



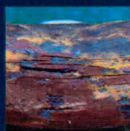
۷۹۰

# بویلر

# و خرابی‌های آن

ویراست جدید

سیدابراهیم موسوی ترشیزی





# شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران

با بیش از ۳۰ سال تجربه موفق

در صنایع نیروگاهی، نفت و گاز، پتروشیمی و سایر صنایع سنگین

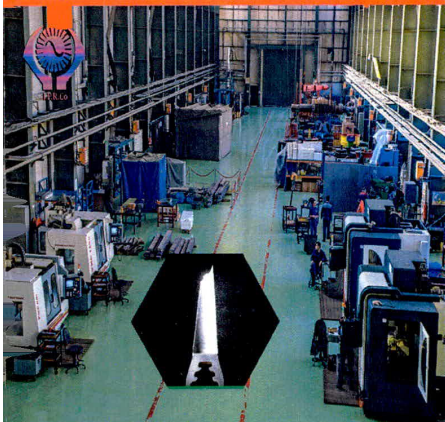
دارای پروانه صلاحیت بهره برداری و نگهداری و نوکده از وزارت نیرو و مجوز تعمیرات اساسی ماشین های دوار از وزارت نفت



شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران



Iran Powerplant Repairs Co.



- خدمات قابل ارائه:
- ۱ - اورهال انواع مختلف واحدهای بخار، گاز و سیکل ترکیبی
  - ۲ - تعمیر انواع توربین های بخار و R.I انواع مختلف توربین های گاز
  - ۳ - تعمیر و تست انواع ماشین های الکتریکی شامل ژنراتور و ملحقات، ترانس های قدرت و الکتروموتورهای فشار قوی
  - ۴ - ساخت کویل و شینه انواع ژنراتورهای فشار قوی با استفاده از مواد عایقی مرغوب
  - ۵ - ارائه خدمات بالانس دینامیکی High Speed و Low Speed روتورهای توربین و ژنراتورها...
  - ۶ - ساخت انواع پره های کمپرسور توربین های گازی مدل های، GEF5، GEF6، GEF9، Asec
  - ۷ - ساخت پره های توربین بخار
  - ۸ - ساخت روتور توربین



- نشانی: استان البرز، کرج، کیلومتر ۷ جاده ملارد، بلوار مهنا • صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۱۳۷
- تلفن: ۰۲۶-۳۶۱۹۵۰۰۰
- دورنگار: ۰۲۶-۳۶۱۹۵۲۱۸
- وبسایت: www.ipr-co.ir
- پست الکترونیکی: info@ipr-co.ir

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

بویلر و خرابی های آن



# بویلر و خرابی‌های آن

دکتر سیدابراهیم موسوی ترشیزی

ویراست جدید



۱۴۰۰



۷۹۰

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

بویلر و خرابی‌های آن  
دکتر سیدابراهیم موسوی ترشیزی

ویراستار: محمود ایرانی فرد  
حروف‌نگار و صفحه‌آرا: سمیرا دهقان  
طراح جلد: امیرشاهرخ فریوسفی  
ناظر چاپ: نوید سیفان  
چاپ اول: ۱۴۰۰  
شمارگان: ۵۰۰  
قیمت: ۱.۶۸۰.۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

سرشناسه:	موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، ۱۳۳۸-
عنوان و نام پدیدآور:	بویلر و خرابی‌های آن / سیدابراهیم موسوی ترشیزی؛ ویراستار محمود ایرانی فرد.
وضعیت ویراست:	[ویراست ۲]
مشخصات نشر:	تهران: دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری:	بیست‌وشش، ۵۳۲ ص: مصور.
فروست:	دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات؛ ۷۹۰.
شابک:	۹۷۸ ۹۶۴ ۴۵۷ ۵۲۸ -
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیپا
یادداشت:	کتابنامه؛ نمایه؛ واژه‌نامه.
موضوع:	دیگ‌های بخار
موضوع:	Steam-boilers
شناسه افزوده:	ایرانی فرد، محمود، ۱۳۶۰ - ویراستار
شناسه افزوده:	دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات
شناسه افزوده:	Shahid Beheshti University, Printing & Publishing Center
رده‌بندی کنگره:	TH۷۵۸۸
رده‌بندی دیوبنی:	۶۲۱/۱۸۳
شماره کتابشناسی ملی:	۷۶۶۷۸۷۰

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴

www.pub.sbu.ac.ir  
unipress@mail.sbu.ac.ir

این کتاب که حاصل بیش از بیست سال تجربه مؤلف در صنعت نیروگاه کشور است،

تقدیم می‌شود به:

شهدای گرانقدر انقلاب اسلامی ایران که استقلال و سربلندی وطن، وامدار پایمردی و

جان‌فشانی آنهاست.

همه اساتید گرامی و معلمان عزیزم و به‌ویژه به روح بلند پدر و مادر بزرگوارم که

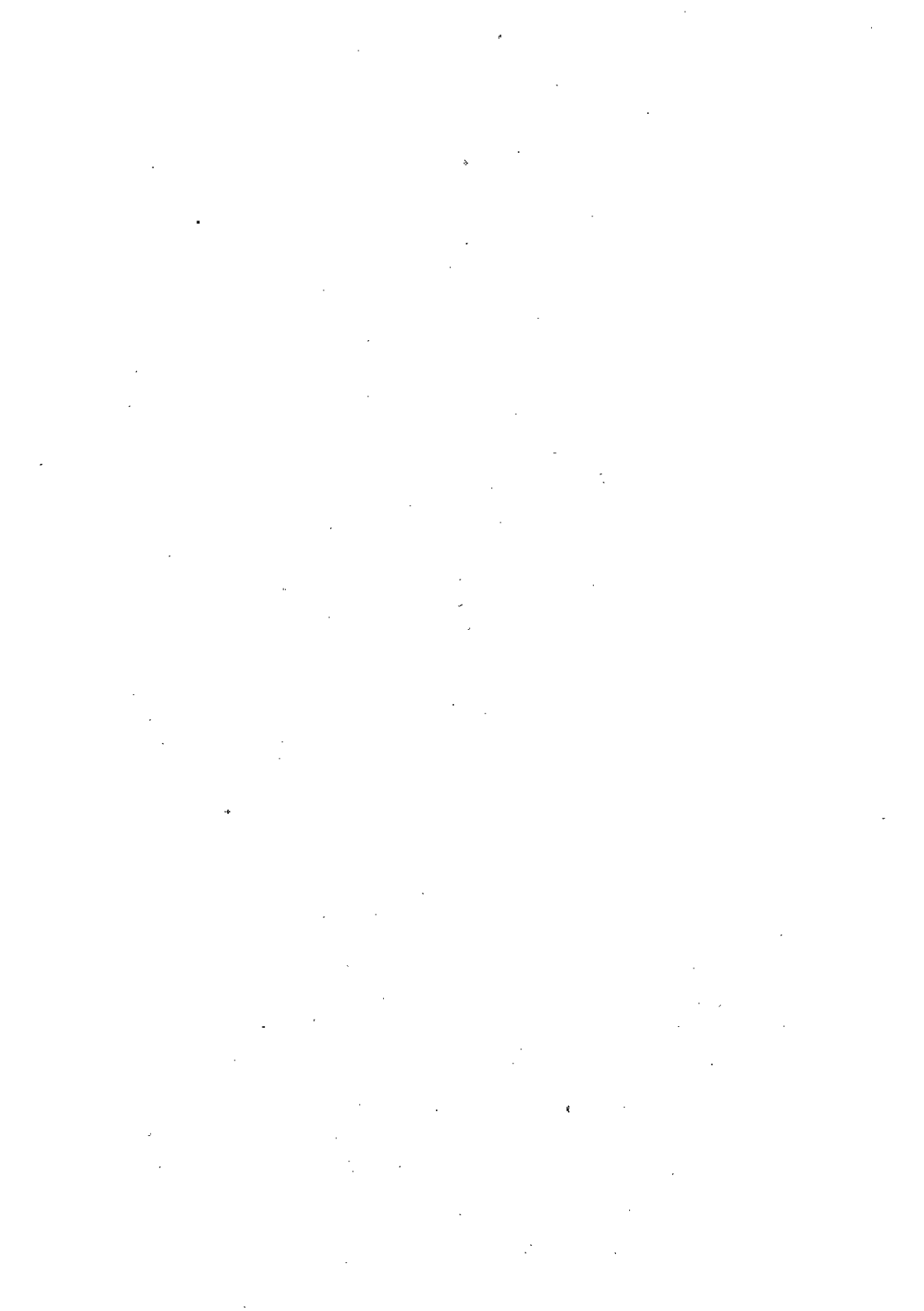
نخستین و بهترین آموزگاران زندگی من بودند و درس دوستی و عشق به وطن و مردم را به

من آموختند.

به همسر گرامی و فرزندان عزیزم که همراهان خوب من در زندگی بوده و هستند.

و به همه رادمردان صنایع نیروگاهی کشور که با سخت‌کوشی، روشنی‌بخش خانه مردم

ایران‌اند.





## فهرست مطالب

پیشگفتار ویراست جدید.....	بیست و یک
پیشگفتار چاپ اول.....	بیست و سه
بویلرها.....	۱
مقدمه.....	۱
فصل ۱. بویلر نیروگاه‌های بخاری و تجهیزات آن.....	۳
۱.۱. اهمیت بویلر در نیروگاه.....	۳
۲.۱. تجهیزات بویلر.....	۴
۱.۲.۱. کوره یا اتاق احتراق.....	۴
۲.۲.۱. لوله‌های دیواره آبی.....	۵
۳.۲.۱. درام.....	۷
۴.۲.۱. سوپرهیتر.....	۸
۱.۴.۲.۱. انواع سوپرهیتر به لحاظ نحوه جذب حرارت.....	۸
۲.۴.۲.۱. انواع سوپرهیتر به لحاظ شکل ظاهری.....	۱۰
۵.۲.۱. ری هیتر.....	۱۲
۶.۲.۱. اکونومایزر.....	۱۲
۷.۲.۱. مشعل.....	۱۳
۸.۲.۱. هیترهای هوا.....	۱۳
۹.۲.۱. هدر.....	۱۵
۱۰.۲.۱. دی سوپرهیتر.....	۱۵
۱۱.۲.۱. فن گردش مجدد دود.....	۱۷
۱۲.۲.۱. دوده‌زدا.....	۱۷
۳.۱. انواع بویلر.....	۱۸
۱.۳.۱. بویلرهای لوله آتشی.....	۱۹
۲.۳.۱. بویلرهای لوله آبی.....	۱۹
۱.۲.۳.۱. بویلرهای یک‌بار گذر.....	۲۰
۲.۲.۳.۱. بویلرهای درام‌دار.....	۲۱
منابع.....	۲۴

فصل ۲. بویلرهای بازیاب نیروگاه‌های سیکل ترکیبی .....	۲۵
۱.۲. مقدمه .....	۲۵
۲.۲. سیکل آب و بخار در واحد بخار سیکل ترکیبی .....	۲۶
۳.۲. مکانیسم خرابی‌ها در بویلرهای بازیاب .....	۳۶
منابع .....	۳۷
فصل ۳. مواد مورد استفاده در لوله‌های بویلر .....	۳۹
۱.۳. مقدمه .....	۳۹
۲.۳. انواع فولاد .....	۳۹
۱.۲.۳. فولادهای غیرآلیاژی (کربنی) .....	۳۹
۲.۲.۳. فولادهای آلیاژی .....	۴۱
۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن .....	۴۲
۱.۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی .....	۴۲
۲.۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن فریتی .....	۴۲
۳.۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی .....	۴۳
۴.۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن با قابلیت رسوب‌سختی .....	۴۳
۵.۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی-فریتی .....	۴۳
۳.۳. تأثیر عناصر گوناگون بر خواص فولاد .....	۴۴
۴.۳. فاکتورهای انتخاب مواد .....	۴۸
۵.۳. مواد مورد استفاده در تجهیزات بویلر .....	۵۱
۱.۵.۳. سوپرهیتر و ری‌هیتر .....	۵۱
۲.۵.۳. اکونومایزر و لوله‌های دیواره‌آبی .....	۵۱
۳.۵.۳. درام .....	۵۴
۴.۵.۳. هدرها و لوله‌های بخار .....	۵۵
۵.۵.۳. انتخاب مواد برای بویلرهای پیشرفته .....	۵۶
۶.۳. بررسی اطلاعات موجود در استانداردهای گوناگون در مورد مواد مورد استفاده در تجهیزات بویلر .....	۵۸
۷.۳. مواد مورد استفاده در بویلرهای بازیاب سیکل ترکیبی .....	۶۰
منابع .....	۶۲

۶۵	خرابی‌های بویلر .....
۶۵	مقدمه .....
۶۵	اطلاعات و کارهای لازم برای آنالیز خرابی .....
۶۷	مراحل آنالیز خرابی .....
۶۸	دلایل اصلی خرابی تجهیزات .....
۶۸	منابع .....
۶۹	فصل ۴. بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۶۹	۱.۴. علت خرابی قطعات بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۷۰	۲.۴. انواع بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۷۰	۱.۲.۴. خزش .....
۷۱	۱.۱.۲.۴. منحنی خزش و مفاهیم اصلی آن .....
۷۳	۲.۱.۲.۴. پارامترهای مؤثر بر شکل منحنی خزش .....
۷۴	۳.۱.۲.۴. شکست خزشی .....
۷۷	۲.۲.۴. گرافیت‌شدن زنجیره‌ای .....
۷۹	۳.۴. محل وقوع بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۸۰	۴.۴. عوامل بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۸۷	۵.۴. بررسی ظاهر شکست در بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۹۱	۶.۴. بررسی ریزساختار در بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۹۴	۷.۴. روش‌های پیشگیری از بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۸.۴	بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلرهای صنایع گوناگون بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت .....
۹۵	منابع .....
۱۲۸	منابع .....
۱۳۱	فصل ۵. بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت .....
۱۳۱	۱.۵. مقدمه .....
۱۳۱	۲.۵. محل وقوع بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت .....
۱۳۱	۳.۵. عوامل بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت .....
۱۳۴	۴.۵. بررسی ظاهر شکست در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت .....
۱۳۷	۵.۵. بررسی ریزساختار در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت .....
۱۳۸	۶.۵. روش‌های پیشگیری از بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت .....

۷.۵. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت .....	۱۳۹
منابع .....	۱۶۶
خوردگی سمت آب .....	۱۶۷
مقدمه .....	۱۶۷
فصل ۶. خوردگی قلبیایی .....	۱۶۹
۱.۶. مکانیسم خوردگی .....	۱۶۹
۲.۶. محل وقوع خوردگی .....	۱۷۰
۳.۶. عوامل خوردگی .....	۱۷۰
۴.۶. علائم خوردگی .....	۱۷۳
۵.۶. روش‌های پیشگیری از خوردگی .....	۱۷۴
۶.۶. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی قلبیایی .....	۱۷۵
منابع .....	۱۸۶
فصل ۷. خوردگی شلانت .....	۱۸۷
۱.۷. مکانیسم خوردگی .....	۱۸۷
۲.۷. محل وقوع خوردگی .....	۱۸۷
۳.۷. عوامل خوردگی .....	۱۸۷
۴.۷. علائم خوردگی .....	۱۸۸
۵.۷. روش‌های پیشگیری از خوردگی .....	۱۹۰
۶.۷. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی شلانت .....	۱۹۰
منابع .....	۱۹۵
فصل ۸. خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری (Low-pH Corrosion During Service) ...	۱۹۷
۱.۸. مکانیسم خوردگی .....	۱۹۷
۲.۸. محل وقوع خوردگی .....	۱۹۷
۳.۸. عوامل خوردگی .....	۱۹۸
۴.۸. علائم خوردگی .....	۱۹۹
۵.۸. روش‌های پیشگیری از خوردگی .....	۱۹۹

۶.۸	بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی اسیدی
۲۰۰	حین بهره‌برداری.....
۲۰۹	منابع.....
۲۱۱	فصل ۹. خوردگی اسیدی حین اسیدشویی (low-pH corrosion during acid cleaning).....
۲۱۱	۱.۹. مکانیسم خوردگی.....
۲۱۱	۲.۹. محل وقوع خوردگی.....
۲۱۳	۳.۹. عوامل خوردگی.....
۲۱۳	۴.۹. علائم خوردگی.....
۲۱۴	۵.۹. روش‌های پیشگیری از خوردگی.....
۲۱۴	۶.۹. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی اسیدی
۲۱۵	حین اسیدشویی.....
۲۲۴	منابع.....
۲۲۵	فصل ۱۰. خوردگی اکسیژنی.....
۲۲۵	۱.۱۰. مکانیسم خوردگی.....
۲۲۶	۲.۱۰. محل وقوع خوردگی.....
۲۲۶	۳.۱۰. عوامل خوردگی.....
۲۲۷	۴.۱۰. علائم خوردگی.....
۲۲۸	۵.۱۰. روش‌های پیشگیری از خوردگی.....
۲۲۹	۶.۱۰. محل‌های نشت هوا.....
۲۲۹	۷.۱۰. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی
۲۳۰	اکسیژنی.....
۲۳۵	منابع.....
۲۳۷	خوردگی سمت آتش.....
۲۳۷	مقدمه.....
۲۳۹	فصل ۱۱. خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی.....
۲۳۹	۱.۱۱. مکانیسم خوردگی.....
۲۴۰	۲.۱۱. محل وقوع خوردگی.....

۲۴۰	.....	۳.۱۱	عوامل خوردگی
۲۴۱	.....	۴.۱۱	علائم خوردگی
۲۴۳	.....	۵.۱۱	روش‌های پیشگیری از خوردگی
۲۴۳	.....		منابع
۲۴۵	.....	۱۲	فصل خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ
۲۴۵	.....	۱.۱۲	۱. مکانیسم خوردگی
۲۴۵	.....	۲.۱۲	۲. محل وقوع خوردگی
۲۴۶	.....	۳.۱۲	۳. عوامل خوردگی
۲۴۶	.....	۴.۱۲	۴. علائم خوردگی
۲۴۸	.....	۵.۱۲	۵. روش‌های پیشگیری از خوردگی
		۶.۱۲	۶. بررسی یک نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ
۲۴۹	.....		منابع
۲۵۱	.....		
۲۵۳	.....	۱۳	فصل خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آبی
۲۵۳	.....	۱.۱۳	۱. مکانیسم خوردگی
۲۵۳	.....	۲.۱۳	۲. محل وقوع خوردگی
۲۵۳	.....	۳.۱۳	۳. عوامل خوردگی
۲۵۴	.....	۴.۱۳	۴. علائم خوردگی
۲۵۵	.....	۵.۱۳	۵. روش‌های پیشگیری از خوردگی
		۶.۱۳	۶. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آبی
۲۵۶	.....		منابع
۲۶۰	.....		
		۱۴	فصل خوردگی قسمت‌های سرد حین بهره‌برداری (cold-end corrosion during service)
۲۶۱	.....	۱.۱۴	۱. مکانیسم خوردگی
۲۶۳	.....	۲.۱۴	۲. محل وقوع خوردگی
۲۶۳	.....	۳.۱۴	۳. عوامل خوردگی
۲۶۴	.....	۴.۱۴	۴. علائم خوردگی

۲۶۵	۵.۱۴. روش‌های پیشگیری از خوردگی.....
۲۶۶	۶.۱۴. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی قسمت‌های سرد.....
۲۷۳	منابع.....
۲۷۵	فصل ۱۵. خوردگی نقطه‌ شبنم در دوره‌های خارج از مدار بودن.....
۲۷۵	۱.۱۵. مکانیسم خوردگی.....
۲۷۵	۲.۱۵. محل وقوع خوردگی.....
۲۷۶	۳.۱۵. عوامل خوردگی.....
۲۷۶	۴.۱۵. علائم خوردگی.....
۲۷۶	۵.۱۵. روش‌های پیشگیری از خوردگی.....
۲۷۷	۶.۱۵. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی نقطه شبنم در دوره‌های خارج از مدار بودن.....
۲۷۹	منابع.....
۲۸۱	فصل ۱۶. حمله هیدروژنی.....
۲۸۱	۱.۱۶. مکانیسم حمله هیدروژنی.....
۲۸۲	۲.۱۶. محل وقوع حمله هیدروژنی.....
۲۸۲	۳.۱۶. عوامل حمله هیدروژنی.....
۲۸۲	۴.۱۶. علائم و روش‌های شناسایی حمله هیدروژنی.....
۲۸۸	۵.۱۶. روش‌های پیشگیری از حمله هیدروژنی.....
۲۸۹	۶.۱۶. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر حمله هیدروژنی.....
۳۱۱	منابع.....
۳۱۳	فصل ۱۷. خوردگی شتاب‌یافته با جریان.....
۳۱۳	۱.۱۷. مکانیسم خوردگی.....
۳۱۶	۲.۱۷. بررسی از دیدگاه سیالاتی.....
۳۱۸	۳.۱۷. عوامل FAC.....
۳۱۸	۱.۳.۱۷. شیمی آب (pH و غلظت اکسیژن).....
۳۱۹	۲.۳.۱۷. طراحی اولیه هارپ.....

۳۲۱	خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد مورد استفاده در ساخت هارپ.....
۳۲۱	شرایط فیزیکی آب (دما).....
۳۲۲	ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال (سرعت سیال).....
۳۲۴	محل وقوع خوردگی.....
۳۲۴	روش‌های پیشگیری از FAC.....
۳۲۵	بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر پدیده FAC.....
۳۲۷	منابع.....
۳۳۹	فصل ۱۸. رسوب‌های ناشی از آب و بخار.....
۳۳۹	۱.۱۸ مکانیسم رسوب‌گذاری.....
۳۴۰	۲.۱۸ محل تشکیل رسوب‌ها.....
۳۴۲	۳.۱۸ عوامل رسوب‌گذاری.....
۳۴۵	۴.۱۸ اثرات رسوب.....
۳۴۸	۵.۱۸ انواع رسوب تشکیل‌شده در بویلر.....
۳۵۱	۱.۵.۱۸ اکسیدهای آهن.....
۳۵۳	۲.۵.۱۸ فلزات دیگر و اکسید آن‌ها.....
۳۵۳	۳.۵.۱۸ نمک‌ها.....
۳۵۵	۶.۱۸ روش‌های پیشگیری از رسوب‌گذاری در بویلر.....
۳۵۶	۷.۱۸ نکات توجه‌برانگیز درباره رسوب‌ها.....
۳۵۷	۸.۱۸ جداکردن رسوب‌های سطوح داخلی لوله‌ها.....
۳۵۸	۹.۱۸ بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر رسوب.....
۳۷۲	منابع.....
۳۷۳	فصل ۱۹. سایش.....
۳۷۳	۱.۱۹ محل‌های کلی وقوع سایش.....
۳۷۴	۲.۱۹ بررسی مکانیسم‌های سایش.....
۳۷۴	۱.۲.۱۹ سایش ناشی از دوده‌زدا.....
۳۷۴	۱.۱.۲.۱۹ مکانیسم سایش.....
۳۷۵	۲.۱.۲.۱۹ محل وقوع سایش.....
۳۷۵	۳.۱.۲.۱۹ عوامل سایش.....
۳۷۵	۴.۱.۲.۱۹ علائم سایش.....



- ۳۷۷..... ۵.۱.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از ساییش
- ۳۷۷..... ۲.۲.۱۹. ساییش بر اثر بخار خروجی از لوله‌های تخریب‌شده مجاور
- ۳۷۷..... ۱.۲.۲.۱۹. مکانیسم ساییش
- ۳۷۸..... ۲.۲.۲.۱۹. محل وقوع ساییش
- ۳۷۸..... ۳.۲.۲.۱۹. عوامل ساییش
- ۳۷۸..... ۴.۲.۲.۱۹. علائم ساییش
- ۳۸۰..... ۵.۲.۲.۱۹. روش پیشگیری از ساییش
- ۳۸۰..... ۳.۲.۱۹. ساییش ناشی از خاکستر معلق
- ۳۸۰..... ۱.۳.۲.۱۹. مکانیسم ساییش
- ۳۸۰..... ۲.۳.۲.۱۹. محل وقوع ساییش
- ۳۸۰..... ۳.۳.۲.۱۹. عوامل ساییش
- ۳۸۲..... ۴.۳.۲.۱۹. علائم ساییش
- ۳۸۴..... ۵.۳.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از ساییش
- ۳۸۴..... ۴.۲.۱۹. ساییش ناشی از ذرات زغال‌سنگ
- ۳۸۴..... ۱.۴.۲.۱۹. مکانیسم ساییش
- ۳۸۵..... ۲.۴.۲.۱۹. محل وقوع ساییش
- ۳۸۵..... ۳.۴.۲.۱۹. عوامل ساییش
- ۳۸۵..... ۴.۴.۲.۱۹. علائم ساییش
- ۳۸۵..... ۵.۴.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از ساییش
- ۳۸۵..... ۵.۲.۱۹. ساییش ناشی از سقوط تکه‌های خاکستر گداخته
- ۳۸۵..... ۱.۵.۲.۱۹. مکانیسم ساییش
- ۳۸۶..... ۲.۵.۲.۱۹. محل وقوع ساییش
- ۳۸۶..... ۳.۵.۲.۱۹. عوامل ساییش
- ۳۸۶..... ۴.۵.۲.۱۹. علائم ساییش
- ۳۸۷..... ۵.۵.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از ساییش
- ۳۸۷..... ۶.۲.۱۹. ساییش تجهیزات قبل و بعد از بویلر
- ۳۸۷..... ۱.۶.۲.۱۹. مکانیسم ساییش
- ۳۸۷..... ۲.۶.۲.۱۹. محل وقوع ساییش
- ۳۸۸..... ۳.۶.۲.۱۹. عوامل ساییش
- ۳۸۹..... ۴.۶.۲.۱۹. علائم ساییش

۳۹۲	.....روش‌های پیشگیری از سایش	۵۶۲.۱۹
۳۹۳	.....سایش سمت آب و سمت بخار	۷۲.۱۹
۳۹۳	.....بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلرهای صنایع گوناگون بر اثر سایش	۳.۱۹
۴۰۲	.....منابع	
۴۰۳	.....فصل ۲۰. کاویناسیون	
۴۰۳	.....۱.۲۰ مکانیسم کاویناسیون	
۴۰۳	.....۲.۲۰ محل وقوع کاویناسیون	
۴۰۴	.....۳.۲۰ عوامل کاویناسیون	
۴۰۶	.....۴.۲۰ علائم خرابی ناشی از کاویناسیون	
۴۰۸	.....۵.۲۰ روش‌های پیشگیری از کاویناسیون	
۴۰۹	.....۶.۲۰ بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر کاویناسیون	
۴۱۱	.....منابع	
۴۱۳	.....فصل ۲۱. عیوب ناشی از تولید	
۴۱۳	.....۱.۲۱ نحوهٔ ایجاد عیوب حین تولید	
۴۱۳	.....۲.۲۱ محل وقوع عیوب	
۴۱۳	.....۳.۲۱ عوامل مؤثر	
۴۱۴	.....۴.۲۱ علائم خرابی‌های ایجادشده	
۴۱۵	.....۵.۲۱ روش‌های پیشگیری از خرابی‌های ناشی از عیوب ایجادشده حین تولید	
۴۱۵	.....۶.۲۱ بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلرهای صنایع گوناگون بر اثر عیوب ناشی از تولید	
۴۲۶	.....منابع	
۴۲۷	.....فصل ۲۲. عیوب جوشکاری	
۴۲۷	.....۱.۲۲ محل وقوع خرابی‌ها	
۴۲۷	.....۲.۲۲ شرایط جوش مناسب	
۴۲۸	.....۳.۲۲ عیوب گوناگون ایجادشده در جوش	
۴۲۸	.....۱.۳.۲۲ خلل و فرج	
۴۲۹	.....۲.۳.۲۲ سرباره‌های جوش	
۴۳۰	.....۳.۳.۲۲ نفوذ بیش‌ازحد	

۴۳۲	..... ذوب ناقص	۴.۳.۲۲
۴۳۲	..... بریدگی کناره جوش	۵.۳.۲۲
۴۳۳	..... نفوذ ناقص در محل اتصال	۶.۳.۲۲
۴۳۴	..... ترک	۷.۳.۲۲
۴۳۶	..... گرافیت‌شدن	۸.۳.۲۲
۴۳۸	..... نکات توجه‌برانگیز	۴.۲۲
	..... بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر عیوب موجود	۵.۲۲
۴۳۸	..... در جوش	
۴۵۱	..... منابع	
۴۵۳	..... فصل ۲۳. خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب	
۴۵۳	..... ۱.۲۳ مواد مورد استفاده در بویلر	
۴۵۳	..... ۲.۲۳ عوامل مؤثر	
۴۵۴	..... ۳.۲۳ محل وقوع خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب	
۴۵۵	..... ۴.۲۳ روش‌های پیشگیری از خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب	
	..... ۵.۲۳ بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر انتخاب ماده نامناسب	
۴۵۵	..... نامناسب	
۴۶۲	..... منابع	
۴۶۳	..... فصل ۲۴. خوردگی گرافیتی	
۴۶۳	..... ۱.۲۴ مکانسیم خوردگی	
۴۶۳	..... ۲.۲۴ محل وقوع خوردگی	
۴۶۴	..... ۳.۲۴ عوامل خوردگی	
۴۶۴	..... ۴.۲۴ علائم خوردگی	
۴۶۷	..... ۵.۲۴ روش‌های پیشگیری از خوردگی	
	..... ۶.۲۴ بررسی یک نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی گرافیتی	
۴۶۷	..... گرافیتی	
۴۶۸	..... منابع	
۴۶۹	..... فصل ۲۵. جدایش عناصر آلیاژی	
۴۶۹	..... ۱.۲۵ مکانسیم جدایش	

۴۷۱	.....	۲.۲۵	محل وقوع جدایش
۴۷۱	.....	۳.۲۵	عوامل جدایش
۴۷۱	.....	۴.۲۵	علائم خرابی‌های ناشی از جدایش
۴۷۳	.....	۵.۲۵	روش‌های پیشگیری از جدایش عناصر آلیاژی
		۶.۲۵	بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر جدایش
۴۷۳	.....		عناصر آلیاژی
۴۷۴	.....		منابع
۴۷۵	.....		فصل ۲۶. خستگی
۴۷۵	.....	۱.۲۶	مقدمه
۴۷۵	.....	۲.۲۶	خستگی در بویلر
۴۷۶	.....	۱.۱.۲.۲۶	خستگی ارتعاشی
۴۷۶	.....	۱.۱.۱.۲.۲۶	روش‌های پیشگیری
۴۷۶	.....	۲.۱.۲.۲۶	خستگی حرارتی
۴۷۶	.....	۱.۱.۲.۲.۲۶	اثر دما بر خستگی
۴۷۷	.....	۲.۲.۲.۲۶	مکانیسم خستگی حرارتی
۴۷۸	.....	۳.۲.۲.۲۶	روش‌های پیشگیری
۴۷۹	.....	۳.۲۶	اندرکنش خزش- خستگی
۴۸۰	.....	۴.۲۶	علائم خرابی‌های ناشی از خستگی
۴۸۲	.....	۵.۲۶	بررسی یک نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در صنایع نیروگاهی بر اثر خستگی
۴۸۴	.....		منابع
۴۸۵	.....		فصل ۲۷. خستگی- خوردگی
۴۸۵	.....	۱.۲۷	مکانیسم خستگی- خوردگی
۴۸۷	.....	۲.۲۷	محل وقوع خستگی- خوردگی
۴۸۸	.....	۳.۲۷	عوامل مؤثر
۴۸۸	.....	۴.۲۷	علائم خستگی- خوردگی
۴۸۹	.....	۵.۲۷	روش‌های پیشگیری
		۶.۲۷	بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر
۴۸۹	.....		خستگی- خوردگی
۴۹۶	.....		منابع

فصل ۲۸. خوردگی تحت تنش.....	۴۹۷
۱.۲۸ مکانیسم خوردگی تحت تنش.....	۴۹۷
۲.۲۸ محل وقوع خوردگی تحت تنش.....	۴۹۷
۳.۲۸ عوامل خوردگی تحت تنش.....	۴۹۸
۴.۲۸ علائم خوردگی تحت تنش.....	۴۹۹
۵.۲۸ روش‌های پیشگیری از خوردگی تحت تنش.....	۵۰۰
۶.۲۸ بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی تحت تنش.....	۵۰۱
منابع.....	۵۰۶
ضمیمهٔ (الف) دیاگرام تعادلی آهن-کربن (Fe-C).....	۵۰۷
دماهای بحرانی.....	۵۰۹
منابع.....	۵۱۰
ضمیمهٔ (ب) رژیم‌های شیمیایی مورد استفاده در بویلرهای درام‌دار با هدف پیشگیری از خوردگی و رسوب‌گذاری.....	۵۱۱
(الف) فسفات هماهنگ.....	۵۱۲
(ب) شلانت.....	۵۱۲
(ج) هیدرازین.....	۵۱۴
(د) روش کنترل شیمیایی فرآر (AVT).....	۵۱۶
(ه) روش کنترل شیمیایی خنثی (NWT).....	۵۱۶
(و) روش کنترل شیمیایی مخلوط (CWT).....	۵۱۷
منابع.....	۵۱۷
واژه‌نامهٔ توصیفی.....	۵۱۹
نمایه.....	۵۲۷



به نام آن که جان را فکرت آموخت چراغ دل به نور جان برافروخت

### پیشگفتار ویراست جدید

چاپ اول این کتاب (۱۳۸۳) با تأکید بر بویلرهای متعارف نیروگاه‌های بخاری ارائه شد، زیرا در آن زمان تعداد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در ایران کم بود، یا نیروگاه‌های سیکل ترکیبی موجود، به تازگی به بهره‌برداری رسیده بودند و خرابی در بویلرهای سیکل ترکیبی اتفاق نیفتاده بود و از طرفی با توجه به فقدان سیستم احتراق مستقیم در بسیاری از بویلرهای بازیاب<sup>۱</sup> و کم‌تر بودن دما و فشار بخار در خروجی بویلر، خرابی در این تأسیسات در مقایسه با بویلرهای نیروگاه‌های بخاری کمتر می‌نمود. اما اکنون با افزایش چشمگیر تعداد بویلرهای بازیاب در ایران و بهره‌برداری چند ساله از آن‌ها، اشکالاتی در این بویلرها بروز یافته است و تجاری در تحلیل خرابی<sup>۲</sup> آن‌ها وجود دارد. از این‌رو بر آن شدیم در چاپ دوم کتاب و برای آشنایی خوانندگان محترم، فصلی را با عنوان «بویلرهای بازیاب» (فصل ۲) مشتمل بر «سیکل توربین گاز، سیکل توربین بخار و سیکل ترکیبی، با تأکید بر گردش آب و بخار در بویلر بازیاب» به کتاب بیفزاییم. فصل سوم کتاب نیز که به مواد به‌کاررفته در بویلرها اختصاص داده شده بود، با افزودن مواد به‌کاررفته در بویلرهای بازیاب کامل‌تر شده است. همچنین بسیاری از تجارب مرتبط با خرابی‌های بویلرها را (با تأکید بر خرابی‌های بویلرهای بازیاب) که طی ۱۶ سال گذشته (پس از چاپ اول) در نیروگاه‌ها و دیگر صنایع انجام شده است خلاصه کردیم و به اقتضای موضوع فصل‌ها به کتاب افزودیم. در این ویرایش، فصل جدیدی را نیز با عنوان «خوردگی شتاب‌یافته با جریان<sup>۳</sup>» که در برخی لوله‌های حاوی آب در بویلر نیروگاه‌های بخاری و به‌ویژه در بویلرهای سیکل ترکیبی اتفاق می‌افتد، تدوین کردیم که در فصل ۱۷ کتاب حاضر ارائه شده است. به‌منظور سهولت فهم مطالب و با توجه به وضوح بیشتر و فهم آسان‌تر تصاویر رنگی، تمامی تصاویر سیاه‌وسفید کتاب، در یک لوح فشرده (CD) (به‌صورت سیاه‌وسفید و رنگی) ذخیره و به کتاب پیوست شده‌اند.

1. Heat Recovery Steam Generator (HRSG)  
3. Flow Accelerated Corrosion (FAC)

2. failure analysis

جای آن است که از همه عزیزانی که در ارائه این ویراست از کتاب همکاری داشته‌اند، صمیمانه سپاسگزاری کنم.

تشکر ویژه خود را از مسئولان محترم شرکت مادر تخصصی برق حرارتی و به‌ویژه معاون محترم راهبری تولید و مدیران این مجموعه ابراز می‌کنم که فضای کاری و امکانات لازم را برای بازنگری و تکمیل این کتاب در اختیارم گذاشتند.

از آقایان مهندس مهیار ابراهیمی و مهندس حسین اصغری فریاد که در تدوین و تکمیل فصول دوم و سوم همکاری جدی داشتند و آقایان مهندس مصطفی سلطانلو و مهندس محسن نیکخو که تعدادی از مطالعات موردی و تجارب شخصی خود را ارائه کردند، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.

بر خود لازم می‌دانم از کمک ارزشمند سرکار خانم الهه رجبی، دانشجوی مهندسی مکانیک دانشگاه شهید بهشتی که زحمت صفحه‌آرایی کتاب را برعهده داشته‌اند به‌صورت ویژه سپاسگزاری کنم. ویرایش نهایی کتاب با دقت زیاد مرهون زحمات ایشان است.

مراتب قدردانی خود را از همکاران گرامی دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی و همکاران گرامی انتشارات دانشگاه اعلام می‌کنم.

امکان ذکر نام همه افرادی که به تدوین و آماده‌سازی این اثر علمی کمک کرده‌اند میسر نیست، اما بر خود وظیفه و فرض می‌دانم که از زحمات و کمک‌های همه آن‌ها قدردانی و سپاسگزاری کنم.

از خوانندگان محترم، صمیمانه تقاضا دارم با نگاه نقادانه به این اثر بنگرند و بزرگوارانه خطاها را به اینجانب اعلام فرمایند تا ان‌شاءالله در چاپ‌های بعدی تصحیح شود. در خاتمه امیدوارم این اثر که حاصل بخش بزرگی از عمر کاری اینجانب است، مورد قبول خداوند متعال قرار گیرد و برای جامعه صنعتی ایران و به‌ویژه مهندسان و کارشناسان نیروگاه مفید و مؤثر باشد.

سیدابراهیم موسوی ترشیزی

عضو هیئت علمی دانشگاه شهید بهشتی

بهار ۱۴۰۰



## پیشگفتار چاپ اول

به دلیل شرایط خاص بهره‌برداری (فشار و درجه حرارت بالا) و فعال‌بودن مکانیسم‌های خرابی گوناگون، بویلر یکی از آسیب‌پذیرترین قسمت‌ها در نیروگاه‌ها و در دیگر صنایعی است که بخار نقشی اساسی در فرایندشان دارد. از طرفی، بروز اشکال یا گسیختگی در لوله‌های بویلر، سبب عدم تولید بخار و خروج واحد از مدار یا تعطیلی فرایند خواهد شد. به همین خاطر، تحلیل و شناخت علت خرابی<sup>۱</sup> از اهمیت فراوانی برخوردار است، زیرا با آگاهی از آن و با ایجاد تغییرات مناسب در شرایط بهره‌برداری و انجام روش‌های پیشگیرانه، می‌توان از تکرار حوادث جلوگیری کرد.

پس از وقوع یک خرابی، برای تشخیص علت آن می‌توان قطعه معیوب را با بررسی‌های چشمی، ریزساختاری، محاسباتی و... بررسی کرد. اما سریع‌ترین و کم‌هزینه‌ترین راه برای تجزیه و تحلیل خرابی، توجه به مشخصه‌های ظاهری خرابی است، زیرا در اکثر موارد، می‌توان با دقت در ظاهر قطعه آسیب‌دیده به علت خرابی پی برد.

در این کتاب، به مبانی نظری و علمی خرابی‌ها اشاره‌ای گذرا و بر قضاوت بر اساس وضعیت ظاهری قطعه تأکید بیشتری شده است، زیرا در مراحل ابتدایی، مهندسان بهره‌برداری و تعمیرات باید قطعات آسیب‌دیده را بدون انجام هیچ آزمایشی بررسی چشمی کنند تا از این طریق، اطلاعات ارزشمندی کسب شود. لازم به یادآوری است که کتاب پیش‌رو به تنهایی نمی‌تواند جایگزین افراد متخصص و باتجربه برای تحلیل خرابی‌ها شود، اما می‌تواند به‌عنوان یک مرجع آسان برای تهیه گزارش‌های اولیه به‌کار گرفته شود.

با توجه به اینکه خرابی‌های اجزای بویلر، میان بویلرهای صنعتی و نیروگاهی تا حد بسیار مشترک است، محتوای کتاب به یکی از آن‌ها منحصر نشده و اطلاعاتی در مورد خرابی‌های انواع بویلر نیروگاهی و صنعتی ارائه شده است. در انتهای هر فصل، گزارش بررسی‌های موردی<sup>۲</sup> از عیوب اتفاق‌افتاده در بویلرهای گوناگون جمع‌آوری و به‌اختصار گزارش شده است.

از آنجاکه برای شناخت خرابی و علل آن، شناخت بویلر و مواد به کاررفته در آن ضرورت دارد، فصل‌های اول و دوم این کتاب به آشنایی با بویلر و تجهیزات آن و جنس تجهیزات گوناگون بویلر اختصاص یافته است. هر یک از فصل‌های بعدی به یکی از مکانیسم‌های خرابی (بیش‌گرمایش بلندمدت<sup>۱</sup>، بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت<sup>۲</sup>، خستگی، رسوب‌گذاری، عیوب ناشی از جوشکاری، خوردگی‌های سمت آب و آتش و...) پرداخته است. در هر فصل تا حد امکان مواردی راجع به خرابی‌ها توضیح داده شده‌اند:

- تعریف و مکانیسم
- محل وقوع
- عوامل مؤثر
- روش شناسایی و علائم
- روش‌های جلوگیری
- نکات خاص مربوطه
- چند مطالعه موردی

گرچه بخش عمده کتاب حاضر برگرفته از کتاب نالکو<sup>۳</sup> است، به‌منظور تکمیل آن و آشنایی خوانندگان محترم با اجزا و مواد به کاررفته در بویلرها (فصل‌های اول و دوم)، مطالبی از دیگر کتاب‌های مرجع جمع‌آوری و گزارش‌هایی نیز از بررسی‌های انجام‌شده روی خرابی‌های چند بویلر نیروگاهی ایران به‌صورت بررسی موردی به انتهای فصل‌ها اضافه شده است.

جا دارد از حمایت‌های مالی و مساعدت مسئولان محترم شرکت مشانیر و به‌خصوص آقایان دکتر محمود مقدم، مدیرعامل، مهندس مهدی مردی، قائم مقام مدیرعامل، مهندس داریوش شهیدی، معاون برنامه‌ریزی و نظارت و مهندس محمدعلی ریاضی، معاون مهندسی بهره‌برداری و طرح‌های بهینه‌سازی سپاسگزاری کنم. زحمات فراوان و پیگیری‌های آقای مهندس محسن غلامی مقدم در جمع‌آوری، تنظیم و تدوین مطالب به‌یادماندنی قابل تقدیر است. دقت‌نظر آقای منوچهر حبیبی در ویرایش ادبی و نظارت فنی بر مراحل طراحی و چاپ این مجموعه نیز جای سپاس فراوان دارد.

گرچه سعی شده است ترجمه، تألیف و تدوین این کتاب، تا حد امکان عاری از خطا و اشتباه باشد و حتی در مواردی از نظرات استادان و متخصصان بهره برده‌ایم، اما وجود خطا در

---

1. long term overheating

2. short term overheating

3. *The NALCO Guide to Boiler Failure Analysis*

آن محتمل است. لذا از تمامی خوانندگان محترم و مهندسان گرمی صمیمانه درخواست می‌شود ما را از نظرات اصلاحی خود محروم نفرمایند. امید است در چاپ‌های بعدی، علاوه بر رفع نواقص احتمالی موجود، مطالعات موردی بیشتری راجع به بویلرهای ایران به این مجموعه اضافه شود.

سیدابراهیم موسوی ترشیزی

تابستان ۱۳۸۳



## بویلرها

### مقدمه

در یک دسته‌بندی کلی، بویلرها به دو گروه بویلرهای با سیستم احتراق مستقیم و بویلرهای بازیاب تقسیم می‌شوند:

- بویلرهای با احتراق مستقیم یا بویلرهای متعارف<sup>۱</sup> با احتراق مستقیم مخلوط سوخت و هوا و تولید حرارت، آب را به بخار تبدیل می‌کنند. این نوع بویلرها در نیروگاه‌های بخاری و بسیاری از صنایع مانند پتروشیمی‌ها، صنایع غذایی، صنایع قند و شکر، کارخانه‌های روغن نباتی و... کاربرد دارند.

- بویلرهای بازیاب<sup>۲</sup> با استفاده از بازیابی گرمای موجود در دود خروجی از یک مولد دیگر، آب ورودی را به بخار تبدیل می‌کنند و موجب افزایش بازدهی مجموعه می‌شوند. این بویلرها ممکن است پس از یک موتور گازسوز، یک توربین گاز و... نصب شوند.

دود خروجی از توربین‌های گازی ساده، با دمای بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد وارد محیط می‌شود. در صنعت برق و نیروگاه، برای افزایش بازدهی نیروگاه‌های گازی، دود خروجی از واحدهای گازی را از بویلرهای بازیاب عبور می‌دهند و بخار تولیدشده در این بویلرها «بدون مصرف سوخت اضافی» وارد یک توربین بخار می‌شود و برق تولید می‌کند (البته در مواردی برای تولید حداکثر توان از مشعل‌های کمکی هم استفاده می‌شود که در فصل ۲ به آن اشاره خواهد شد). این مجموعه، یعنی تجهیز هر توربین گازی با یک بویلر بازیاب و تلفیق یک یا چند بویلر بازیاب با یک توربین بخار، «سیکل ترکیبی» نامیده می‌شود.

با توجه به نقش و اهمیت بویلرهای بازیاب در صنعت برق و تولید درصد چشمگیری از برق کشور در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، این موضوع در فصل ۲: «بویلرهای بازیاب نیروگاه‌های سیکل ترکیبی» بررسی شده است. شایان ذکر است که مواد به کاررفته در این دو نوع بویلر، در یک فصل تجمیع شده (فصل ۳) با عنوان «مواد به کاررفته در لوله‌های بویلر» ارائه شده است.

1. conventional

2. Heat Recovery Steam Generator (HRSG)



## فصل ۱

### بویلر نیروگاه‌های بخاری و تجهیزات آن

#### ۱.۱. اهمیت بویلر در نیروگاه

بویلر<sup>۱</sup> از مهم‌ترین و همچنین آسیب‌پذیرترین قسمت‌های یک نیروگاه است که وظیفه تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به انرژی حرارتی و انتقال این انرژی به سیال عامل را دارد. برای تشریح جایگاه بویلر در یک نیروگاه، لازم است قوانین اول و دوم ترمودینامیک بررسی شوند.

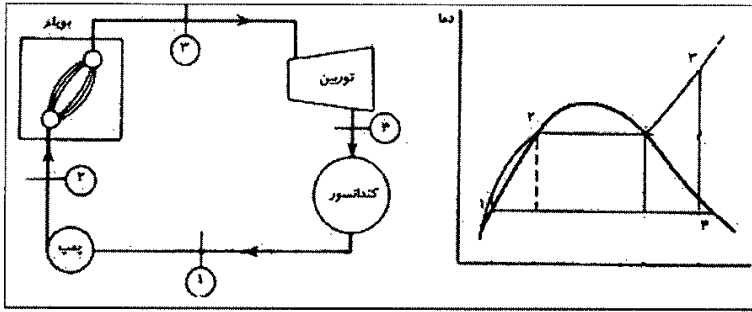
بر اساس قانون اول ترمودینامیک، انتگرال چرخه‌ای حرارت و انتگرال چرخه‌ای کار برابرند  $(\oint Q = \oint W)$ ، بنابراین برای تولید کار، باید یک منبع حرارتی وجود داشته باشد که گرمای مورد نیاز سیکل را تأمین کند. با توجه به قانون دوم ترمودینامیک، فرایندها فقط در یک جهت معین پیش می‌روند و انجام آن‌ها در خلاف جهت ممکن نیست. به بیان دیگر، انتقال حرارت همواره از منبع گرم به منبع سرد است.

به‌طور کلی، تمامی اجزایی که از طریق انتقال حرارت یا احتراق انرژی تولید می‌کنند، حتی اگر یک سیکل ترمودینامیکی بسته را طی نکنند، یک موتور حرارتی‌اند؛ جزئی که از طریق انتقال حرارت از یک جسم با درجه حرارت بالا به جسمی با درجه حرارت پایین، مقداری کار مثبت انجام می‌دهد. بنابراین می‌توان کل نیروگاه را یک موتور حرارتی در نظر گرفت که در آن، مقدار حرارت  $Q_H$  در بویلر (از محصولات احتراق) به سیال عامل و مقدار حرارت  $Q_L$  به یک جسم با درجه حرارت پایین (سیال خنک‌کن کندانسور<sup>۲</sup>) انتقال می‌یابد. در شکل ۱.۱ سیکل ساده یک نیروگاه بخاری (سیکل رانکین) و جایگاه بویلر در این سیکل (تحول ۲-۳) نشان داده شده است [۵].

---

1. boiler

2. condenser



شکل ۱.۱. سیکل ساده یک نیروگاه بخاری (سیکل رانکین)

## ۲.۱. تجهیزات بویلر

### ۱.۲.۱. کوره یا اتاق احتراق

کوره یا اتاق احتراق، محفظه‌ای است که عمل احتراق در آن انجام می‌شود. در دیواره‌های جانبی، کف و سقف اتاق احتراق، لوله‌های دیواره آبی<sup>۱</sup> نصب می‌شوند. لوله‌های سوپرهیتر<sup>۲</sup>، ری‌هیتر<sup>۳</sup> و اکنومایزر<sup>۴</sup>، در فضای داخلی کوره قرار می‌گیرند. در کوره، انرژی حرارتی آزاد شده در اثر احتراق سوخت، به شکل تشعشعی<sup>۵</sup> و جابه‌جایی<sup>۶</sup> به سیال درون لوله‌ها انتقال می‌یابد. حاصل این تبادل حرارت، جذب انرژی حرارتی به وسیله سیال داخل لوله‌ها و تبدیل آب به بخار و سوپرهیت شدن بخار است.

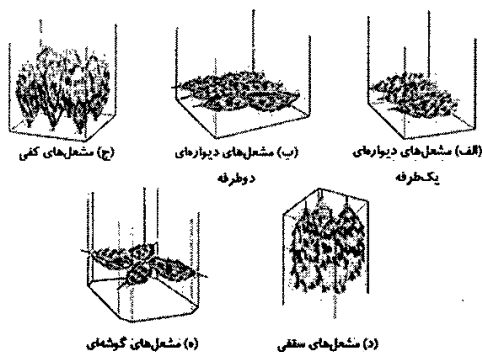
کوره‌ها بر اساس نحوه آرایش مشعل‌ها در کوره و تعداد و نحوه آرایش گذرهای کوره<sup>۷</sup>، به انواع گوناگون تقسیم می‌شوند. بر اساس نحوه آرایش مشعل‌ها، کوره‌ها را به ۵ دسته تقسیم می‌کنند (شکل ۲.۱):

- الف) کوره‌هایی که مشعل‌ها در یک دیواره و در یک یا چند ردیف قرار دارند؛
- ب) کوره‌هایی که مشعل‌ها در دو دیواره و در یک یا چند ردیف قرار دارند؛
- ج) کوره‌هایی که مشعل‌ها در کف محفظه کوره قرار دارند؛
- د) کوره‌هایی که مشعل‌ها در سقف کوره قرار دارند؛
- ه) کوره‌هایی که مشعل‌ها در گوشه‌ها و در یک یا چند ردیف قرار دارند.

1. water wall tube  
3. re-heater  
5. radiation  
7. pass

2. superheater  
4. economizer  
6. convection





شکل ۲.۱. دسته‌بندی کوره‌ها بر اساس نحوه آرایش مشعل‌ها

بر اساس تعداد گذر، کوره‌ها را به ۷ دسته تقسیم می‌کنند (شکل ۳.۱):

الف) کوره‌های II شکل

ب) کوره‌های T شکل

ج) کوره‌های سه‌گذره

د) کوره‌های چهارگذره

ه) کوره‌های برج‌شکل<sup>۱</sup>

و) کوره‌های L شکل دوگذره

ز) کوره‌های دوبلوکه<sup>۲</sup> [۱، ۵]

### ۲.۲.۱. لوله‌های دیواره‌آبی

لوله‌های دیواره‌آبی، روی دیواره‌های کوره نصب می‌شوند و انرژی حرارتی را به شکل تشعشعی جذب می‌کنند. وظیفه لوله‌های دیواره‌آبی، تبدیل آب به مخلوط آب و بخار است<sup>۳</sup>. لوله‌های

#### 1. tower scheme

۲. Double Block Layout: در این نوع کوره‌ها، بین دو بلوک کوره یک دریچه قرار دارد. اگر یک بلوک از مدار خارج شود، بویلر می‌تواند با بلوک بعدی، در بار ۵۰٪ به کار ادامه دهد.

۳. سیال ورودی به دیواره‌آبی همیشه به شکل آب خالص نیست. از آنجاکه با کاهش فشار، انرژی لازم برای تبخیر آب افزایش می‌یابد، ممکن است در بویلرهای با فشار پایین (در حدود ۴ مگاپاسکال)، این انرژی در مجموعه لوله‌های دیواره‌آبی فراهم نشود. در این مواقع، بخشی از وظیفه تبخیر آب را اکونومایزر انجام می‌دهد؛ یعنی آب در اکونومایزر می‌جوشد و بخشی از آن بخار می‌شود.

دیواره‌ای ممکن است به چهار شکل تهیه و نصب شوند (شکل ۴.۱):

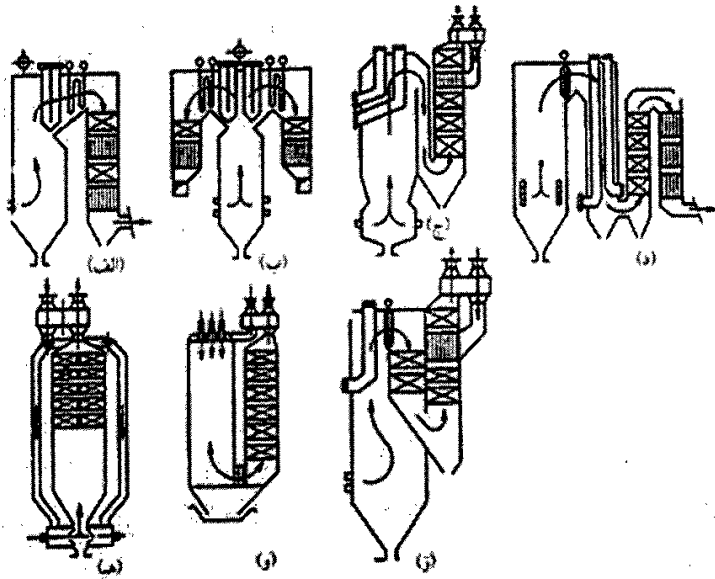
(الف) لوله‌های ساده و با فاصله کم (۴ تا ۶ میلی‌متر)؛

(ب) لوله‌های فین‌دار که فین‌ها به لوله، پرس یا نورد شده‌اند؛

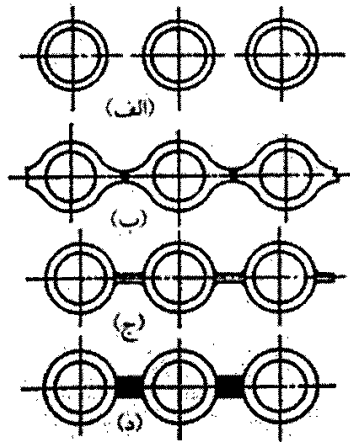
(ج) لوله‌های ساده که فین‌ها به لوله جوش داده شده‌اند؛

(د) لوله‌های ساده که فضای بین لوله‌ها با یک قطعه فلزی پر شده است.

در بویلرهای گردش طبیعی<sup>۱</sup>، لوله‌های دیواره آبی فقط به صورت عمودی یا شیب‌دار نصب می‌شوند. در بویلرهای گردش اجباری<sup>۲</sup>، لوله‌های دیواره آبی می‌توانند با هر زاویه‌ای (عمودی، افقی و شیب‌دار) نصب شوند (بویلرهای گردش طبیعی و اجباری در بخش ۲.۲.۳.۱ بررسی می‌شوند)[۱].



شکل ۴.۱. دسته‌بندی کوره‌ها بر اساس تعداد گذر [۱]



شکل ۴.۱. انواع لوله دیواره آبی

### ۳.۲.۱. درام

درام<sup>۱</sup> مخزنی است که در بالاترین قسمت بویلر نصب می‌شود و وظایف گوناگونی دارد. آب موجود در لوله‌های دیواره آبی، در یک بار گردش آب در لوله‌ها به‌طور کامل تبخیر نمی‌شود. بنابراین باید به‌نحوی آب را از بخار جدا کرد و برای تبخیر آب باقی‌مانده، مجدداً آن را در لوله‌های دیواره آبی به گردش درآورد. این کار در درام و با جداکننده‌های سیکلونی<sup>۲</sup> انجام می‌شود. مخلوط آب و بخار وارد سیکلون شده و به مخلوط آب و بخار، حرکت چرخشی داده می‌شود. در اثر نیروی گریز از مرکز، قطرات آب از بخار جدا می‌شوند و به سمت پایین حرکت می‌کنند (شکل ۵.۱). استفاده از سیکلون، روش مناسبی برای جداکردن آب از بخار است، اما این روش باعث افزایش مقاومت در مسیر بخار می‌شود که در محاسبات گردش باید به آن توجه کرد.

درام به‌عنوان مخزن ذخیره آب و بخار نیز عمل می‌کند. وقتی به‌منظور افزایش بار به بخار بیشتری نیاز است، تا زمانی که بویلر این بخار را تهیه کند، بخار موجود در درام، این کمبود را جبران می‌کند. هنگامی که مشکلی برای پمپ‌های آب تغذیه ایجاد شود نیز آب موجود در درام می‌تواند به‌طور موقت نیاز بویلر را تأمین کند.

همچنین تزریق برخی محلول‌های شیمیایی در درام انجام می‌شود.

1. drum

2. cyclone separator

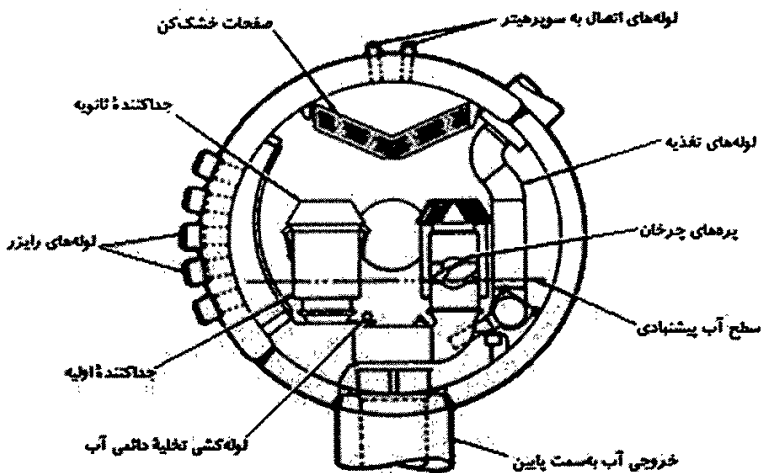
در نهایت، بخار از صفحات خشک‌کن عبور می‌کند و آخرین قطرات آب از آن جدا می‌شود. سپس برای سوپرهیت شدن، وارد سوپرهیتر می‌شود. لوله‌های پایین آورنده<sup>۱</sup> نیز آب را به سمت لوله‌های دیواره‌آبی هدایت می‌کنند [۱، ۵].

#### ۴.۲.۱. سوپرهیتر

برای افزایش بازده حرارتی در نیروگاه‌ها و حذف قطرات آبی که ممکن است در بخار اشباع خروجی از درام وجود داشته باشد، بخار اشباع وارد سوپرهیترها شده و فوق اشباع<sup>۲</sup> می‌شود. از آنجاکه دما در سوپرهیترها بسیار بالاست، این بخش بویلر از آسیب‌پذیرترین قسمت‌ها به‌شمار می‌آید.

#### ۱.۴.۲.۱. انواع سوپرهیتر به‌لحاظ نحوه جذب حرارت

بسته به نحوه جذب حرارت، سوپرهیترها به سه نوع تشعشی، پلاتن نیمه‌تشعشی<sup>۳</sup> و جابه‌جایی تقسیم می‌شوند [۱].



شکل ۵.۱. مقطعی از درام [۵]

1. down comer

2. superheat

3. semi-radiant platen superheater

الف) سوپرهیترهای تشعشی

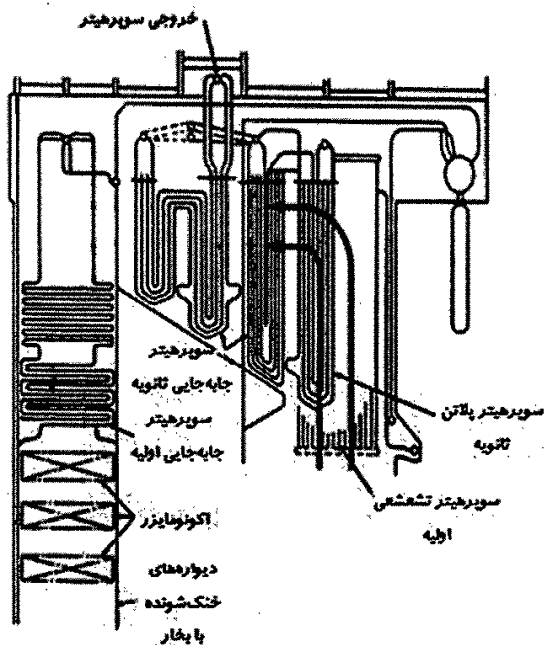
این نوع سوپرهیتر معمولاً در بالای کوره (مشعل‌ها) قرار می‌گیرد و قسمت اعظم حرارت خود را از طریق تشعشع دریافت می‌کند. در شکل ۶.۱ نمونه‌ای از سوپرهیتر تشعشی نشان داده شده است [۶].

ب) سوپرهیترهای پلاتن نیمه‌تشعشی

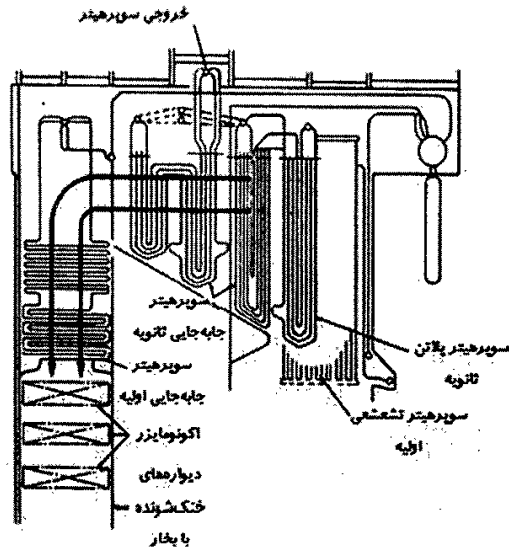
این نوع سوپرهیتر بین سوپرهیترهای جابه‌جایی و تشعشی نصب می‌شود (شکل ۶.۱) و می‌تواند تا ۵۰٪ انرژی لازم برای سوپرهیت‌شدن را جذب کند [۱].

ج) سوپرهیترهای جابه‌جایی

این نوع سوپرهیتر معمولاً در گذرگاه‌ها و دیواره‌های گذرگاه‌ها قرار دارد و به‌دلیل دوری از مشعل‌ها، عمده انرژی جذب‌شده به‌وسیله آن، به‌صورت جابه‌جایی است (شکل ۶.۱) [۶].



شکل ۶.۱. محل قرارگیری سوپرهیترهای تشعشی و پلاتن نیمه‌تشعشی در بویلر [۶]



شکل ۷.۱. محل قرارگیری سوپرهیترهای جابه‌جایی در بویلر [۶]

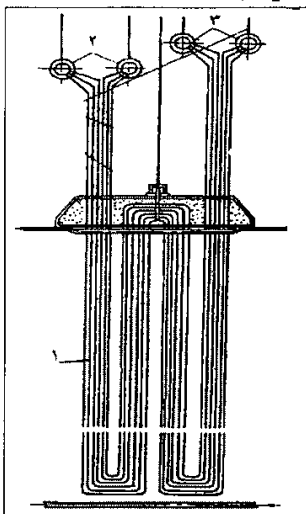
#### ۲.۴.۲.۱. انواع سوپرهیتر به لحاظ شکل ظاهری

##### الف) سوپرهیترهای عمودی

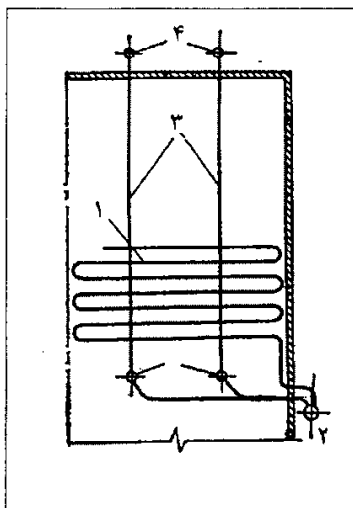
چنان‌که از نامشان برمی‌آید، این نوع سوپرهیترها به صورت عمودی قرار می‌گیرند. از جمله مزایای آن‌ها، طراحی ساده‌تر در مقایسه با سوپرهیترهای افقی است. همچنین، با اطمینان بیشتری در محل خود ثابت نگه داشته می‌شوند و احتمال تشکیل رسوب روی آن‌ها کمتر است. عیب این نوع سوپرهیتر، تخلیه‌ناپذیری آن است؛ یعنی نمی‌توان تقطیرات ایجادشده را به طور کامل از سوپرهیتر خارج کرد. این می‌تواند به بروز خوردگی، مشکلات در انتقال حرارت به سوپرهیتر و انسداد موقت آن منجر شود (فصل ۶: «بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت» مطالعه شود). آرایش این نوع سوپرهیتر و نحوه ثابت نگه‌داشتن آن در شکل ۸.۱ نشان داده شده است [۱].

##### ب) سوپرهیترهای افقی

طراحی این نوع سوپرهیترها و نحوه ثابت نگه‌داشتن آن‌ها پیچیده‌تر است، اما در این نوع سوپرهیتر، امکان تخلیه قطرات آب وجود دارد. آرایش و نحوه ثابت نگه‌داشتن این نوع سوپرهیتر در شکل ۹.۱ نشان داده شده است [۱].



شکل ۸.۱. سوپرهیتر عمودی؛ (۱) لوله‌های سوپرهیتر عمودی؛ (۲ و ۳) هدرهای ورودی و خروجی.

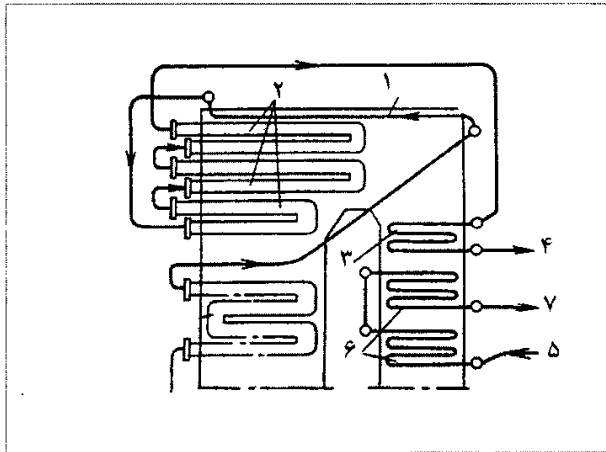


شکل ۹.۱. سوپرهیتر افقی؛ (۱) لوله‌های سوپرهیتر افقی؛ (۲) هدر ورودی سوپرهیتر؛ (۳) لوله‌های نگهدارنده (SUSPENDED TUBES)؛ (۴ و ۵) هدرهای لوله‌های نگهدارنده.

## ۵.۲.۱. ری‌هیتر.

فشار بخار با عبور از توربین فشارقوی افت پیدا می‌کند و به فشار اشباع که برای کارکرد طبیعی توربین مضر است، نزدیک می‌شود. برای افزایش بازدهی حرارتی و جلوگیری از ایجاد رطوبت در طبقات فشارضعیف توربین، باید درجه حرارت بخار بازگشتی از توربین فشارقوی را بالا برد و سپس به سمت توربین فشارمتوسط هدایت کرد. این عمل را ری‌هیتر انجام می‌دهد. وجود ری‌هیتر به ظرفیت بویلر و نوع طراحی نیروگاه بستگی دارد. در نیروگاه‌های کم‌ظرفیت، معمولاً از ری‌هیتر استفاده نمی‌شود، اما در نیروگاه‌های پُرظرفیت ری‌هیتر به کار گرفته می‌شود. تحول در ری‌هیتر، فشار ثابت است، اما درجه حرارت بخار تا حد نامی افزایش می‌یابد [۵].

ری‌هیترها از لوله‌های موازی و افقی تشکیل شده‌اند. نحوه آرایش لوله‌های ری‌هیتر در یک بویلر بالای فشار بحرانی، در شکل ۱۰.۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰.۱. آرایش لوله‌های ری‌هیتر در یک بویلر بالای فشار بحرانی (۱) سوپرهیتر سقفی؛ (۲) سوپرهیتر پلاتن؛ (۳) سوپرهیتر جابه‌جایی؛ (۴) خروجی سوپرهیتر به سمت توربین فشارقوی؛ (۵) خروجی توربین فشارقوی؛ (۶) لوله‌های ری‌هیتر؛ (۷) خروجی به سمت توربین فشارمتوسط [۱].

## ۶.۲.۱. اکونومایزر

گازهای داغ حاصل از احتراق، پس از تبادل حرارت با سوپرهیترها و ری‌هیترها، به سمت دودکش هدایت می‌شوند، اما هنوز حرارت بسیاری دارند. اگر این مقدار حرارت باقی‌مانده از



بویلر خارج شود، به‌حفاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست و بازدهی بویلر کاهش می‌یابد. برای جذب این حرارت در محصولات احتراق، از اکونومایزر<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

درحقیقت می‌توان اکونومایزر را هیتر آب تغذیه محسوب کرد؛ یعنی آخرین مرحله‌ای که آب تغذیه خروجی از کندانسور در آن گرم می‌شود. اکونومایزر در جایی از بویلر قرار گرفته است که حرارت به‌صورت جابه‌جایی به آن منتقل می‌شود. ممکن است لوله‌های اکونومایزر ساده یا فین‌دار باشند (شکل ۱۱.۱) [۵].

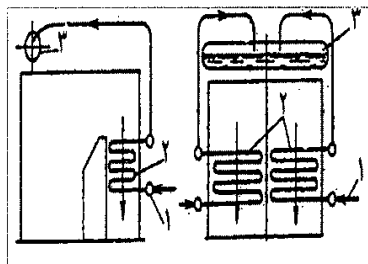
هدف اولیه از به‌کارگیری اکونومایزر، صرفه‌جویی در مصرف سوخت بوده است و لذا این جزء از بویلر با این نام خوانده می‌شود.

#### ۷.۲.۱. مشعل

برای احتراق مناسب، لازم است سوخت به‌صورت پودر درآید تا قطرات سوخت سریع‌تر تبخیر و محترق شوند. در نیروگاه‌ها، این فرایند به‌کمک بخار و به‌وسیله پودرکننده<sup>۲</sup> انجام می‌شود (شکل ۱۲.۱). مشعل‌ها ضمن پودرکردن سوخت و تبدیل آن به ذرات ریز، با ایجاد اغتشاش میان هوا و سوخت، باعث تشکیل مخلوط یکنواختی از هوا و سوخت می‌شوند. چنانچه قبلاً گفته شد، آرایش مشعل‌ها در کوره می‌تواند طرح‌های گوناگونی داشته باشد (شکل ۲۰.۱) [۵].

#### ۸.۲.۱. هیترهای هوا

برای افزایش بازدهی و کاهش تنش‌های حرارتی در بویلر، هوایی که فن دمنده<sup>۳</sup> هوا<sup>۳</sup> وارد کوره می‌کند باید گرم شود. گرم‌کن‌های هوای بویلر به دو شکل بخاری و دوار (ژانگستروم) هستند.

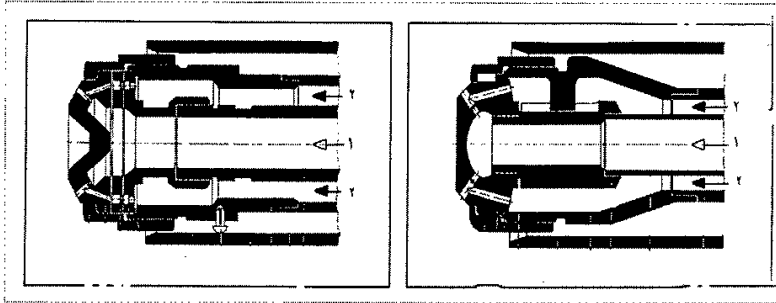


شکل ۱۱.۱. آرایش لوله‌های اکونومایزر؛ (۱) هدر ورودی اکونومایزر؛ (۲) لوله‌های اکونومایزر؛ (۳) درام [۱].

1. economizer

2. atomizer

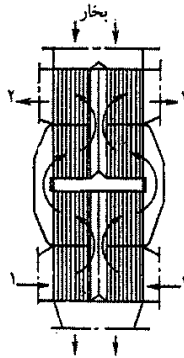
3. Forced Draft Fan (FD Fan)



شکل ۱۳.۱. دو نوع پودرکننده سوخت: (۱) محل ورود سوخت؛ (۲) محل ورود سیال پودرکننده [۲].

#### الف) گرم‌کن هوای بخاری

گرم‌کن‌های بخاری یک نوع مبدل حرارتی ساده‌اند که در آن‌ها بخار، انرژی گرمایی خود را از دست می‌دهد و هوایی که در اطراف لوله‌ها جریان دارد، این گرما را جذب می‌کند (شکل ۱۳.۱).



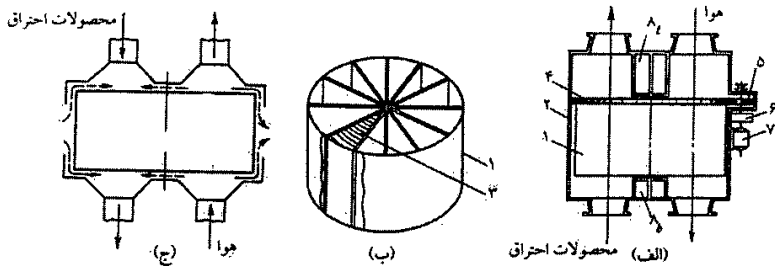
شکل ۱۳.۱. گرم‌کن هوای بخاری؛ (۱) هوای سرد ورودی؛ (۲) هوای گرم خروجی.

#### ب) گرم‌کن هوای دوار

این نوع گرم‌کن شامل ورقه‌های فولادی چین‌دار و یا مسطحی (بسکت<sup>۱</sup>) است که میانشان فاصله‌ای برای عبور محصولات احتراق وجود دارد. بسکت‌ها داخل یک محفظه استوانه‌ای دوار

1. basket

قرار می‌گیرند که به قطاع‌هایی ایزوله از هم، تقسیم شده است. یک موتور الکتریکی، قسمت استوانه‌ای شکل را می‌چرخاند. محصولات احتراق و هوا به‌طور پیوسته داخل گرم‌کن هوا جریان دارند؛ درحالی‌که مسیر حرکتشان مجزاست (شکل ۱۴.۱). مقاطعی از گرم‌کن هوای دوار که در مسیر محصولات احتراق قرار دارند، بر اثر محصولات احتراق گرم می‌شوند و وقتی در اثر چرخش استوانه در مسیر هوا قرار می‌گیرند، گرمای خود را به هوا منتقل می‌کنند [۱].



شکل ۱۴.۱. گرم‌کن هوای دوار؛ الف) مقطع طولی؛ ب) استوانه چرخان؛ ج) مسیر عبور هوا و دود. ۱) روتور؛ ۲) پوسته ثابت؛ ۳) بست‌ها؛ ۴) نردبانی؛ ۵) چرخ‌دنده؛ ۶) جمبه‌دنده کاهنده؛ ۷) موتور الکتریکی؛ ۸) و ۸ب) صفحات بالایی و پایینی برای جداکردن مسیر هوا و دود.

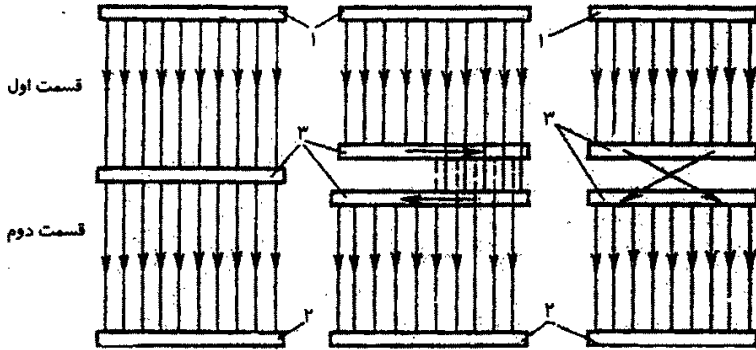
### ۹.۲.۱. هدر

هدرها برای توزیع سیال در لوله‌ها استفاده می‌شوند و سه شکل اساسی دارند: الف) هدرهای تغذیه یا توزیع‌کننده: این هدرها سیال را در لوله‌هایی که به آن‌ها متصل شده‌اند، توزیع می‌کنند (شکل ۱۵.۱، المان شماره ۱). ب) هدرهای تخلیه: این هدرها سیال را از لوله‌هایی که به آن‌ها متصل شده‌اند، دریافت می‌کنند (شکل ۱۵.۱، المان شماره ۲). ج) هدرهای میانی یا مخلوط‌کننده: این هدرها برای یکسان کردن شرایط بهره‌برداری لوله‌ها به کار می‌روند (شکل ۱۵.۱، المان شماره ۳) [۱].

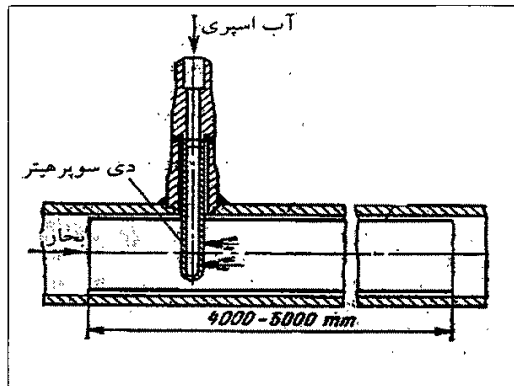
### ۱۰.۲.۱. دی سوپرهیتر

دمای بخار سوپرهیترها، بر اثر تغییر پارامترهای بهره‌برداری مانند دمای آب تغذیه، مقدار هوای اضافی کوره، میزان رسوب روی لوله‌های دیواره آبی و مقدار رطوبت سوخت، تغییر می‌کند.

از آنجاکه محدوده مجاز تغییر دمای بخار سوپرهیترها بین  $10- تا +5$  درجه سانتی‌گراد است، در صورت افزایش دمای بخار، باید دمای آن کاهش یابد. یکی از روش‌های کاهش دما، پاشش آب در سوپرهیتر است<sup>۱</sup> که با دی‌سوپرهیتر انجام می‌شود (شکل ۱۶.۱). آب لازم برای دی‌سوپرهیترها معمولاً از خروجی پمپ آب تغذیه تأمین می‌شود [۱].



شکل ۱۵.۱. انواع هدر: (۱) هدر توزیع کننده؛ (۲) هدر تخلیه؛ (۳) هدر مخلوط کننده.

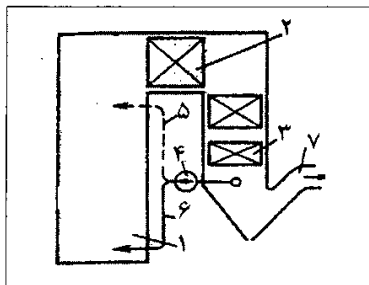


شکل ۱۶.۱. دی‌سوپرهیتر

۱. یکی دیگر از روش‌های کنترل دمای سوپرهیتر، تغییر میزان جذب انرژی از سمت آتش است. این روش‌ها شامل چرخش مجدد محصولات احتراق، بای‌پس کردن بخشی از محصولات احتراق و تغییر زاویه مشعل‌ها هستند.

### ۱۱.۲.۱. فن گردش مجدد دود

دود قبل از ورود به دودکش، به وسیله فن گردش مجدد<sup>۱</sup> دوباره وارد کوره می‌شود. ورود دود به کوره موجب توزیع یکنواخت حرارت میان سطوح حرارتی می‌شود. ورود مجدد دود به کوره می‌تواند از قسمت بالا یا پایین کوره باشد (شکل ۱۷.۱). ورود از پایین کوره، باعث کاهش جذب مستقیم حرارت در کوره و در نتیجه افزایش دمای دود در خروجی آن می‌شود. همچنین، گردش مجدد دود، دبی محصولات احتراق داخل کوره را افزایش می‌دهد. این دو عامل باعث افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی در سوپرهیتر و در نتیجه افزایش دمای بخار می‌شوند. کاهش جذب انرژی در محدوده لوله‌های دیواره آبی، از آن‌ها در مقابل بیش‌گرمایش<sup>۲</sup> محافظت می‌کند. ورود دود از قسمت بالای کوره، نقش چشمگیری در بهره‌برداری کوره ندارد، اما موجب کاهش دمای دود در محدوده سوپرهیتر می‌شود و این امر، کاهش میزان جذب انرژی در سوپرهیتر و در نتیجه کاهش دمای بخار را در پی دارد [۱].



شکل ۱۷.۱. محل قرارگیری فن گردش مجدد دود در بویلر؛ (۱) کوره؛ (۲) سوپرهیتر؛ (۳) آکونومایزر؛ (۴) فن گردش مجدد دود؛ (۵) ورودی دود از قسمت بالای کوره؛ (۶) ورودی دود از قسمت پایین کوره؛ (۷) خروجی دود به سمت هیتر هوا.

### ۱۲.۲.۱. دوده‌زدا

تمیز نگه‌داشتن سطوح حرارتی بویلر، برای انتقال بهتر و سریع‌تر حرارت، مهم است. برای زدودن دود و گرد و خاک از سطوح حرارتی لوله‌های سوپرهیترها و ری‌هیترها، از دوده‌زدا<sup>۳</sup> استفاده می‌کنند. بخار لازم برای دوده‌زداها، معمولاً از خروجی سوپرهیتر گرفته شده و پس از

1. Gas Recirculation Fan (GR Fan)

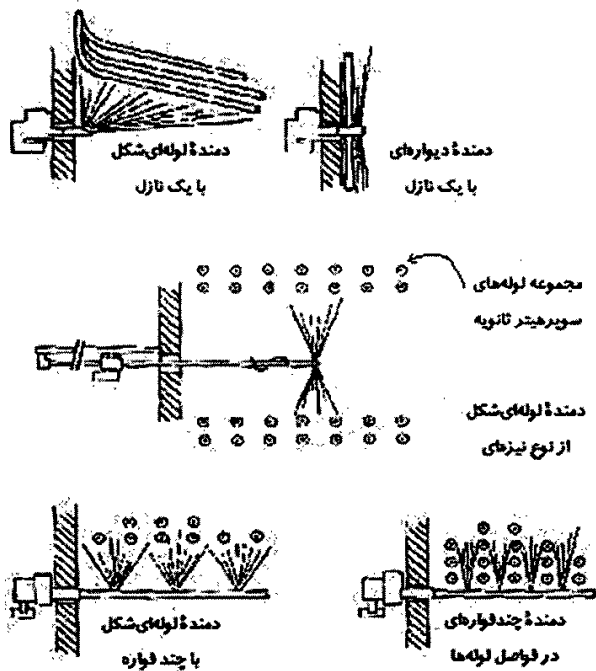
۲. overheat (در فصل‌های ۵ و ۶، خرابی‌های ناشی از بیش‌گرمایش بررسی خواهند شد.)

3. soot blower

عبور از یک شیر فشارشکن، برای دوده‌زدایی به‌کار گرفته می‌شود. دوده‌زداها در دو دسته جمع‌شونده و دوار و غیرجمع‌شونده طبقه‌بندی می‌شوند. در غیر زمان بهره‌برداری، دوده‌زدایی جمع‌شونده عقب کشیده می‌شود تا بر اثر حرارت زیاد گازهای حاصل از احتراق نسوزد. همین امر باعث افزایش طول عمر آن می‌شود. نوع غیرجمع‌شونده در محل‌هایی نصب می‌شود که فضا محدود است یا گازهای حاصل از احتراق، دمای بالایی نداشته باشند. در برخی طرح‌ها، به‌جای بخار از پرتاب ساچمه برای دوده‌زدایی استفاده می‌شود (شکل ۱۸.۱) [۷، ۵].

### ۳.۱. انواع بویلر

بویلرها را می‌توان به‌لحاظ نحوه تولید بخار، به دو دسته لوله آتشی<sup>۱</sup> و لوله آبی<sup>۲</sup> تقسیم کرد.



شکل ۱۸.۱. دوده‌زداهای جمع‌شونده [۷]

1. fire tube

2. water tube

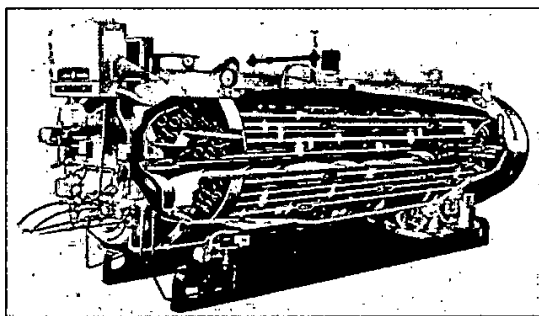
### ۱.۳.۱. بویلرهای لوله آتشی

در این بویلرها، محصولات احتراق درون لوله‌هایی (لوله‌های آتش) جریان دارند و با تبادل حرارت میان لوله‌ها و آب اطراف آن‌ها، بخار تولید می‌شود. فشار بخار تولیدشده در این نوع بویلرها محدود است و امکان تولید بخار سوپرهیت وجود ندارد. این بویلرها بازدهی پایینی دارند (حداکثر ۷۰٪). به دلیل محدودیت‌های ناشی از مقاومت اجزا و وجود حجم زیاد آب، نمی‌توان حجم این بویلرها را به‌طور نامحدود افزایش داد و در نتیجه دبی بخار تولیدشده در آن‌ها کم است. از این بویلرها معمولاً به‌عنوان بویلرهای کمکی و در مواردی نظیر گرمایش سوخت در نیروگاه‌ها استفاده می‌شود (شکل ۱۹.۱) [۵].

### ۲.۳.۱. بویلرهای لوله آبی

در این بویلرها، آب و بخار در لوله‌ها در جریان است و محصولات احتراق و شعله در بیرون لوله‌ها و در فضای کوره قرار دارند. بویلرهای به‌کار گرفته‌شده در نیروگاه‌ها و اکثر صنایع، از این نوع‌اند که در آن‌ها، زغال‌سنگ، گاز طبیعی، گازوئیل یا مازوت به‌همراه هوای گرم در کوره می‌سوزند و محصولات احتراق، در کوره به‌حرکت درمی‌آیند. بر اثر انتقال حرارت از محصولات احتراق به آب موجود در لوله‌های دیواره آبی، بخار تولید می‌شود. بخار اشباع تولید شده، در سوپرهیت‌رها، فوق‌اشباع (سوپرهیت) می‌شود.

خود این بویلرها را بر اساس وجود یا فقدان درام در فرایند تولید بخار، به بویلرهای یکبار گذر<sup>۱</sup> و درام‌دار تقسیم می‌کنند.



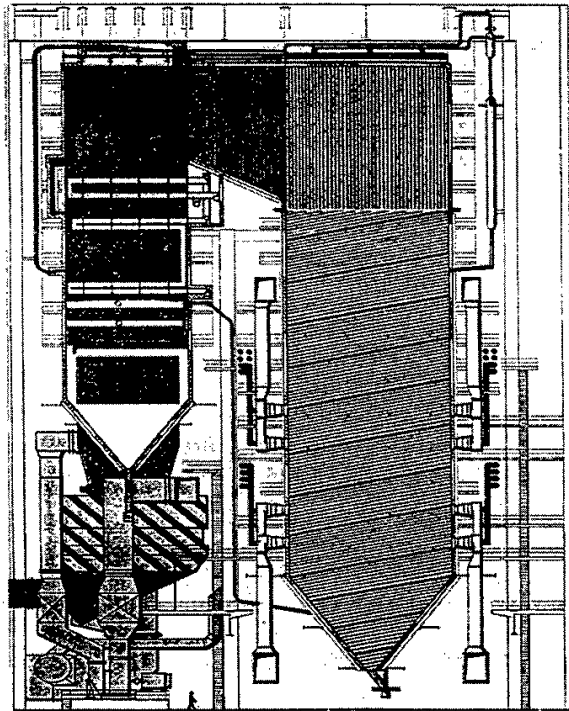
شکل ۱۹.۱. بویلر لوله آتشی [۳]

1. once through

۱.۲.۳.۱. بویلرهای یک‌بار گذر

بویلرهای یک‌بار گذر، درام ندارند و طراحی مجموعه کوره و لوله‌های دیواره آبی آن‌ها به‌شکلی است که همه آب تغذیه موجود در لوله‌های دیواره آبی، با عبور از لوله‌های دیواره‌ای، به بخار تبدیل شده و مستقیماً به سمت سوپرهیتر هدایت می‌شود؛ بنابراین عدد سیرکولاسیون<sup>۱</sup> این نوع بویلرها، ۱ است (شکل ۲۰.۱).

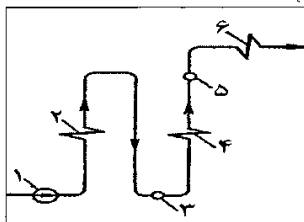
سیکل تولید بخار در این بویلرها، در شکل ۲۱.۱ نشان داده شده است. آب پس از تیخیر مستقیماً وارد سوپرهیتر شده و سپس به سمت توربین فشارقوی هدایت می‌شود. در این بویلرها، مرز مشخصی میان اکونومایزر، لوله‌های دیواره آبی و سوپرهیتر وجود ندارد. این بویلرها در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی کار می‌کنند [۱، ۵].



شکل ۲۰.۱. بویلر یک‌بار گذر

۱. به تعداد دفعاتی که آب باید در بویلر گردش کند تا به‌طور کامل بخار شود، «عدد سیرکولاسیون» گفته می‌شود.





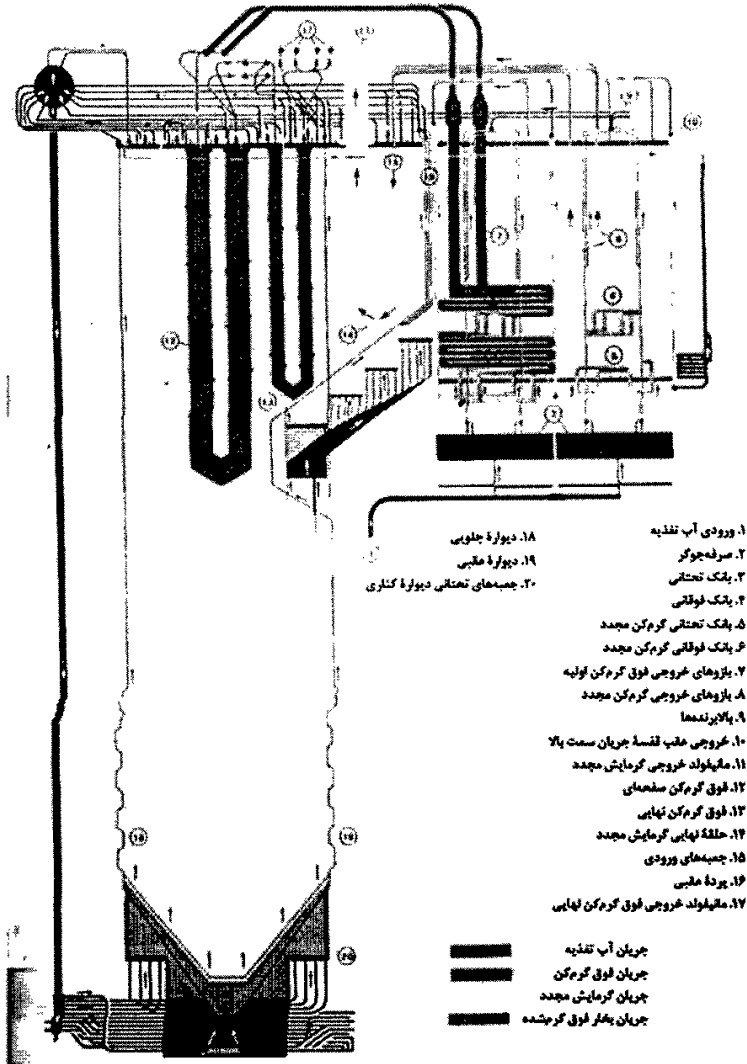
شکل ۲۱.۱. شماتیک تولید بخار در بویلر یک‌بار گذر؛ (۱) پمپ آب تغذیه؛ (۲) اکونومایزر؛ (۳) هدر؛ (۴) لوله‌های دیواره‌آبی؛ (۵) هدر؛ (۶) سوپرهیتر [۱].

### ۲.۲.۳.۱. بویلرهای درام‌دار

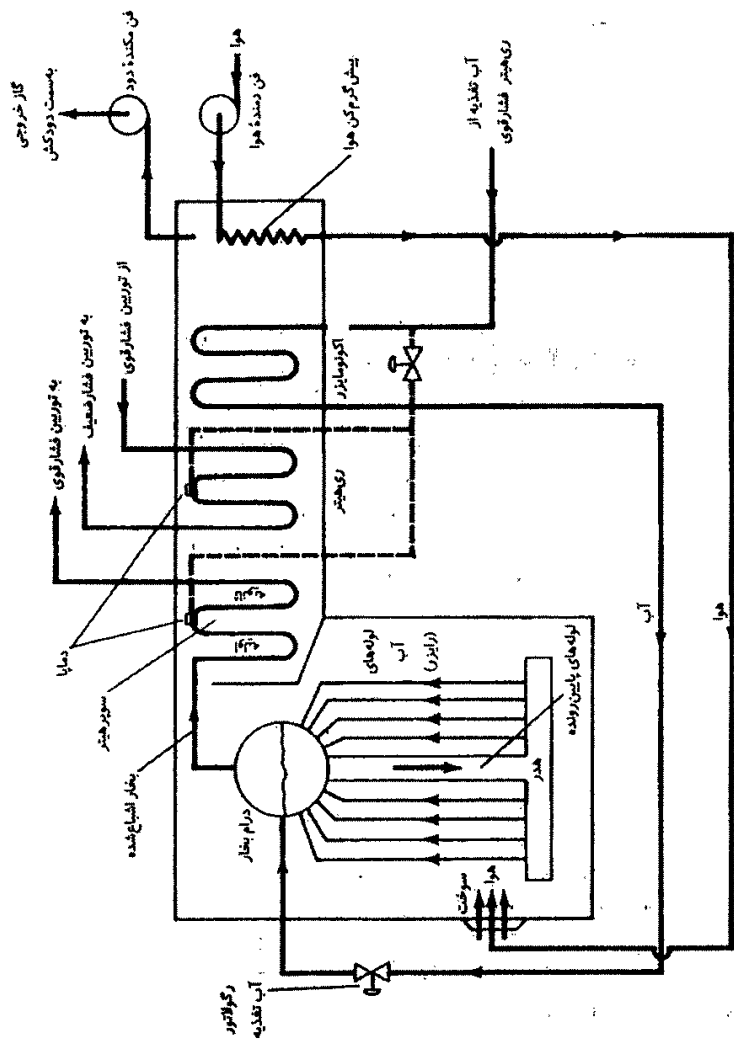
همان‌طور که از نام برمی‌آید، درام یکی از اجزای فرایند تولید بخار در این نوع بویلرهاست (شکل ۲۲.۱). فرایند تولید بخار در این بویلرها در شکل ۲۳.۱ نشان داده شده است. آب با دمای ۲۳۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد (۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه فارنهایت) از هدر فشاربالای آب تغذیه وارد اکونومایزر و به صورت اشباع یا مخلوط دوفازی با کیفیت پایین، از اکونومایزر خارج و وارد درام می‌شود. آب از طریق لوله‌های پایین آورنده قرار گرفته در بیرون کوره، به هدر آب تغذیه در پایین کوره وارد می‌شود. این هدر به لوله‌های دیواره‌آبی متصل است. آب در لوله‌های دیواره‌آبی، حرارت را از شعله و گازهای حاصل از احتراق جذب می‌کند و بخار می‌شود. البته همه آب موجود در لوله‌ها، در یک بار حرکت در لوله‌های دیواره‌آبی بخار نمی‌شود و بنابراین آب و بخار در درام از یکدیگر جدا می‌شوند. آب باقی‌مانده با آب ورودی از اکونومایزر مخلوط و مجدداً با لوله‌های پایین آورنده به هدر پایین کوره منتقل می‌شود. بخار موجود در درام، وارد سوپرهیتر و پس از سوپرهیتر شدن، وارد توربین فشاربالا می‌شود. بخار خروجی از توربین فشاربالا، مجدداً وارد بویلر و در لوله‌های ری‌هیتر حرارت داده می‌شود. در ری‌هیتر دمای بخار تا دمای بخار اصلی افزایش می‌یابد، اما فشارش از فشار بخار اصلی کمتر می‌شود. نهایتاً بخار خروجی از ری‌هیتر، وارد توربین فشار متوسط و فشار ضعیف می‌شود [۱].

تذکر: سیال موجود در لوله‌های دیواره‌آبی، ترکیبی از آب و بخار با چگالی کمتر نسبت به آب موجود در لوله‌های پایین آورنده است. بنابراین ممکن است به‌طور طبیعی اختلاف فشار لازم برای چرخش سیال در بویلر وجود داشته باشد. به این نوع بویلرها، بویلرهای «گردش طبیعی» گفته می‌شود (شکل ۲۴.۱). در این بویلرها، حجم بخار در خروجی لوله‌های دیواره‌آبی، بین ۳٪ تا ۲۵٪ و بنابراین عدد سیرکولاسیون این بویلرها بین ۴ تا ۳۳ است. علاوه بر گردش طبیعی، می‌توان سیال را با استفاده از یک پمپ نیز در لوله‌ها به‌گردش درآورد. در این بویلرها که

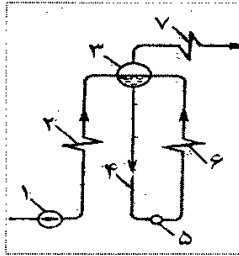
«گردش اجباری» نام گرفته‌اند (شکل ۲۵.۱)، لوله‌ها می‌توانند در هر جهتی قرار بگیرند و عمودی بودن آن‌ها الزامی نیست. عدد سیرکولاسیون نیز ممکن است بین ۳ تا ۱۰ باشد [۱].



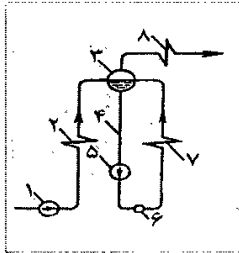
شکل ۲۲.۱. اجزای یک بویلر درام‌دار [۶]



شکل ۱-۲۳. فرایند تولید بخار در یک بویلر درام‌دار [۴]



شکل ۲۴.۱. بویلر گردش طبیعی؛ (۱) پمپ آب تغذیه؛ (۲) اکونومایزر؛ (۳) درام؛ (۴) لوله پایین آورنده؛ (۵) هدر؛ (۶) لوله‌های دیواره‌آبی؛ (۷) سوپرهیتر.



شکل ۲۴.۱. بویلر گردش اجباری؛ (۱) پمپ آب تغذیه؛ (۲) اکونومایزر؛ (۳) درام؛ (۴) لوله پایین آورنده؛ (۵) پمپ گردش آب در بویلر؛ (۶) هدر؛ (۷) لوله‌های دیواره‌آبی؛ (۸) سوپرهیتر.

## منابع

- [1] Rezinkov, M. I. and Yu. M. Lipov. *Steam Boilers of Thermal Power Stations*. Translated from the Russian by V. Afanasyev. 1981 (English translation: 1985).
- [2] Babcock Company. *Selected Contribution on Power Station Technology*. 1980.
- [3] Jackson, James J. *Steam Boiler Operation, Principles and Practice*. Second Edition. Prentice-Hill. 1987.
- [4] El-Wakil, M. M. *Power Plant Technology*. Mc Graw-Hill Company. 1987.

[۵] ناصر معینی و حمید هدیه، طراحی حرارتی بویلر، پایان‌نامه کارشناسی مهندسی مکانیک نیروگاه، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، آبان ۱۳۷۳.

[۶] عبدالرضا بانسی، تهیه دستورالعمل‌های تخمین عمر لوله‌های سوپرهیتر، پایان‌نامه کارشناسی مهندسی مکانیک نیروگاه، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، پاییز ۱۳۸۲.

[۷] دوره اپراتوری نیروگاه حرارتی، مجتمع آموزشی و پژوهشی شهید عباسپور، معاونت سازندگی و آموزش وزارت نیرو.

## فصل ۲

### بویلرهای بازیاب نیروگاه‌های سیکل ترکیبی

#### ۱.۲. مقدمه

یکی از معایب تولید توان با استفاده از توربین‌های گازی به‌صورت سیکل باز (ساده) که از منظر ترمودینامیکی در سیکل برایتون کار می‌کنند، بازدهی پایین آن‌ها (۳۰٪ تا ۴۰٪) است. علت این امر، خروج گازهای داغ حاصل از احتراق با دمای بالا (حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) به اتمسفر از طریق آگزوز توربین گاز و عدم استفاده از این انرژی است.

استفاده از یک مبدل حرارتی یعنی بویلر بازیاب<sup>۱</sup> برای استفاده از جریان انرژی خروجی از آگزوز توربین گاز، یکی از روش‌های معمول برای بهبود بازدهی است. علاوه‌بر آگزوز توربین‌های گازی، این مبدل‌ها در خروجی آگزوز واحدهای تولید پراکنده که عمدتاً موتورهای گازسوز<sup>۲</sup> هستند نیز به کار می‌روند. بسته به دما و دبی گازهای خروجی از آگزوز، ظرفیت این مبدل‌ها از تولید آب گرم (موتورهای گازسوز) تا تولید بخار سوپرهیت در چند سطح فشار (توربین‌های گاز) متفاوت است. بخار (یا آب داغ) تولیدی در بویلرهای بازیاب می‌تواند به‌عنوان یک منبع حرارت در فرایندهای صنعتی استفاده شود که در این صورت به‌عنوان تولید هم‌زمان<sup>۳</sup> (برق و حرارت) شناخته می‌شود. همچنین می‌توان از بخار تولیدی در یک توربوژنراتور بخار به‌منظور تولید توان الکتریکی استفاده کرد که این فرایند، سیکل ترکیبی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. با استفاده از بویلرهای بازیاب و تبدیل آن به سیکل ترکیبی، بازدهی سیکل ساده توربین گاز به ۵۵٪ تا ۶۰٪ افزایش می‌یابد.

در ایران، بخش چشمگیری از انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی تولید می‌شود. این نوع نیروگاه با توجه به بازدهی و نیز گستردگی استفاده از توربین‌های گازی، بخش مهمی از سبد تولید انرژی را به خود اختصاص داده است. بر اساس گزارش عملکردی وزارت نیرو، از میزان ۸۰،۳۱۱ مگاوات ظرفیت نیروگاهی نصب‌شده در کشور در سال ۱۳۹۷، ۲۴،۹۲۳ مگاوات به نیروگاه‌های سیکل ترکیبی مربوط بود [۱]. به‌عبارت دیگر، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که

1. Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

2. gas engine

3. co-generation

4. combined cycles

بویلرهای بازیاب از اجزای اصلی‌شان هستند، ۳۱٪ از تولید انرژی الکتریکی کشور را برعهده دارند. این میزان در حال رشد است، به طوری که سهم مذکور در سال ۹۷ در مقایسه با سال ۹۶، ۷/۱۶٪ افزایش داشته است. مقایسه سهم نیروگاه‌های سیکل ترکیبی (دارای بویلر بازیاب) با سهم نیروگاه‌های بخار (دارای بویلرهای معمولی) که ۱۹/۷٪ از ظرفیت نصب‌شده در سال ۹۷ بود، نشان‌دهنده اهمیت بویلرهای بازیاب در سیستم تولید توان الکتریکی کشور است.

## ۲.۲. سیکل آب و بخار در واحد بخار سیکل ترکیبی

شکل‌های ۱.۲ و ۲.۲ طرحواره یک نیروگاه سیکل ترکیبی و دیاگرام آنتروپی-دمای آن را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها تحول‌ها شماره‌گذاری شده‌اند:

۱-۲: تراکم هوا در کمپرسور توربین گاز

۲-۳: اتاق احتراق توربین گاز

۳-۴: توربین گاز

۴-۵: سردشدن گازهای محصولات احتراق در بویلر بازیاب

۷-۹: گرم‌شدن آب در بویلر سیکل ترکیبی و تبدیل آن به بخار سوپرهیت

۸: بویلر بازیاب

۹-۱۰: توربین بخار

۱۰-۱۱: کندانسور

۱۱-۶: پمپ تغذیه آب بویلر<sup>۱</sup>

G: ژنراتور

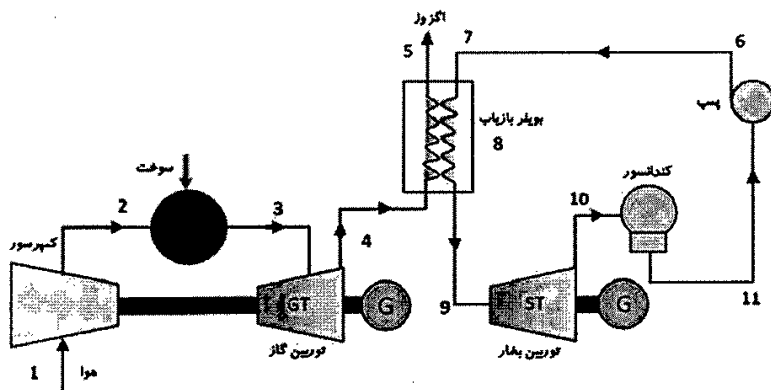
گازهای خروجی توربین گاز با دمایی در حدود ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، معمولاً در شرایط نزدیک به فشار اتمسفر قرار دارند. این گازها پس از خروج از توربین گاز، وارد بویلر بازیاب می‌شوند و در آنجا انرژی خود را از طریق مبدل‌های حرارتی موجود در بویلر، به آب موجود در چرخه بخار می‌دهند و آب ورودی را به بخار سوپرهیت تبدیل می‌کنند. این بخار معمولاً دمایی در حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشاری بین ۱۳ تا ۲۰ مگاپاسکال دارد.

مکانیسم‌های غالب انتقال حرارت در بویلرهای بازیاب، جابه‌جایی و هدایت<sup>۲</sup> است؛ بنابراین چیدمان المان‌های حرارتی آن‌ها شامل لوله‌های اواپراتورها (با عملکرد مشابه واتروال‌ها در

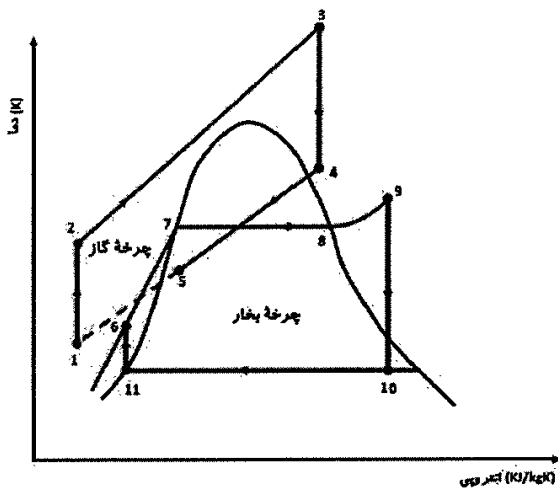
1. Boiler Feed Pump (BFP)

2. conduction

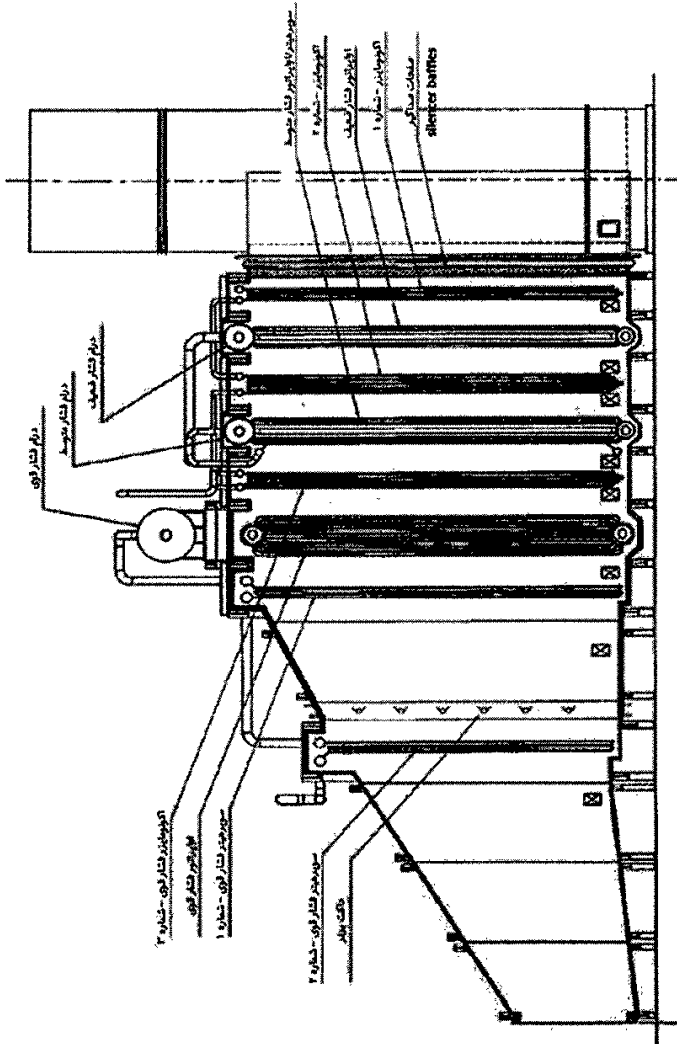
بویلرهای نیروگاه‌های بخاری، سوپرهیترها و ری هیترها، متفاوت با بویلرهای سنتی است. در شکل ۳.۲ نمایی عمومی از یک بویلر بازیاب نشان داده شده است. لوله‌های بویلر به صورت فین‌دار و در جهت عمودی قرار می‌گیرند و گازهای خروجی از آگزوز توربین گاز به صورت افقی از بین آن‌ها عبور می‌کنند.



شکل ۱.۲. طرحواره یک نیروگاه سیکل ترکیبی [2]



شکل ۲.۲. دیاگرام آنترپپی-دمای سیکل ترکیبی [2]



شکل ۳.۲. چیدمان عمومی لوله‌ها در بویلر بازتاب [۳]



اگرچه بویلر بازیاب می‌تواند تک‌فشاره باشد، اما برای افزایش بازدهی بویلرهای بازیاب، مخصوصاً در کاربردهای نیروگاهی، بسته به انرژی ورودی به آن‌ها (از آگروز توربین گاز)، بویلرهای بازیاب دو یا سه‌فشاره طراحی می‌شوند. تعداد مدار چرخش آب و بخار در بویلر، برابر با تعداد سطوح فشار است؛ به عبارتی، با فرض یک بویلر بازیاب سه‌فشاره، سه مدار آب و بخار مشتمل بر فشارقوی<sup>۱</sup>، فشارمتوسط<sup>۲</sup> و فشارضعیف<sup>۳</sup> برای آن وجود دارد. چیدمان این مدارها به ترتیب از منطقه داغ به سمت ناحیه سرد بویلر بازیاب است.

هر یک از مدارهای یادشده، از المان‌های اصلی حرارتی شامل اواپراتورها، درام و سوپرهیتر برخوردار است. همچنین به‌منظور استفاده بیشتر از حرارت موجود در گازهای عبوری، در بخش‌هایی از بویلر بازیاب المان‌هایی برای گرمایش آب تغذیه قبل از ورود به مدارهای اصلی قرار داده می‌شوند. این المان‌ها شامل پیش‌گرم‌کن آب کندانس<sup>۴</sup> و اکونومایزر هستند. شایان ذکر است که میزان استفاده از حرارت موجود در گازهای خروجی و کاهش دمای آن‌ها، محدودیت دارد و با توجه به وجود عناصر خورنده در این گازها، کاهش دما محدود به دمای شبنم‌گازهای خروجی است. در شکل ۴.۲ طرحواره‌ای از مسیر آب و بخار در یک بویلر بازیاب سه‌فشاره نشان داده شده است. تعداد المان‌ها و نوع آرایش نشان‌داده‌شده، بسته به پروفیل دما، حرارت و دیگر پارامترهای طراحی متفاوت بوده و شکل مذکور نمایش عمومی از مسیر و سطوح حرارتی است.

همان‌طور که در شکل ۴.۲ ملاحظه می‌شود، آب کندانس (خروجی کندانسور نیروگاه) به‌وسیله پمپ کندانس<sup>۵</sup> به منطقه بویلر بازیاب وارد می‌شود. این آب، ابتدا از یک المان حرارتی که انتهای ترین سطح حرارتی بویلر بازیاب است و در سردترین ناحیه قرار دارد عبور می‌کند و پیش‌گرم می‌شود. با توجه به حرارت پایین در این منطقه، به‌منظور جلوگیری از میعان بخار موجود در گازهای خروجی و بروز خوردگی در شرایط خاص مانند سوخت مایع، پایین‌بودن دما و...، تمهیداتی مانند مسیر کنارگذر<sup>۶</sup> و کنترل مقدار جریان عبوری از این مسیر، در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای کنترل دمای آب خروجی، مسیر بازچرخش در این المان حرارتی به‌وسیله یک پمپ<sup>۷</sup> تأمین می‌شود. آب کندانس پس از خروج از پیش‌گرم‌کن، وارد هواژدا<sup>۸</sup> می‌شود تا با عبور از سینی‌های مخصوص و تزریق هم‌زمان بخار، اکسیژن و دیگر گازهای نامحلول در آن خارج شوند. آب کندانس خروجی از دی‌اریتور که با بخار تزریقی ترکیب و

1. High Pressure (HP)

3. Low Pressure (LP)

5. Condensate Water Pump (CWP)

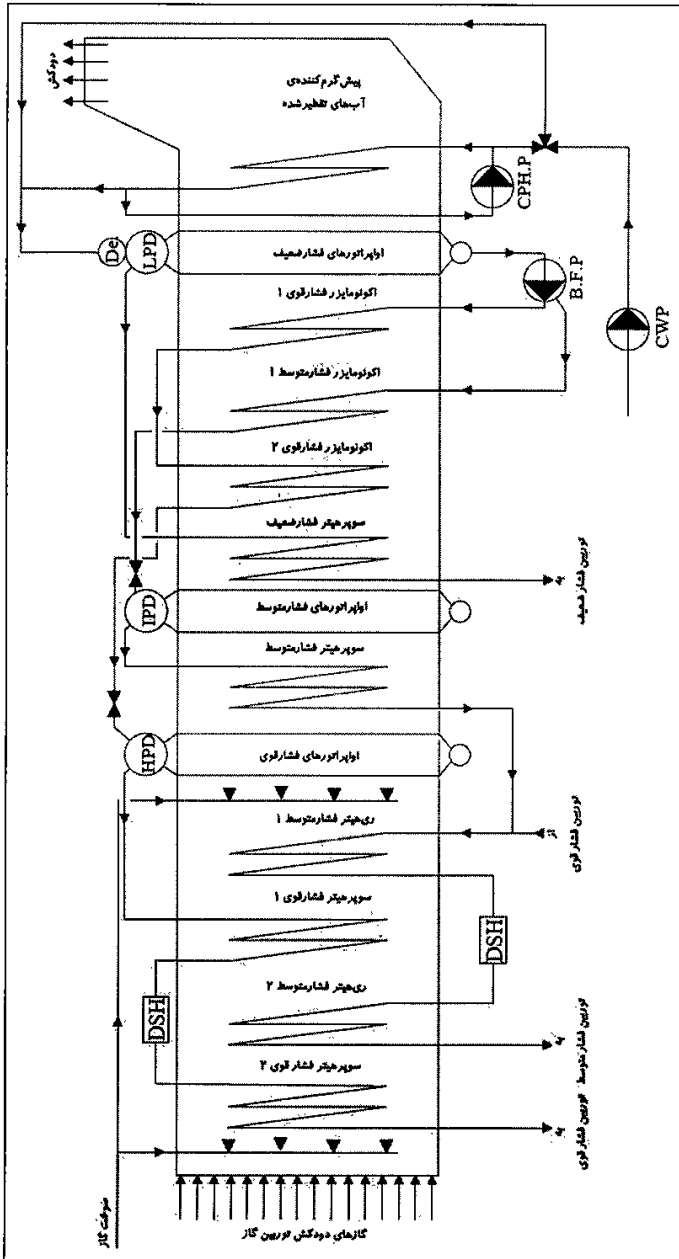
7. Condensate Preheater Pump (CPHP)

2. Intermediate Pressure (IP)

4. condensate preheater

6. by-pass

8. deaerator



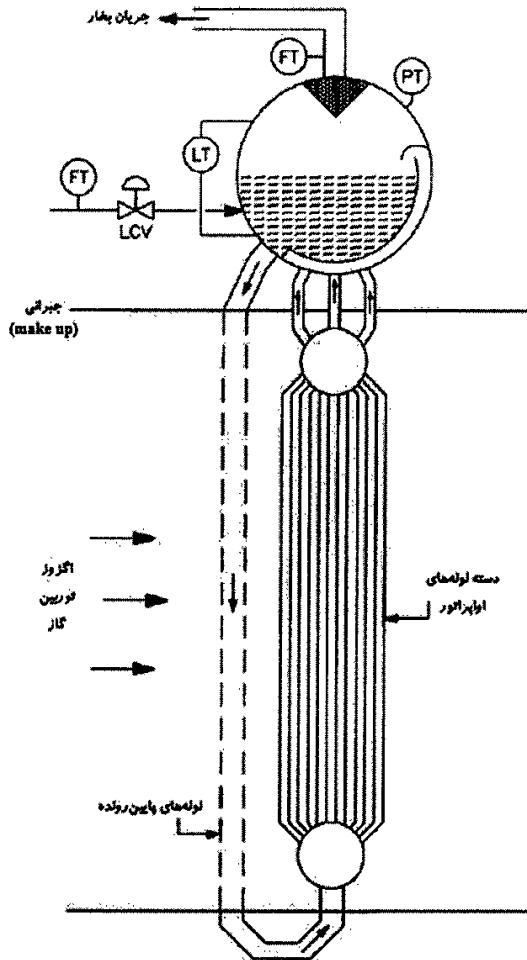
شکل ۴.۲. مسیر آب و بخار در یک بویلر بازیاب سه فشاره

گرم‌تر شده و به لحاظ ترمودینامیکی در حالت مایع (۰.۱۰۰٪) اشباع قرار گرفته است، در یک مخزن<sup>۱</sup> ذخیره می‌شود. این مخزن که در ارتفاع بالا نصب می‌شود، به‌عنوان منبع تأمین آب تغذیه در بالادست پمپ آب تغذیه عمل می‌کند. در برخی طرح‌ها، این مخزن با درام فشارپایین<sup>۲</sup> یکپارچه می‌شود (مشابه طرح شکل ۴.۲). آب پیش‌گرم‌شده از درام فشارپایین در لوله‌های تبخیرکننده فشارپایین<sup>۳</sup> به‌عنوان یکی از المان‌های حرارتی اصلی بویلر بازیاب، توزیع می‌شود. این المان‌ها در یک حلقهٔ چرخشی مشتمل بر هدر بالا (درام)، هدر پایین و لوله‌های مربوطه قرار گرفته‌اند و آب طی چرخش طبیعی، انرژی حرارتی موجود در آن بخش از بویلر را جذب می‌کند و در یک فرایند دماثابت، به مایع اشباع و به‌تدریج به بخار اشباع تبدیل می‌شود. جداسازی بخار از مخلوط بخار و مایع، با جداکننده‌های داخل درام انجام می‌شود (شکل ۵.۲). بخار اشباع خارج‌شده از درام، به سوپرهیتر فشارپایین وارد شده و در آنجا به حالت بخار مافوق گرم درآمده و سپس از بویلر بازیاب خارج و برای انجام کار، به توربین بخار فشارپایین (در کاربردهای نیروگاهی) یا دیگر تجهیزات فرایندی مصرف‌کننده بخار فشارپایین (کاربردهای فرایندی) ارسال می‌شود. مایع اشباع باقی‌مانده در درام مجدداً در تبخیرکننده‌ها به گردش ادامه می‌دهد و بخشی از آن نیز به ورودی پمپ آب تغذیه می‌رود.

وظیفهٔ پمپ آب تغذیه، تأمین فشار و رساندن فشار آب‌کنده به فشار لازم برای مدارهای فشارمتوسط و فشاربالا است. آب لازم برای مدار فشارمتوسط، از یکی از طبقات میانی این پمپ گرفته شده و پس از عبور از اکونومایزر فشارمتوسط<sup>۴</sup> پیش‌گرم شده و سپس وارد درام فشارمتوسط<sup>۵</sup> می‌شود. به‌طور مشابه، آب تغذیهٔ خروجی از انتهای پمپ، به مدار فشارقوی ارسال و پس از عبور از اکونومایزر فشاربالا<sup>۶</sup> وارد درام فشاربالا<sup>۷</sup> می‌شود. آب تغذیه در هر یک از درام‌ها، در لوله‌های تبخیرکنندهٔ مربوطه توزیع و پس از گردش طبیعی، تغییر فاز می‌دهد و از مایع اشباع به بخار اشباع تبدیل می‌شود. مشابه درام فشارپایین، بخار اشباع به‌وسیلهٔ جداکننده‌های هر یک از درام‌ها جدا و از طریق لوله‌های مربوطه به المان‌های حرارتی سوپرهیترها (سوپرهیترهای فشارمتوسط<sup>۸</sup> و فشاربالا<sup>۹</sup>) وارد می‌شود. این سطوح حرارتی، آخرین مرحلهٔ تولید بخار هستند و در داغ‌ترین منطقهٔ بویلر بازیاب قرار دارند؛ به‌طوری‌که گازهای

1. feed water storage tank
3. LP evaporators
5. IP drum
7. HP drum
9. HP superheater

2. LP drum
4. IP economizer
6. HP economizer
8. IP superheater



شکل ۵.۲. مسیر تغییر فاز از مایع اشباع به بخار اشباع [4]

خروجی از انگروز توربین گاز، ابتدا به این سطوح برخورد می کنند و تبادل حرارت انجام می دهند. بخار خروجی از هر یک از سوپرهیترهای فشار متوسط و فشار بالا، برای انجام کار مکانیکی، به توربین های فشار متوسط و فشار قوی (در کاربردهای نیروگاهی) ارسال می شوند. به منظور کنترل دمای بخار تولیدی در مراحل عبور از سوپرهیترها، در هر یک از مدارهای

فشار متوسط و فشار قوی، از یک تجهیز با نام دی‌سوپرهیتر<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که در صورت نیاز، با پاشش آب اشباع به بخار، باعث کاهش دمای بخار تا حد تعیین شده می‌شود. ممکن است بویلرهای بازیاب در کاربردهای نیروگاهی مجهز به المان‌های بازگرمایش<sup>۲</sup> باشند (مشابه طرح شکل ۴.۲). در این حالت بخار خروجی از توربین فشار قوی از طریق اختلاط با بخار فشار متوسط در مراحل میانی و عبور از المان حرارتی بازگرمایش، مجدداً در مدار فشار متوسط استفاده می‌شود.

در شکل ۶.۲ الگوی تغییرات دما در سمت گاز (گازهای خروجی از آگزوز توربین گاز) و سمت آب (آب تغذیه و بخار) برای یک بویلر بازیاب سه‌فشاره به‌طور نمونه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، از یک سمت گازهای داغ خروجی از توربین، وارد بویلر بازیاب می‌شوند و به‌صورت تدریجی دمای خود را از دست می‌دهند تا با کمترین دما از دودکش خارج شوند. از طرف دیگر، آب ورودی به بویلر، پس از ورود به اکونومایزر، گرما را به‌صورت غیرمستقیم از گازهای داغ دریافت می‌کند و دمایش تا رسیدن به دمای جوش افزایش می‌یابد؛ سپس در اواپراتور به‌صورت کامل تبخیر و وارد سوپرهیتر می‌شود. در سوپرهیتر نیز به‌تدریج دمای آن افزایش می‌یابد تا به دمای مناسب برای ورود به توربین برسد.

در ساختار دمایی بویلر بازیاب، دو نقطه از اهمیت بالایی برخوردارند (شکل ۷.۲)؛ یکی «نزدیک‌ترین دما»<sup>۳</sup> که برابر است با اختلاف دمای آب خروجی از اکونومایزر و دمای اشباع در همان فشار. اگر این دما کم باشد، احتمال تشکیل بخار در بخش‌های پایانی اکونومایزر و آسیب دیدن لوله‌های آن وجود دارد. در نتیجه معمولاً در طراحی بویلر بازیاب، نزدیک‌ترین دما برابر با ۱۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر در نظر گرفته می‌شود تا از تبخیر آب در لوله‌های اکونومایزر پیشگیری شود. نقطه بعدی، دمای پینچ<sup>۴</sup> است که به اختلاف دمای اشباع با دمای گازهای داغ گفته می‌شود. به‌لحاظ نظری، هر چه این اختلاف کمتر باشد، بازده حرارتی بویلر بیشتر است، اما در عمل برای تحقق دمای پینچ کم، به در نظر گرفتن سطح انتقال حرارت زیاد و افزایش قیمت بویلر نیاز است. برای جلوگیری از افزایش نامعقول قیمت بویلر، دمای پینچ را معمولاً در حدود ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر می‌گیرند.

بویلرهای بازیاب اگرچه اساساً انرژی لازم برای تولید بخار را از یک منبع انرژی حرارتی — که کار اصلی خود را انجام داده — بازیابی می‌کنند و برخلاف بویلرهای متداول، سیستم احتراق

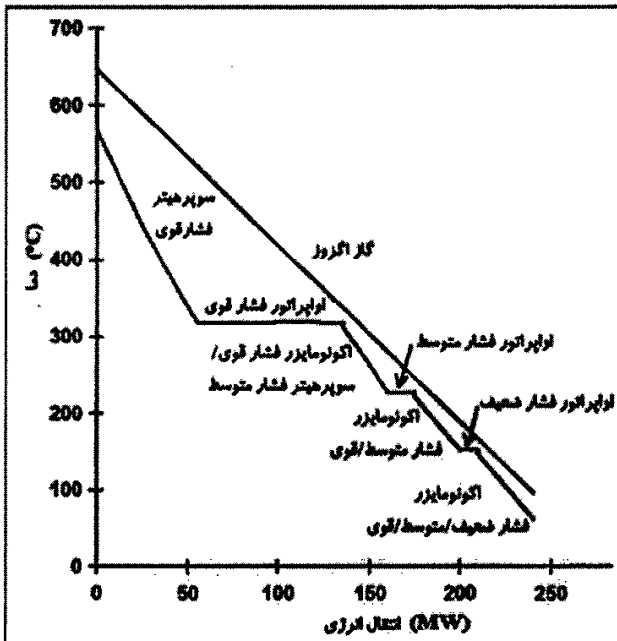
1. de-superheater (Attemperator)

2. re-heater

3. approach point

4. pinch point

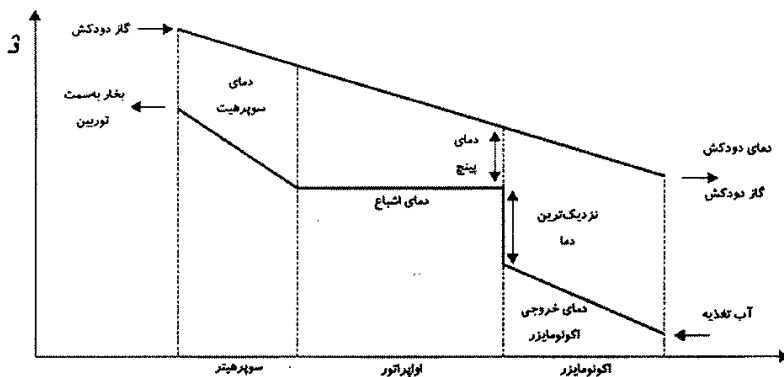
ندارند، باین حال در برخی موارد به یک سیستم احتراق اضافی<sup>۱</sup> مجهز می‌شوند. سیستم احتراق اضافی شامل چند ردیف مشعل چیده شده در داخل کانال بویلر بازیاب و تجهیزات و ملحقات مربوطه، باعث می‌شود هر وقت و به هر علت که توربین گاز در بار نامی خود کار نمی‌کند و در نتیجه انرژی ورودی به بویلر بازیاب کاهش می‌یابد، کمبود انرژی ورودی به بویلر جبران شود و تولید بخار در مقدار نامی باقی بماند. این مشعل‌ها که به صورت ردیفی و عمود بر جریان گازهای داغ قرار می‌گیرند (شکل ۸.۲)، بسته به مقدار انرژی لازم ممکن است یک یا دو مرحله‌ای باشند. در برخی کاربردهای خاص به‌ویژه تولید هم‌زمان، این سیستم احتراق به‌گونه‌ای طراحی و انتخاب می‌شود که حتی هنگام خارج از سرویس بودن توربین گاز، قابلیت تولید بخار برای بویلر بازیاب وجود داشته باشد.



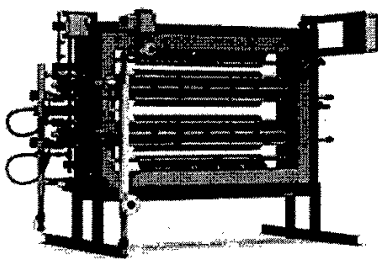
شکل ۶.۲. نمونه الگوی تغییرات دما در یک بویلر سه فشاره [۵]

1. supplementary firing

2. duct burner



شکل ۷.۲. توزیع دما و انتقال حرارت از سیال گرم به سرد در یک بویلر بازیاب و نمایش دمای پینچ و نزدیک‌ترین دما روی منحنی تغییرات دما [6]



شکل ۸.۲. نمای عمومی از یک داکت برنر [3]

بهره برداری پایدار و مطمئن از بویلرهای بازیاب، مستلزم قابلیت اطمینان بالای اجزایشان است. بر اساس بررسی‌ها و مطالعات انجام‌شده، برخی اجزای بویلر بازیاب که بیشتر در معرض خرابی‌اند و به‌واسطهٔ خرابی آن‌ها تولید مختل و متحمل هزینه خواهد شد عبارت‌اند از:

- سوپرهیتورها و ری‌هیتورها
- محل اتصال لوله‌ها به هدرها (در مناطق داغ)
- محل اتصال درام به لوله‌های پایین‌آورنده
- محل‌های خم لوله‌ها و سطوح حرارتی
- دی‌سوپرهیتورها
- اکونومایزرها
- اوپراتورها

### ۳.۲. مکانیسم خرابی‌ها در بویلرهای بازیاب

بروز خرابی در اجزای بویلرهای بازیاب می‌تواند ناشی از مکانیسم‌های خرابی باشد؛ اعم از خستگی سیکل پایین<sup>۱</sup>، خزش، شوک‌های حرارتی، اکسیداسیون، اختلاف انبساطی، خستگی- خوردگی<sup>۲</sup>، خوردگی در لوله‌ها، خوردگی تشدیدشده با جریان<sup>۳</sup>، برخورد محصولات خوردگی به اجزای پایین‌دست، رسوب‌گذاری روی سطوح و سایش. در جدول ۱.۲ آسیب‌های ممکن برای هر یک از اجزای اصلی بویلر بازیاب ذکر شده است.

جدول ۱.۲. مکانیسم‌های خرابی اجزای گوناگون بویلر بازیاب [7]

مکانیسم خرابی	اجزا	خستگی سیکل پایین	خزش	شوک حرارتی	اختلاف انبساطی	خستگی- خوردگی	اکسیداسیون	خوردگی شیمیایی	خوردگی تشدیدشده با جریان	با اجزای پایین‌دست	بر خورد محصولات خوردگی
دما پا <sup>۴</sup>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ری‌هیترها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
اواپراتورها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
اکونوماایزرها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
درام	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
لوله‌کشی‌ها <sup>۵</sup>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
شیرها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
فین‌ها و لوله‌ها <sup>۶</sup>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
روکش و جداره	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
داکت‌ها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
دمپرها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
سازه‌ها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
دودکش‌ها	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

\*attemperators \*\*piping \*\*\*fines and tubes

1. Low Cycle Fatigue (LCF)

2. corrosion-fatigue

3. Flow Accelerated Corrosion (FAC)



## منابع

- [۱] گزارش عملکرد سال ۱۳۹۷ صنعت آب و برق، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی وزارت نیرو، تهران، خرداد ۱۳۹۸.
- [2] Çengel, Y. A. and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill, 2006.
- [3] Ganapathy, V., *Steam Generators and Waste Heat Boilers for Process and Plant Engineers*, Taylor & Francis Group, 2015.
- [4] *Operator Training Manual Combined Cycle Fundamentals*, Al Ezzel Power.
- [5] Kehlhofer, R., B. Rukes, F. Hannemann and F. Stirnimann, *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*, PennWell, 2009.
- [6] Rackley, S. A., *Carbon Capture and Storage*, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [7] Akber Pasha, R. A., "babcockpower," [Online]. Available: <https://www.babcockpower.com/literature-library/>.



## فصل ۳

### مواد مورد استفاده در لوله‌های بویلر

#### ۱.۳. مقدمه

با توجه به دما و فشار بالای بهره‌برداری در بویلرها، تقریباً تمامی تجهیزات اصلی بویلر از فولاد ساخته می‌شوند. افزودن عناصر گوناگون به فولادهای کربنی ساده، باعث افزایش مقاومت فولادها در مقابل مکانیسم‌های خرابی گوناگون فعال در دماهای بالا می‌شود. از این‌رو در این فصل، ابتدا انواع فولاد و تأثیر عناصر گوناگون بر خواص آن‌ها بررسی می‌شود. از آنجاکه انتخاب مواد مناسب برای تجهیزات گوناگون بویلر، با دانستن عوامل مؤثر بر استحکام آن‌ها در شرایط گوناگون بهره‌برداری امکان‌پذیر است، در ادامه این عوامل بررسی و سپس جنس تجهیزات اصلی بویلر به تفکیک بررسی می‌شود. در پایان نیز به‌منظور آشنایی با اطلاعات موجود در استانداردهای گوناگون، پاره‌ای اطلاعات موجود در استانداردهای گوناگون ارائه می‌شود. مواد پرکاربرد در بویلرهای سیکل‌های ترکیبی نیز در انتهای همین فصل ارائه شده است.

#### ۲.۳. انواع فولاد

فولادها آلیاژهای پایه آهنی دارای کربن (به‌طور کلی کمتر از ۰.۲٪) و برخی عناصر دیگرند که بر اساس ترکیب شیمیایی، روش تولید و موارد کاربرد طبقه‌بندی می‌شوند. در این قسمت، نحوه طبقه‌بندی فولادها بر اساس ترکیب شیمیایی، بررسی می‌شود. در این نوع طبقه‌بندی، فولادها را به دو دسته فولادهای غیرآلیاژی (کربنی) و فولادهای آلیاژی تقسیم می‌کنند.

#### ۱.۲.۳. فولادهای غیرآلیاژی (کربنی)

اصطلاح فولاد کربنی به این معنی نیست که دیگر عناصر آلیاژی در این نوع فولاد وجود ندارد، بلکه مقدار عناصر آلیاژی در فولادهای کربنی، از مقدار مشخصی فزاینده‌تر نمی‌رود (جدول ۱.۳).

جدول ۱.۳. مقدار عناصر آلیاژی مشخص‌کننده مرز فولادهای غیرآلیاژی و آلیاژی [۱]

مقادیر (%)	عناصر مشخص‌شده	
	نماد	نام
۰/۱۰	Al	آلومینیوم
۰/۱۰	Bi	بیس‌موت
۰/۱۰۰۰۸	B	برن
۰/۳۰	Cr	کروم
۰/۱۰	Co	کبالت
۰/۴۰	Cu	مس
۰/۰۵	-	لانتانیدها
۰/۴۰	Pb	سرب
۰/۶۵*	Mn	منگنز
۰/۰۸	Mo	مولیبدن
۰/۳۰	Ni	نیکل
۰/۰۶	Nb	نیوبیم
۰/۱۰	Se	سلنیم
۰/۵۰	Si	سیلیکون
۰/۱۰	Te	تلوریم
۰/۰۵	Ti	تیتانیوم
۰/۱۰	W	تنگستن
۰/۱۰	V	وانادیم
۰/۰۵	Zr	زیرکونیم
۰/۰۵	-	بقیه عناصر تعیین‌شده (به‌جز کربن، نیتروژن، فسفر و گوگرد) (هر کدام)

\* وقتی مقدار مشخص‌شده فقط برای منگنز در نظر گرفته شود، این مقدار برابر ۱/۸٪ خواهد بود.  
تذکر: مقادیر مشخص‌شده برای هر عنصر با همان دقتی که محاسبه شده‌اند، در جدول گزارش شده‌اند.

- بسته به مقدار کربن موجود در فولاد، فولادهای غیرآلیاژی به سه دسته تقسیم می‌شوند:
- الف) کم‌کربن: با کمتر از ۰/۳۰٪ کربن
  - ب) با کربن متوسط: بین ۰/۳۰٪ تا ۰/۶۰٪ کربن
  - ج) پرکربن: با بیش از ۰/۶۰٪ کربن

در یک دسته‌بندی دیگر برحسب وجود دیگر عناصر، فولادهای غیرآلیاژی به سه دسته تقسیم شده‌اند:

- الف) فولادهای کربنی ساده که مقدار منگنز آن‌ها کمتر از ۰.۱٪ است؛
- ب) فولادهای کربنی با منگنز بالا که مقدار منگنز آن‌ها بیش از ۰.۱٪ است؛
- ج) فولادهای خوش‌تراش<sup>۱</sup> که دارای دست‌کم ۰.۰۷۰٪ گوگرد و (یا) بیسموت، سرب، فسفر، سلنیم و تلوریم هستند [۱، ۹].

### ۲.۲.۳. فولادهای آلیاژی

فولادهای آلیاژی فولادهایی‌اند که درصد هر یک از عناصر آن‌ها، بیشتر از مساوی با مقادیر مشخص‌شده<sup>۲</sup> در جدول ۱.۳ باشد. فولادهای آلیاژی، بسته به مقدار عناصر آلیاژی موجود در آن‌ها (به‌جز کربن، نیتروژن، فسفر و گوگرد)، به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- الف) فولادهای کم‌آلیاژ<sup>۳</sup> که مجموع عناصر آلیاژی آن‌ها کمتر از ۵٪ است؛
  - ب) فولادهای پرآلیاژ<sup>۴</sup> که مجموع عناصر آلیاژی آن‌ها بیشتر از یا مساوی ۵٪ است.
- تذکر: از دیرباز روش‌های گوناگونی برای حفاظت محصولات آهنی و فولادی در برابر خوردگی وجود داشته است. در حال حاضر نیز این کار به‌طور جدی و گسترده دنبال می‌شود. این روش‌ها شامل رنگ‌زدن و پوشش‌دادن قطعه با مواد فلزی و غیرفلزی می‌شود. این پوشش، از زنگ‌زدن فولاد در محیط‌های کاری جلوگیری می‌کند. باید توجه داشت که این پوشش‌ها عمر محدودی دارند؛ بنابراین برای سالم‌ماندن قطعه اصلی، پس از مدت زمان معینی، پوشش را تعویض می‌کنند. معمولاً آلیاژسازی، بهترین روش برای کاهش میزان خوردگی یا حذف آن است. استفاده از این روش باعث می‌شود که علاوه بر سطح فلز، تمامی قسمت‌های داخلی فلز هم در مقابل خوردگی مقاوم شوند. خانواده بزرگی از فولادهای آلیاژی، در برابر خوردگی، حرارت یا هر دوی آن‌ها مقاومت خوبی نشان می‌دهند. این نوع فولاد را زنگ‌زن<sup>۵</sup> می‌گویند [۹]. با توجه به وجود شرایط خورنده در محیط بویلر، استفاده از فولادهای زنگ‌زن اهمیت خاصی پیدا می‌کند. در ادامه، فولادهای زنگ‌زن بررسی می‌شوند.

---

1. free cutting steels  
3. low alloy steels  
5. stainless steels

2. limiting value  
4. high alloy steels

### ۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن

فولادهای زنگ‌نزن، فولادهای پُرآلیاژی‌اند که دست‌کم ۱۱/۵٪ کروم دارند. ممکن است برای افزایش مقاومت به خوردگی و ایجاد دیگر خواص مفید، عناصر آلیاژی دیگری نیز به آن‌ها افزوده شود. فولادهای زنگ‌نزن، مقاومت عالی به خوردگی و اکسیداسیون، خواص شکل‌دهی خوب، ظاهری جالب و گستره استحکام وسیعی دارند. آن‌ها معمولاً به پنج دسته تقسیم می‌شوند:

#### ۱.۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی

این فولادها برای ایجاد ساختار آستنیتی در دمای محیط، دارای مقادیر کافی نیکل یا ترکیبی از نیکل، منگنز و نیتروژن‌اند. آن‌ها با عملیات حرارتی سخت نمی‌شوند، اما با عملیات سردکاری<sup>۱</sup> می‌توانند سختی لازم را به‌دست آورند. این فولادها نرمی<sup>۲</sup> و چقرمگی<sup>۳</sup> خوب، شکل‌پذیری خوب و مقاومت عالی در برابر خوردگی دارند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی علاوه‌بر مقاومت به اکسیداسیون و استحکام زیاد در دماهای بالا، معمولاً دارای خواص برودتی<sup>۴</sup> عالی نیز هستند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در محیط‌های کلریدی دچار خوردگی تحت تنش<sup>۵</sup> می‌شوند و همچنین مستعد خوردگی حفره‌ای<sup>۶</sup>، شیاری<sup>۷</sup> و پوسیدگی جوش<sup>۸</sup> هستند؛ به‌جز در حالتی که ترکیب شیمیایی، عملیات حرارتی و شرایط بهره‌برداری آن‌ها به‌دقت کنترل شود. اگر عملیات حرارتی آنیل<sup>۹</sup> روی این فولادها انجام شده باشد، غیرمغناطیسی می‌شوند؛ هرچند ممکن است بعضی از آن‌ها با عملیات سردکاری کمی خاصیت مغناطیسی پیدا کنند [1].

#### ۲.۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن فریتی

فولادهای زنگ‌نزن فریتی، فولادهای زنگ‌نزن کم‌کربنی‌اند که کروم اصلی‌ترین عنصر آلیاژی‌شان است و ریزساختار آن‌ها ترکیبی از فریت و کاربیدهاست. این نوع فولاد، با عملیات حرارتی سخت نمی‌شود، اما می‌توان آن را با عملیات سردکاری نسبتاً سخت کرد. همچنین، نرمی و شکل‌پذیری خوبی دارد، اما در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، در دماهای بالا استحکام کمتری دارد. فولادهای زنگ‌نزن فریتی مقاومت خوبی در مقابل خوردگی و

1. cold working
3. toughness
5. Stress Corrosion Cracking (SCC)
7. crevice corrosion
9. annealing heat treatment

2. ductility
4. cryogenic properties
6. pitting corrosion
8. weld decay

اکسیداسیون دارند، به طوری که استفاده از آن‌ها در محیط‌های کلریدی، به دلیل مقاومت عالی در مقابل خوردگی تحت تنش و همچنین مقاومت خوب در مقابل خوردگی حفره‌ای و شیار، بسیار مرسوم است. این خاصیت فولادهای فریتی باعث می‌شود تا برای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی که معمولاً در اثر خوردگی تحت تنش در محیط‌های کلریدی دچار خرابی می‌شوند، جایگزین مناسبی باشند. آن‌ها خاصیت مغناطیسی نیز دارند [1].

### ۳.۲.۳. فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی

فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی که کروم عنصر آلیاژی اصلی آن‌هاست، ۰.۸٪ تا ۱٪ کربن دارند. آن‌ها از قابلیت سخت شدن با عملیات حرارتی برخوردارند و چنانچه آبدهی<sup>۱</sup> و بازپخت<sup>۲</sup> شده باشند، استحکام و سختی بالا و نرمی و چقرمگی نسبتاً خوبی دارند. با افزایش استحکام، این خواص کاهش می‌یابد. فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی، در محیط‌های معتدل، در مقابل خوردگی مقاومت می‌کنند و خاصیت مغناطیسی نیز دارند [1].

### ۳.۲.۴. فولادهای زنگ‌نزن با قابلیت رسوب‌سختی

عناصر آلیاژی اصلی فولادهای زنگ‌نزن با قابلیت رسوب‌سختی<sup>۳</sup>، کروم و نیکل هستند. این فولادها می‌توانند با عملیات حرارتی رسوب‌سختی تا مقادیر بالایی مستحکم شوند. آن‌ها نرمی و چقرمگی خوب و مقاومت متوسط تا خوب در مقابل خوردگی دارند که بهتر از خواص مشابه در فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی است. این فولادها پس از خروج از حالت محلول جامد، بر اساس ریزساختارشان به فولادهای زنگ‌نزن با قابلیت رسوب‌سختی آستنیتی، نیمه‌آستنیتی و مارتنزیتی تقسیم می‌شوند [۹].

### ۳.۲.۵. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی-فریتی

کروم، نیکل و مولیبدن عناصر آلیاژی اصلی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی-فریتی<sup>۴</sup> هستند و ریزساختار این فولادها در دمای اتاق، ترکیبی از فریت و آستنیت است (در حدود ۴۰٪ تا ۶۰٪). در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، این فولادها استحکام کششی و تنش جاری شدن

- 
1. quench
  2. temper
  3. precipitation hardening steels
  4. austenitic-ferritic (duplex) stainless steels

بالاتر و در مقابل خوردگی‌های کلریدی تحت تنش<sup>۱</sup>، خوردگی حفره‌ای و خوردگی شیاری، مقاومت بیشتری دارند. نرمی و چقرمگی این فولادها بین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی است. آن‌ها دارای خواص مغناطیس‌اند[۱].

### ۳.۳. تأثیر عناصر گوناگون بر خواص فولاد

در جدول ۲.۳، اثر برخی عناصر بر خواص فولاد نشان داده شده است [۱۰]. در ادامه، اثر عناصر گوناگون را با جزئیات بیشتر بررسی می‌کنیم.

#### کربن (C)

کربن مهم‌ترین عنصر آلیاژی فولاد است و بیشترین اثر را روی آن دارد. نقطه ذوب کربن ۳۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است. مقدار کربن اساساً هیچ تأثیری روی مقاومت به خوردگی فولاد در آب، اسید و گازهای داغ ندارد. به‌طور کلی کربن سه اثر بر خواص فولادها دارد:

۱. افزایش استحکام و سختی و درمقابل، کاهش نرمی آلیاژ؛
۲. افزایش شدید سختی‌پذیری<sup>۲</sup>؛
۳. کاهش خواص انعطاف‌پذیری و چکش‌خواری و کاهش قابلیت جوشکاری و ماشینکاری<sup>۳</sup>.

#### کروم (Cr)

کروم یک عنصر کاربیدزاست که استحکام کششی فولاد را افزایش می‌دهد. کاربیدهای کروم باعث افزایش مقاومت سایشی فولاد می‌شوند. کروم ساختمان بلوری جسم را تصفیه و مرتب می‌کند و مجموع این دو اثر، چقرمگی و سختی جسم را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، کروم پنج اثر بر خواص فولادها دارد:

۱. افزایش محدود سختی‌پذیری؛
۲. کندشدن نرخ نرم‌شدن در عملیات بازیخت و تولید سختی ثانویه؛
۳. افزایش مقاومت سایشی در فولادهای پُرکربن؛
۴. افزایش استحکام در دماهای بالا؛
۵. افزایش مقاومت در مقابل خوردگی و اکسیداسیون.

1. chloride stress corrosion cracking  
3. workability

2. hardenability



جدول ۲.۳. میزان تأثیر عناصر گوناگون بر خواص فولاد [۱۰]

عناصر آلیاژی	خواص مکانیکی													خواص مغناطیسی								
	سختی	استحکام	کشش تسلیم	ازدیاد طول نسبی	کاهش سطح مقطع	چقرمگی ضربه	الاستیسیته	استحکام گرمایی	سرعت خنک‌شدن	تشکیل کاربید	استحکام سایش	قابلیت آهنگری	قابلیت براده‌برداری	پوسته‌شدن	قابلیت نیروی مقاوم خوردگی	مقاومت خوردگی	هیستریزیس	قابلیت نفوذ	نیروی پسماندزدا	پسماند	اتلاف توان	
سیلیسیم	+	+	۲+	-	≈	-	۳+	+										۲-	۲+	۲-	۲+	۲+
منگنز در فولادهای پرلیتی	+	+	+	≈	≈	≈	+	≈	-	≈	۳-	+	-	≈	≈	۴						
منگنز در فولادهای آستنیتی	۳-	+	-	۲+	≈	۴	۴	۴	۲-	۴	۴	۳-	۲-	۲-	۴	۴	غیر مغناطیسی					
کروم	۲+	۲+	۲+	-	-	-	+	+	۳-	۲+	+	-	۴	۳-	۲+	۳+			+	۲+		
نیکل در فولادهای پرلیتی	+	+	+	≈	≈	≈	۴	+	۲-	۴	۲-	-	-	-	۴	۴			۲+	۲+		
نیکل در فولادهای آستنیتی	۲-	+	-	۲+	۲+	۳+	۴	۳+	۲-	۴	۴	۳-	۳-	۲-	۲+	۲+	غیر مغناطیسی					
آلومینیم	۴	۴	۴	۴	-	-	۴	۴	۴	۴	۴	۲-	۴	۲-	۳+	۴			۲+	۲+		
تنگستن	+	+	+	-	-	≈	۴	۲+	۲-	۲+	۳+	۲-	۲-	۲-	۴			۳+	۳+			
وانادیم	+	+	+	≈	≈	+	+	۲+	۲-	۴+	۲+	+	۴	-	+	+						
کیالت	+	+	+	-	-	-	۴	۲+	۲+	۴	۳+	-	≈	-	۴	۴			۲+	۳+	۳+	
مولیبدن	+	+	+	-	-	+	۴	۲+	۲-	۳+	۲+	-	-	۲+	۲+	۴			+			
مس	+	+	۲+	≈	≈	≈	۴	+	۴	۴	۴	۳-	≈	≈	۴	+						
گوگرد	۴	۴	۴	-	-	-	۴	۴	۴	۴	۴	۳-	۳+	۴	۴	-						
فسفر	+	+	+	-	-	۳-	۴	۴	۴	۴	۴	-	۲+	۴	۴							
اعداد: نشانگر شدت افزایش و کاهش							- : کاهش خواص							+ : افزایش خواص								
							؟ : تأثیر ناشناخته و نامشخص							≈ : تقریباً بدون تأثیر								

**مولیبدن (Mo)**

مولیبدن کاربردزاست و معمولاً با عناصر آلیاژی دیگر به‌کار می‌رود و با کاهش سرعت سردکردن بحرانی، سختی‌پذیری را بهبود می‌بخشد. مولیبدن باعث افزایش نقطه تسلیم می‌شود و استحکام نهایی را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی مولیبدن پنج اثر بر خواص فولادها دارد:

۱. کاهش شدید سختی‌پذیری؛

۲. کند کردن نرخ نرم شدن در فرایند بازیخت و تولید سختی ثانویه؛
۳. افزایش استحکام کششی و استحکام خزشی در دمای بالا؛
۴. افزایش قابلیت جوشکاری و کاهش قابلیت فورجینگ (آهنگری)<sup>۱</sup>؛
۵. افزایش مقاومت در مقابل خوردگی؛ به‌ویژه در محلول‌های کلریدی برای فولادهای زنگ‌نزن.

#### منگنز (Mn)

- منگنز اکسیژن زداست و به‌عنوان عامل احیا در همه فولادها به‌کار می‌رود. منگنز در فریت حل نمی‌شود و تشکیل کاربید می‌دهد. به‌طور کلی منگنز چهار اثر بر خواص فولادها دارد:
۱. افزایش استحکام و سختی (تأثیر کمتر نسبت به کربن)؛
  ۲. افزایش محدود سختی‌پذیری؛
  ۳. کاهش قابلیت جوشکاری (تأثیر کمتر نسبت به کربن)؛
  ۴. افزایش ضریب انبساط حرارتی و کاهش ضریب هدایت حرارتی و الکتریکی.

#### نیکل (Ni)

- نیکل در فریت حل می‌شود و کاربید و اکسید تشکیل نمی‌دهد. به‌طور کلی نیکل سه اثر بر خواص فولادها دارد:
۱. افزایش نسبی سختی‌پذیری؛
  ۲. افزایش چقرمگی آلیاژ حتی در دماهای پایین؛
  ۳. کمک به سخت کردن محلول جامد.

#### فسفر (P)

- فسفر معمولاً یک عنصر آلیاژی نامطلوب در فولادها تلقی می‌شود، زیرا هنگام انجماد، جدایش و تجمع اولیه شدیدی دارد و با محدود کردن چشمگیر محدوده فاز گاما، باعث تجمع ثانویه زیاد در حالت جامد می‌شود. به‌طور کلی، فسفر سه اثر بر خواص فولادها دارد:
۱. افزایش استحکام و سختی و کاهش شدید نرمی و چقرمگی؛
  ۲. افزایش تردی آلیاژ در دمای بالا؛
  ۳. بهبود مقاومت در برابر خوردگی در فشارهای پایین (فشار محیط).

### گوگرد (S)

گوگرد بیشترین تجمع و جدایش را بین عناصر موجود در فولاد دارد و از آنجاکه میل چشمگیری به ترکیب با منگنز دارد، با تشکیل سولفید منگنز، اثرات مضر آن از بین می‌رود. به‌طور کلی، گوگرد دو اثر بر خواص فولادها دارد:

۱. کاهش نرمی و چقرمگی؛
۲. افزایش قابلیت ماشینکاری و کاهش قابلیت جوشکاری.

### سیلیسیم (Si)

به فولادی که بیش از ۰/۴٪ سیلیسیم داشته باشد، فولاد سیلیسیم دار می‌گویند. سیلیسیم، اکسیژن زداست و منطقه پایداری فاز گاما را به شدت کاهش می‌دهد و در برخی مواقع به‌عنوان احیاکننده به‌کار می‌رود. به‌طور کلی، چهار اثر بر خواص فولادها دارد:

۱. افزایش محدود سختی پذیری؛
۲. افزایش نرخ نرم‌شدن در فرآیند بازیخت آلیاژ؛
۳. افزایش مقاومت در برابر اکسیداسیون در دماهای بالا؛
۴. افزایش حساسیت به دی‌کربوره شدن<sup>۱</sup> و گرافیت‌شدن.

### وانادیم (V)

وانادیم میل بسیار شدیدی به تشکیل کاربید دارد و به همین دلیل به مقدار بسیار کم به‌کار می‌رود. همچنین احیاکننده‌ای بسیار قوی است. از آنجاکه وانادیم تا اندازه‌ای نامحلول در فریت است، در چقرمگی فولاد مؤثر است. نرم‌کردن فولاد وانادیم‌دار با روش بازیخت بسیار دشوار است و بنابراین بیشتر در فولادهای ابزارسازی به‌کار می‌رود.

### تنگستن (Tu)

تنگستن به مقدار بسیار زیاد در فولادهای ابزارسازی استفاده می‌شود، زیرا سختی فولاد را حتی تا دمای سرخ‌شدن حفظ می‌کند. وجود آن در فولاد، باعث ایجاد ساختار دانه‌ریز و متراکم و در نتیجه افزایش سختی و چقرمگی می‌شود. اثر تنگستن مانند مولیبدن است؛ با این تفاوت که مقادیر بیشتری از آن را باید به فولاد اضافه کرد [۱، ۱۱].

### ۴.۳. فاکتورهای انتخاب مواد

موادی که برای قسمت‌های گوناگون بویلر انتخاب می‌شوند، باید خواص لازم را برای مقاومت در شرایط کاری خاص آن قسمت داشته باشند. یکی از این خواص مهم و مؤثر، قابلیت تحمل آلیاژ در دمای بهره‌برداری از آن آلیاژ است. در جدول ۳.۳، حداکثر دمای تحمل‌پذیر برای فولادهای به‌کاررفته در بویلر بر اساس استاندارد ASME و دستورالعمل سازندگان بویلر ارائه شده است. علاوه بر دمای بهره‌برداری از آلیاژ، دیگر خواص توجه‌برانگیز برای اجزای گوناگون بویلر و فولادهایی که می‌توانند این خواص را تأمین کنند، در جدول ۴.۳ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۴.۳ مشاهده می‌شود، یکی از فاکتورهای مؤثر در انتخاب مواد برای سوپرهیترها و ری‌هیترها، مقاومت در مقابل اکسیداسیونی است که در دماهای بالا خودبه‌خود رخ می‌دهد. در جدول ۵.۳، دمایی که اکسیداسیون حرارتی آلیاژهای به‌کاررفته در سوپرهیترها و ری‌هیترها شدت می‌یابد، ارائه شده است. بر اساس خواص ذکرشده در جدول ۶.۳، نوع فولادهای مورد استفاده در بویلر و ترکیب آلیاژی آن‌ها با جزئیات بیشتری ارائه شده است.

جدول ۳.۳. حداکثر دمای مجاز بهره‌برداری از فولادهای مورد استفاده در بویلر بر اساس استاندارد ASME و دستورالعمل سازندگان بویلر [2]

نوع لوله فولادی	معادل در ASME	ASME فازنه‌ایت (سانتی‌گراد)	بابکوک و ویلکوکس <sup>۱</sup> فازنه‌ایت (سانتی‌گراد)	کمبراسشن انجینیرینگ <sup>۲</sup> فازنه‌ایت (سانتی‌گراد)	ریلی استوکر <sup>۳</sup> فازنه‌ایت (سانتی‌گراد)
فولاد کربنی	SA-178 C	۱۰۰۰ (۵۲۸)	۹۵۰ (۵۱۰)	۸۵۰ (۴۵۴)	۸۵۰ (۴۵۴)
	SA-192	۱۰۰۰ (۵۲۸)	۹۵۰ (۵۱۰)	۸۵۰ (۴۵۴)	۸۵۰ (۴۵۴)
	SA-210 A1	۱۰۰۰ (۵۲۸)	۹۵۰ (۵۱۰)	۸۵۰ (۴۵۴)	۸۵۰ (۴۵۴)
کربن-مولیبدن	SA-209 T1	۱۰۰۰ (۵۲۸)	-	۹۰۰ (۴۸۲)	۹۰۰ (۴۸۲)
	SA-209 T1a	۱۰۰۰ (۵۲۸)	۹۷۵ (۵۲۴)	-	-
کروم-مولیبدن	SA-213 T11	۱۲۰۰ (۶۴۹)	۱۰۵۰ (۵۶۶)	۱۰۲۵ (۵۵۲)	۱۰۲۵ (۵۵۲)
	SA-213 T22	۱۲۰۰ (۶۴۹)	۱۱۱۵ (۶۰۲)	۱۰۷۵ (۵۸۰)	۱۰۷۵ (۵۸۰)
زنگ‌نزن	SA-213 321H	۱۵۰۰ (۸۱۶)	۱۴۰۰ (۷۶۰)	-	۱۵۰۰ (۸۱۶)
	SA-213 347H	۱۵۰۰ (۸۱۶)	-	۱۳۰۰ (۷۰۴)	-
	SA-213 304H	۱۵۰۰ (۸۱۶)	۱۴۰۰ (۷۶۰)	۱۳۰۰ (۷۰۴)	-

1. Babcock and Wilcox  
3. Riley Stoker

2. Combustion Engineering

جدول ۴.۳. خواص لازم برای اجزای اصلی بویلر و فولادهایی که می‌توانند این خواص را تأمین کنند [2].

نام جزء	خواص	نوع فولاد
لوله‌های دیواره آبی	استحکام کششی، مقاومت در مقابل خوردگی، قابلیت جوشکاری	فولادهای کربنی و C-Mo
درام	استحکام خستگی - خوردگی، استحکام کششی، مقاومت در مقابل خوردگی، قابلیت جوشکاری	فولادهای کربنی، C-Mo و C-Mn
هدرها	استحکام کششی، قابلیت جوشکاری، استحکام خزشی	فولادهای کربنی، C-Mn، C-Mo و Cr-Mo
سوپرهیترا و ری‌هیترا	قابلیت جوشکاری، استحکام خزشی، مقاومت در مقابل اکسیداسیون، ضریب انبساط حرارتی کم	فولادهای Cr-Mo؛ فولادهای زنگ‌زن آستنیتی
لوله‌های بخار*	قابلیت جوشکاری، استحکام خزشی، مقاومت در مقابل اکسیداسیون، ضریب انبساط حرارتی کم	فولادهای Cr-Mo؛ فولادهای زنگ‌زن آستنیتی

steam pipes

جدول ۵.۳. دمایی که اکسیداسیون حرارتی شدت می‌یابد [3].

دمای تقریبی*		آلیاژ فولاد
فارنهایت	سانتی‌گراد	
۱۰۲۵	۵۵۰	C
۱۰۵۰	۵۷۰	1/2 Mo
۱۰۷۰	۵۸۰	1/2 Cr - 1/2 Mo
۱۱۰۰	۶۰۰	1Cr - 1/2 Mo
۱۱۰۰	۶۰۰	2Cr - 1/2 Mo
۱۱۰۰	۶۰۰	2 1/4 Cr - 1Mo
۱۴۰۰	۷۶۰	3Cr - 1/2 Mo - 1 1/4 Si
۱۱۵۰	۶۵۰	5Cr - 1/2 Mo
۱۵۵۰	۸۵۰	5Cr - 1/2 Mo - 1 1/2 Si
۱۱۵۰	۶۵۰	5Cr - 1/2 Mo - Ti
۱۲۵۰	۶۸۰	7Cr - 1/2 Mo
۱۴۲۰	۷۷۰	9Cr - 1Mo
۱۴۲۰	۷۷۰	12Cr
۱۵۵۰	۸۵۰	17Cr
۱۶۰۰	۸۷۰	18Cr - 8Ni
۱۷۰۰	۹۳۰	18Cr - 8Ni, Ti
۱۶۵۰	۹۰۰	18Cr - 8Ni, Cb
۱۶۵۰	۹۰۰	18Cr - 8Ni, Mo
۲۰۰۰	۱۱۰۰	25Cr - 12Ni
۲۰۰۰	۱۱۰۰	25Cr - 20Ni
۲۰۰۰	۱۱۰۰	27Cr

\*دمایی که سرعت اکسیداسیون، ۱۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع در ۱۰۰۰ ساعت می‌شود.

جدول ۶.۳. مواد مورد استفاده در تجهیزات بویلر [2]

Alloy	Product form	ASME or ASTM specification	Grade	Minimum tensile strength, ksi	Minimum yield strength, ksi	Composition(s), %							
						C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
<b>Carbon steels</b>													
Low strength	Tubes	SA-192	...	(47)	(26)	0.06-0.18	0.27-0.63	0.048	0.058	0.25	...	...	...
	Tubes (ERW)	SA-178	A	...	...	0.06-0.18	0.27-0.63	0.050	0.060	...	...	...	
	Tubes (ERW)	SA-226	...	(47)	(26)	0.06-0.18	0.27-0.68	0.050	0.060	...	...	...	
Intermediate strength	Tubes	SA-210	A-1	60	37	0.27	0.93	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...
	Tubes (ERW)	SA-178	C	60	37	0.35	0.30	0.050	0.060	...	...	...	
	Pipe	SA-106	B	60	35	0.30	0.29-1.06	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...
	Castings(b)	SA-216	WCA	60	30	0.25	0.70	0.040	0.045	0.60	...	...	...
	Structural shapes	A36	...	58	36	0.26	...	0.040	0.05	...	...	...	...
High strength	Pipe	SA-106	C	70	40	0.35	0.29-1.06	0.048	0.058	0.10 Min	...	...	...
	Plate	SA-299	...	75	40	0.30	0.86-1.55	0.035	0.040	0.13-0.33	...	...	...
	Plate	SA-515	70	70	38	0.35	0.90	0.035	0.04	0.13-0.33	...	...	...
	Forgings	SA-105	...	70	36	0.35	0.60-1.05	0.040	0.050	0.35	...	...	...
	Castings(b)	SA-216	WCB	70	36	0.30	1.00	0.040	0.045	0.60	...	...	...
<b>Ferritic alloys</b>													
C-0.5Mo	Tubes	SA-209	T1	55	30	0.10-0.20	0.30-0.80	0.045	0.045	0.10-0.50	...	...	0.44-0.65
	Forgings	SA-336	F12	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.10-0.60	...	0.80-1.10	0.45-0.65
Cr-0.5Mo	Tubes	SA-213	T12	60	30	0.15	0.30-0.61	0.045	0.045	0.50	...	0.80-1.25	0.44-0.65
	Pipe	SA-335	F12	60	30	0.15	0.30-0.61	0.045	0.045	0.50	...	0.80-1.25	0.44-0.65
	Plate	SA-387	12Cr2	65	40	0.17	0.36-0.69	0.035	0.040	0.13-0.32	...	0.74-1.21	0.40-0.65
1.25Cr-0.5Mo	Forgings	SA-182	F12	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.10-0.60	...	0.80-1.25	0.44-0.65
	Tubes	SA-213	T11	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50-1.00	...	1.00-1.50	0.44-0.65
	Pipe	SA-335	F11	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50-1.00	...	1.00-1.50	0.44-0.65
	Plate	SA-387	11Cr2	75	45	0.17	0.36-0.69	0.035	0.040	0.44-0.86	...	0.94-1.56	0.40-0.70
	Forgings	SA-182	F11	70	40	0.10-0.20	0.30-0.80	0.040	0.040	0.50-1.00	...	1.00-1.50	0.44-0.65
2.25Cr-1Mo	Castings(b)	SA-217	WC6	70	40	0.20	0.50-0.80	0.040	0.045	0.60	...	1.00-1.50	0.45-0.65
	Tubes	SA-213	T22	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50	...	1.90-2.60	0.87-1.13
	Pipe	SA-335	P22	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.50	...	1.90-2.60	0.87-1.13
	Plate	SA-387	22Cr1	60(c)	30(c)	0.17	0.27-0.63	0.035	0.035	0.50	...	1.88-2.62	0.85-1.15
	Forgings	SA-387	Cr2	75(d)	45(d)	...	...	...	...	...	...	...	...
5Cr-0.5Mo	Forgings	SA-182	F22	75	45	0.15	0.30-0.60	0.040	0.040	0.50	...	2.00-2.50	0.87-1.13
	Castings-(b)	SA-217	WC9	70	40	0.18	0.40-0.70	0.040	0.045	0.60	...	2.00-2.75	0.90-1.20
9Cr-1Mo	Tubes	SA-213	T9	60	30	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.25-1.00	...	8.00-10.00	0.90-1.10
<b>Austenitic stainless alloys</b>													
3-8Ni	Tubes	SA-213	TP304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	8.00-11.00	18.00-20.00	...
	Pipe	SA-376	TP304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	8.00-11.00	18.00-20.00	...
	Plate	SA-240	304	75	30	0.08	2.00	0.045	0.035	1.00	8.00-10.50	18.00-20.00	...
		SA-240	304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	8.00-10.00	18.00-20.00	...
	Forgings	SA-182	F304H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	1.00	8.00-11.00	18.00-20.00	...
		SA-213	TP321H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	9.00-13.00	17.00-20.00	...
18Cr-10Ni-Ti	Tubes(e)	SA-213	TP321H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	9.00-13.00	17.00-20.00	...
18Cr-10Ni-Cb	Tubes(f)	SA-213	TP347H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	9.00-13.00	17.00-20.00	...
16Cr-12Ni-2Mo	Tubes	SA-213	TP316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	11.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
	Pipe	SA-376	TP316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	0.75	11.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
	Forgings	SA-182	F316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.040	0.030	1.00	10.00-14.00	16.00-18.00	...
	Plate	SA-240	316H	75	30	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
	Structural sheet	A167	316L	70	25	0.03	2.00	0.045	0.03	1.00	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
25Cr-12Ni	Castings	SA-351	CH20	70	30	0.20	1.50	0.040	0.040	2.00	12.00-15.00	22.00-26.00	...

(a) Single values shown are maximums. (b) Residual elements not to exceed 1.00%. (c) Annealed. (d) Normalized. (e) Titanium content not less than four times carbon content and not more than 0.60%. (f) Cr + Ti not less than eight times carbon content and not more than 1.02%.

### ۵.۳. مواد مورد استفاده در تجهیزات بویلر

#### ۱.۵.۳. سوپرهیتر و ری هیتر

لوله‌های سوپرهیتر و ری هیتر از جمله اجزای بویلرند که در سخت‌ترین شرایط کار می‌کنند. با توجه به شرایط کاری سوپرهیتر و ری هیتر، لازم است آن‌ها از مقاومت خوردگی سمت آتش، مقاومت به اکسیداسیون دمابالا، استحکام خزشی و قابلیت مونتاژ مناسب برخوردار باشند. سوپرهیترها و ری هیترها برای فشارهای بالا و دماهای بالاتر از ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد طراحی شده‌اند و لذا به آلیاژهایی با استحکام بالا نیاز دارند.

در کنار انتخاب مواد برای مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون، وجود فشار بالای بخار، ضرورت استفاده از لوله‌های ضخیم را ایجاب می‌کند. همچنین، لوله‌های ضخیم‌تر (به لحاظ انتقال حرارت کمتر نسبت به لوله‌های نازک‌تر) از سمت جداره بیرونی در معرض دمای بالاتری قرار دارند. بنابراین امکان فعال شدن واکنش‌های شیمیایی دما بالا در این قسمت‌ها بیشتر است و این لوله‌ها بیشتر در معرض خوردگی سطح خارجی قرار دارند. این مسئله به ویژه در مورد سوخت‌های با درصد ناخالصی بالاتر، مهم‌تر است. در نتیجه سوپرهیترها و ری هیترها، به موادی با مقاومت خزشی بالاتر از فولادهای کربنی نیاز دارند.

در میان آلیاژهای نیروگاهی، فولادهای فریتی حاوی مولیبدن، کروم و در برخی موارد دارای وانادیم، خواص خوبی برای کارکردن در دماهای حداکثر تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد دارند [۱۲].

در جدول ۷.۳، آلیاژهای به‌کاررفته در سوپرهیترها، بر اساس دمای دیواره لوله، ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ارائه شده است [4]. در جدول ۸.۳ نیز آلیاژهای متداول برای ساخت لوله‌های سوپرهیتر و ری هیتر نشان داده شده است. در آنجا مشاهده می‌شود که برای بالابردن استحکام، تقریباً در همه آلیاژهای ذکرشده، عناصر کروم و مولیبدن وجود دارند [۱۲].

#### ۲.۵.۳. اکونومایزر و لوله‌های دیواره آبی

در اغلب نقاط دیواره، حداکثر دمای لوله‌های دیواره آبی کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین برای ساخت این لوله‌ها از فولادهای کربنی استفاده می‌شود، زیرا این فولادها تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد قابل استفاده‌اند. در دماهای بالاتر، میزان خزش و پوسته‌پوسته شدن در این فولادها بسیار زیاد می‌شود.

اکونومایزرها به دو دسته لوله‌های ساده<sup>۱</sup> و لوله‌های فین‌دار جوشکاری شده<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. در گذشته، اکونومایزرهای نوع فین‌دار جوشکاری شده، به دلیل مقاومت به خوردگی، از جنس چدن ساخته می‌شدند؛ ولی فقط تا فشار ۲۰ بار قابل استفاده بودند. امروزه برای رفع این محدودیت، فین‌ها را به شکل ورق نورد شده آماده می‌کنند و به لوله‌های فولادی<sup>۳</sup> جوش می‌دهند. در ساخت اکونومایزرها، به دلیل پایین‌تر بودن دمای کاری نسبت به لوله‌های دیواره آبی، از همان مواد مورد استفاده در ساخت لوله‌های دیواره آبی استفاده می‌شود.

جدول ۷.۳. آلیاژهای مورد استفاده در سوپرهیترها بر اساس دمای دیواره لوله [4]

کاربرد	خواص مکانیکی در دمای اتاق			عناصر آلیاژی (%)
	چقرمگی ضربه (kJ/m)	افزایش طول (%)	تنش جاری شدن (MPa)	
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۵۸۰°C	۴۹۰	۱۶	۳۴۳	۵۷۷ Cr=1.1-1.4 Mo=0.9-1.2 V=0.2-0.3
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۵۸۰°C	۵۹۰	۲۱	۲۳۵	۴۷۰ Cr=1.6-1.9 Mo=0.5-0.7 V=0.2-0.35 Si=0.4-0.7 B=0.005
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۵۶۰°C	-	۳۰	-	۳۹۲ Cr=2.1-2.6 Mo=0.5-0.7 V=0.2-0.35 Nb=0.5-0.8
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۶۵۰°C	-	۳۵	۲۱۵	۵۴۰ Cr=13-15 Ni=13-15 W=2-2.75 Mo=0.45-0.6
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۶۵۰°C	-	۳۵	۲۱۵	۵۴۰ Cr=17-19 Ni=11-13 Ti=0.65
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۷۰۰°C	۱۳۸۰	۳۸	۲۱۵	۴۹۰ Cr=15-23 Ni=18-20 W=2-2.3 Nb=0.9-1.3 B=0.005
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۷۰۰°C	۱۳۸۰	۳۸	۲۱۵	۵۱۰ Cr=15-17 Ni=15-17 W=2-3 Mo=0.4-0.9 Nb=0.6-1.0 B=0.005
سوپرهیترهای با حداکثر دمای دیواره ۷۰۰°C	۱۳۸۰	۳۸	۲۳۵	۵۲۰ Cr=15-17 Ni=13-15 W=2-2.75 Nb=0.9-1.3 B=0.005

1. plain tube

2. welded fin tube

3. mild steel



جدول ۸.۳. آلیاژهای متداول برای لوله‌های سوپر‌هیتز و ری‌هیتز [5، 6، 12]

ترکیب شیمیایی (%)								معادل در ASME	آلیاژ
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo		
۰/۱ - ۰/۲	۰/۳ - ۰/۸	۰/۰۴۵ Max	۰/۰۴۵ Max	۰/۱ - ۰/۵	-	-	۰/۶۵ - ۰/۴۴	SA-209	1Cr - 1/2 Mo
۰/۱۵ Max	۰/۳ - ۰/۶۱	۰/۰۴۵ Max	۰/۰۱۵	۰/۵	-	۱/۲۵ - ۰/۸	۰/۶۵ - ۰/۴۴	SA-213 T12	1Cr - 1/2 Mo
۰/۱۵ Max	۰/۳ - ۰/۶	۰/۰۳ Max	۰/۰۲	۰/۵ - ۱/۰	-	۱/۵ - ۱/۰	۰/۶۵ - ۰/۴۴	SA-213 T11	1 1/4 Cr - 1/2 Mo
۰/۱۵ Max	۰/۳ - ۰/۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۵ Max	-	۲/۱۶ - ۱/۹	۱/۱۳ - ۰/۸۷	SA-213 T22	2 1/4 Cr - 1Mo
۰/۱۵ Max	۰/۳ - ۰/۶	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۲۵ - ۱/۰	-	۱۰/۰ - ۸/۰	۱/۱۰ - ۰/۹	SA-213 T9	9Cr - 1Mo
۰/۰۴ - ۰/۱	۲/۰۰ Max	۰/۰۴ Max	۰/۰۲	۰/۷۵ Max	۱۴/۰ - ۱۱/۰	۱۸/۰ - ۱۶/۰	۲/۰ - ۲/۰	SA-213 TP316H	16Cr - 12Ni - 2Mo
۰/۰۴ - ۰/۱	۲/۰۰ Max	۰/۰۴ Max	۰/۰۲	۰/۷۵ Max	۱۱/۰ - ۸/۰	۲۰/۰ - ۱۸/۰	-	SA-213 TP304H	18Cr - BNi

فولادهای کربنی برای ساخت لوله‌ها در گرم‌کننده‌های هوا نیز به‌کار می‌روند. در جدول ۹.۳، ترکیب شیمیایی چند نمونه فولاد کربنی مورد استفاده در ساخت لوله‌های دیوارهٔ آبی، اکونومایزر و پیش‌گرم‌کن هوا ارائه شده است [۱۲].

جدول ۹.۳. مواد مورد استفاده در ساخت لوله‌های دیوارهٔ آبی، اکونومایزر و گرم‌کن هوا [۵، ۶، ۱۲]

ترکیب شیمیایی (%)					معادل در ASME	آلیاژ
C	Mn	P	S	Si		
۰/۰۶-۰/۱۸	۰/۲۷-۰/۶۳	۰/۰۴۸ Max	۰/۰۵۸ Max	۰/۲۵ Max	SA-192	فولادهای کربنی
۰/۰۶-۰/۱۸	۰/۲۷-۰/۶۳	۰/۰۵۰ Max	۰/۰۶۰ Max	-	SA-178 Grade A	
۰/۰۶-۰/۱۸	۰/۲۷-۰/۶۳	۰/۰۵۰ Max	۰/۰۶۰ Max	۰/۲۵ Max	SA-226	
۰/۱۵	۱/۰۰	-	-	-	-	فولادهای کربن- منگنزدار

### ۳.۵.۳. درام

در اغلب مسیره‌های درام، مخلوطی از آب و بخار وجود دارد. بنابراین دمای کاری آن مانند لوله‌های دیوارهٔ آبی، نمی‌تواند زیاد باشد و در ساخت آن از فولادهای کربنی با استحکام بالا، فولادهای کربن-منگنزدار و گاهی از فولادهای دارای وانادیم، مولیبدن، منگنز و کروم استفاده می‌شود. در جدول ۱۰.۳ چند نمونه از مواد مورد استفاده در ساخت درام ارائه شده است [۱۲].

جدول ۱۰.۳. مواد مورد استفاده در ساخت درام [۵، ۶، ۱۲]

ترکیب شیمیایی (%)								معادل در ASME	آلیاژ
C	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Si		
۰/۳	۰/۸۶-۱/۵۵	۰/۰۳۵ Max	۰/۰۴۰ Max	-	-	-	۰/۳۳-۰/۱۳	SA-299	فولاد کربنی با استحکام بالا
۰/۳۵	۰/۹	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	-	-	-	۰/۳۳-۰/۱۳	SA-515	
۰/۱۵	۱/۰	-	-	-	-	-	-	-	فولاد کربن-منگنز
۰/۱۵	۱/۲۵	-	-	۰/۵۵	۰/۲۴	۰/۷ Max	-	-	فولاد Cr.Mn.Mo.V

### ۴.۵.۳. هدرها و لوله‌های بخار

وظیفه لوله‌های بخار، ایجاد ارتباط میان قسمت‌های گوناگون بویلر و همچنین میان بویلر و توربین است. به‌طور کلی، لوله‌های بخار را می‌توان به دو گروه درزدار و بدون درز تقسیم کرد. برای ساختن لوله‌های درزدار، ابتدا ورق به شکل استوانه‌ای نورد شده و سپس درز میان لبه‌های استوانه به هم جوش داده می‌شوند. در مواردی که امکان استفاده از لوله‌های درزدار وجود ندارد، لوله‌های بدون درز انتخاب می‌شوند.

هدرها عموماً از ورق<sup>۱</sup> ساخته می‌شوند. در جدول ۱۱.۳، آلیاژهای متداول برای ساخت هدرها و لوله‌های بخار که با روش بدون درز ساخته می‌شوند و در جدول ۱۲.۳، آلیاژهایی که در روش درزدار به کار می‌روند، ارائه شده‌اند [۱۲].

جدول ۱۱.۳. آلیاژهای متداول در ساخت هدرها و لوله‌های بخار با روش بدون درز [5, 6, ۱۲]

ترکیب شیمیایی (%)								معادل در ASME	آلیاژ
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo		
۰/۳۰ Max	۰/۰۲۹ - ۱/۰۶	۰/۰۴۸ Max	۰/۰۵۸ Max	۰/۱ Min	-	-	-	SA-106 Grade B	فولاد کربنی با استحکام متوسط
۰/۰۳۵ Max	۰/۰۲۹ - ۱/۰۶	۰/۰۴۸ Max	۰/۰۵۸ Max	۰/۱ Min	-	-	-	SA-106 Grade C	فولاد کربنی با استحکام بالا
۰/۰۵ - ۰/۱۵	۰/۳ - ۰/۶۱	۰/۰۲۵ Max	۰/۰۲۵ Max	۰/۵۰ Max	-	۰/۸ - ۱/۲۵	۰/۴۴ - ۰/۶۵	SA-335 P12	1Cr - 1/2 Mo
۰/۱۵ Max	۰/۳ - ۰/۶	۰/۰۳ Max	۰/۰۳ Max	۰/۵ - ۱/۰	-	۱/۰ - ۱/۵	۰/۴۴ - ۰/۶۵	SA-335 P11	1 1/4 Cr - 1/2 Mo
۰/۱۵ Max	۰/۳ - ۰/۶	۰/۰۳ Max	۰/۰۳ Max	۰/۵ Max	-	۱/۹ - ۲/۶	۰/۸۷ - ۱/۱۳	SA-335 P22	2 1/4 Cr - 1Mo
۰/۰۴ - ۰/۱	۲/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۷۵	۸/۰ - ۱۱/۰	- ۲۰ ۱۸	-	SA-376 TP 304	18Cr - 8Ni
۰/۰۴ - ۰/۱	۲/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۷۵	- ۱۴ ۱۱	- ۱۸ ۱۶	۲/۰ - ۳/۰	SA-376 TP347H	16Cr - 12Ni - 2Mo

جدول ۱۳.۳. آلیاژهای متداول در ساخت هدرها و لوله‌های بخار با روش درزدار [5, 6, ۱۲].

ترکیب شیمیایی (%)								معادل در ASME	آلیاژ
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo		
۰/۳۰	۰/۸۶ - ۱/۵۵	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۱۳ - ۰/۳۳	-	-	-	SA-299	فولاد کربنی با استحکام متوسط
۰/۳۵	۰/۹۰	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۱۳ - ۰/۳۳	-	-	-	SA-515	فولاد کربنی با استحکام بالا
۰/۱۷	۰/۳۵ - ۰/۷۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۱۳ - ۰/۴۵	-	۰/۷۴ - ۱/۲۱	۰/۴ - ۰/۶۵	SA-387	1Cr - 1/2 Mo
۰/۱۷	۰/۳۵ - ۰/۷۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴۰	۰/۴۴ - ۰/۸۶	-	۰/۹۴ - ۱/۵۶	۰/۴ - ۰/۷	SA-387 Grade 12	1 1/4 Cr - 1/2 Mo
۰/۱۷	۰/۲۵ - ۰/۶۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۵۰	-	۱/۸۸ - ۲/۶۲	۰/۸۵ - ۱/۱۵	SA-387 Grade 22	2 1/4 Cr - 1Mo
۰/۰۸	۲/۰۰	۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	۱/۰۰	۸/۰ - ۱۰/۵	۱۸/۰ - ۲۰/۰	-	SA-240	18Cr - 8Ni
۰/۰۴ - ۰/۱	۲/۰۰	۰/۰۴۵	۰/۰۳	۱/۰۰	۱۰/۰ - ۱۴/۰	۱۶/۰ - ۱۸/۰	۲/۰ - ۳/۰	SA-240 316H	16Cr - 12Ni - 2Mo

### ۵.۵.۳. انتخاب مواد برای بویلرهای پیشرفته

در نیروگاه‌های پیشرفته برای بالا بردن راندمان، دمای بخار تا ۵۹۵ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر، بالا برده می‌شود. در جدول ۱۳.۳، آلیاژهایی که قادرند نیازهای نیروگاه‌های پیشرفته را برآورده کنند ارائه شده است. این مواد به دو گروه فولادهای ۹٪ تا ۱۲٪ کروم و فولادهای آستنیتی تقسیم می‌شوند [۱۲].



### ۶.۳. بررسی اطلاعات موجود در استانداردهای گوناگون در مورد مواد مورد

#### استفاده در تجهیزات بویلر

اطلاعات لازم در مورد لوله‌های کربنی و آلیاژی مورد استفاده در ساخت لوله‌های بویلر، در استانداردهای گوناگون ذکر شده است. از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اطلاعات لازم برای سفارش لوله از سوی خریدار (روش ساخت، ترکیب شیمیایی، تولرانس‌های قابل قبول، قطر، ضخامت، طول و ...)
  - روش‌های تهیه فولاد به کاررفته در ساخت لوله‌ها
  - روش‌های ساخت
  - ترکیب شیمیایی
  - عملیات حرارتی
  - خواص مکانیکی
  - کیفیت ظاهری
  - تولرانس‌های قابل قبول در ترکیب شیمیایی
  - تست‌های لازم
  - نحوه تهیه نمونه‌ها برای تست
  - نحوه ارائه نتایج آزمایش
  - نحوه کدگذاری
- و ... [7]

چند استاندارد مهم در این زمینه عبارت‌اند از:

- BS 3059 : Part 2 : 1990
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Division 2
- ISO / TR 7468-1981 (E)

در ادامه نمونه‌هایی از اطلاعات موجود در استاندارد ISO / TR 7468-1981 (E) ارائه

می‌شود. [8]

جدول ۱۴.۳. مشخصات فولاد 1Cr0.5MO

محدوده هر داده مطابق با TC17/SC10/ETP		جزئیات مواد تست شده		ترکیب شیمیایی (%)
بیشترین	کمترین			
۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۸۶ - ۱/۵۵	C	
۰/۴۰	-	۰/۱۴ - ۰/۶۷	Si	
۰/۷۰	۰/۴۰	۰/۴۲ - ۰/۸۰	Mn	
۰/۰۴۰	-	۰/۰۰۵ - ۰/۰۳۹	P	
۰/۰۴۰	-	۰/۰۰۴ - ۰/۰۵۰	S	
۱/۲۰	۰/۷۰	۰/۷۲ - ۱/۱۷	Cr	
۰/۱۶۵	۰/۴۰	۰/۳۹ - ۰/۶۶	Mo	
900-960°C AC 900-960°C AC and Tempered 620-720°C		900°C FC 920°C FC T 720°C 920-940°C cc 40-60°C 920-950°C cc T 680°C 875-1000°C AC 900-970°C AC T 585-750°C 920-925°C OQ T 630-720°C		عملیات حرارتی
همه شکل‌های محصولات ساخته شده		اندازه (میلی‌متر)	شکل	محصولات
		15-70 dia	میله*	
		18-150 thk	صفحه**	
		6-88 thk	لوله***	
		20-462 sq	آهنگری	

\*bar \*\*plate \*\*\*tube

جدول ۱۵.۳. متوسط تنش شکست فولاد 1Cr0.5MO بر حسب  $N/mm^2$

۲۵۰,۰۰۰ ساعت	۲۰۰,۰۰۰ ساعت	۱۵۰,۰۰۰ ساعت	۱۰۰,۰۰۰ ساعت	۵۰,۰۰۰ ساعت	۳۰,۰۰۰ ساعت	۱۰,۰۰۰ ساعت	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱۷۰	۱۸۰	۱۹۴	۲۱۰	۲۳۹	۲۶۷	۳۰۴	۴۸۰
۱۳۹	۱۴۸	۱۶۱	۱۷۷	۲۰۷	۲۳۳	۲۷۳	۴۹۰
۱۱۴	۱۲۲	۱۳۲	۱۴۶	۱۷۷	۲۰۰	۲۳۹	۵۰۰
۹۱	۹۹	۱۰۸	۱۲۱	۱۴۹	۱۶۹	۲۰۹	۵۱۰
۷۴	۷۹	۸۷	۹۹	۱۲۴	۱۴۰	۱۷۹	۵۲۰
۵۹	۶۴	۷۱	۸۱	۱۰۱	۱۱۶	۱۵۴	۵۳۰
۴۸	۵۲	۵۷	۶۷	۸۲	۹۶	۱۲۹	۵۴۰
۳۹	۴۲	۴۶	۵۴	۶۸	۷۹	۱۰۹	۵۵۰
۳۲	۳۴	۳۸	۴۳	۵۵	۶۶	۹۱	۵۶۰
(۲۶)	(۲۸)	(۳۱)	۳۵	۴۵	۵۴	۷۶	۵۷۰
-	-	-	-	-	۴۴	۶۴	۵۸۰
-	-	-	-	-	۳۶	۵۳	۵۹۰
-	-	-	-	-	(۲۹)	۴۴	۶۰۰

### ۷.۳. مواد مورد استفاده در بویلرهای بازیاب سیکل ترکیبی

با توجه به اینکه لوله‌های بویلرهای بازیاب نیروگاهی در معرض شعله و تشعشع مستقیم نیستند و فشار و دمای بخار بهره‌برداری آن‌ها از لوله‌های مشابه در بویلرهای نیروگاه‌های بخاری کمتر است، رده مقاومت و استحکام این لوله‌ها نیز از لوله‌های مشابه در بویلرهای نیروگاه‌های بخار، پایین‌تر است. به‌طور مثال، از فولادهای پرآلیاژ آستنیتی مانند SA-213 321 H و SA-213 347 H که در سوپرهیتر نهایی نیروگاه‌های بخاری به‌کار می‌روند، استفاده نمی‌شود. همچنین به‌دلیل فشار و دمای بهره‌برداری پایین‌تر در بویلرهای سیکل ترکیبی، خرابی‌ها و گسیختگی لوله‌ها در این بویلرها کمتر است و چنان‌که در فصول آینده بحث خواهد شد، مکانیزم خرابی آن‌ها نیز متفاوت است. در جدول ۱۶.۳ دمای مجاز بهره‌برداری برای مواد مورد استفاده در بویلرهای بازیاب ارائه شده است [4]. در ادامه اجمالاً به جنس لوله‌های بویلرهای بازیاب در ایران اشاره می‌شود.

جنس اجزای داغ و تحت فشار استفاده‌شده در یکی از نیروگاه‌های کشور (مشابه طرح نمونه شکل ۴.۲) به‌صورت جدول ۱۷.۳ است. مواد به‌کاررفته در تمامی بویلرهای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در ایران، مشابه یا بسیار نزدیک به این جدول‌اند. شرایط بهره‌برداری و جنس لوله‌های نمونه‌ای از بویلرهای بازیاب متصل به واحدهای V94.2 در جدول ۱۸.۳ و نمونه‌ای از بویلرهای بازیاب زیمنس که به توربین‌های گازی GE-F9 متصل‌اند، در جدول ۱۹.۳ ارائه شده است.

جدول ۱۶.۳. دمای مجاز برای مواد مورد استفاده در بویلرهای بازیاب [4]

دما		ترکیب	ماده
درجه سانتی‌گراد	فارنهایت		
۵۱۰	۹۵۰	فولاد کربنی	SA 178A (erw)
۵۱۰	۹۵۰	فولاد کربنی	SA 178C (erw)
۵۱۰	۹۵۰	فولاد کربنی	SA 192 (seamless)
۵۱۰	۹۵۰	فولاد کربنی	SA 210A1
۵۱۰	۹۵۰	فولاد کربنی	SA 210C
۵۶۵	۱۰۵۰	$1\frac{1}{4}Cr - \frac{1}{2}Mo - Si$	SA 213-T11
۶۱۰	۱۱۲۵	$2\frac{1}{4}Cr - 1Mo$	SA 213-T22
۶۵۰	۱۲۰۰	$9Cr - 1Mo - V$	SA 213-T91
۷۶۰	۱۴۰۰	$18Cr - 8Ni$	SA 213-TP304H
۷۶۰	۱۴۰۰	$18Cr - 10Ni - Cb$	SA 213-TP347H
۷۶۰	۱۴۰۰	$18Cr - 10Ni - Ti$	SA 213-TP321H
۸۱۵	۱۵۰۰	$32Ni - 21Cr - 42Fe$	SA 407-800H



جدول ۱۷.۳. جنس سطوح حرارتی اصلی برای نمونه بویلر بازیاب شکل ۴.۲

سطح حرارتی		جنس
LP	Economizer	SA 210M Gr.A1
	Evaporator	
	Superheater	
IP	Economizer	SA 210M Gr.A1
	Evaporator	
	Superheater	
	Re heater 1	SA 213M T22
	Re heater 2	SA 213M T91
HP	Economizer	SA 210M Gr.C
	Evaporator	
	Superheater 1	SA 213M T22
	Superheater 2	SA 213M T91

جدول ۱۸.۳. شرایط طراحی و جنس لوله‌های نمونه‌ای از بویلرهای بازیاب متصل به واحدهای V94.2

نام بخش	جزء	ماده	طراحی		
			دما	فشار	
			فازتهایت	درجهٔ سانتی‌گراد	گیج برحسب bar
CPH TUBE	EC-PR	SA178-A	۴۵۶/۸	۲۳۶/۰	۳۰/۰
LP EVA. TUBE	EV-LP	SA192	۳۹۹/۲	۲۰۴/۰	۱۲/۰
LP SH TUBE	SH-LP	SA192	۴۸۵/۶	۲۵۲/۰	۱۲/۰
HP 1 <sup>st</sup> ECO. TUBE	EC-HP1	SA178-C	۶۱۸/۸	۳۲۶/۰	۱۲۱/۰
HP 2 <sup>nd</sup> ECO. TUBE	EC-HP2	SA178-C	۶۱۸/۸	۳۲۶/۰	۱۲۱/۰
HP 1 <sup>st</sup> EVA. TUBE	EV-HP1	SA192	۶۱۷/۰	۳۲۵/۰	۱۰۵/۰
HP 2 <sup>nd</sup> EVA. TUBE	EV-HP2	SA192	۶۶۹/۲	۳۵۴/۰	۱۰۵/۰
HP 1 <sup>st</sup> SH TUBE	SH-HP1	SA213-T22	۸۷۹/۸	۴۷۱/۰	۱۰۵/۰
HP 2 <sup>nd</sup> SH TUBE	SH-HP2	SA213-T22	۱۰۱۱/۲	۵۴۴/۰	۱۰۵/۰
HP 3 <sup>rd</sup> SH TUBE	SH-HP3	SA213-T22	۱۰۲۷/۴	۵۵۳/۰	۱۰۵/۰

جدول ۱۹.۳. شرایط طراحی و جنس لوله‌های بویلرهای بازیاب زمینس

شماره	برجسب	دمای طراحی (درجه سائتی‌گراد)	فشار (مطلق بر حسب bar)	حداکثر دمای گاز (درجه سائتی‌گراد)	ماده
۱	HPHTSH	۵۲۷/۰	۱۰۵/۰	۵۹۱/۰	SA213T22
۲	HPITSH	۴۹۸/۰	۱۰۵/۰	۵۵۸/۰	SA213T22
۳	HPLTSH	۴۲۹/۰	۱۰۵/۰	۵۳۲/۰	SA123T22
۴	HPEVAP	۳۷۱/۰	۱۰۵/۰	۴۸۶/۰	SA192
۵	HPHTECON	۳۷۱/۰	۱۰۹/۰	۳۱۷/۰	SA210A
۶	IPSH	۳۷۱/۰	۱۳/۰	۲۵۹/۰	SA192
۷	IP EVAP	۳۷۱/۰	۱۳/۰	۲۵۵/۰	SA192
۸	HPLTECON	۳۷۱/۰	۱۰۹/۰	۱۹۹/۰	SA210A
۹	IPECON	۳۷۱/۰	۱۵/۰	۱۷۳/۰	SA192
۱۰	DAEVAP	۳۷۱/۰	۷/۰	۱۶۸/۰	SA192
۱۱	CPH	۳۷۱/۰	۹/۰	۱۴۵/۰	SA268TP430

شرح خلاصه‌نویسی‌های جدول ۱۹.۳:

- HPHTSH: High Pressure High Temperature Super Heater
- HPITSH: High Pressure Intermediate Temperature Super Heater
- HPLTSH: High Pressure Low Temperature Super Heater
- HPEVP: High Pressure Evaporator
- HPHTECON: High Pressure High Temperature Economizer
- IPSH: Intermediate Pressure Super Heater
- IPEVAP: Intermediate Pressure Evaporator
- HPLTECON: High Pressure Low Temperature Economizer
- IPECON: Intermediate Pressure Economizer
- DAEVAP: Deaerator Evaporator
- CPH: Condensate Preheater

### منابع

- [1] Nayar, A., *The Steel Handbook*, Tata McGraw-Hill Publication Company Limited, 2002.
- [2] Viswanatan, R., *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*, ASM International Society, 1995.
- [3] Port, Robert. D., Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, 1991.

- [4] Ganapathy, V., *Steam Generators and Waste Heat Boilers For Process and Plant Engineers*, Taylor & Francis Group, 2015.
- [5] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. I: "Power Boilers", Pub. American Society of Mechanical Engineering, 1983.
- [6] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. II: "Material Specifications, Part A: Ferrous Materials", Pub. American Society of Mechanical Engineering, 1983.
- [7] *BS Standard - BS 3059: Part 2: 1990*: "Steel Boiler and Superheater Tubes".
- [8] *ISO Standard - ISO/TR 7468-1981 (E)*.

[۹] بویلر، هوارد، پل آنتریسر و جیمز کوبس، راهنمای کاربران عملیات حرارتی، مترجمان: بهناز ربیعی، راحله قنبری، کیان جوادی فخار، افشین مقصودی، چاپ اول، انتشارات جهان نو، ۱۳۷۹.

[۱۰] جداول و استانداردهای فولاد (کلید فولاد)، مترجم: عبدالله ولی‌نژاد، انتشارات طراح، چاپ سوم، پاییز ۱۳۸۱.

[۱۱] عبدالرضا بانسی، تهیه دستورالعمل‌های تخمین عمر لوله‌های سوپرهیتر، پایان‌نامه کارشناسی مکانیک نیروگاه، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، پاییز ۱۳۸۲.

[۱۲] جهازی، محمد، سیاوش پهلوان یلی، علیرضا ابراهیمی، حسین مناجاتی زاده، برآورد عمر باقی‌مانده قطعات نیروگاهی، گزارش شماره ۱: شناسایی مواد مورد استفاده و عوامل تخریب در قطعات نیروگاهی، شرکت تعمیرات نیرو، آذر ۱۳۷۲.



## خرابی‌های بویلر

### مقدمه

نیروگاه‌ها نقشی حیاتی در صنعت دارند و توقف یک نیروگاه، ممکن است باعث توقف دیگر واحدهای صنعتی و سازمان‌های خدماتی و اداری و در نتیجه وارد آمدن خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و... به کشور شود. از آنجاکه خرابی بویلر و توقف آن برای تعمیرات باعث توقف نیروگاه می‌شود، انجام بررسی‌های ظاهری در محل برای تشخیص مقدماتی علت خرابی و ارائه راه‌حل برای رفع خرابی به‌وجود آمده، اهمیت بالایی در کاهش زمان توقف واحدها دارد. از این‌رو در فصل‌های بعدی به بررسی مکانیسم‌های خرابی از دیدگاه مشخصه‌های ظاهری خرابی پرداخته و راه‌حل‌های کاربردی برای رفع آن‌ها ارائه خواهد شد.

### اطلاعات و کارهای لازم برای آنالیز خرابی

#### • سوابق بهره‌برداری

در اکثر نیروگاه‌ها، اطلاعات مربوط به بهره‌برداری از واحدها، جمع‌آوری و نگهداری می‌شود. از سوابق بهره‌برداری می‌توان اطلاعات ارزشمندی مانند دما و فشار بهره‌برداری، توان خروجی نیروگاه، نوسانات بخار تولیدی، ترکیب سوخت، نوع و مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده در تصفیه شیمیایی، نوع و مقدار مواد آلوده‌کننده آب سیکل و آب جبرانی، فاصله زمانی و نحوه تمیزکاری سطوح سمت آتش و آب، ابعاد تجهیزات، زمان و موقعیت وقوع خرابی‌های گذشته، مدت زمان بهره‌برداری و پیشینه هر گونه شرایط غیرطبیعی ایجاد شده در سیستم به‌دست آورد.

#### • بررسی‌های محلی

نتیجه‌گیری نهایی (به‌طور مثال، در مورد مکانیسم خرابی) اغلب بدون بررسی‌های آزمایشگاهی

حاصل نمی‌شود؛ اما کسب برخی اطلاعات اولیه مانند تشخیص قطعه‌ای که ابتدا دچار خرابی شده و تعیین موقعیت خرابی نسبت به دیگر اجزای بویلر (مانند موقعیت لوله تخریب شده نسبت به مشعل‌ها، دوده‌زداها و...)، از مهم‌ترین کارهایی است که باید در بررسی‌های محلی انجام شود.

داشتن پاکت‌های پلاستیکی یا هر وسیله دیگری که برای حمل نمونه‌ها مناسب باشد، مفید است.

تهیه نقشه‌های اولیه و عکس‌برداری از موقعیت قطعه و نحوه قرارگرفتن آن (افقی، عمودی و...) توصیه می‌شود؛ زیرا با داشتن این نقشه‌ها و عکس‌ها، تعمیر یا تعویض قطعات با سرعت بیشتری انجام می‌شود. از آنجاکه اغلب لازم است واحدی که تخریب در آن رخ داده به مدار بازگردد و ممکن است فرصت انجام آزمایش‌های دیگر وجود نداشته باشد، بررسی‌های اولیه یادشده باید به‌طور کامل انجام شوند.

#### • نمونه‌برداری

با توجه به ابعاد بزرگ و ثابت‌بودن تجهیزات نیروگاه، ممکن است خارج‌کردن این تجهیزات برای انجام آزمایش ناممکن باشد. در نتیجه در این مواقع باید نمونه‌هایی از قطعه تخریب شده تهیه شود.

انتخاب نمونه‌ها برای بررسی‌های آزمایشگاهی از اهمیت بسزایی برخوردار است. به‌طور مثال، اگر در یک یا چند لوله دیواره آبی یا سوپرهیتر شکستگی رخ داده باشد، احتمال بسیاری وجود دارد که لوله‌های مجاور نیز بر اثر قرارگرفتن در شرایط منجر به شکست، کیفیت اولیه خود را از دست داده باشند. بنابراین باید نمونه‌هایی از لوله‌های مجاور به شکست که در ظاهر دچار خرابی نشده‌اند تهیه کرد تا وسعت خرابی تعیین شود.

روش نمونه‌گیری، اندازه و محل نمونه‌برداری را تعیین می‌کند. در روش‌های مکانیکی نمونه‌برداری مانند برش با اره، دریل و... احتمال تغییر ریزساختار، ویژگی‌های رسوب‌های سمت آب و آتش و محصولات خوردگی نسبت به روش برش با شعله، کمتر است. هرچند استفاده از روش‌های مکانیکی ترجیح دارد، اما گاه به‌دلیل کندی بودن این روش‌ها و فقدان امکان استفاده از آن‌ها در نمونه‌گیری از برخی قسمت‌ها، ممکن است برش شعله‌ای بهترین روش نمونه‌برداری باشد. در صورت استفاده از روش برش شعله‌ای، لازم است نمونه‌های بزرگ‌تری

نسبت به روش‌های مکانیکی تهیه شود. همچنین محل برش باید با فاصله از محل وقوع خرابی باشد.

خرابی‌های بویلر، اغلب با خوردگی همراه‌اند، اما نوع ماده‌ی خورنده همیشه قابل شناسایی نیست. از آنجاکه آنالیز شیمیایی محصولات خوردگی می‌تواند کلید تعیین علت خرابی باشد، جمع‌آوری و نگهداری محصولات خوردگی، به‌ویژه نمونه‌برداری از رسوب‌های سست و نرم، پوسته‌پوسته و پودرمانند، توصیه می‌شود.

## مراحل آنالیز خرابی

با توجه به مکانیسم مختص هر خرابی، مراحل آنالیز خرابی نیز تغییر می‌کند، اما مراحل اساسی آنالیز خرابی به‌قرار زیر است.

- جمع‌آوری اطلاعات اولیه‌ی مربوط به خرابی (شامل مشخصات قطعه، ابعاد و شکل قطعه، عملیات مکانیکی و حرارتی انجام‌شده روی قطعه، سوابق تعمیرات و بهره‌برداری از قطعه و...)
- بررسی اولیه‌ی قطعه‌ی تخریب‌شده (بازدید چشمی و ثبت شواهد)
- انجام تست‌های غیرمخرب
- انجام تست‌های مکانیکی (شامل سختی‌سنجی و تست چقرمگی)
- انتخاب نمونه‌ها، محافظت از نمونه‌ها و تمیزکاری آن‌ها (در صورت نیاز)
- بررسی و آنالیز ماکروسکوپی (سطوح شکست، ترک‌های ثانویه<sup>۱</sup> و دیگر ویژگی‌های سطحی)
- بررسی و آنالیز میکروسکوپی
- تهیه‌ی نمونه برای آزمایش‌های متالوگرافی
- بررسی و آنالیز نمونه‌های متالوگرافی
- تعیین مکانیسم خرابی
- آنالیز شیمیایی (کلی، موضعی، محصولات خوردگی، رسوب‌ها یا پوشش‌ها و...)
- آنالیز مکانیسم‌های شکست
- انجام آزمایش تحت شرایط بهره‌برداری شبیه‌سازی‌شده
- آنالیز همه‌ی شواهد، دسته‌بندی نتایج و نوشتن گزارش (راه‌حل مشکل باید ذکر شود).

## دلایل اصلی خرابی تجهیزات

بویلرها و دیگر تجهیزات نیروگاه‌های بخاری، در معرض خرابی‌های پُرشماری قرار دارند. برجسته‌ترین این مکانیسم‌های خرابی بیش‌گرمایش، خوردگی، خوردگی تحت تنش، حمله هیدروژنی، خوردگی شتاب‌یافته با جریان، خزش، خستگی مکانیکی و حرارتی، سایش و اندرکنش یک یا چند مکانیسم با هم هستند.

علت خرابی را می‌توان به‌طور کلی، عیوب طراحی، عیوب ساخت، انتخاب ماده نامناسب، بهره‌برداری نادرست (مانند تصفیه نامناسب آب)، مشکلات عادی بهره‌برداری (مانند دوده‌زدایی زیاد) و دلایل گوناگون دیگری دانست. از میان این دلایل کلی، بهره‌برداری نادرست — که شایع‌ترین آن‌ها بیش‌گرمایش، خوردگی و مسدودشدن لوله‌ها هستند — و عیوب ایجادشده در طراحی — که در اثر مهارت کم افراد، استفاده از ماده نامناسب و استفاده از مواد اولیه معیوب ایجاد می‌شوند — علت ۷۵٪ خرابی تجهیزات نیروگاه‌اند.

بیش‌گرمایش علت اصلی خرابی‌ها در بویلر است. به‌طور مثال، در بررسی‌هایی که در ۴۱۳ مورد خرابی و طی ۱۲ سال انجام شده، علت ۲۰۱ خرابی (۴۸/۷٪)، بیش‌گرمایش تشخیص داده شده است (شکست ناشی از بیش‌گرمایش می‌تواند در کمتر از چند دقیقه رخ دهد یا سال‌ها به‌طول انجامد، بنابراین بر اساس زمانی که قطعه می‌تواند دمای بالا را تحمل کند، بیش‌گرمایش را می‌توان به دو دسته «بیش‌گرمایش بلندمدت<sup>۱</sup>» و «بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت<sup>۲</sup>» تقسیم کرد. در فصل‌های بعدی به بررسی این دو مکانیسم خرابی دما بالا پرداخته می‌شود. خستگی و خوردگی — خوردگی که علت ۸۱ مورد خرابی‌ها (۲۱/۵٪) بوده‌اند، در رده دوم و خوردگی، خوردگی تحت تنش و تردشدن هیدروژنی که علت خرابی ۶۸ مورد (۶/۵٪) بوده‌اند، در رده بعدی اهمیت قرار دارند. انتخاب ماده نامناسب یا معیوب، علت دیگر خرابی‌ها (۱۳/۳٪) بوده است. هرچند استفاده از ماده معیوب، علت برخی خرابی‌ها دانسته می‌شود، اما آمار نشان می‌دهد این مورد، کمترین تأثیر را در ایجاد خرابی داشته است [1].

## منابع

[1] *ASM Handbook, Vol. 11: "Failure Analysis and Prevention"*, 1992.



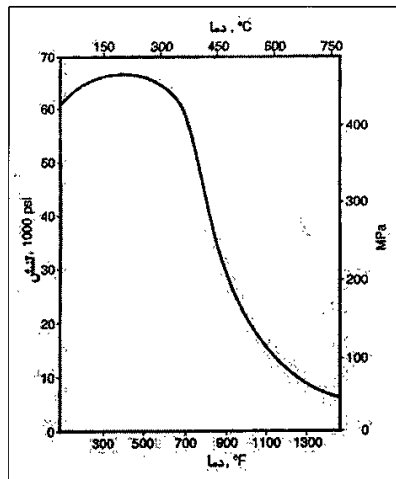
## فصل ۴

### بیش‌گرمایش بلندمدت

#### ۱.۴. علت خرابی قطعات بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت

در بیش‌گرمایش بلندمدت<sup>۱</sup>، دمای فلز برای مدتی طولانی از حد تحمل‌پذیر آن فلز بالاتر می‌رود. در دماهای بالا، استحکام فولاد کاهش می‌یابد و لذا لوله نمی‌تواند فشار داخلی را تحمل کند و می‌شکند (شکل ۱.۴).

حداکثر دمای مجاز لوله‌ها، به عناصر آلیاژی و درصد آن‌ها بستگی دارد، به‌طوری‌که با افزایش عناصر آلیاژی، به‌ویژه کروم و مولیبدن، حداکثر دمای تحمل‌پذیر افزایش می‌یابد [۱].



شکل ۱.۴. تغییرات تنش سیلان<sup>۲</sup> فولاد کربنی ساده برحسب دما. به کاهش شدید استحکام فلز در دماهای بالاتر از ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ درجه فارنهایت) توجه کنید [۱].

1. long term overheating

2. yield stress

معمولاً دمایی را که در دماهای بالاتر از آن، مشکلات دمابالا مطرح می‌شود  $T_m$  ۰/۵ در نظر می‌گیرند که در آن،  $T_m$  دمای ذوب فلز یا آلیاژ برحسب «کلوین» است. در نظر گرفتن این دما پیشنهادی است و در واقع برای هر فلز یا آلیاژ، دمای منحصر به فردی وجود دارد. به‌طور مثال، مقادیر تقریبی این دما برای آلیاژهای آلومینیوم،  $T_m$  ۰/۵۴ (۲۰۵ درجه سانتی‌گراد) آلیاژهای تیتانیوم،  $T_m$  ۰/۳ (۳۱۵ درجه سانتی‌گراد)، آلیاژهای دمابالا با پایه آهن استنتیتی<sup>۱</sup>،  $T_m$  ۰/۴۹ (۵۴۰ درجه سانتی‌گراد) آلیاژهای دمابالا با پایه کبالت یا نیکل،  $T_m$  ۰/۵۶ (۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) فولادهای کم‌آلیاژ،  $T_m$  ۰/۳۶ (۳۷۰ درجه سانتی‌گراد) و برای فلزها و مواد دیرگداز<sup>۲</sup>  $T_m$  ۰/۴۵ تا  $T_m$  ۰/۴۵ (۹۸۰ تا ۱۵۴۰ درجه سانتی‌گراد) است [2]. بنابراین با توجه به بالا بودن دمای بهره‌برداری سوپرهیترها و ری‌هیترها، در اغلب موارد لوله‌های آن‌ها از فولادهای آلیاژی انتخاب می‌شوند (جدول ۵.۳).

با توجه به مطالب فوق، وقوع و شدت بیش‌گرمایش بلندمدت، به دمای لوله، مدت بهره‌برداری از لوله در دمای موردنظر و متالورژی آن بستگی دارد. به‌طور مثال، اگر از یک لوله ساخته‌شده از فولاد نرم، حتی برای چند روز در دمای بالاتر از ۴۵۴ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ درجه فارنهایت) بهره‌برداری شود، ممکن است لوله دچار بیش‌گرمایش بلندمدت شود، اما اگر دما برای مدت طولانی‌تری بالا بماند، وقوع بیش‌گرمایش بلندمدت حتمی خواهد بود. با افزایش دما، شدت بیش‌گرمایش نیز افزایش می‌یابد [1].

## ۲.۴. انواع بیش‌گرمایش بلندمدت

### ۱.۲.۴. خزش

به‌طور کلی می‌توان خرابی‌های ناشی از بیش‌گرمایش بلندمدت را به دو مکانیسم خرابی «خزش» و «گرافیت‌شدن زنجیره‌ای»<sup>۳</sup> تقسیم کرد.

در یک تعریف جامع، می‌توان خزش را به‌صورت کرنش وابسته به زمان مواد در دماهای بالا تعریف کرد. بر اثر خزش، تغییر شکل پلاستیک به‌آرامی در فلز ایجاد می‌شود که در نهایت به مجموعه‌ای از حفره‌ها یا ترک‌های مرزخانه‌ای در فلز منجر می‌شود. وقوع خزش در صورت وجود دما، تنش و زمان کافی، به نوع آلیاژ یا فلز، ریزساختار آن و شرایط محیط کار قطعه بستگی دارد. بنابراین خزش می‌تواند در گستره وسیعی از دماها رخ دهد، اما به‌طور کلی، در دماهای بالاتر از

1. iron-base high-temperature alloys

2. refractory

3. chain graphitization

دمای تبلور مجدد<sup>۱</sup> فلز یا آلیاژ که اتم‌ها به‌اندازه کافی متحرک می‌شوند، رخ می‌دهد. پیشنهاد شده است که برای فلزهای موجود، این دما  $0.5 T_m$  در نظر گرفته شود، اما این دما برای آلیاژها و فلزهای گوناگون، مقادیر منحصر به فردی هستند که قبلاً به آن اشاره شده است [2].

#### ۱.۱.۲.۴. منحنی خزش و مفاهیم اصلی آن

رفتار عمومی مواد تحت مکانیسم خزش در شکل ۲.۴ نشان داده شده است. پس از کرنش الاستیک اولیه ( $\epsilon_e$ ) که بر اثر اعمال ناگهانی بار ایجاد می‌شود (این کرنش از آنجا که بخشی از کرنش مجاز قطعه است، در ملاحظات طراحی و تحلیل خرابی مهم به‌شمار می‌رود)، قطعه سه مرحله مجزای خزش اولیه، خزش ثانویه و خزش ثالثیه را پشت‌سر می‌گذارد.

- خزش اولیه (گذرا): نرخ کرنش در این مرحله با گذشت زمان کاهش می‌یابد، زیرا عیوب کریستالی موجود در فلز در یک مسیر مشخص صف می‌کشند. کاهش نرخ کرنش باعث شروع مرحله دوم خزش می‌شود.

- خزش ثانویه (پایدار): در این مرحله، میان مکانیسم‌های کارسختی و بازیابی<sup>۲</sup> تعادل برقرار می‌شود. این امر باعث تثبیت نرخ کرنش می‌شود که در واقع کمترین نرخ کرنش طی مکانیسم خزش است<sup>۳</sup>. این ناحیه خزش در مواد مقاوم به خزش<sup>۴</sup>، کاملاً گسترده است، به‌نحوی که مقدار MCR را برای کل ناحیه خزش ثانویه می‌توان به‌کار برد. در این مواد، به‌طور تجربی می‌توان MCR را به عمر شکست قطعه مرتبط کرد.

- خزش ثالثیه (نهایی): در این مرحله، نرخ کرنش افزایش می‌یابد و در نهایت قطعه می‌شکند. ممکن است افزایش نرخ کرنش در اثر تغییر در ساختار ماده مانند تبلور مجدد (در اثر بار) باشد که به دلیل فقدان کارسختی کافی، باعث افزایش سرعت تغییر شکل می‌شود. عوامل محیطی مانند اکسیداسیون که باعث کاهش سطح مقطع می‌شوند، در شروع مرحله سوم خزش و افزایش نرخ کرنش در این مرحله مؤثرند. در بسیاری از آلیاژهای تجاری مقاوم به خزش، خزش ثالثیه در کرنش‌های  $0.5\%$  یا کمتر رخ می‌دهد [2].

همان‌طور که در منحنی خزش مشاهده می‌شود، نقاط انتهایی مرحله اول خزش و شروع مرحله سوم خزش، دقیقاً مشخص نیست. برای تعریف نقطه شروع مرحله سوم خزش، از روش  $0.2\%$ <sup>۵</sup> (شکل ۲.۴) استفاده می‌شود.

1. recrystallization temperature

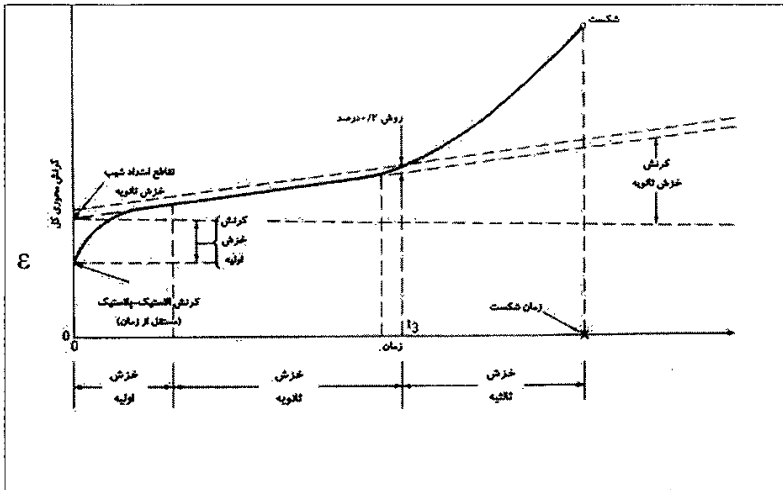
2. recovery

3. Minimum Creep Rate (MCR)

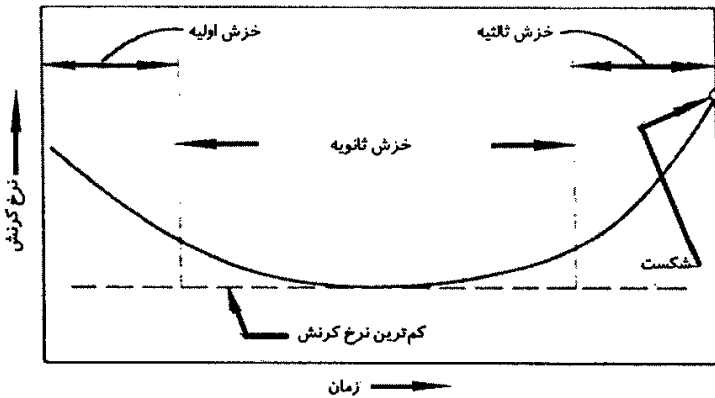
4. creep resistant materials

5. off set method

در شکل ۳.۴، نحوه تغییرات نرخ کرنش خزشی در بار ثابت نسبت به زمان نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، کرنش ابتدا با نرخ زیاد شروع می‌شود و سپس با سرعت تا مقدار MCR کاهش می‌یابد. با شروع خزش نهایی، نرخ کرنش تا شکست قطعه افزایش می‌یابد [2].



شکل ۳.۴. منحنی خزش



شکل ۳.۴. رابطه بین نرخ خزش و زمان در یک آزمایش خزش بار ثابت

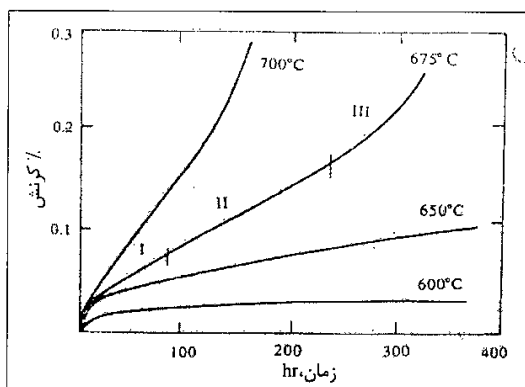
#### ۲.۱.۲.۴ پارامترهای مؤثر بر شکل منحنی خزش

به‌طور خلاصه، پارامترهایی که بر شکل منحنی خزش تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از:

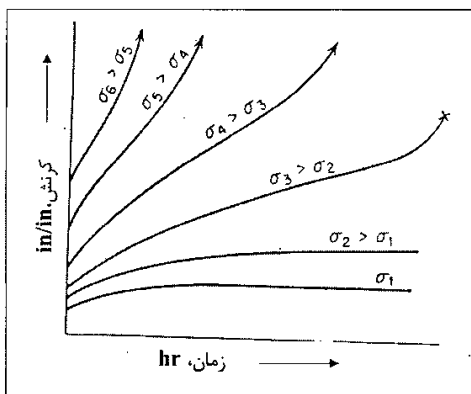
۱. کارسختی که به کاهش سرعت خزش تمایل دارد؛
۲. فرایندهای نرم‌شدن نظیر بازیابی و تبلور مجدد که به افزایش سرعت خزش تمایل دارند؛
۳. فرایندهای مخرب نظیر ایجاد حفره، ترک و اکسیداسیون که باعث کاهش زمان گسیختگی  $(T_f)$  می‌شوند؛

۴. تنش و دما؛ هرچه تنش و دمای قطعه افزایش یابد، زمان گسیختگی قطعه کاهش و شیب قسمت ثانویه افزایش می‌یابد. تأثیر دما و تنش بر منحنی خزش، در شکل‌های ۴.۴ و ۵.۴ نشان داده شده است.

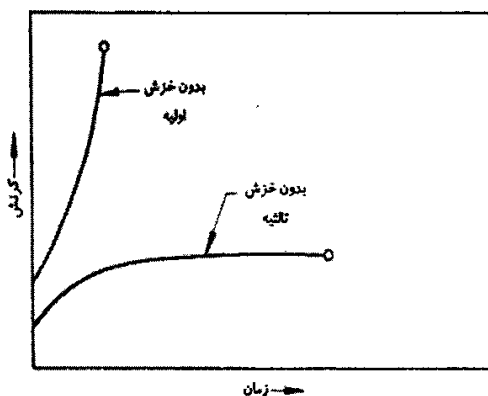
در برخی شرایط، برخی فلزات، سه مرحله خزش را طی نمی‌کنند. به‌طور مثال، در دما یا تنش بالا، ممکن است مرحله اول خزش رخ ندهد یا در برخی شرایط حاد، بلافاصله پس از بارگذاری، مرحله سوم خزش شروع شود. درمقابل، ممکن است در برخی شرایط حاد، مرحله سوم خزش رخ ندهد و قطعه با کرنش کم بشکند. این مسئله به‌ویژه در آلیاژهای ریخته‌گری‌شده توجه‌برانگیز است (شکل ۴.۴) [2].



شکل ۴.۴. تأثیر دما بر شکل منحنی خزش



شکل ۵.۴. تأثیر تنش بر شکل منحنی خزش



شکل ۶.۴. منحنی خزش در برخی حالت‌های خاص

#### ۳.۱.۲.۴. شکست خزشی

شکست خزشی، به‌جز چند مورد استثنایی، به‌شکل مرزدانه‌ای<sup>۱</sup> است و با یکی از دو مکانیسم زیر رخ می‌دهد (شکل ۷.۴):

۱. ترک خوردگی در نقاط سه‌گانه مرزدانه‌ها<sup>۲</sup>

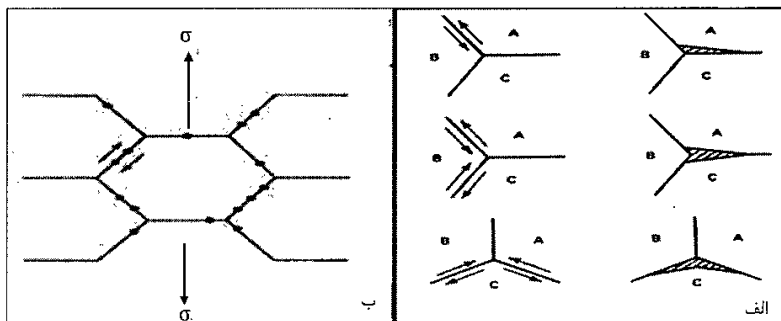
۲. حفره‌زایی در مرزدانه‌ها<sup>۳</sup>

1. intergranular
3. grain boundary cavitation

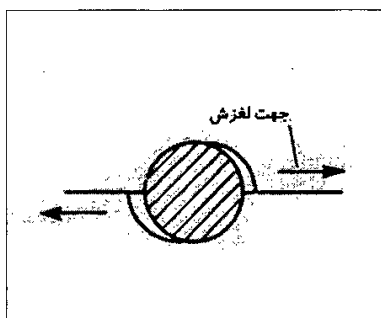
2. triple-point cracking

در درجه حرارت‌های متوسط، اعمال کرنش با نرخ زیاد، باعث لغزش مرزدانه‌ای و ایجاد ترک در نقاط سه‌گانه مرزدانه‌ها می‌شود. البته ترک در مرزدانه‌ها، در نقاطی غیر از نقاط سه‌گانه نیز می‌تواند به‌وجود آید.

در مواردی که درجه حرارت بالاتر و سرعت اعمال کرنش کمتر باشد، شکست خزشی با حفره‌زایی در مرزدانه‌ها شروع می‌شود. حفره‌زایی معمولاً از یک ذره ناخالصی شروع می‌شود (شکل ۸.۴). این ذرات ناخالصی، معمولاً فازهای ثانویه‌ای‌اند که بر اثر تحمل درجه حرارت بالا در زمان طولانی، در مرزدانه‌ها ایجاد می‌شوند [2].



شکل ۷.۴. مکانیسم‌های شکست خزشی؛ الف) ترک خوردگی در نقاط سه‌گانه مرزدانه‌ها، ب) حفره‌زایی در مرزدانه‌ها [2, 3]



شکل ۸.۴. ایجاد حفره در مجاورت ذرات رسوب در مرزدانه‌ها [3]

## 1. wedge cracking

محققان بسیاری به مطالعه حفره‌های ناشی از خزش و پیشرفت خرابی متأثر از آن پرداخته‌اند. این مطالعات که در برخی موارد به تدارک استانداردهایی (مانند TW507 – VGB) منجر شده است، روی فولادهای پرکاربرد در صنعت و به‌ویژه فولادهای مورد استفاده در بویلرهای نیروگاهی انجام شده‌اند. بر اساس این استانداردها، به‌طور کلی چهار مرحله برای حفره‌دار شدن فولادها ذکر شده که عبارت‌اند از (شکل ۹.۴):

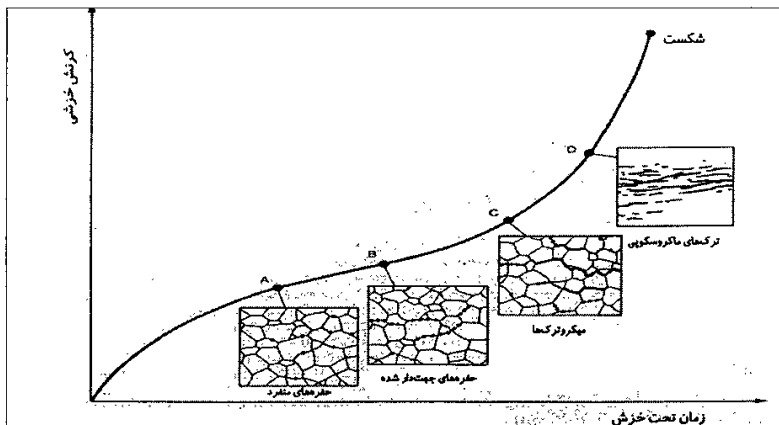
(A) ایجاد حفره‌های منفرد؛

(B) تشکیل حفره‌های جهت‌دار؛

(C) تشکیل حفره‌های متصل<sup>۳</sup> یا میکروتُرک‌ها<sup>۴</sup>؛

(D) تشکیل ترک‌های ماکروسکوپی<sup>۵</sup>.

مشاهدات بسیاری که آلمانی‌ها در نیروگاه‌های گوناگون داشته‌اند، مدت زمان لازم برای ایجاد خسارت و تبدیل آن از یک مرحله به مرحله دیگر را بر اساس شرایط عمومی تخمین زده‌اند. بر اساس این تجربیات:



شکل ۹.۴. مراحل ایجاد حفره در مکانیسم خزش

1. isolated cavities
3. linked cavities
5. macrocracks

2. oriented cavities
4. microcracks

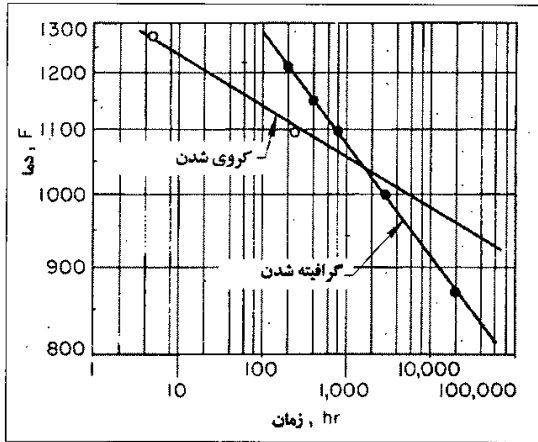


- برای خسارت خزشی نوع A، هیچ تعمیر یا بازسازی ضرورت ندارد.
  - برای خسارت محدوده B که حفره‌های جهت‌دار را در خود دارد، باید بازرسی مجدد ۱/۵ تا ۳ساله انجام شود.
  - برای خسارت نوع C، به تعمیر یا تعویض ظرف شش ماه آینده نیاز است.
  - برای خسارت نوع D، تعمیر فوری لازم است.
- از این روش که تا حدی محافظه‌کارانه است، برای تحت‌نظر داشتن آسیب خزشی استفاده می‌شود و به دلیل سادگی، بین بهره‌برداران نیروگاه‌ها طرفداران بسیاری دارد.
- تذکر: پس از اینکه خرابی خزشی در یک لوله رخ دهد، تخمین عمر باقی‌ماندهٔ دیگر لوله‌هایی که در شرایط کاری مشابه لولهٔ تخریب‌شده قرار دارند، ضروری می‌شود. در بخش ۸.۴ که چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلرهای صنایع گوناگون بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت بررسی شده، از عمر باقی‌ماندهٔ یک لولهٔ سوپرهیتر بحث شده است (نمونهٔ نهم).

#### ۲.۲.۴. گرافیت‌شدن زنجیره‌ای

گرافیت‌شدن زنجیره‌ای (که به‌ندرت اتفاق می‌افتد) یکی از نتایج بیش‌گرمایش بلندمدت است. این نوع خرابی، وقتی شروع می‌شود که ذرات کاربید آهن (که معمولاً در فولادهای کربنی و فولادهای کم‌آلیاژ وجود دارند) پس از بیش‌گرمایش طولانی‌مدت در دماهای بالاتر از ۴۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد (۸۰۰ درجهٔ فارنهایت)، به ذرات گرافیت تجزیه می‌شوند. ذرات گرافیت، معمولاً در محل عیوب ریزساختاری، در مناطقی که ناخالصی‌های شیمیایی وجود دارد و در امتداد خطوط تنش<sup>۱</sup> تشکیل می‌شوند. ذرات گرافیت اگر به‌طور یکنواخت در ساختار فولاد توزیع شده باشند، به‌ندرت باعث خرابی می‌شوند، اما گاهی هسته‌های گرافیت در کنار یکدیگر، زنجیره‌هایی از گرافیت تشکیل می‌دهند. وجود ذرات گرافیت باعث تردشدن فولاد و در نتیجه کاهش استحکام آن در امتداد زنجیره‌های گرافیت می‌شود. در نهایت، فولاد بر اثر فشار داخل لوله و در راستای زنجیره‌های گرافیت، پاره می‌شود [1].

گرافیت‌شدن زنجیره‌ای و تشکیل کاربیدهای کرومی، مکانیسم‌هایی‌اند که برای تجزیهٔ پرلیت با یکدیگر رقابت می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۱۰.۴ نشان داده شده است، در دماهای کمتر از ۵۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۰۲۵ درجهٔ فارنهایت)، گرافیت‌شدن و در دماهای بالاتر، تشکیل کاربیدهای کرومی مکانیسم‌هایی‌اند که باعث تجزیهٔ پرلیت می‌شوند [2].



شکل ۱۰.۴. رقابت گرافیت‌شدن زنجیره‌ای و تشکیل کاربیدهای کرومی برای تجزیهٔ پرلیت [2]

گرافیت‌شدن معمولاً در محل جوش‌ها اتفاق می‌افتد (شکل ۱۱.۴)، اما گاهی (به‌ندرت) در نقاط دور از جوش نیز باعث ایجاد ترک‌های ماریچ در سطح لوله می‌شود (در شکل ۱۲.۴ به ایجاد ترک‌ها در راستای تنش برشی ماکسیمم توجه کنید). از آنجاکه گرافیت‌شدن در شرایط تحمل دماهای متوسط برای زمان طولانی ایجاد می‌شود، این خرابی به‌ندرت در سطوحی اتفاق می‌افتد که جوشش در آن‌ها رخ داده است. لوله‌های اکونومایزر، لوله‌های بخار و دیگر تجهیزاتی که برای هزاران ساعت در دمای ۴۲۵ تا ۵۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار دارند، از قسمت‌هایی‌اند که در مقایسه با سطوحی که جوشش در آن‌ها رخ می‌دهد، امکان تردشدن آن‌ها به‌خاطر گرافیت‌شدن، بیشتر است [1، 2] (نمونهٔ هفتم).



شکل ۱۱.۴. پارگی در یک جوش طولی در اثر گرافیت‌شدن زنجیره‌ای. به لبهٔ کلفت و ناصاف شکست توجه کنید.

چنین خرابی‌هایی پس از بیش‌گرمایش بلندمدت ملایم رخ می‌دهند [1].



شکل ۱۲.۴. ترک‌های ماریچ بر اثر گرافیت‌شدن زنجیره‌ای. این ترک‌ها در امتداد خطوط با حداکثر تنش برشی ایجاد شده‌اند [1].

تذکره: افزودن بیش از ۰/۵٪ کروم، کاربیدهای آهن را پایدار می‌کند و مانع تجزیه آن‌ها به گرافیت می‌شود [2].

### ۳.۴. محل وقوع بیش‌گرمایش بلندمدت

این نوع خرابی‌ها، در لوله‌های آب و بخار مانند لوله‌های دیواره‌ی آبی، لوله‌های پایین‌آورنده، لوله‌های دیواره‌ی بین منطقه سوپرهیترها و اکونومایزرها<sup>۱</sup>، سوپرهیترها، ری‌هیترها و لوله‌های سقف بویلر ایجاد می‌شوند. البته حدود ۹۰٪ خرابی‌هایی که بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت رخ می‌دهند، در سوپرهیترها، ری‌هیترها و لوله‌های دیواره‌ی اتفاق می‌افتند. این نوع خرابی‌ها، به‌ندرت در اکونومایزرها و لوله‌های کف بویلر مشاهده می‌شوند. لوله‌هایی که اغلب دچار بیش‌گرمایش می‌شوند، رسوب<sup>۲</sup> چشمگیری دارند، جریان سیال خنک‌کن در آن‌ها کاهش یافته، گرمای ورودی سمت آتش آن‌ها بیش از حد بوده است یا در مقابل مشعل‌ها قرار داشته‌اند. لوله‌های نزدیک به تجهیزات تغذیه‌ی زغال<sup>۳</sup>، لوله‌های مجاور به مناطقی که موانعی در مسیر جریان دود ایجاد شده است (رسوبات خارجی لوله‌ها و دوده) یا مناطقی که کانالیزه‌شدن دود<sup>۴</sup> رخ می‌دهد، معمولاً دچار بیش‌گرمایش بلندمدت می‌شوند. لوله‌هایی که قسمتی از ماده‌ی نسوزشان جدا شده است نیز در معرض بیش‌گرمایش قرار دارند. در بویلرهای بازیاب، لوله‌های دیواره‌ی نزدیک به بستر<sup>۵</sup> که با مواد جامد و مواد کربنی پوشیده نشده‌اند، در معرض بیش‌گرمایش قرار دارند. لوله‌های شیب‌دار، مانند قوس‌های دماغه‌ای<sup>۶</sup> که احتمال کانالیزه‌شدن بخار<sup>۷</sup> در آن‌ها وجود

1. screen tubes

3. chain grate stoker

5. smelt bed

7. steam channeling

2. deposit

4. gas channeling

6. nose arches

دارد، از دیگر موقعیت‌هایی‌اند که ممکن است دچار بیش‌گرمایش بلندمدت شوند. بویلرهای لوله آتشی به‌ندرت دچار این نوع خرابی می‌شوند.

این نوع خرابی معمولاً در یک ناحیه گسترده و در بسیاری از لوله‌ها ایجاد می‌شود. بسیاری از لوله‌هایی که دچار این نوع خرابی می‌شوند، می‌شکنند یا ورم<sup>۱</sup> می‌کنند [۱].

#### ۴.۴. عوامل بیش‌گرمایش بلندمدت

بیش‌گرمایش بلندمدت، یک مکانیسم خرابی زمان‌بَر است و بر اثر مشکلات طولانی مدت موجود در سیستم، ایجاد می‌شود. ازجمله این مشکلات می‌توان به رسوب‌های داخلی زیاد در لوله‌ها، ورود فلاکس حرارتی<sup>۲</sup> بیش از حد به لوله‌ها، شروع جوشش لایه‌ای ناپایدار<sup>۳</sup>، مسدودشدن فضای خارجی بین لوله‌ها با خاکستر، کاهش جریان سیال خنک‌کن در لوله‌ها، اسپری کم یا نامنظم آب در سوپرهیترها و ری‌هیترها، تنظیم‌نبودن مشعل‌ها، توزیع غیریکنواخت سیال در لوله‌ها، ایجاد نقاط داغ<sup>۴</sup> در لوله‌ها، انتخاب آلیاژهای نامناسب، ورم‌ها و... اشاره کرد.

رسوب: رسوب‌های داخلی لوله‌ها مانند عایق حرارتی عمل می‌کنند و باعث افزایش دمای لوله می‌شوند. خواص ماده نزدیک به سطوح داخلی و خارجی، انتقال حرارت به لوله‌های بویلر را کنترل می‌کند. در لوله‌های بدون رسوب، در مسیر انتقال حرارت از محصولات احتراق (دمای محصولات احتراق اغلب از ۱۰۹۳ درجه سانتی‌گراد یا ۲۰۰۰ درجه فارنهایت بالاترند) به سیال درون لوله، سه مقاومت شامل لایه نازک محصولات احتراق چسبیده به دیواره خارجی (معمولاً دما در این لایه نازک، بیش از ۵۳۷ درجه سانتی‌گراد یا ۱۰۰۰ درجه فارنهایت کاهش می‌یابد)، ضخامت دیواره و لایه نازک سیال چسبیده به دیواره داخلی وجود دارند. نیروی محرک برای انتقال حرارت در این مقاومت‌ها، اختلاف درجه حرارت در دو سر مقاومت است (شکل ۱۳.۴، سمت چپ). در صورت وجود لایه رسوب در دیواره داخلی لوله، یک مقاومت دیگر به‌طور سری با دیگر مقاومت‌ها در مسیر انتقال حرارت قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در فرایند انتقال حرارت، گرما مانند جریان الکتریسیته و اختلاف درجه حرارت مانند اختلاف پتانسیل عمل می‌کند، برای انتقال حرارت ثابت به سیال، اختلاف درجه حرارت دو سر مقاومت‌ها باید افزایش یابد. این امر باعث افزایش دمای لوله می‌شود (شکل ۱۳.۴، سمت راست). همچنین باید توجه داشت که ضریب انتقال حرارت رسوب‌ها در حدود ۵٪ ضریب فولاد است و این باعث کاهش

1. bulge

2. heat Flux

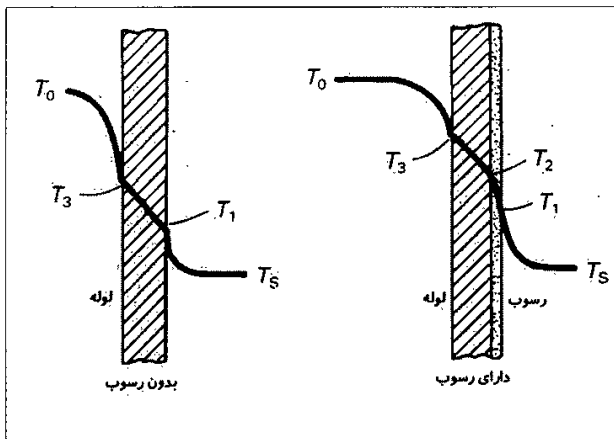
3. Departure From Nucleate Boiling (DNB)

4. hot spots

انتقال حرارت از لوله به سیال و ذرنتیجه افزایش دمای لوله می‌شود (ضرایب انتقال حرارت رسوب‌ها در جدول ۳.۱۸ آمده است). در شکل‌های الف و ب، ۱۴.۴، اثر ضخامت رسوب بر گرادیان حرارتی عبوری از رسوب نشان داده شده است. در شکل‌های ج و د، ۱۴.۴، اثر ضخامت رسوب بر دمای سطح خارجی لوله نشان داده شده است. به‌طور مثال، شکل ۱۴.۴ نشان می‌دهد وجود یک لایه رسوب به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر (۰/۱۶ اینچ) یا بیشتر، باعث می‌شود در لوله‌ای از جنس فولاد کربنی با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ) که فلاکس حرارتی ورودی به آن  $315000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{hr}$  است، دمای فلز از حد مجاز بالاتر رود [1، 2].

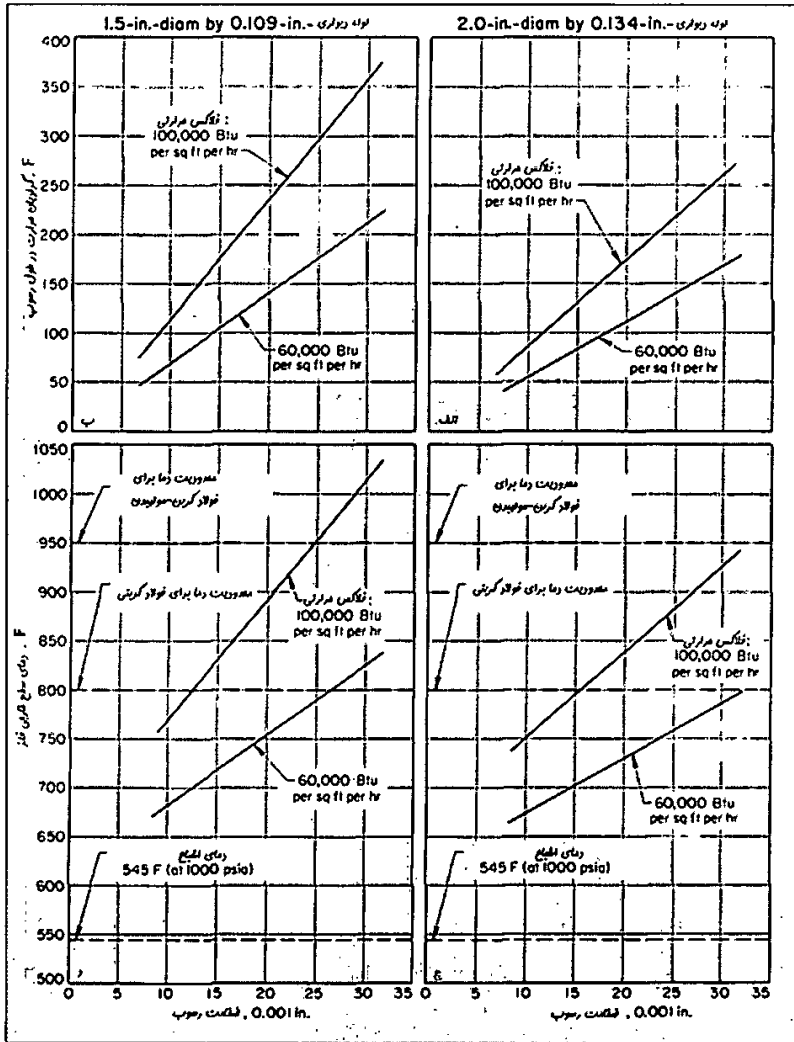
تذکر ۱: رسوب‌ها، محصولات خوردگی، عایق‌های موجود در سطح خارجی و دیگر موادی که روی سطوح خارجی قرار می‌گیرند، در حد اندک باعث کاهش دمای فلز می‌شوند. ممکن است مقاومت حرارتی دیواره لوله، دمای لوله را اندکی افزایش دهد [1].

تذکر ۲: تجربه نشان می‌دهد در مواقعی که نسبت ضخامت رسوب در سطح داغ به سطح سرد لوله‌های آب از ۳ بیشتر می‌شود، گرمای ورودی در سمت داغ به‌طرز چشمگیری نسبت به سطح سرد بیشتر خواهد بود. وقتی این نسبت به ۱۰ می‌رسد، گرمای ورودی سمت داغ نسبت به سمت سرد بسیار بیشتر می‌شود. در صورتی که گرمای ورودی در سطح داغ زیاد نباشد، عملیات شیمیایی تصفیه آب ناقص باشد یا آب تغذیه بر اثر وجود مواد آلوده‌کننده کیفیت شیمیایی مناسب خود را از دست داده باشد، این نسبت معمولاً از ۳ کمتر خواهد بود [1].



شکل ۱۳.۴. تغییرات دما هنگام انتقال حرارت به سیال درون لوله.

به اثر وجود رسوب داخلی در افزایش دمای لوله توجه کنید [2].



شکل ۱۴.۴. منحنی دما بر حسب ضخامت رسوب برای دو لوله با ابعاد گوناگون و در دو فلاکس حرارتی گوناگون؛ (الف) و (ب) اثر ضخامت رسوب بر گرادینان حرارتی عبوری از رسوب، (ج) و (د) اثر ضخامت رسوب بر دمای سطح خارجی لوله.

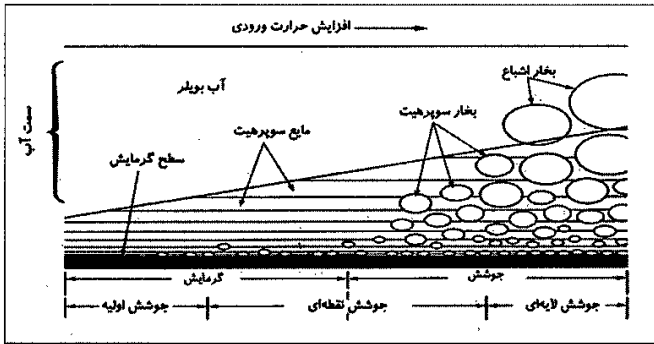
نذکر ۳: رسوب‌گذاری در لوله‌های سوپرهیتر، بر اثر انتقال کف از درام به سوپرهیترها<sup>۱</sup> یا استفاده از آب اسپری آلوده در دی‌سوپرهیتر رخ می‌دهد. در بسیاری از لوله‌های بخار، اختلاف فلاکس حرارتی ورودی بین سطوح داغ و سرد قابل توجه نیست، بنابراین نحوه رسوب‌گذاری در این لوله‌ها، به ویژگی‌های مواد آلوده‌کننده موجود در بخار بستگی دارد و گرماي ورودی بیش از حد، تأثیری بر رسوب‌گذاری ندارد [1]. گرافها (شکل ۱۴.۴) برای رسوبی یکنواخت و پیوسته، با ضریب هدایت حرارتی  $14/4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  و در ناحیه‌ای از لوله که جوشش لایه‌ای است رسم شده‌اند. فشار سیستم، ۶۹۰ کیلوپاسکال (۱۰۰ پوند بر اینچ مربع) است (دمای اشباع: ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد یا ۵۴۵ درجه فارنهایت) [2].

نذکر ۴: لایه اکسید  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  که موقع بهره‌برداری داخل لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر تشکیل می‌شود و با گذشت زمان، ضخامتش افزایش می‌یابد مثل لایه‌های رسوب داخل لوله‌ها عمل می‌کند و باعث افزایش درجه حرارت لوله می‌شود.

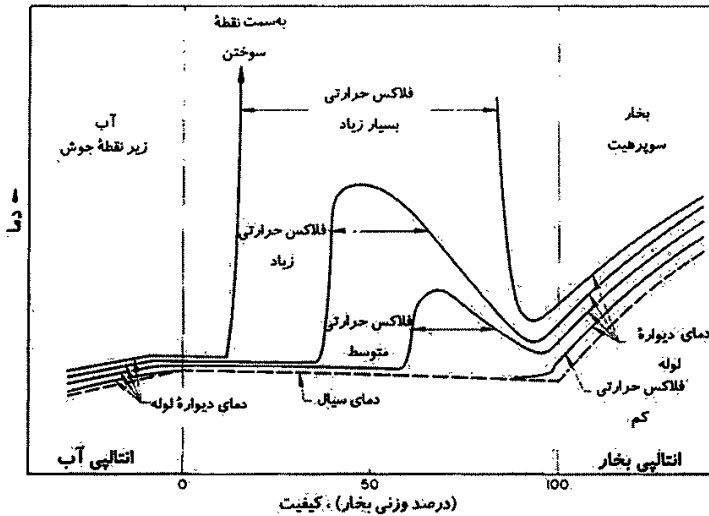
شروع جوشش لایه‌ای ناپایدار: DNB یا شروع جوشش لایه‌ای ناپایدار نیز باعث افزایش مقاومت بر سر راه انتقال حرارت می‌شود. مراحل گوناگون جوشش در شکل ۱۵.۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در فرایند انتقال حرارت به آب در یک سطح، ابتدا دمای آب افزایش می‌یابد تا حباب‌های آب تشکیل شود. با افزایش بیشتر دما، جوشش نقطه‌ای<sup>۲</sup> آغاز می‌شود. این ناحیه از دو قسمت گوناگون تشکیل شده است. در ناحیه اول، حباب‌های جداگانه روی سطح به وجود می‌آیند و از آن جدا می‌شوند. در ناحیه دوم، محل‌های تشکیل حباب فعال‌تر و این امر باعث تداخل و به هم پیوستن حباب‌ها می‌شود. با افزایش بخار، همه سطح با بخار پوشیده و از تماس مایع با سطح جلوگیری می‌شود. در ادامه، جوشش انتقالی یا جوشش لایه‌ای ناپایدار شروع می‌شود. در این مرحله، مقدار تولید بخار بسیار زیاد می‌شود و لایه‌ای از بخار، سطح لوله را فرامی‌گیرد. با توجه به زیادبودن مقاومت حرارتی بخار با کیفیت پایین، با شروع DNB، اختلاف درجه حرارت لوله و سیال افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش دمای لوله می‌شود. در شکل ۱۶.۴ که تغییرات دمای سیال و دمای لوله را برحسب کیفیت بخار نشان می‌دهد، می‌توان اثر شروع DNB را که با شکست ناگهانی در منحنی تغییرات دمای لوله همراه است، مشاهده کرد.

در شکل ۱۵.۴، مراحل تولید بخار در یک سطح نشان داده شده است. جوشش در لوله‌های قائم بویلر با آنچه در این شکل نشان داده شده است، تفاوت‌هایی دارد و در واقع جوشش در لوله

قائم، یک جریان دوفازی است. شکل ۱۷.۴، مراحل تولید بخار را در یک لوله قائم نشان داده است. به‌وضوح می‌توان اثر ایجاد نقاط خشک روی جداره داخلی لوله را بر کاهش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه افزایش دمای لوله، مشاهده کرد. ناصافی‌های سطوح، مکان‌های مناسبی برای تشکیل حباب بخارند. با توجه به کم‌بودن ضریب انتقال حرارت بخار، احتمال افزایش دمای لوله در این نقاط نیز وجود دارد [1، 2، 7].

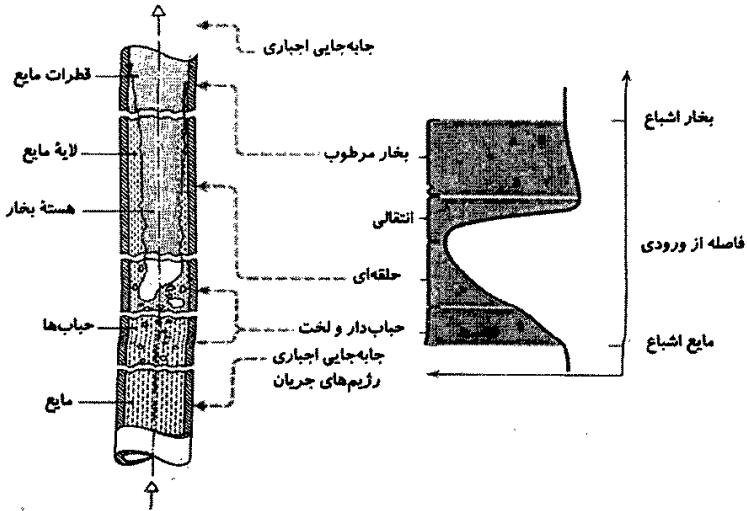


شکل ۱۵.۴. مراحل گوناگون جوشش در یک سطح [1]



شکل ۱۶.۴. تغییرات درجه حرارت دیواره لوله و سیال در فلاکس‌های حرارتی گوناگون برحسب کیفیت بخار [2]





شکل ۱۷.۴. اثر ایجاد نقاط خشک بر کاهش ضریب انتقال حرارت [۷]

افزایش فلاکس حرارتی ورودی: با توجه به روابط انتقال حرارت، با افزایش فلاکس حرارتی ورودی، اختلاف درجه حرارت بین دیواره لوله و سیال داخل لوله افزایش می‌یابد و این امر به افزایش دمای لوله منجر می‌شود (شکل ۱۶.۴).

تذکر: اثر رسوب‌ها بر بیش‌گرمایش لوله‌ها، از اثر ورود حرارت بیش از حد، بیشتر است [2]. مسدودشدن فضای خارجی بین لوله‌ها با خاکستر: سبب مسدودشدن فضای انتقال حرارت جابه‌جایی و افزایش دبی محصولات احتراق در برخی نواحی مجاور می‌شود. افزایش سرعت سیال، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت آتش ( $h_o$ ) و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به لوله و افزایش دمای فلز می‌شود.

کاهش جریان سیال خنک‌کن (آب یا بخار) در لوله‌ها: کاهش جریان در لوله‌ها، باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت آب یا بخار و در نتیجه، کاهش انتقال حرارت از لوله می‌شود. این امر دمای لوله را بالا می‌برد. ممکن است انسداد لوله به خاطر تجمع ذرات اکسید پوسته‌پوسته<sup>۱</sup> به‌ویژه در قسمت‌های ل‌شکل سوپرهیترها یا ری‌هیترها، ایجاد شده باشد. امکان انسداد لوله‌ها پس از شستشوی شیمیایی لوله‌ها، بیشتر است.

پاشش کم یا نامنظم آب در سوپرهیترها و ری‌هیترها: ممکن است به‌خاطر پاشش نامنظم، دمای بخار در بخشی از لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر، تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ درجه فارنهایت) بیشتر از دیگر بخش‌ها شود. از آنجاکه نرخ افزایش دمای بخار باید در سراسر سوپرهیترهای دمابالا یکنواخت باشد، متفاوت بودن درجه حرارت بخار ورودی به سوپرهیتر، به اختلاف دما در فلز لوله منجر می‌شود [2].

تنظیم‌نبودن مشعل‌ها: ممکن است تنظیم‌نبودن مشعل‌ها باعث برخورد شعله با تعدادی از لوله‌ها شود. همچنین، ممکن است تنظیم‌نبودن سوخت و هوای مشعل‌ها توزیع غیریکنواخت محصولات احتراق در کوره را ایجاد کند. این مشکل باعث افزایش فلاکس حرارتی ورودی به لوله‌های برخی مناطق کوره می‌شود.

توزیع نامنظم سیال در لوله‌ها: ممکن است توزیع نامنظم سیال، دبی برخی لوله‌ها را از حد مطلوب پایین‌تر آورد و در نتیجه اثر خنک‌کنندگی سیال کاهش یابد. یا اینکه به‌خاطر رسوب‌گرفتنی ورودی لوله‌ها، توزیع نامنظم سیال در لوله‌های متصل به یک هدر خاص، یا تغییرات موضعی قطر لوله‌ها بر اثر تغییر در روش ساخت لوله‌ها، کاهش سیال خنک‌کن پدید آید. معمولاً در طراحی سوپرهیترها و ری‌هیترها، به توزیع نامنظم بخار در لوله‌ها به‌عنوان یکی از فاکتورهای مؤثر در محاسبه دمای فلز لوله توجه می‌شود.

انتخاب آلیاژهای نامناسب: انتخاب آلیاژی که توانایی تحمل دماهای بالای بهره‌برداری، به‌ویژه در سوپرهیترها و ری‌هیترها را ندارند، موجب بیش‌گرمایش لوله می‌شود. در مورد مشکلات ناشی از انتخاب مواد نامناسب برای تجهیزات بویلر، در فصل ۲۳: «خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب» توضیحات کامل‌تری خواهد آمد.

ورم‌ها: معمولاً وجود ورم‌ها وقوع خرابی را تسریع می‌کند. در بیشتر موارد، این ورم‌ها بر اثر توزیع غیریکنواخت دما در سطوح داغ ایجاد می‌شوند و می‌توانند شکل‌های گوناگون داشته باشند. آن‌ها گاهی سطحی و کم‌عمق و گاهی بزرگ‌اند (شکل ۱۸.۴). ممکن است روی سطح لوله یک یا چند ورم ایجاد شود. معمولاً وقتی ورم‌های بسیاری در سطوح داغ ایجاد می‌شود، ضخامت رسوب‌های داخلی زیاد است. ورم‌ها اغلب باعث پوسته‌پوسته‌شدن رسوب‌های داخلی می‌شوند و این امر به کاهش موضعی دمای لوله منجر می‌شود. در لوله‌های آب، ورم‌ها باعث اغتشاش جریان شده و در نتیجه، احتمال تشکیل پوشش بخار<sup>۱</sup> بیشتر می‌شود. ایجاد پوشش

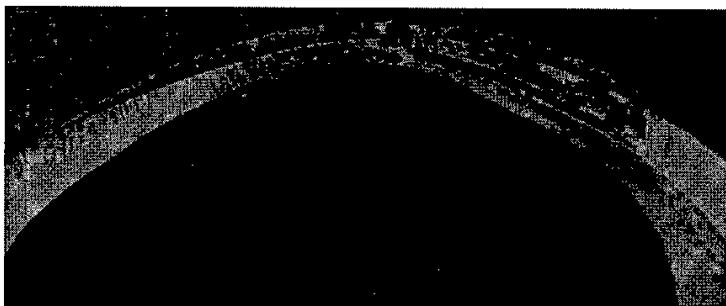
بخار، باعث افزایش دمای لوله می‌شود. همچنین ورم‌ها، سطح انتقال حرارت را افزایش می‌دهند و این باعث افزایش موضعی حرارت ورودی و در نتیجه افزایش دمای لوله می‌شود. به‌طور کلی، دمای لوله در محل ورم‌ها نسبت به قسمت‌های مجاور آن‌ها، بالاتر است. در بسیاری از موارد، حتی اگر رسوب‌های داخلی جدا شوند، وجود ورم‌ها برای بیش‌گرمایش لوله کافی است [1].



شکل ۱۸.۴. ورم‌های پرشمار و بزرگ در سطح داغ لوله دیواره آبی یک بویلر بازیاب [1]

#### ۵.۴. بررسی ظاهر شکست در بیش‌گرمایش بلندمدت

با توجه به شکل ظاهری شکست، می‌توان مواردی را از نشانه‌های بیش‌گرمایش بلندمدت دانست: ۱. می‌توان لایه ترد، ضخیم و سیاه مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) را در نزدیکی محل خرابی و سطوح داخلی و خارجی مشاهده کرد (شکل‌های ۱۹.۴ و ۲۰.۴). چنانچه دمای فلز از مقدار خاصی بیشتر شود، اکسیداسیون حرارتی تسریع خواهد شد. این دماها<sup>۱</sup> که برای هر آلیاژ مقدار خاصی است، در جدول ۵.۳ ارائه شده‌اند. لایه اکسید حرارتی اغلب دارای درزها و ترک‌های طولی است. گاهی اوقات ممکن است قسمت‌هایی از اکسید، پوسته‌پوسته شوند (شکل ۲۱.۴). ترک‌ها و قسمت‌های پوسته‌پوسته‌شده لایه اکسید، بر اثر انبساط و انقباض ایجادشده حین بیش‌گرمایش یا اعمال تنش‌های حرارتی و به دلیل تردبودن لایه اکسیدی، ایجاد می‌شوند. اکسیده‌شدن و کنده‌شدن متناوب فلز لوله، باعث کاهش ضخامت دیواره می‌شود. این فرایند می‌تواند تا اکسیدشدن کامل دیواره و ایجاد حفره در دیواره ادامه یابد (شکل ۲۲.۴)؛



شکل ۱۹.۴. اکسیدهای حرارتی ضخیم در سطوح داخلی و خارجی یک لوله متورم. نازک شدن فلز لوله در محل ورم، بر اثر تغییر شکل پلاستیک و اکسیداسیون حرارتی است [1].



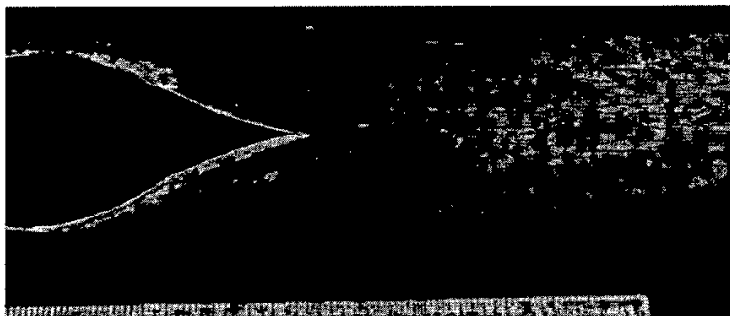
شکل ۲۰.۴. تاول‌های بزرگ مگنتیت در سطح داخلی یک لوله با فشار ۱۰ مگاپاسکال (۱۵۰ پوند بر اینچ مربع). اکسیدها زمانی ایجاد شده‌اند که به‌رغم جریان نداشتن سیالی در لوله، از بویلر بهره‌برداری شده است. دمای فلز به ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) رسیده و همین امر باعث سیلان مگنتیت شده است [1].

۲. در لوله‌های تحت فشار، می‌توان ورم و تغییر شکل پلاستیک را در محل خرابی مشاهده کرد. در برخی شرایط، ممکن است ورم‌های بسیاری ایجاد شوند. معمولاً وقتی رسوب‌های داخلی زیاد باشند، ورم‌های بسیاری در سطوح داغ ایجاد می‌شوند؛

۳. شکست‌ها، اغلب طولی (موازی محور لوله) هستند (شکل ۲۳.۴). شکست‌های خزشی، معمولاً به‌شکل ترک‌های طولی، در نوک ورم‌هایی که به‌شدت اکسید شده‌اند ایجاد می‌شوند (شکل ۲۴.۴). از دیگر شکل‌های شکست خزشی، شکست‌هایی به‌شکل «دهان ماهی»<sup>۱</sup>

1. fish mouth shape

هستند (شکل ۲۵.۴): لبه‌های شکست‌ها بر سطح لوله عمودند. این شکست‌ها می‌توانند بسته به دما، زمان و مقدار تنش، لبه‌کلفت<sup>۱</sup> یا لبه‌نازک<sup>۲</sup> باشند [1]. برخی منابع، فقط شکست‌های لبه‌کلفت را از علائم بیش‌گرمایش بلندمدت دانسته‌اند [2]. سطوح شکست‌های لبه‌کلفت، کمی ناصاف‌اند. ممکن است در نزدیکی محل شکست اصلی، ترک‌ها و شکست‌های طولی که از شکست اصلی کوچک‌ترند، دیده شوند؛



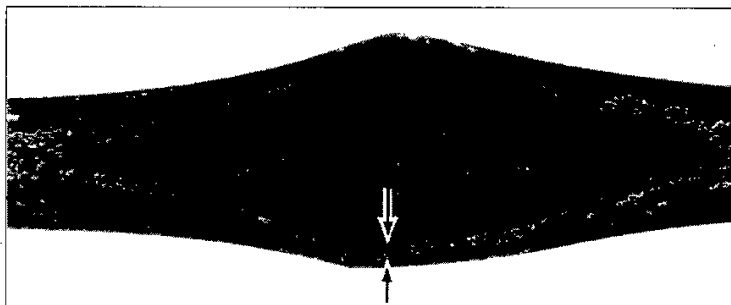
شکل ۲۱.۴. اکسیداسیون حرارتی فلز دیواره یک لوله مربوط به بویلر مصارف جانبی (utility). به پوسته پوسته شدن و ترک خوردن لایه اکسید که شبیه پوست درخت است توجه کنید. این حالت بر اثر ورم کردن لوله و اعمال تنش‌های حرارتی ایجاد شده است [1].



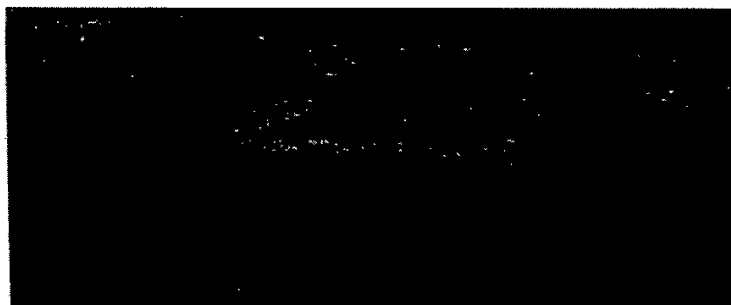
شکل ۲۲.۴. اکسیداسیون لوله در امتداد ضخامت دیواره در یک بویلر فشاریابین. تکه‌های ترد و سیاه مگنتیت هنوز به دهانه محل شکست چسبیده‌اند. در قسمت‌های دیگر، اکسیدها پوسته‌پوسته شده‌اند. این نوع اکسیداسیون که در ضخامت دیواره رخ می‌دهد، در بویلرهای فشاریابین رخ می‌دهد. در این بویلرها، فشار داخلی برای شکست ناگهانی کافی نیست [1].

1. thick lip

2. thin lip



شکل ۲۳.۴. شکست طولی در یک لوله سوپرهیتر (SA213, GRADE TP321H) [2]



شکل ۲۴.۴. شکست خزشی کوچک و با سطح ناصاف در نوک یک ورم. به لبه نسبتاً کلفت شکست و درزهایی که از گوشه‌های شکست شروع شده‌اند، توجه کنید [1].



شکل ۲۵.۴. دو لوله سوپرهیتر مربوط به یک بویلر صنعتی (فشار ۹/۷ MPa - ۱۴۰۰ psi) که بر اثر خزش دچار خرابی شده‌اند. به ظاهر شکست که به شکل دهان ماهی است، توجه کرده و آن را با شکل ۲۴.۴ مقایسه کنید [1].

۴. معمولاً در سمت آب لوله‌ها، رسوب‌های سخت و لایه‌لایه مشاهده می‌شود. معمولاً این رسوب‌ها، بر اثر حرارت بالا به شدت به سطح می‌چسبند. این رسوب‌ها از چند لایه با رنگ‌ها و ترکیب‌های گوناگون تشکیل شده‌اند که داخلی‌ترین لایه (لایه مجاور به سطح داخلی لوله) سخت‌تر و اغلب چسبیده به سطح است. تذکره ۱: بازدید از سطوح برای بررسی وجود ورم، لایه اکسید و پوسته‌پوسته شدن این لایه، توصیه می‌شود.

تذکره ۲: بیش‌گرمایش بلندمدت، همیشه باعث شکست قطعه نمی‌شود، بلکه گاهی فقط تغییرات کمی در ریزساختار لوله ایجاد می‌کند. اغلب در چنین مواردی عمر کاری قطعه کاهش می‌یابد. در صورت تداوم بیش‌گرمایش، شکست رخ خواهد داد. تذکره ۳: با افزایش دما، شدت خرابی‌ها افزایش می‌یابد. تذکره ۴: با اندازه‌گیری دما حین بهره‌برداری با ترموکوپل، اطلاعات مفیدی در مورد احتمال بروز بیش‌گرمایش به دست می‌آید [۱، ۲].

#### ۶.۴. بررسی ریزساختار در بیش‌گرمایش بلندمدت

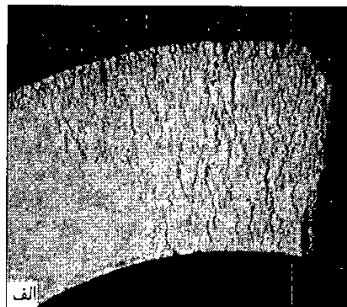
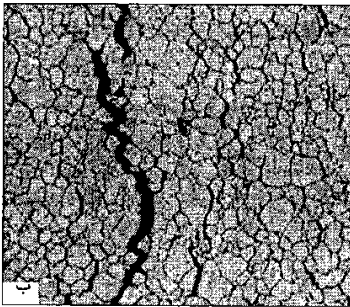
هرچند تشخیص بیش‌گرمایش بلندمدت بر اساس ظاهر شکست، ساده‌تر به نظر می‌رسد، بهترین راه برای شناخت آن، بررسی ریزساختار قطعه است. در خرابی‌های ناشی از خزش، حفره‌های خزشی<sup>۱</sup>، جدایی مرزدانه‌ها، ترک‌های مرزدانه‌ای در سطوح داخلی یا (و) خارجی و نفوذ ذرات اکسید در مرزدانه‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۲۶.۴). علائم خرابی‌های ناشی از بیش‌گرمایش را می‌توان جداگانه برای فولادهای گوناگون بررسی کرد: ۱. فولادهای ساده یا کم‌آلیاژ: در این فولادها، معمولاً بیش‌گرمایش بلندمدت در دماهای کمتر از ACI (دمای بحرانی اول<sup>۲</sup>)، باعث تجزیه پریلیت به فریت و کاربیدهای کرومی می‌شود و این امر استحکام ماده را کاهش می‌دهد. در صورت تداوم بیش‌گرمایش، حفره‌های مرزدانه‌ای تشکیل می‌شوند (شکل ۲۷.۴الف). دانه‌ها به‌طور اتفاقی (بدون جهت ترجیحی) از یکدیگر جدا می‌شوند (شکل ۲۷.۴ب) و قطعه بر اثر تنش، دچار خرابی می‌شود؛ ۲. فولادهای فریتی: در این فولادها، فاز کاربید به تدریج از فازهای اولیه جدا و در نهایت کاملاً کرومی می‌شود. در شکل ۲۸.۴، مراحل کرومی شدن کاربیدها نشان داده شده است [۴]:

1. baked

2. cavitation

۳. در ضمیمه (الف)، دماهای بحرانی معرفی شده‌اند.

- الف) ساختار اولیه فلز دست‌نخورده (فريت و پرليت)  
 ب) مشاهده کاربيدها در مرزدانه‌ها  
 ج) آغاز کروي‌شدن کاربيدها  
 د) پايان کروي‌شدن کاربيدها (کاربيدها هنوز داخل فاز پرليت پراکنده‌اند)  
 ه) پراکنده‌شدن کاربيدها در تمام زمينه  
 و) درشت‌ترشدن و به هم‌پيوستن کاربيدها

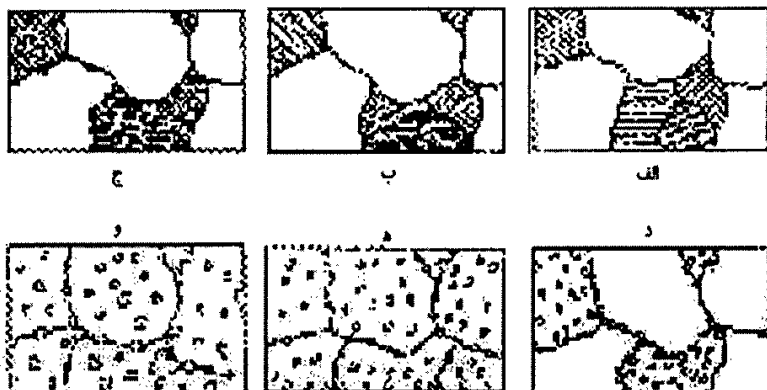


شکل ۲۶.۴. شکست لبه کلفت در یک لوله سوپرهیتر از جنس 213, GRADE TP321H ASME [2]: الف) مقطع اچ‌نشده‌ای (unetched) از ناحیه بین فلش‌های شکل ۲۳.۴. ترک‌های متقاطع در ناحیه وسیعی در مجاورت شکست اصلی مشاهده می‌شوند. (بزرگ‌نمایی: ۴/۵ برابر)؛ ب) ترک‌های مرزدانه‌ای در نمونه‌ای که در محلول ۶۰٪  $HNO_3$  (اسید نیتریک) با روش الکترونیکی، اچ شده است (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰ برابر).



شکل ۲۷.۴. ریزساختار یک نمونه از فولادهای کربنی مورد استفاده در بویلر که در معرض بیش‌ترگرمایش بلندمدت قرار گرفته است؛ الف) حفره‌ها (سیاه‌رنگ) در مرزدانه‌ها و کروي‌شدن (روشن، کروي) کاربيدها؛ ب) جدایی مرزدانه‌ای در مجاورت محل شکست.





شکل ۴.۲۸.۴. مراحل کروی شدن کاربیدها [4]

۳. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی: در این فولادها، ممکن است در دماهای بالا سه نوع ناپایداری متالورژیکی ایجاد شود:

- تشکیل یا افزایش کاربیدها
- رسوب فریت
- تشکیل فاز  $\sigma$  یا  $\chi$

این ناپایداری‌های متالورژیکی، عمر فولادهای زنگ‌نزن را کاهش می‌دهند. بنابراین احتمال خرابی لوله بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت افزایش می‌یابد.

تغییرات ریزساختاری در قطعاتی که دچار گرافیت‌شدن زنجیره‌ای می‌شوند، در بخش ۲.۲.۴ توضیح داده شده‌اند. اکنون فقط ریزساختار لوله‌ای از جنس کربن-مولیبدن که پس از ۱۳ سال در ناحیه متأثر از حرارت<sup>۱</sup> جوش دچار گرافیت‌شدن زنجیره‌ای شده است، نشان داده می‌شود (شکل ۲۹.۴).

در ادامه، نمونه‌هایی از ریزساختار قطعاتی که دچار بیش‌گرمایش بلندمدت شده‌اند، ارائه خواهد شد (نمونه‌های ششم، هفتم و هشتم).

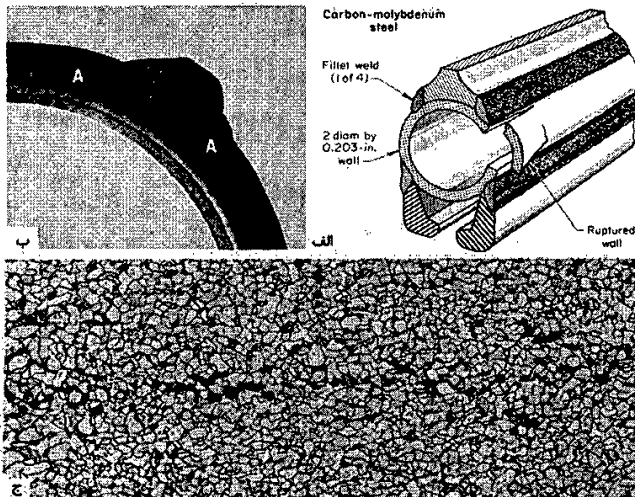
تذکر: وجود نشانه‌های بیش‌گرمایش بلندمدت در ریزساختار لوله در محل شکست، نمی‌تواند دلیل قاطعی بر بیش‌گرمایش لوله حین بهره‌برداری باشد، زیرا ممکن است ریزساختار

مذکور هنگام نصب لوله نیز وجود داشته است. بنابراین در تهیه نمونه برای آزمایش‌های متالوگرافی، علاوه بر محل شکست، باید از نقاطی با فاصله از محل شکست، از لوله‌های مجاور و در صورت امکان، از لوله‌های استفاده‌نشده و مشابه لوله دچار خرابی شده ساخت همان کارخانه نیز نمونه‌هایی تهیه کرد [2].

#### ۷.۴. روش‌های پیشگیری از بیش‌گرمایش بلندمدت

برای پیشگیری از بیش‌گرمایش بلندمدت، موارد زیر توصیه می‌شود:

۱. بازدید از هدرها، خم‌های U شکل، لوله‌های افقی بلند و دیگر نقاط داغ برای بررسی وجود موانع، رسوب و دیگر اجسام خارجی؛
۲. شناسایی و حذف منابع تولید رسوب. دلایل عمده رسوب‌گذاری عبارت‌اند از تصفیه نامناسب آب، آلوده‌شدن سیال در سیکل، بهره‌برداری نادرست از بویلر و گرمای ورودی بیش از حد؛
۳. شستشوی شیمیایی لوله‌ها برای حذف رسوب؛



شکل ۲۹.۴. لوله‌ای از جنس فولاد 25C-MO که بر اثر گرافیت‌شدن در ناحیه HAZ جوش، پس از ۱۳ سال دچار شکست شده است؛ الف) نمایی از لوله که ابعاد، موقعیت جوش و شکست را نشان می‌دهد؛ ب) گرافیت‌شدن در امتداد لبه‌های ناحیه HAZ جوش (A) [بزرگ‌نمایی: ۲ برابر؛ ج) ریزساختار نمونه اچ شده (etched) در محلول ۲٪ نایتال که زنجیره‌ای از ذرات گرافیت را در لبه ناحیه HAZ نشان می‌دهد (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰ برابر).

۴. کنترل احتراق، عملکرد مشعل‌ها و ارزش حرارتی سوخت؛
۵. کنترل دمای سطح کوره حین بهره‌برداری و در نزدیکی نواحی که قبلاً دچار بیش‌گرمایش شده‌اند؛
۶. کنترل عملکرد پاشش آب در سوپرهیترها و ری‌هیترها؛
۷. تغییر جنس لوله‌ها در صورت نیاز؛
۸. استفاده از سپر حرارتی<sup>۱</sup> و مواد عایق (نسوز)<sup>۲</sup> روی لوله‌ها در صورت نیاز؛
۹. توجه به دمای کاری فولادهای گوناگون (فصل سوم را مطالعه کنید). شایان ذکر است که طول عمر لوله‌ها با جنس‌های گوناگون، در شرایط گوناگون تنش و درجه حرارت، در استانداردها موجود است. به‌طور مثال، می‌توان استاندارد BS3059 را نام برد [1، 2].

#### ۸.۴. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلرهای صنایع گوناگون

##### بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت

□ نمونه اول

صنعت:	تولید محصول‌های گازی
محل نمونه:	لوله سوپرهیتر، ۱ m (۳ ft) بالاتر از کف محفظه احتراق <sup>۳</sup> ، نزدیک به وسط کوره
نحوه قرارگرفتن نمونه:	افقی، نزدیک به دیواره آجری <sup>۴</sup>
عمر نمونه:	۱۲ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	درام برای فشار ۴/۸ MPa (۷۰۰ psi) طراحی شده ولی در فشار ۴/۱ MPa (۶۰۰ psi) بهره‌برداری می‌شده است.
مشخصه‌های لوله:	جنس SA-213-T22، قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)
سوخت:	گاز طبیعی

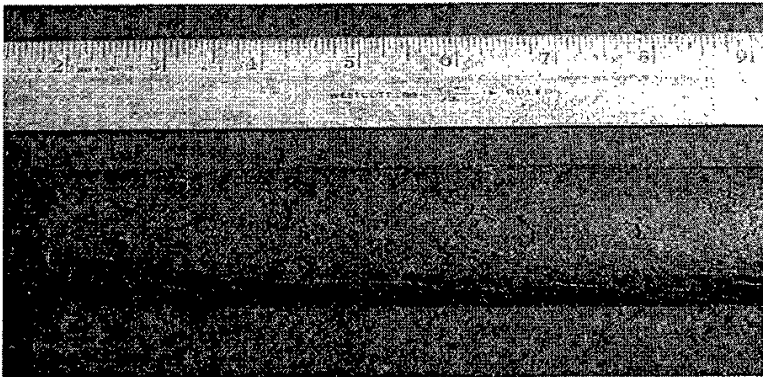
1. tube shielding
3. fire box

2. refractory
4. firebrick

شرایط بهره‌برداری از بویلر: به‌طور متناوب از آن بهره‌برداری شده است. علائم ناشی از خرابی: یک لایه سیاه و ترد مگنتیت، سطوح داخلی و خارجی این لوله سوپرهیتر را پوشانده است. اکسیدهای حرارتی، پوسته‌پوسته شده و این امر ضخامت دیواره لوله را کاهش داده است (شکل ۳۰.۴). کاهش ضخامت دیواره در سطح خارجی لوله و در قسمت‌های نزدیک به دیوار G آجری، بیشتر است.

علت اکسیداسیون شدید و خرابی لوله: اکسیداسیون حرارتی در دماهای ۶۰۰ تا ۷۲۷ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۰ تا ۱۳۵۰ درجه فارنهایت)، باعث از بین رفتن فلز به‌ویژه از سمت خارجی شده است. در لوله‌های مجاور به دیواره آجری، دما بالاتر است و محصولات احتراق کانالیزه شده‌اند. این عوامل باعث تشدید اکسیداسیون و پوسته‌پوسته شدن لایه اکسید شده‌اند.

خرابی‌ها، بر اثر مشکلات طولانی‌مدت ناشی از طراحی و بهره‌برداری ایجاد شده‌اند. نزدیکی محل خرابی‌ها به دیواره آجری نشان‌دهنده بیش‌گرمایش بر اثر مشکلات طراحی است. نکته توجه برانگیز درباره این خرابی: کاهش ضخامت ناشی از اکسیداسیون، در گذشته باعث خرابی‌هایی در لوله‌های مجاور این لوله شده است. داخل این لوله‌ها، رسوبی وجود نداشته و پاشش آب انجام نمی‌شده است: در سطوح خارجی لوله‌ها، خاکستری<sup>۲</sup> وجود نداشته است [1].



شکل ۳۰.۴. اکسیداسیون شدید حرارتی و پوسته‌پوسته شدن آن‌ها در سطح خارجی. شکل لایه‌لایه اکسیدها، نشان‌دهنده چندمرحله‌ای بودن اکسیداسیون و پوسته‌پوسته شدن آن‌هاست.

## □ نمونه دوم

صنعت:	فولاد
محل نمونه:	قسمت میانی لوله‌های دیواره آبی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۸ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۸/۳ MPa ( ۱۲۰ - psi )
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm ( ۳ in )
سوخت:	Blust-Furnace Gas

علائم ناشی از خرابی: درزهای طولی و لبه‌کلفت و همچنین ورم‌های ترک‌خورده در طول قسمت داغ لوله مشاهده می‌شود (شکل ۳۱.۴). ۳ سال قبل از خرابی، بویلر شستشو داده شده و رسوب‌هایی با تراکم ۲۲ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع، سطوح داغ داخلی این لوله‌ها را پوشانده است. سطوح، با لایه‌ای ناصاف از خاکسترهای قهوه‌ای روشن پوشیده شده‌اند. سطح خارجی لوله در نزدیکی درزها، شطرنجی‌شکل است.



شکل ۳۱.۴. درزهای طولی در قسمت داغ لوله. به ایجاد ترک‌ها در نوک ورم توجه کنید.

علت ایجاد درزها و شکست لوله: درزها و شکست لوله، بر اثر بیش‌گرمایش بسیار بلندمدت در دماهای ۴۵۴ تا ۵۶۶ درجه سانتی‌گراد (۸۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه فارنهایت) ایجاد شده‌اند. شواهد نشان می‌دهد احتمالاً به مدت چند سال از لوله در این محدوده دمایی بهره‌برداری شده است. علت بیش‌گرمایش، زیادتربودن گرمای ورودی نسبت به دبی سیال خنک‌کن است.

نکته توجه برانگیز دربارهٔ این خرابی: لوله‌های مجاور به این لوله نیز با شدت کمتری دچار بیش‌گرمایش شده‌اند [1].

□ نمونهٔ سوم

صنعت:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	دیوارهٔ روبه‌روی مشعل‌ها <sup>۲</sup> ، به‌فاصلهٔ ۹/۱ m (۳۰ Ft) از دیوارهٔ مشعل‌ها <sup>۳</sup>
نحوهٔ قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱/۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۴/۳ MPa (۶۲۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
سوخت:	زغال‌سنگ پودر شده

شرایط بهره‌برداری از بویلر: در بویلری که این لوله در آن به‌کار رفته است، نوسانات مکرر بار، امری عادی است و همچنین از این بویلر به‌طور متناوب بهره‌برداری شده است. علائم ناشی از خرابی: تعدادی ورم در امتداد گردهٔ داغ لوله ایجاد شده است (شکل ۱۸.۴). لایهٔ ضخیم، سخت و چسبندهٔ اکسید آهن، به غیر از محل‌هایی که این لایه پوسته‌پوسته و در نتیجه کنده شده، روی ورم‌ها را پوشانده است. روی لایهٔ مگنتیت سطح داخلی لوله، در سمت داغ آن، با رسوب‌های اسفنجی و متخلخل پوشیده شده است. وزن رسوب‌ها در سطح سرد، ۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع (۵ گرم بر فوت‌مربع) و در سطح داغ، ۲۸ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع (۲۶ گرم بر فوت‌مربع) است. در همان ارتفاع، در دیوارهٔ پشتی نیز خرابی‌های بسیاری مشاهده می‌شود.

علت رسوب‌گذاری و بیش‌گرمایش: تشکیل رسوب در سطوح، بر اثر فقدان تعادل بین مقدار سیال خنک‌کن و گرمای ورودی است. ورود ذرات خارجی به داخل آب و افزایش غلظت ذرات بر اثر تبخیر، باعث رسوب‌گذاری شده‌اند.

1. utility  
3. front wall

2. rear wall

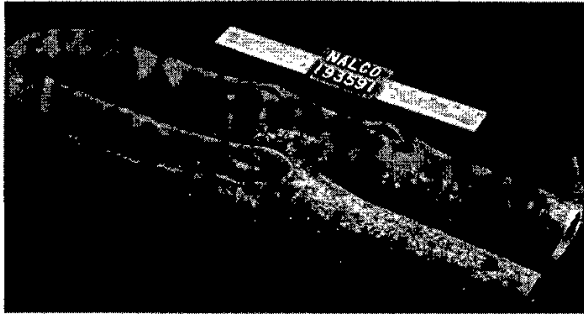
در محل ورم‌ها، دمای لوله برای مدت طولانی، در محدوده ۵۱۰ تا ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد (۹۵۰ تا ۱۱۵۰ درجه فارنهایت) بوده است. این مسئله باعث بیش‌گرمایش لوله در محل ورم‌ها، و دمای بالا به‌همراه بهره‌برداری متناوب از بویلر و نوسانات زیاد بار، باعث بیش‌گرمایش لوله شده‌اند. روش پیشگیری از بیش‌گرمایش: با توجه به بهره‌برداری متناوب از بویلر و نوسانات بار، کنترل دقیق‌تر پارامترهای بهره‌برداری توصیه می‌شود [1].

□ نمونه چهارم

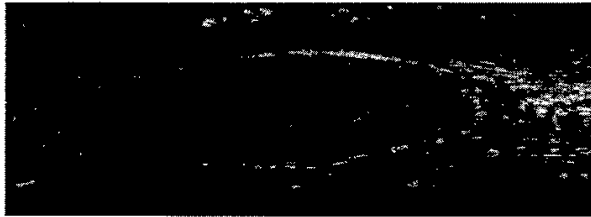
صنعت:	فولاد
محل نمونه:	لوله‌های سوپرهیتر اولیه
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی، آویزان
عمر نمونه:	۱۶ سال
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۸/۳ MPa (۱۲۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۷ cm (۲/۲۵ in)
سوخت:	گاز کک <sup>۱</sup>

علائم ناشی از خرابی: در قسمت لاشکل یک لوله سوپرهیتر، سه ورم مشاهده می‌شود که هر سه دچار شکست شده‌اند. این لوله به قدری باد کرده که قطر خارجی آن از ۵/۷ سانتی‌متر (۲/۲۵ اینچ) به ۶/۴ سانتی‌متر (۲/۵ اینچ) رسیده است (شکل‌های ۳۲.۴ و ۳۳.۴). درحالی‌که در سطوح داخلی، رسوب چشمگیری وجود ندارد، سطوح خارجی با یک لایه چسبیده و تکه‌تکه اکسید، پوشیده شده‌اند. در مجموع، ۱۸ لوله دچار خرابی شده‌اند.

علت ایجاد ورم‌ها و شکست آن‌ها: دمای لوله برای چند روز (یا بیشتر) به ۵۴۰ تا ۷۳۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰۰ تا ۱۳۵۰ درجه فارنهایت) رسیده است. این مسئله باعث کاهش استحکام دیواره در دمای بالا می‌شود و ضخامت دیواره نیز بر اثر اکسیدشدن کاهش یافته است. این دو عامل باعث تشکیل ورم‌ها و درنهایت شکست آن‌ها شده‌اند.



شکل ۳۲.۴. ایجاد ورم در قسمت لاشکل سوپرهیتر و شکست آن‌ها؛ لوله کمی باد کرده است.



شکل ۳۳.۴. اکسیدهای حرارتی تکه‌تکه در اطراف ورم‌های مشخص شده در شکل ۳۲.۴

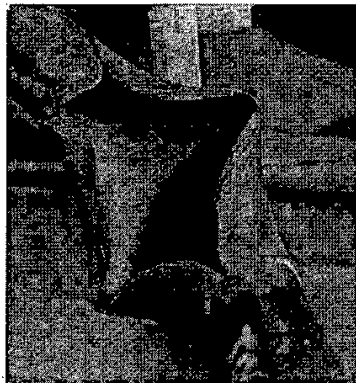
نکات توجه‌برانگیز در مورد این خرابی:

- حرارت لازم برای این بویلر، از تلفات حرارتی کوره یک کارخانه ورق‌سازی تأمین شده است.
- سوابق بهره‌برداری، افزایش دمای بخار در حدود ۵۶ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ درجه فارنهایت) را طی دو ماه قبل از خرابی نشان می‌دهند. از آنجا که از کارخانه ورق‌سازی به‌طور متناوب بهره‌برداری می‌شده، شرایط انتقال حرارت در بویلر متغیر بوده و این امر به افزایش دمای بخار منجر شده است [1].

علائم ناشی از خرابی: دقیقاً در پایین‌دست یک جوش محیطی، شکستی بزرگ، لبه‌کلفت و طولی ایجاد شده است. بر اثر شدت انفجار، لوله به شکل L خم شده است. این شکست بزرگ، از یک طرف به دو پارگی لبه‌کلفت محدود شده است (شکل ۳۴.۴). به جز قسمت‌های نزدیک به محل شکست که لایه اکسید، ترک‌خورده و کنده‌شده است، لایه ضخیم و چسبنده مگنتیت روی سطوح خارجی را پوشانده است. در سطوح داخلی، لکه‌هایی از رسوب‌های حاوی مس مشاهده می‌شود.



نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	ورودی سوپرهیتر اولیه، در قسمتی که گازهای حاصل از احتراق، بیشترین دما را داشته است.
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۲۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۸/۳ MPa (۱۲۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	لوله جوشکاری شده (جوش محیطی)، قطر خارجی: ۵/۷ cm (۲/۲۵ in)
سوخت:	در حال حاضر: زغال سنگ (گوگرد: ۱٪، خاکستر: کمتر از ۱٪)، تا ۶ ماه قبل از خرابی: مازوت (گوگرد: ۲٪، وانادیم: ۴۰۰-۲۰۰ ppm)



شکل ۲۴.۴. شکست بزرگ و لبه کلفت بر اثر خزش. به جوش محیطی در زیر شکست توجه کنید. لوله بر اثر شدت شکست، پاره و به صورت زائویی ۹۰° خم شده است.

علت خرابی: لوله بر اثر بیش گرمایش بلندمدت در دماهای بالاتر از ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۵۰ درجه فارنهایت) دچار چنین شکستی شده است. دلیل اصلی شکست، خزش است. اغتشاش سیال پس از جوش و رسوب‌های داخلی، باعث کاهش انتقال حرارت از لوله شده‌اند.

همچنین تغییر سوخت از مازوت به زغال‌سنگ، احتمالاً باعث تغییر میزان حرارت ورودی به لوله شده است. این عوامل به بیش‌گرمایش لوله کمک کرده‌اند [1].

نکات توجه‌برانگیز در مورد این خرابی:

- در گذشته، انتقال کف از درام به سوپرهیترها و نوسانات بار در این بویلر، متداول بوده است.
- دست‌کم ۲ سال قبل، در همین ناحیه خرابی‌هایی رخ داده است.

#### □ نمونه ششم (بررسی ریزساختاری) [2]

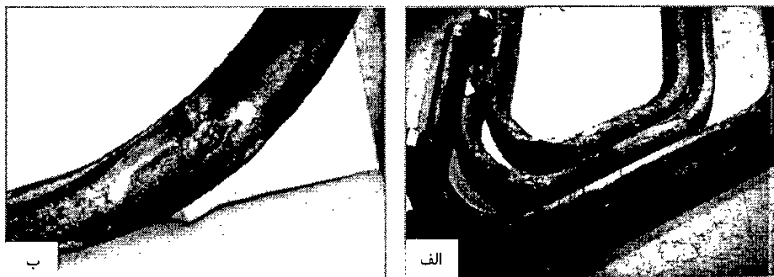
صنعت:	نیروگاه
محل نمونه:	ری‌هیتر
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶۴ mm (۲/۵ in)
	ضخامت دیواره: حداقل ۳/۴ mm (۰/۱۳۴ in)
	جنس: SA-213-T22 (1.25Cr-0.5 Mo)

علائم ناشی از خرابی: بررسی‌های چشمی نشان می‌دهد تمامی خرابی‌ها مشابه‌اند. چهار لوله از مجموعه لوله‌های آویزان در شکل‌های (۳۵.۴ الف) و (۳۵.۴ ب)، ترک‌های ریز ایجاد شده را نشان می‌دهند. اندازه‌گیری‌های ابعادی، هیچ علامتی حاکی از بادکردن لوله را به‌جز در محل خرابی نشان نمی‌دهند. ضخامت لوله در نواحی دور از محل خرابی، بسته به محل اندازه‌گیری و لوله انتخاب شده، بین ۳/۸ تا ۳/۹ میلی‌متر (۰/۱۴۸ تا ۰/۱۵۴ اینچ) است که به‌اندازه کافی از حداقل ضخامت دیواره یعنی ۳/۴ میلی‌متر، بیشتر است. هیچ خوردگی یا فرسایش چشمگیری و همچنین، هیچ رسوبی داخل لوله مشاهده نمی‌شود. در مناطق دور از محل ترک‌ها، رسوب‌های پوسته‌پوسته، کاملاً یکنواخت و با ضخامت ۰/۱۳ میلی‌متر (۰/۰۵ اینچ) وجود دارند. ضخامت این رسوب‌ها در منطقه خرابی به ۱/۳ میلی‌متر (۰/۰۵ اینچ) نیز رسیده است. مقدار اندکی از لایه‌های جدا شده از سطح داخلی یکی از لوله‌ها که چند تکه ضخیم بودند، داخل یکی از لوله‌ها مشاهده شد.

نمونه‌گیری: از چهار لوله آمده در شکل ۳۵.۴ الف، سه نمونه برای بررسی‌های متالوگرافی انتخاب شدند. محل تهیه این نمونه‌ها به شرح زیر است:

نمونه اول: لبه خرابی

نمونه دوم: در فاصله ۲۰۵ میلی‌متر از محل خرابی و در امتداد خرابی  
نمونه سوم: در صفحه خرابی و با زاویه  $180^\circ$  نسبت به محل خرابی



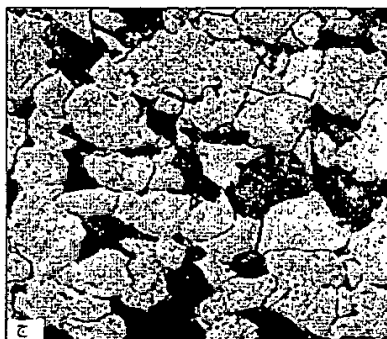
شکل ۴.۵.۴. لوله‌های ری‌هیتر آویزان که دچار شکست شده‌اند؛ الف) بخشی از لوله‌ها پس از جدا کردن از ری‌هیترها؛ ب) یک نمونه از لوله‌هایی که دچار خزش شده‌اند. [2]

بررسی ریزساختار نمونه‌ها؛ ریزساختار قسمت تخریب‌شده (نمونه اول)، کاربیدهای کاملاً  
کروی را در ماتریس فریت نشان می‌دهد (شکل ۴.۳۶.۴ الف). ریزساختار نمونه‌های دوم و سوم،  
ساختار تقریباً فریتی و پرلیتی را به‌طور نرمال نشان می‌دهد (شکل ۴.۳۶.۴ ب و ج). اگرچه  
کاربیدها کروی شده‌اند، اما هنوز محدوده پرلیت به‌راحتی قابل شناسایی است.  
با استفاده از روابط موجود برای تخمین دما و با لحاظ ضخامت ۵ و ۵۰ میلی‌اینچ (۰/۰۵ و  
۰/۰۵ اینچ)، زمان ۳۷۰۰۰ ساعت؛ دمای متوسط فلز در محل خرابی، ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد  
(۱۲۰۰ درجه فارنهایت) و در دیگر نقاط، ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) تخمین  
زده شد.

علت خرابی: علت احتمالی خرابی، پوسته‌پوسته‌شدن رسوب موجود در سطح داخلی و تجمع  
آن‌ها در قسمت‌های U شکل است. این مشکل باعث شده که بخشی از لوله حدود ۱۱۰ درجه  
سانتی‌گراد (۲۰۰ درجه فارنهایت) گرم‌تر از بقیه لوله شده و دمای لوله از حداکثر دمای مجاز  
فولاد SA-213-T11 که ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۲۰۰ درجه فارنهایت) است، بیشتر شود. این  
درجه حرارت باعث خزش و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان در این واحد شده است.

روش پیشگیری از خرابی: لوله‌های ری‌هیتر نسبت به لوله‌های سوپر‌هیتر، شرایط مناسب‌تری  
برای پوسته‌پوسته‌شدن رسوب داخلی دارند. از آنجاکه جلوگیری از این مسئله دشوار است،  
مؤثرترین راه‌حل ممکن، تعویض لوله‌های دچار مشکل است. بنابراین پیشنهاد می‌شود با

استفاده از رادیوگرافی، لوله‌هایی که دارای بیشترین تجمع زباله‌اند مشخص شده و سپس با توجه به ضرورت، تعویض شوند.



شکل ۳۶.۴. ریزساختار لوله آمده در شکل ۳۵.۴ ب که در محلول نایتال، اچ شده است (بزرگ نمایی: ۵۰۰ برابر)؛ الف) کروی شدن کامل فاز کاربید در فریت در لبه خرابی؛ ب) پرلیت و فریت نرمال در صفحه خرابی، در زاویه  $180^\circ$  نسبت به محل خرابی؛ ج) پرلیت و فریت نرمال در فاصله ۲۰۵ میلی‌متر از محل خرابی.

نکته توجه برانگیز این خرابی: ریزساختار لوله نشان می‌دهد که فقط در محدوده کوچکی از لوله، دما بالا بوده است [2].

علائم ناشی از خرابی: چنان‌که در شکل ۳۷.۴ مشاهده می‌شود، لوله در محل خم در جهت طول لوله سوراخ شده است. علاوه بر ترک اصلی، ترک‌های فرعی نیز به موازات ترک اصلی دیده می‌شوند. لایه اکسیدی، پوسته پوسته شده و به سهولت از سطح جدا می‌شود. ترک اصلی از نوع لبه کلفت است. علاوه بر سطح خارجی، در سطح داخلی نیز یک ترک اصلی و ترک‌هایی

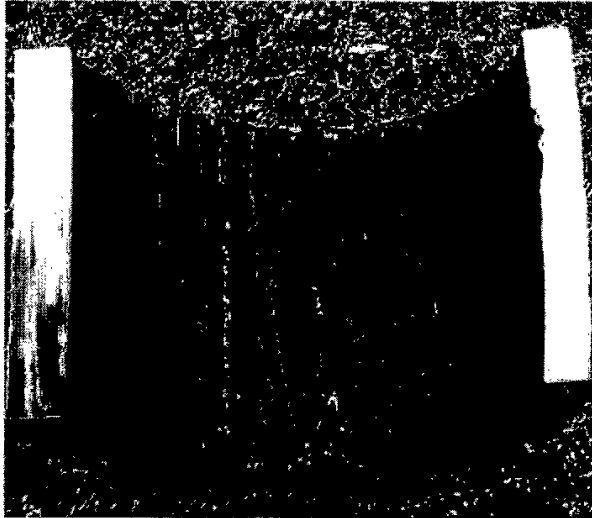
به موازات آن در لایه اکسید داخلی ایجاد شده است (شکل ۳۸.۴). قطر خارجی لوله در محل شکست به ۳۴/۵ میلی متر رسیده است.

□ نمونه هفتم (بررسی ریزساختاری) [۸]

نوع بویلر:	نیروگاهی ۶۰ مگاواتی
محل نمونه:	سوپر هیتز نهایی
نحوه قرار گرفتن نمونه:	زانویی ۸۰° (قائم به مایل)
فشار درام:	۹/۹ MPa (۱۴۳۶ psi)
مشخصه های لوله:	قطر خارجی: ۳/۲ cm (۱/۲۶ in)، ضخامت اولیه: ۰/۴ cm (۰/۱۶ in)، جنس: فولاد 15Mo3 (استاندارد DIN)
سوخت:	مازوت و گاز



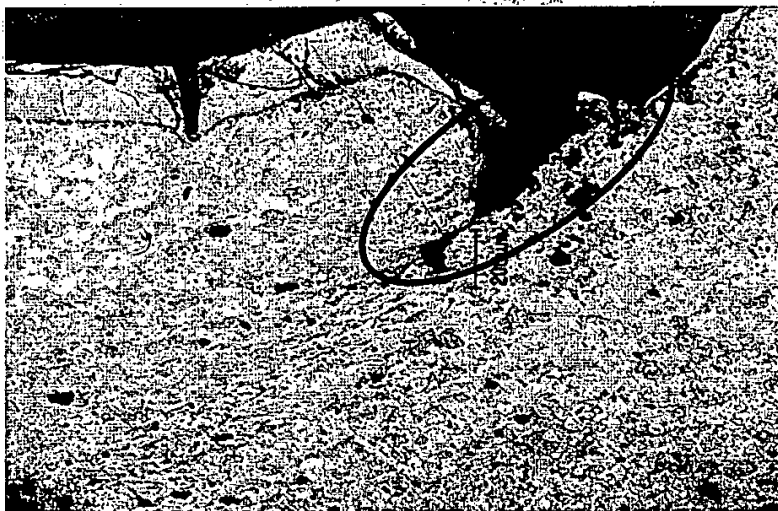
شکل ۳۷.۴. ترک اصلی و ترک های فرعی موازی با آن در سطح خارجی لوله



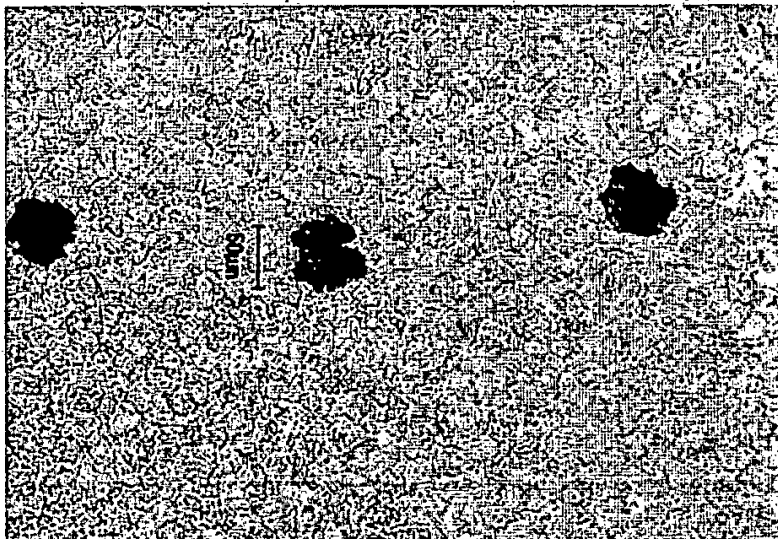
شکل ۳۸.۴. ترک اصلی و ترک‌های فرعی موازی با آن در لایه اکسید داخلی

علت خرابی: با توجه به لبه کلفت بودن ترک، ایجاد ترک‌هایی به موازات آن در سطوح داخلی و خارجی و افزایش قطر لوله، شکست خزشی عامل خرابی بوده است.

تذکر: در برخی خرابی‌ها، چند مکانیسم خرابی در ایجاد شکست نهایی اثرگذارند. در این لوله نیز گرافیت‌ها در تسریع شکست مؤثر بوده‌اند. در فولادهای کربنی ساده و فولادهای کم‌آلیاژ، گرافیت‌شدن در محدوده دمایی ۴۲۷ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ تا ۱۲۵۰ درجه فارنهایت) اتفاق می‌افتد. با توجه به دمای بخار خروجی از این سوپرهیتر (۵۱۴ درجه سانتی‌گراد) و محاسبات انجام‌شده، درجه حرارت فلز از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد کمتر بوده و شرایط مناسب دمایی برای گرافیت‌شدن آن وجود داشته است. شکل‌های ۳۹.۴ و ۴۰.۴، گرافیت‌شدن را که پدیده‌ای طبیعی برای این فولاد است، نشان می‌دهند. چنان‌که در شکل ۳۹.۴ مشاهده می‌شود، ترک اصلی با شکست لایه اکسید داخل لوله شروع شده است و کریستال‌ها در امتداد نوک ترک، جهت‌دار شده‌اند. همچنین، گرافیت‌ها باعث تسریع شکست شده‌اند. شایان ذکر است که افزودن فقط ۰/۵٪ کروم، مانع گرافیت‌شدن فولاد می‌شود [۸].



شکل ۳۹.۴. کشیده شدن کریستال‌ها در راستای انتشار ترک. به ذرات گرافیت ایجاد شده (ذرات سیاه‌رنگ) در فولاد توجه کنید و (شکل ۴۰.۴) را نیز ببینید.



شکل ۴۰.۴. ذرات گرافیت ایجاد شده که به هم پیوستن آن‌ها راستای شکست را مشخص می‌کند.

□ نمونه هشتم (بررسی ریزساختاری) [۸]

نوع بویلر:	نیروگاهی ۶۰ مگاواتی
محل نمونه:	سوپرهیتر نهایی
نحوه قرار گرفتن نمونه:	زانبویی ۸۰° (قائم به مایل)
فشار درام:	۹/۹ MPa (۱۴۳۶ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۳/۲ cm (۱/۲۶ in)، ضخامت اولیه: ۰/۴ cm (۰/۱۶ in)
ساخت:	جنس: فولاد 14MoV63 (استاندارد DIN) مازوت و گاز

علائم ناشی از خرابی: در محل خم‌ها در سوپرهیتر نهایی، چند مورد خرابی اتفاق افتاده است (شکل ۴۱.۴). شکست‌های ایجاد شده از نوع لبه کلفت‌اند. در اطراف محل گسیختگی، لایه اکسیدی کاملاً از بین رفته است (شکل‌های ۴۲.۴ و ۴۳.۴). به‌رغم تشکیل لایه ضخیم اکسید در خارج لوله که باعث کاهش قطر خارجی می‌شود، قطر لوله هنگام شکست به ۳۳ میلی‌متر افزایش یافته است.



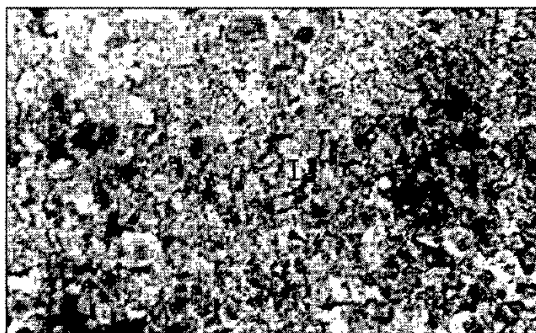
شکل ۴۱.۴. شکست لبه کلفت در محل خم لوله سوپرهیتر



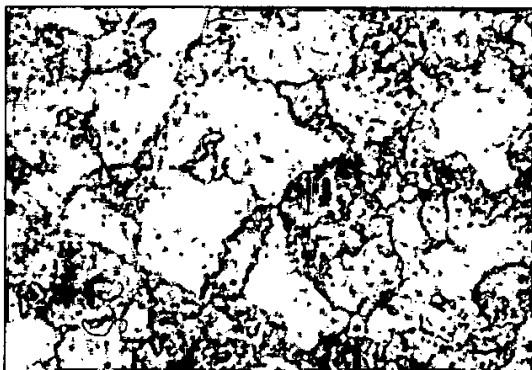


شکل ۴۲.۴. سطح داخلی لوله در محل شکست. به ترک‌های ایجادشده در لایه اکسید دقت کنید.

علت خرابی: شرایط بهره‌برداری (درجه حرارت فلز نزدیک به ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار داخلی ۹/۹ مگاپاسکال) امکان خزش را برای لوله فراهم کرده است. تذکر: شایان ذکر است که تحمل درجه حرارت زیاد، اغلب باعث تغییرات ساختاری و تشکیل کاربید در مرزدانه‌ها می‌شود، اما زیادبودن تنش، عامل اصلی ایجاد حفره‌های خزشی است. به‌همین دلیل در خارج خم که به‌دلیل خمکاری، ضخامت کاهش و در نتیجه تنش افزایش یافته است. علاوه‌بر کاربیدهای درشت، حفره‌های خزشی مرزدانه‌ای به‌وجود آمده است. شکل ۴۳.۴ کاربیدها و حفره‌های خزشی را که نشانه خزش پیشرفته است نشان می‌دهد. داخل خم فقط تغییرات ساختاری اتفاق افتاده است و کاربیدها تشکیل شده‌اند، اما از حفره‌های خزشی اثری نیست (شکل ۴۴.۴) [۸].



شکل ۴۳.۴. ساختار لوله در محل گسیختگی. حفره‌های خزشی ایجادشده و کاربیدهای کروی‌شده در مرزدانه‌ها، در شکل قابل شناسایی‌اند (بزرگ‌نمایی: ۵۰۰ برابر، محلول اچ: نایتال).



شکل ۴۴.۴. مقابل لبه شکست در لوله سوپرهیتر. کاربیدهایی که در مرزدهانه‌ها کروی شده‌اند، در شکل مشخص‌اند (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰۰ برابر، محلول اچ: نایتال).

□ نمونه نهم (ارزیابی عمر باقی‌مانده) [۹]

صنعت:	نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی
محل نمونه:	سوپرهیتر اولیه
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۲۰ سال
مشخصه‌های لوله:	جنس: 10CD5-05 (نزدیک به فولاد 14CrMo3 استاندارد UNI ایتالیا)

با افزایش آمار خرابی‌ها و گسیختگی‌های سوپرهیتر، به ارزیابی و تخمین عمر این لوله‌ها توجه شد. سوابق بهره‌برداری از سوپرهیترها در جدول ۱.۴ آمده است.

جدول ۱.۴. اطلاعات بهره‌برداری واحد

توان (مگاوات)	فشار (بار)	درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	مدت بهره‌برداری (ساعت)
<۲۵۰	<۱۵۵	<۵۳۹	≈۱۳۱۴۰
۲۵۰	۱۵۷	۵۴۰	۶۱۳۲۰
۲۸۰	۱۶۷/۵	۵۴۱	۴۸۱۸۰
۳۰۰	۱۶۸/۵	۵۴۱	۳۵۰۴۰
مجموع زمان بهره‌برداری (ساعت)			۱۵۷۶۸۰

محاسبه عمر صرف‌شده بر اثر خزش

محاسبه طول عمر قطعات در رژیم خزشی، بر اساس زمان صرف‌شده در ناحیه دوم از منحنی خزش (خزش ثانویه) انجام می‌شود. اگر عمر قطعه در تنش و درجه حرارت مشخصی  $t_f$  و زمان بهره‌برداری از قطعه در این شرایط  $t$  باشد، بر اساس قانون کسر عمر، عمر صرف‌شده  $\frac{t}{t_f}$  است. عمومی‌ترین روش محاسبه آسیب فزاینده خزشی، محاسبه مقدار عمر صرف‌شده با استفاده از کسر زمان یا کرنش است. در محاسبه عمر لوله‌های سوپرهیتز از رابطه کسر زمان،  $\sum \frac{t_i}{t_{fi}} - e$  استفاده می‌شود.

در محاسبات دقیق، معمولاً مدت زمان کاری قطعه به فواصل زمانی کوتاهی تقسیم‌بندی و در هر فاصله زمانی، برحسب ضخامت، فشار داخلی و دمای کاری لوله، کسر عمر خزشی محاسبه می‌شود [6]. درنهایت با جمع خطی این مقادیر، کل عمر صرف‌شده قطعه به دست می‌آید و سپس به کمک آن، عمر باقی‌مانده برآورد می‌شود.

محاسبه درجه حرارت بهره‌برداری

گرچه دمای بخار در نقاطی از بویلر اندازه‌گیری می‌شود، اما به‌ندرت به‌صورت موضعی و در نقاط گوناگون لوله‌ها قابل اندازه‌گیری است و درجه حرارت‌های اندازه‌گیری‌شده، محدود به نقاطی از هدرهاست. خوشبختانه، هر لوله تاریخچه درجه حرارت خاص خود را داخل خود دارد (لایه اکسید). چون رشد این لایه تابعی از زمان و درجه حرارت است، می‌تواند به‌منظور تخمین تاریخچه دمایی معادل برای مدت زمان بهره‌برداری استفاده شود [6]. سپس می‌توان با استفاده از داده‌های تنش گسیختگی و دمای محاسبه‌شده از روی ضخامت لایه اکسیدی، عمر باقی‌مانده را تخمین زد.

ضخامت لایه اکسیدی سمت بخار

با توجه به محافظت سطح داخلی لوله با لایه اکسید مغناطیسی آهن ایجادشده داخل آن، سرعت رشد ضخامت لایه اکسیدی با زمان خطی نیست ( $X^2 = kt$ ). در اینجا یکی از روابط تغییرات ضخامت این لایه با دما و زمان، در فولادهای کروم-مولیبدن، ارائه شده است [2]:

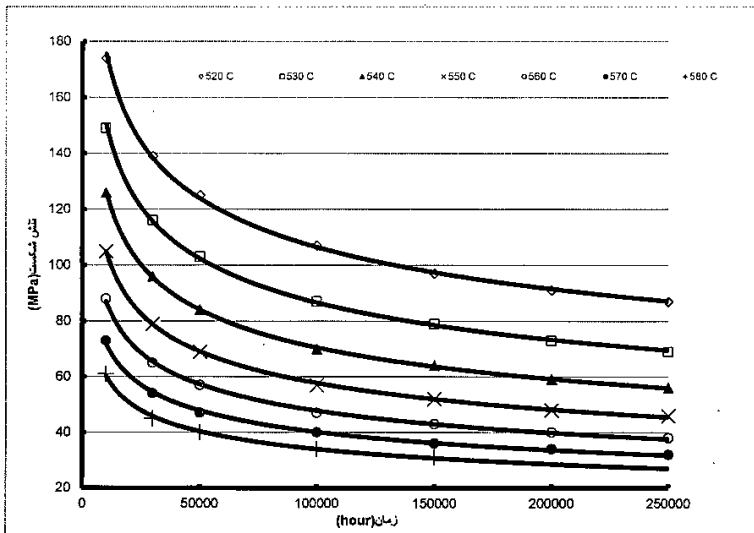
$$\text{Log}X = 0.00022(T + 460) * (20 + \text{Log}t) - 7.25$$

از معادله بالا فقط در تعیین دمای معادل قسمت خارجی لوله از زمان شروع اکسیداسیون استفاده می‌شود؛ بنابراین ترکیدگی یا اسیدشویی، باعث ایجاد خطا در این روش است. با اندازه‌گیری ضخامت لایه اکسیدی با روش متالوگرافی یا آلتراسونیک، درجه حرارت در هر بازه

زمانی را محاسبه می‌کنند. همان‌طور که گفته شد، مبنای این محاسبات، رشد لایه اکسیدی است. با افزایش زمان بهره‌برداری، ضخامت این لایه افزایش می‌یابد. این پدیده مقاومت حرارتی لوله را بالا می‌برد و به تبع آن، دمای فلز بیشتر می‌شود. از طرفی با افزایش ضخامت لایه اکسیدی سمت بخار، اکسیداسیون و سایش سمت آتش، از ضخامت لوله کاسته می‌شود و در نتیجه تنش در جداره لوله افزایش می‌یابد. این دو پدیده (افزایش دما و افزایش تنش) باعث افزایش عمر تلف‌شده به‌ازای زمان واحد می‌شوند.

تنش مؤثر لوله با توجه به ابعاد اولیه و فعلی آن و با استفاده از فرمول ماکسیمم تنش محیطی الاستیک محاسبه می‌شود. برای هر فاصله زمانی، ضخامت لایه اکسید و نازک‌شدن جداره تعیین می‌شود. با تکرار این روند برای هر فاصله زمانی، دما و تنش متوسط فلز برای هر دوره محاسبه می‌شود. بنابراین، عمر صرف‌شده در هر فاصله زمانی با در نظر گرفتن مواردی محاسبه می‌شود:

- افزایش درجه حرارت ناشی از ضخامت لایه اکسیدی سمت بخار
- افزایش تنش ناشی از کاهش ضخامت لوله
- منحنی تنش-گسیختگی در هر دمای محاسبه‌شده بر اساس داده‌های استاندارد (شکل ۴۵.۴)



شکل ۴۵.۴. منحنی‌های تنش-گسیختگی برای فولاد به‌کاررفته در سوپرهیتر؛ بر اساس استاندارد B.S.

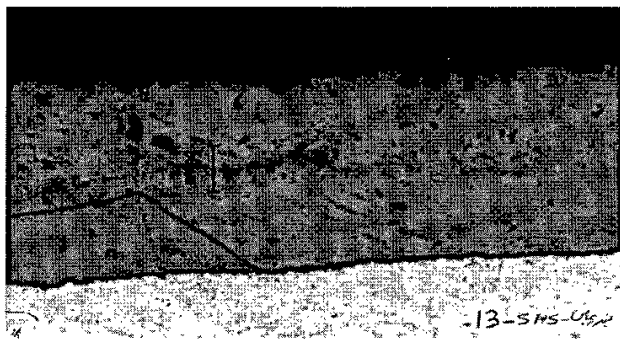
### محاسبهٔ عمر صرف‌شده

این کسر عمرها جمع می‌شوند تا عمر صرف‌شده تا زمان بازرسی ارزیابی شود. عمر باقی‌مانده در زمان‌های بعدی نیز با همین روش از طریق برون‌یابی آن برای آینده محاسبه می‌شود. وقتی جمع عمر صرف‌شده به ۱ رسید، عمر قطعه تمام شده است.

### تعیین عمر نمونه با روش محاسباتی

با توجه به سوابق بهره‌برداری (جدول ۱.۴) و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، دو مقدار ۲۲۰ و ۳۲۰ میکرون به‌عنوان مقادیر حداکثر و حداقل ضخامت لایهٔ اکسیدی (شکل ۴۶.۴) تعیین شد. محاسبهٔ عمر بر اساس این مقادیر و مقدار ضخامت متوسط یعنی ۲۸۰ میکرون انجام شده است. خلاصهٔ نتایج محاسبات در جدول ۲.۴ ارائه شده است.

توجه به نتایج محاسبات نشان می‌دهد که در بعضی نقاط، عمر صرف‌شده از ۱ فراتر رفته و از همین‌رو، تعدادی از نقاط، گسیخته شده که تعدادشان با گذر زمان روبه‌افزایش است [۹].



شکل ۴۶.۴. حداقل ضخامت لایهٔ اکسیدی مشاهده‌شده روی نمونهٔ اچ‌نشده (۲۲۰ میکرون)

جدول ۲.۴. نتیجهٔ محاسبات براساس ضخامت لایهٔ اکسیدی ۲۲۰، ۲۸۰ و ۳۲۰ میکرون

ضخامت لایهٔ اکسیدی (میکرون)			عمر صرف‌شده
۳۲۰	۲۸۰	۲۲۰	
۱/۳۱	۰/۷۷	۰/۴	

□ نمونه دهم [۱۰]

نوع بویلر:	بویلر بازیاب سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله‌های اواپراتور فشاربالای بویلر، از قسمت بدون فین فوقانی و نزدیک به هدر بالا
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی در محل اتصال به هدر بالا
عمر نمونه:	نو و کارکرده
رژیم شیمیایی آب:	AWT (Alkalinity Water Treatment)
فشار کاری:	۱۳۵ - ۱۵۰ bar
مشخصه‌های لوله:	جنس لوله مطابق استاندارد ASTM امریکا، A210 grade A1 است.

بررسی ظاهری: یکی از لوله‌های اواپراتور فشاربالای بویلر سیکل ترکیبی، از قسمت بدون فین فوقانی و نزدیک به هدر بالا دچار گسیختگی شده است. در پی این حادثه، لوله آسیب‌دیده را بردند و لوله نو را جایگزین آن کردند. لوله گسیخته بررسی و تحلیل شد. در بررسی ظاهر لوله آسیب‌دیده (شکل ۴۷.۴)، چند نکته توجه‌برانگیز وجود داشت:

- در لایه اکسید محافظ مگنتیت، ترک‌های موازی به‌وجود آمده و بر اثر انبساط لوله، لایه مگنتیت به‌دلیل تردی دچار گسیختگی شده و لایه محافظ آسیب دیده و فلز لوله دچار اکسیداسیون شده است. تغییر رنگ سطح داخلی لوله، این فرضیه را اثبات می‌کند. انبساط لوله نشان‌دهنده خزش و بیش‌گرمایش بلندمدت است.

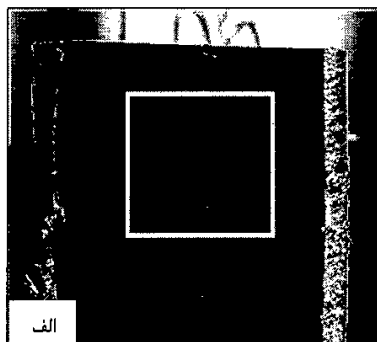
- در محل گسیختگی، لبه‌ها تیز شده‌اند. این نوع شکست می‌تواند نشان‌دهنده افزایش موضعی دما به‌دلیل بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت باشد.

- انبساط لوله درست پس از اتمام ناحیه فین‌دار آغاز شده است. فین‌ها به‌لحاظ مکانیکی باعث استحکام و مانع انبساط لوله می‌شوند. تغییر رنگ لوله پس از اتمام فین‌ها، مؤید این مطلب است (شکل ۴۷.۴).

- ترک‌های محیطی در محل خم لوله و در جهت عمود بر خطوط اولیه دیده می‌شوند. احتمالاً این خطوط، به‌دلیل انبساط و انقباض لوله هنگام خاموش و روشن شدن واحد در محل خم‌ها ایجاد شده‌اند (شکل ۴۸.۴).

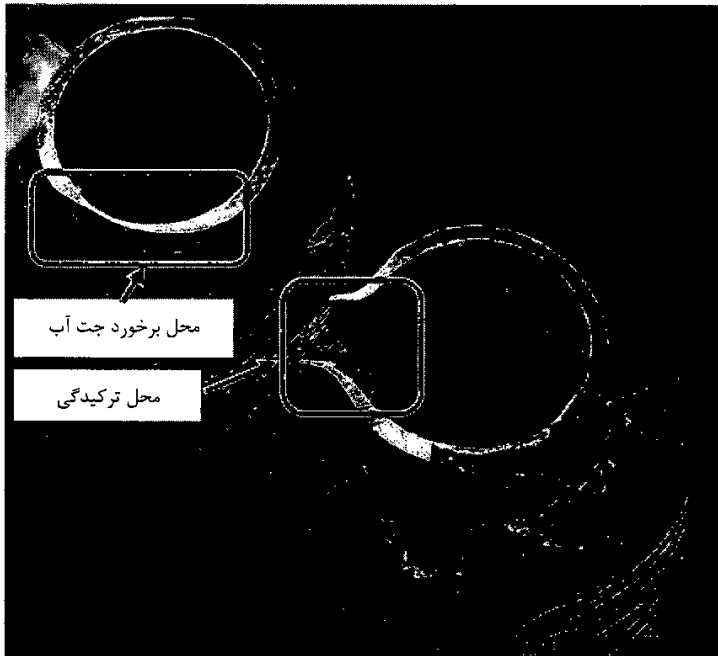


شکل ۴۷.۴. ظاهر لوله آسیب دیده



شکل ۴۸.۴. راستای ترک‌ها در لایه اکسیدی در دو جهت عمود بر هم: شکل (ب)، تصویر بزرگ شده قسمتی از (الف) است.

- نکته دیگر که در بررسی ظاهری جالب توجه است، تأثیر پاشش آب ناشی از ترکیب لوله معیوب بر لوله مجاور آن است. امکان مشاهده موقعیت بروز این اتفاق در شکل ۴۹.۴ وجود دارد.

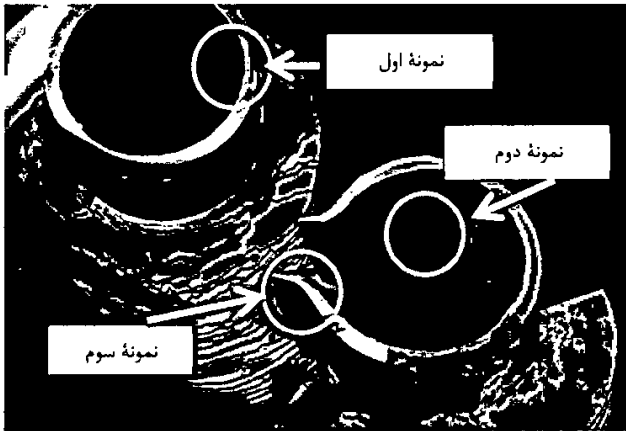


شکل ۴۹.۴. موقعیت لوله آسیب‌دیده و لوله مجاور آن

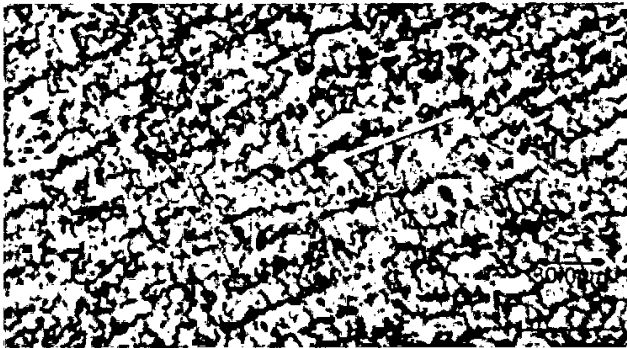
بررسی متالورژیکی: سه نمونه متالوگرافی تهیه شد (شکل ۵۰.۴). نمونه اول از لوله سالم تهیه شد، نمونه دوم از ناحیه ترک‌ها در لایه اکسیدی انتخاب شد و نمونه سوم از لبه پارگی تهیه شد. شکل ۵۱.۴، تصویر متالوگرافی نمونه اول را که از لوله سالم تهیه شده است نشان می‌دهد. پرلیت‌های نواری شکل که به صورت موازی در زمینه فریت هم‌محور نظم یافته‌اند، نشان می‌دهند که در فرایند تولید، از نورد گرم استفاده شده است.

به لحاظ ریزساختاری، بیش‌گرمایش بلندمدت معمولاً در دماهای کمتر از دمای  $AC_1$  (۲۲۷ درجه سانتی‌گراد) اتفاق می‌افتد. بر اثر این پدیده که سبب تجزیه پرلیت به فریت و کاربیدهای کرومی یا ایجاد ذرات گرافیت می‌شود، استحکام فولاد کاهش می‌یابد. این دو مکانیسم در دماهای بین ۴۲۷ تا ۷۳۲ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهند. با این تفاوت که در دماهای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در فولادهای کربنی (به دلیل کم بودن مقدار کروم)، گرافیت‌شدن و در دماهای بالاتر تشکیل کاربیدهای کرومی، مکانیسم‌های غالب برای تجزیه پرلیت‌اند (شکل ۱۰.۴).





شکل ۵۰.۴. محل انتخاب نمونه‌ها



شکل ۵۱.۴. تصویر متالوگرافی نمونه سالم (اول)

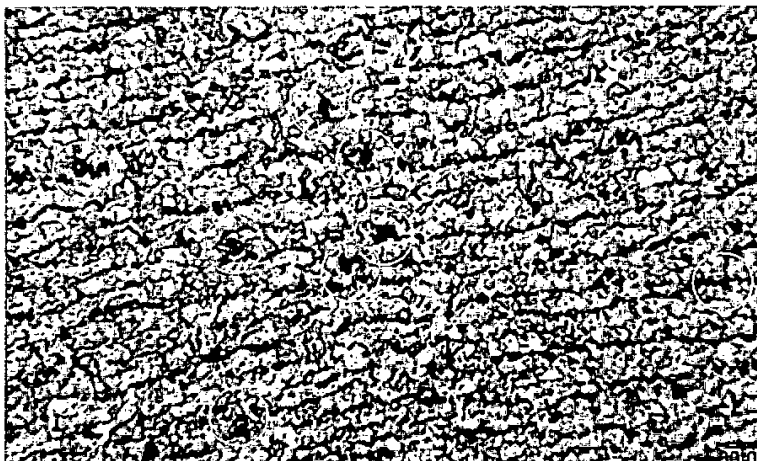
ذرات گرافیت اگر به‌طور یکنواخت در ساختار فولاد توزیع شده باشند، به‌ندرت باعث خرابی می‌شوند، اما گاهی هسته‌های گرافیت در کنار یکدیگر، زنجیره‌هایی از گرافیت تشکیل می‌دهند. وجود ذرات گرافیت باعث ترد شدن فولاد و کاهش استحکام آن در امتداد زنجیره‌های گرافیت می‌شود و فولاد بر اثر فشار داخل لوله در راستای زنجیره‌های گرافیت، گسیخته می‌شود. در نمونه تهیه‌شده از لوله سالم، تعداد کاربیدهای کرومی بسیار کم است و در حدی نیست که در کوتاه‌مدت باعث خرابی لوله شود (شکل ۵۲.۴). سختی‌سنجی روی این نمونه به روش ویکرز انجام شده و مقدار میانگین آن ۱۶۶ ویکرز گزارش شد.

در شکل ۵۲.۴، تصویر متالوگرافی نمونه دوم که از ناحیه ترک‌های سطح داخلی انتخاب شده است، مشاهده می‌شود. نواحی مشخص شده مکان‌هایی‌اند که در آن‌ها گرافیت‌های کروی در حال شکل‌گیری هستند. تعداد و توزیع این نواحی در این سمت در حدی است که می‌تواند مقاومت قطعه را کاهش دهد و مقدمات ایجاد ترک را فراهم آورد. میانگین سختی در این ناحیه ۱۵۵ ویکرز است که نسبت به قسمت سالم لوله، افت کرده است.

بررسی تصاویر مربوط به متالوگرافی لبه ترک نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به لبه ترک، ذرات گرافیتی بزرگ‌تر شده‌اند و تغییر شکل پلاستیک شدید در لبه ترک ایجاد شده است. بررسی‌های متالورژیکی نشان می‌دهد که لوله تحت بیش‌گرمایش بلندمدت بوده، اما هنوز به لحاظ ساختاری، آسیب چندانی ندیده است.



شکل ۵۲.۴. حضور هسته‌های گرافیتی در لوله سالم

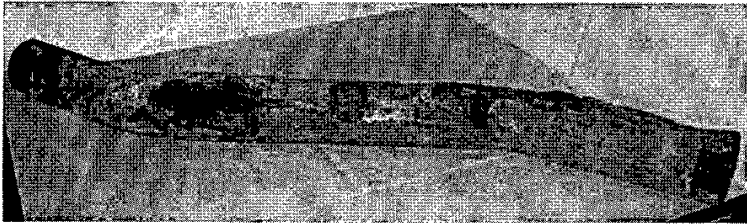


شکل ۵۳.۴. تصویر متالوگرافی نمونه دوم. نوارهای پرلیتی در محل‌های مشخص شده در حال تغییر شکل به گرافیت‌های کروی‌اند.

□ نمونه یازدهم [۱۱]

صنعت:	قند و شکر
محل نمونه:	سوپرهیتر
نحوه قرارگرفتن نمونه:	سوپرهیتر معلق
عمر نمونه:	بسیار کم، پس از ۱۴ روز بهره‌برداری (حدود ۳۴۰ ساعت)
شرایط کاری:	دمای بخار خروجی $375^{\circ}\text{C}$ و فشار ۳۰ bar
مشخصه‌های لوله:	T22

بررسی‌های ظاهری: قطعه‌ای از لوله سوپرهیتر با طول تقریبی ۷۰ سانتی‌متر که در چند نقطه دچار بادکردگی و تورم شدید شده بود، بررسی شد (شکل ۵۴.۴). در قسمتی که کمترین آسیب را دیده بود، کمترین و بیشترین ضخامت  $4/5$  و  $4/8$  میلی‌مترند. چنان‌که مشاهده می‌شود، حتی در این قسمت که تقریباً از سالم‌ترین نقاط لوله به‌شمار می‌رود، اکسیداسیون شدید موجب دست‌کم تغییر ضخامت  $0/3$  میلی‌متر شده است.



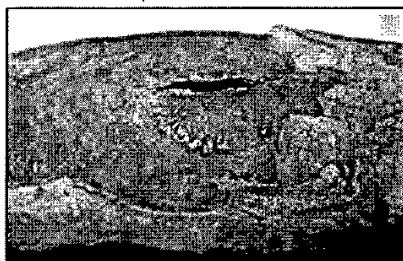
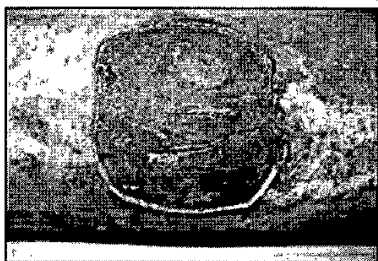
شکل ۵۴.۴. نمای ظاهری لوله و وجود چند بادکردگی در نمونه

ورم‌ها باعث پوسته‌پوسته‌شدن رسوب‌های داخلی می‌شوند و این باعث کاهش موضعی دمای لوله می‌شود. البته ورم‌ها سطح انتقال حرارت را نیز افزایش می‌دهند و این باعث افزایش موضعی حرارت ورودی و در نتیجه افزایش دمای لوله می‌شود. به‌طور کلی، دمای لوله در محل ورم‌ها نسبت به قسمت‌های مجاور، بالاتر است. در بسیاری از موارد، حتی اگر رسوب‌های داخلی جدا شوند، وجود ورم‌ها برای بیش‌گرمایش لوله کافی است [1].

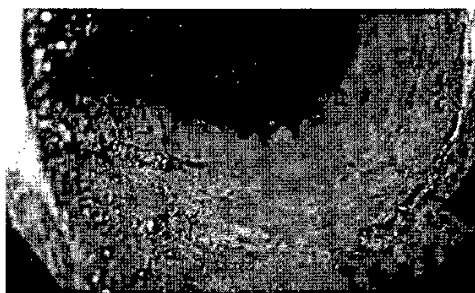
آنچه در شکل ۵۵.۴ به‌وضوح به چشم می‌آید، لایه‌های اکسیدی بسیار ضخیم، چه‌بسا تا ضخامت یک میلی‌متر، در سطح خارجی لوله است. سطح داخلی نیز با لایه‌ای بسیار ضخیم از اکسید آهن پوشیده شده است (شکل ۵۶.۴). با توجه به جدول ۵.۳ از یک سو — که دمایی را که اکسیداسیون در آن برای آلیاژهای متداول بویلر تشدید می‌شود ذکر کرده است — و ضخامت بیش از  $0/5$  میلی‌متر لایه اکسیدی و عمر بسیار کم لوله (۱۴ روز، معادل تقریباً ۳۴۰ ساعت) از سوی دیگر، قطعاً دمای بهره‌برداری بسیار بیش از  $600$  درجه سانتی‌گراد بوده است.

نکته تأمل‌برانگیز دیگری که بررسی ظاهری لبه‌های شکست نشان می‌دهد، صاف‌نبودن (مضرس‌بودن) لبه‌هاست که نشانه شکست خزشی و بیش‌گرمایش بلندمدت است. زیرا شکست‌های خزشی، مرزدانه‌ای هستند و لبه‌های ناصاف تولید می‌کنند. کمترین ضخامت اندازه‌گیری شده در لبه شکست،  $0/7$  میلی‌متر بوده که نشانه تغییر فرم پلاستیک لوله بر اثر نرم‌شدن فلز در دمای بسیار بالا و تحت فشار داخلی است. این امر در بویلرها عموماً در شرایط بهره‌برداری نامناسب (راه‌اندازی نامناسب و مانورهای شدید روی بویلر) اتفاق می‌افتد و نشانه بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در این شرایط است.

نتیجه بررسی‌های ظاهری اثبات می‌کند که به‌دلایل گوناگون، دمای بهره‌برداری بسیار بیش از دمای متعارف بویلر بوده است؛ احتمالاً حدود  $700$  درجه سانتی‌گراد یا شاید بیشتر.



شکل ۵۵.۴. وجود ورم، شروع گسیختگی و اکسیداسیون شدید روی سطح خارجی لوله

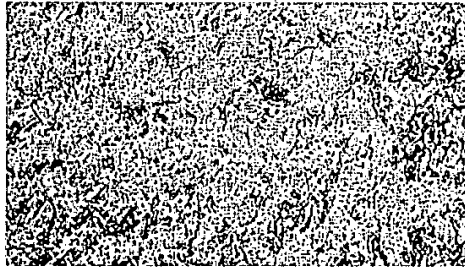


شکل ۵۶.۴. لایه اکسیدی داخل لوله

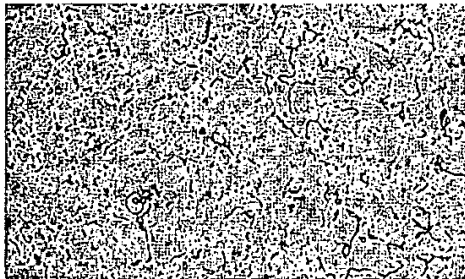
بررسی ریزساختاری؛ قبل از شروع بحث از تغییرات ریزساختاری ایجادشده در لوله در حال بررسی، ساختار اولیه و تغییرات آن در طول بهره‌برداری بویلرها ارائه می‌شود.

شکل ۵۷.۴ ساختار متالورژیکی لوله استفاده‌نشده بویلر از جنس T22 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ساختار از کاربیده‌های صفحه‌ای بسیار کوچکی که در زمینه پخش شده‌اند، تشکیل شده است. شکل ۵۸.۴ آغاز کروی‌شدن کاربیده‌ها و رسوب زنجیره‌های کاربید در مرز دانه‌ها را نشان می‌دهد.

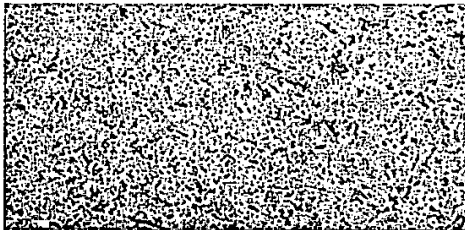
تصاویر ۵۹.۴، ۶۰.۴ و ۶۱.۴ مربوط به سوپرهیتریک بویلر مازوت‌سوز از جنس T22 هستند که دما و فشار آن به ترتیب ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۰۵ بار است و پس از ۷ ماه گسیخته شده است. شکل ۵۹.۴ کروی‌شدن کامل کاربیده‌ها و توزیع یکنواخت آن‌ها را در زمینه، در شرایط بهره‌برداری فوق نشان می‌دهد.



شکل ۵۷.۴. ساختار متالورژیکی لوله نو بویلر از جنس T22. مورفولوژی پرلیت در فولادهای با کرم و مولیبدن بالا، کاملاً متغیر است (نایتال اچ 500X) [5].



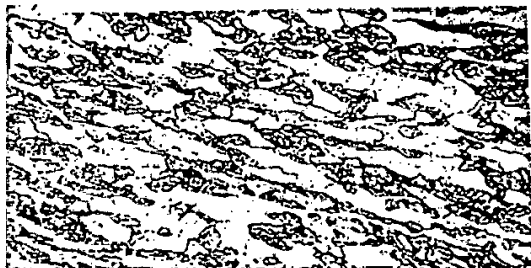
شکل ۵۸.۴. آغاز کروی شدن کاربیدها و رسوب زنجیره‌های کاربید در مرز دانه‌های فریت در لوله بویلر از جنس T22 (نایتال اچ 500X) [5].



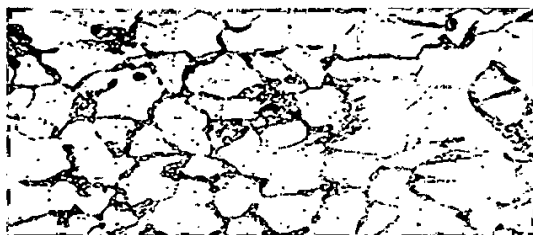
شکل ۵۹.۴. کروی شدن کامل و توزیع یکنواخت کاربیدها در ساختار در منطقه دور از شکست (نایتال اچ 500X) [5].

شکل ۶۰.۴ ساختار لوله مزبور را در لبه شکست نشان می‌دهد. این ساختار از فریت و بینیت تشکیل شده و نشان می‌دهد دما حداکثر تا ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و در لحظه شکست، به سرعت خنک شده است. در این شکل، کشیدگی دانه‌های فریت بر اثر اعمال تنش و نرم‌شدگی فلز نیز دیده می‌شود. شکل ۶۱.۴ ساختار همین لوله را در فاصله ۲۵ سانتی‌متری

محل شکست نشان می‌دهد. در این شکل، دانه‌های بی‌شکل (هم‌محور) فریت و فاز بینیت در مرزدانه‌ها دیده می‌شود. دمای حداکثر در این لوله به ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر از دمای بحرانی اول رسیده است.



شکل ۶۰.۴. ساختار لوله در لبه شکست. تشکیل فریت و بینیت در دمای حدود ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد در لحظه شکست (نایتال اچ 500X) [5].



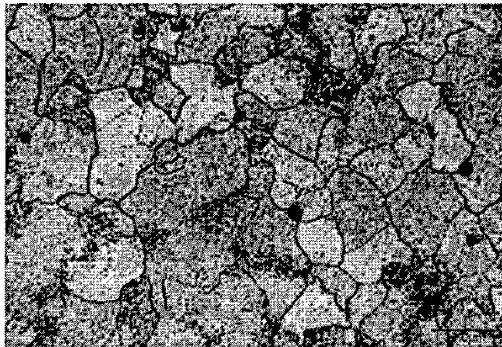
شکل ۶۱.۴. ساختار لوله در فاصله ۲۵ سانتی‌متری محل شکست و وجود دانه‌های هم‌محور فریت و فاز بینیت در مرزدانه‌ها. دمای حداکثر در این لوله به ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر از دمای بحرانی اول رسیده است (نایتال اچ 500X) [5].

در شکل ۶۲.۴ اثراتی از شبکه پرتیتی اولیه دیده می‌شود، اما کاربیدها عموماً کروی شده و در مرزدانه‌ها و داخل دانه‌ها پراکنده شده‌اند. شایان ذکر است که این پدیده در دماهای بالا و در زمان‌های طولانی اتفاق می‌افتد (دماهای بیش از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت بیش از ۱۰ سال). وقوع این اتفاق در ۱۴ روز، نشان از بهره‌برداری در دماهای بسیار بالا دارد (شاید بیش از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد).

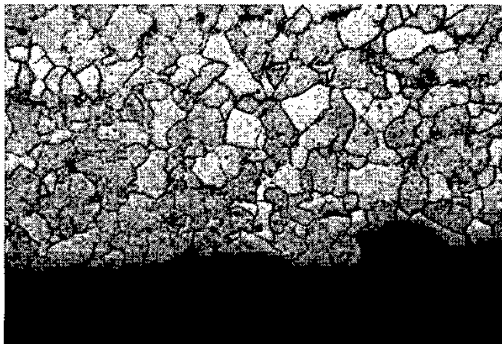
یک نکته توجه‌برانگیز دیگر در این تصاویر، وجود حفره‌های خزشی منفرد در تمامی سطح است. ایجاد این حفره‌ها در این مدت کوتاه، دلیل دیگری بر دمای بهره‌برداری بسیار بالاست.

شکل ۶۳.۴ سطح داخلی نمونه تهیه شده از منطقه سالم را با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر نشان می‌دهد. در این شکل، وجود حفره‌های خزشی و کربن‌زدایی در سطح داخلی به عمق تقریبی ۳۰۰ میکرون دیده می‌شود. کربن‌زدایی در اثر واکنش بخار داغ و فلز اتفاق می‌افتد [۱۱].

شکل ۶۴.۴ لبه گسیختگی لوله در شکاف اول را نشان می‌دهد. مشاهده فاز بینیت در ساختار این شکل و مقایسه آن با ساختارهای نشان داده شده در شکل‌های ۶۰.۴ و ۶۱.۴، نشان می‌دهد دما از دمای بحرانی اول یعنی حدود ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد فراتر رفته و سپس فولاد سریع سرد شده است.



شکل ۶۲.۴. منطقه سالم لوله، آغاز کروی شدن کاربیدها و وجود حفره‌های خزشی پراکنده (بزرگ‌نمایی: ۲۰۰ برابر)

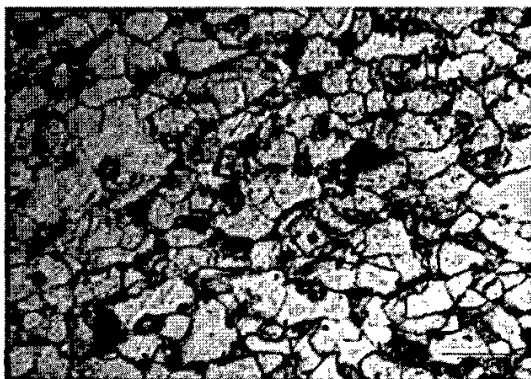


شکل ۶۳.۴. سطح داخلی نمونه منطقه سالم (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰ برابر) کربن‌زدایی در سطح داخلی، وجود حفره‌های خزشی پراکنده و خوردگی مرزدانه‌ای.

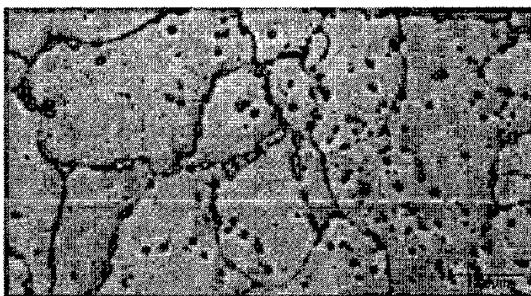


شکل ۶۵.۴ کرووی شدن و توزیع یکنواخت کاربیدها در همهٔ زمینه، در وسط ضخامت لوله و دور از لبه شکست را نشان می‌دهد. مقایسهٔ این شکل با ساختار نشان‌داده شده در شکل ۵۹.۴ (مربوط به لوله‌ای از همین جنس در بویلری با دمای بخار خروجی ۵۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد پس از ۷ ماه) نشان می‌دهد تغییرات ریزساختاری با شتاب زیاد انجام شده و این نشانهٔ دمای بهره‌برداری بسیار زیاد بویلر است.

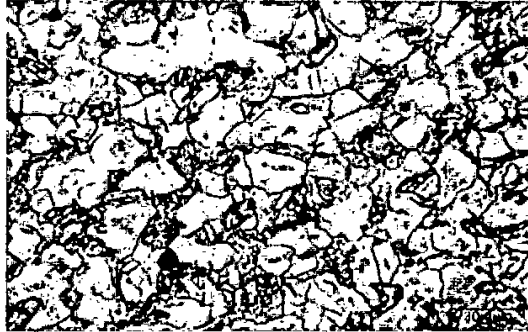
در وسط ضخامت لبهٔ ترک، ساختار پیشرفته‌تری از بینیت دیده می‌شود (شکل ۶۶.۴). مقایسهٔ این ساختار با موارد قبلی نشان می‌دهد دما به مراتب بیش از ۷۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد بوده و به حدود ۸۰۰ درجه نیز رسیده است.



شکل ۶۴.۴. ساختار وسط ضخامت، نزدیک لبهٔ ترک و تشکیل فاز بینیت (بزرگ‌نمایی: ۲۰۰ برابر)



شکل ۶۵.۴. کرووی شدن و توزیع یکنواخت کاربیدها در زمینه، در وسط ضخامت لوله و دور از لبهٔ شکست (بزرگ‌نمایی: ۵۰۰ برابر)



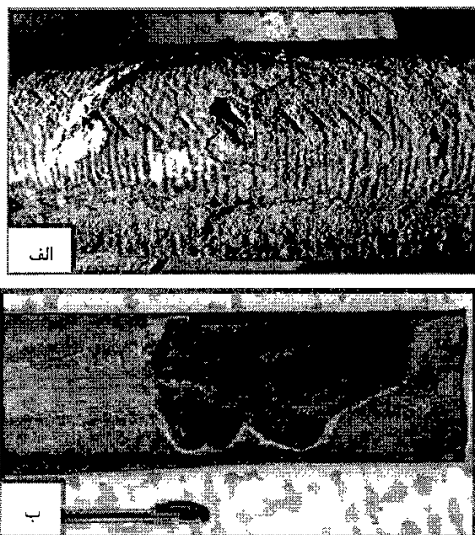
شکل ۶۶.۴. وسط ضخامت لبه ترک و ساختار پیشرفته‌تری از فریت بینیت. دما به‌مراتب از ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد فراتر رفته و به حدود ۸۰۰ درجه نیز رسیده است (بزرگ‌نمایی: ۲۰۰ برابری).

□ نمونه دوازدهم [۱۲]

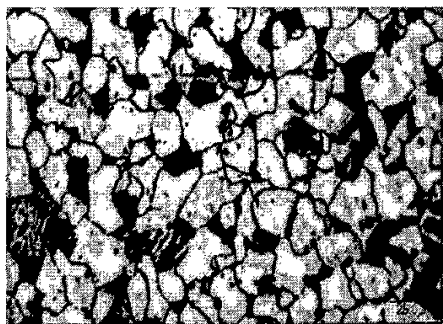
صنعت:	نیروگاه بخار
محل نمونه:	لوله اواپراتور
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی، با ارتفاع تقریبی ۸ متر
عمر نمونه:	حدود ۲۵ سال
شرایط کاری:	دمای آب ۳۸۰ تا ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵۰ bar
مشخصه‌های لوله:	فولاد 15M63

علائم ظاهری: نحوه گسیختگی و شکل ظاهری خرابی لوله‌ها بررسی شد. شیارهای محیطی در سراسر نمونه مشاهده می‌شود. محل آسیب در شکل ۶۷.۴ الف نشان داده شده است. شکل ۶۷.۴ ب شیارهای مورب موجود در سمت آتش لوله تخریب شده را نشان می‌دهد. تخریب عمدتاً روی این شیارها شکل گرفته است. رسوب سفیدرنگی سطح خارجی لوله را پوشانده است. بررسی متالورژیکی: ریزساختار لوله در دو منطقه لوله تخریب شده (محل ترک و دور از محل ترک) بررسی شد. ریزساختار نواحی پشت‌به‌آتش در محل ترک فریتی-پرلیتی است که تغییرات محسوسی در آن مشاهده نمی‌شود (شکل ۶۸.۴). شکل ۶۹.۴ ریزساختار محل ترک در سمت آتش لوله را نشان می‌دهد. در این نواحی، تغییرات ریزساختاری ناشی از تجزیه پرلیت و تشکیل کلنی‌های گرافیت و زنجیره‌ای شدن آن به‌وضوح مشاهده می‌شود. به شکل‌گیری زنجیره

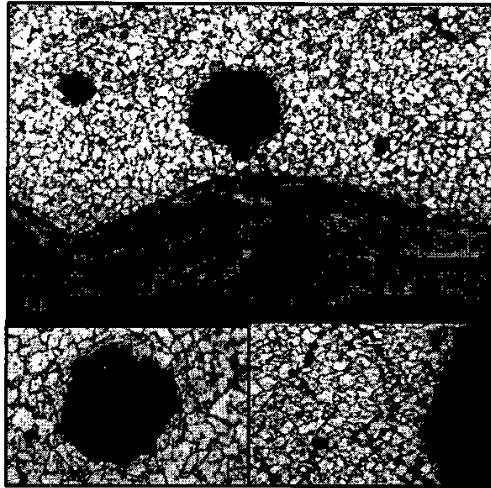
گرافیت‌ها در امتداد  $45^\circ$  دقت شود. بروز این پدیده موجب ترک‌های ماکروسکوپی در همین راستا می‌شود (شکل ۶۷.۴ الف). همچنین، کاهش ضخامت لوله به واسطه خوردگی سمت آتش در شکل ۷۰.۴ نشان داده شده است. نتایج آنالیز عنصری نیز حضور عناصر وانادیم، سدیم و گوگرد را در محصولات خوردگی نشان می‌دهد.



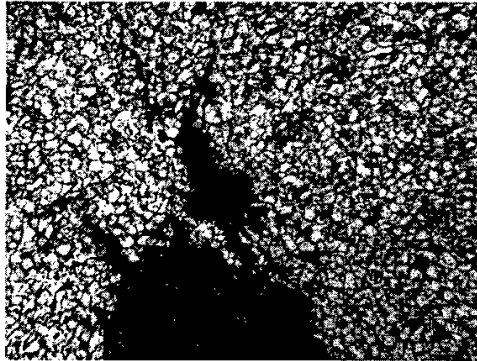
شکل ۶۷.۴. شکل ظاهری لوله گسیخته؛ الف) تصویر کلی لوله؛ ب) تخریب روی شماره‌های موجود.



شکل ۶۸.۴. ریزساختار نواحی پشت‌به‌آتش در محل ترک



شکل ۶۹.۴. تصاویر متالوگرافی سطح خارجی سمت آتش لوله، در نزدیکی محل گسیختگی. به ذرات گرافیت کروی شده توجه شود.



شکل ۷۰.۴. تصویر پیشرفت ترک در ضخامت لوله به واسطه خوردگی سمت آتش

### منابع

- [1] Port, R.D. and H.M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, McGraw-Hill Inc., New York, 1991.
- [2] *ASM Handbook, Vol.11*, "Failure Analysis and Prevention", 1992.
- [3] Viswanatan, R., *Damage Mechanisms and LiFe Assessment of High-Temperature Components*, ASM International Society, 1995.

- [4] *Residual Life Assessment and Microstructure*, ECCC, RECOMMENDATIONS, VOLUME 6 [Issue 1], PREPARED BY ECCC - WG1.1, 2005.
- [5] French, David N., *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, Wiley, 1983.
- [6] Wardle, T. J. (Bobcock & Wilcox): "Creep-Rupture Assessment of Superheater Tubes Using Nondes-tractive Oxide Thickness Measurement", *ICOLM (International Conference on Life Management and Life Extension of Power Plant)*, Barberton, Ohio, U.S.A., May 2000.
- [7] این کروپرا، فرانک پی. و دیوید پی. دویت: مقدمه‌ای بر انتقال گرما (جلد دوم)، مترجمان: علی اصغر رستمی و مریم شیرازی، دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ ششم، ۱۳۸۹.
- [8] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، ارزیابی لوله‌های سوپرهیتر واحدهای ۱ و ۲ نیروگاه مشهد، تیر ۱۳۸۳.
- [9] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، ارزیابی عمر باقیمانده لوله‌های سوپرهیترهای واحد ۳ نیروگاه بندرعباس، شرکت مشانیر، بهمن ۱۳۸۲.
- [۱۰] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، بررسی علت گسیختگی و ارزیابی عمر باقیمانده لوله اواپراتور فشاربالای بویلر شماره ۲ نیروگاه قم، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، بهمن ۱۳۹۱.
- [۱۱] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، بررسی علل خرابی لوله سوپرهیتر بویلر شرکت کشت و صنعت دعبل خزاعی (حادثه ۱۵ بهمن ۱۳۹۱)، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، فروردین ۱۳۹۲.
- [۱۲] سلطانیلو، مصطفی، بررسی علل شکست لوله‌های اواپراتور بویلر نیروگاه نکا، پژوهشگاه نیرو، اسفند ۱۳۹۱.



## فصل ۵

### بیش گرمایش کوتاه مدت

#### ۱.۵. مقدمه

همان طور که در شکل ۱.۴ مشاهده شد، با افزایش دما استحکام فلز به شدت کاهش می‌یابد. این مسئله باعث گسیختگی قطعه در مدت زمان کوتاه می‌شود. با توجه به زمان کوتاهی که قطعه می‌تواند دمای بالا را تحمل کند، به این نوع خرابی‌های دمابالا، «بیش گرمایش کوتاه مدت»<sup>۱</sup> می‌گویند. در تمامی مواردی که این نوع خرابی اتفاق می‌افتد، دمای فلز دست کم ۴۵۴ درجه سانتی‌گراد (۸۵۰ درجه فارنهایت) است و گاهی از ۷۳۰ درجه سانتی‌گراد (۱۳۵۰ درجه فارنهایت) نیز تجاوز می‌کند. بسته به دمای قطعه، ممکن است خرابی در مدت زمان بسیار کوتاهی رخ دهد. معمولاً این نوع خرابی بر اثر نوسان در بهره‌برداری بویلر اتفاق می‌افتد [1].

#### ۲.۵. محل وقوع بیش گرمایش کوتاه مدت

این نوع خرابی، در لوله‌های آب و بخار، مانند لوله‌های پایین‌آورنده، لوله‌های دیواره‌آبی، لوله‌های سقف بویلر، شبکه‌ها<sup>۲</sup>، سوپرهیتورها و ری‌هیتورها رخ می‌دهد. با توجه به دمای بالای بهره‌برداری در سوپرهیتورها و ری‌هیتورها، اغلب این قسمت‌ها دچار این نوع خرابی می‌شوند. با توجه به دمای پایین بهره‌برداری در اکونومایزرها، این قسمت‌ها اغلب دچار این خرابی نمی‌شوند. در مواقعی که سطح آب بویلر پایین است، بیش گرمایش کوتاه مدت در قسمت‌های بالایی لوله‌های دیواره‌آبی نیز که در نزدیکی درام بخارند رخ می‌دهد [1].

#### ۳.۵. عوامل بیش گرمایش کوتاه مدت

بیش گرمایش کوتاه مدت بر اثر برخی شرایط غیرطبیعی که به شکل گذرا در سیستم به وجود

---

1. short-term overheating

2. screens

آیند، رخ می‌دهد. بنابراین بررسی دقیق حوادث غیرطبیعی که پیش از وقوع خرابی در سیستم ایجاد شده‌اند، در تشخیص علت خرابی اهمیت فراوانی دارد. اینجا می‌توان به چند حادثه غیرطبیعی که در بویلر ایجاد می‌شود به‌عنوان نمونه اشاره کرد: آغاز جوشش لایه‌های ناپایدار (DNB)، انسداد لوله‌ها، راه‌اندازی سریع، نشتی لوله‌ها، ورود فلاکس حرارتی بیش از حد به لوله، کاهش جریان سیال خنک‌کن، برخورد شعله با لوله، احتراق غیریکنواخت در بویلر، خرابی‌های قبلی.

آغاز جوشش لایه‌های ناپایدار (DNB): تعریف DNB و اثرات آن در خرابی‌های دمابالا، به‌طور کامل در بخش ۴.۴: «عوامل مؤثر در بیش‌گرمایش بلندمدت» بررسی شده است.

انسداد لوله‌ها: مسدودشدن مسیر سیال، موجب کاهش جریان و به‌تبع کاهش اثر خنک‌کنندگی سیال می‌شود. از جمله عوامل مؤثر در انسداد لوله‌ها، می‌توان به جمع‌شدن محصولات تقطیر در قسمت‌های لاشکل سوپرهیترها و ری‌هیترها پس از سردشدن شان و جمع‌شدن ذرات اکسید و رسوب‌ها در قسمت‌های لاشکل سوپرهیترها، ری‌هیترها و لوله‌های طولیل اشاره کرد. هنگام راه‌اندازی بویلر، تا وقتی محصولات تقطیر بخار نشوند جریان بخار نمی‌تواند در لوله‌ها برقرار شود و امکان بیش‌گرمایش لوله‌ها وجود دارد.

راه‌اندازی سریع: هنگام راه‌اندازی سریع، ممکن است بخار لازم برای لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر به‌موقع تأمین نشود.

نشتی لوله‌ها: بر اثر نشتی در قسمت‌های پایینی لوله‌های دیواره‌آبی، آب نمی‌تواند تا انتهای لوله جریان داشته باشد و قسمت‌های انتهایی، به‌علت نبود آب کافی، دچار بیش‌گرمایش خواهند شد. در این قسمت‌ها، امکان وقوع DNB، حتی در شرایط کاری عادی بویلر، وجود دارد.

ورود فلاکس حرارتی بیش از حد به لوله: اثرات ورود فلاکس حرارتی بیش از حد در بخش ۴.۴ بررسی شده است. این عامل در ایجاد بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت نیز مؤثر است.

کاهش جریان سیال خنک‌کن: اثرات کاهش جریان سیال خنک‌کن نیز در بخش ۴.۴ بررسی شده است. این عامل در ایجاد بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت نیز نقش دارد.

برخورد شعله با لوله: برخورد شعله می‌تواند باعث افزایش فلاکس حرارتی ورودی به لوله و بیش‌گرمایش آن شود.

احتراق غیریکنواخت در بویلر: احتراق غیریکنواخت در کوره‌هایی با چند مشعل و همچنین در کوره‌هایی که اغتشاش کافی برای اختلاط محصولات احتراق وجود ندارد، می‌تواند باعث افزایش دبی محصولات احتراق از مقادیر طراحی در برخی نقاط شود. این امر حرارت ورودی به برخی لوله‌های موجود در این قسمت‌ها را افزایش می‌دهد و در نهایت لوله دچار بیش‌گرمایش می‌شود.



خرابی‌های قبلی: ممکن است وقوع خرابی باعث جابه‌جایی رسوب‌ها و محصولات خوردگی شود و این ذرات در مسیر جریان طبیعی سیال، ایجاد مانع کنند.

با توجه به مطالب گفته‌شده، کیفیت شیمیایی آب، اغلب اثر کمی در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت دارد. بنابراین در تعیین علت بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، باید توجه خود را بیشتر به نحوه بهره‌برداری و طراحی تجهیزات معطوف کرد. با توجه به اینکه بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، نتیجه شرایط قبلی موجود در سیستم است، پاسخ به چند پرسش، اطلاعات مفیدی برای تشخیص علت خرابی ارائه می‌کند:

- آیا خرابی در زمان راه‌اندازی یا خواباندن رخ داده است؟
- آیا اخیراً اسیدشویی انجام شده است؟
- آیا در هدرها و قسمت‌های لاشکل، مواد زائد و رسوباتی وجود دارد؟
- آیا قبل از این خرابی، خرابی دیگری اتفاق افتاده است؟
- آیا نحوه احتراق عوض شده است؟
- آیا تغییرات ناگهانی بار وجود داشته است؟
- آیا سطح آب در محدوده مجاز بوده است؟
- آیا حین خرابی یا قبل از آن، مقدار تخلیه دائمی آب بیش از اندازه بوده است؟

تذکر ۱: ممکن است بر اثر مشکلات طراحی، انتقال حرارت در سطوح به‌طور چشمگیری از میزان موردانتظار، کمتر باشد. این مسئله باعث می‌شود محصولات احتراق در برخی نقاط بسیار داغ باشند و بنابراین امکان بیش‌گرمایش لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر فراهم آید.

تذکر ۲: در صورتی که (به‌هرنحو) دبی آب به‌طور ناگهانی کاهش یابد، احتمال بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در مواقع راه‌اندازی، تغییرات سریع بار و هنگام بهره‌برداری از بویلر در بار نامی، زیاد خواهد بود. ممکن است کاهش دبی آب، بر اثر مشکلات کلی به‌وجودآمده در سیکل، مانند خارج‌شدن پمپ‌های آب تغذیه از مدار، ایجاد شده باشد.

تذکر ۳: معمولاً پاشش کم آب در سوپرهیترها و ری‌هیترها، باعث بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت نمی‌شود. هرچند در این موارد، امکان بیش‌گرمایش بلندمدت وجود دارد.

تذکر ۴: در مواردی که فقط یک لوله دچار بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت شده باشد، احتمال وقوع خرابی بر اثر مسدودشدن لوله یا وجود مشکل دیگری در مسیر حرکت طبیعی سیال در آن لوله، بیشتر است [1, 2].

#### ۴.۵. بررسی ظاهر شکست در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت

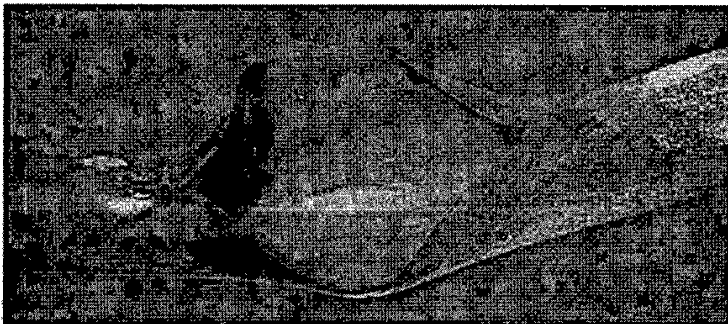
کیفیت ماکروسکوپی و میکروسکوپی سطوح شکست، به آلیاژ و دمای لوله بستگی دارد. با این حال، می‌توان موارد زیر را از علائم ظاهری سطوح شکست دانست:

۱. به‌طور کلی، رسوب‌های سطوح داخلی زیاد نیستند. در صورت وجود رسوب، معمولاً این رسوب‌ها ترد و شکننده‌اند و می‌توان به‌آسانی از سطح جدایشان کرد (برخلاف رسوب‌های موجود در بیش‌گرمایش بلندمدت که به‌شدت به سطح چسبیده‌اند)؛

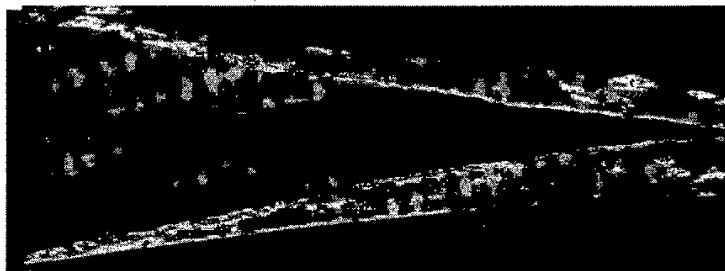
۲. در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، کاهش استحکام فلز طوری است که قبل از تشکیل میزان چشمگیری اکسید در لوله، خرابی رخ خواهد داد. به‌عبارت دیگر، در خرابی‌هایی که بر اثر این نوع بیش‌گرمایش ایجاد می‌شوند، اکسید چندانی مشاهده نمی‌شود؛

۳. در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدتی که بسیار سریع اتفاق می‌افتد، شکست‌های طولی ایجاد می‌شود. این شکست‌ها می‌توانند به‌شکل «دهان‌ماهی» با لبه‌های تیز (شکل ۱.۵) یا لبه‌کلفت باشند (شکل ۲.۵)؛

۴. شکست‌ها می‌توانند لبه‌کلفت یا لبه‌نازک باشند [1]. در برخی منابع فقط شکست‌های لبه‌نازک را از نشانه‌های بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت دانسته‌اند [2]. در شکست‌های لبه‌کلفت، ضخامت دیواره در محل شکست تغییری نمی‌کند (شکل ۲.۵). وقتی این نوع شکست رخ می‌دهد، معمولاً محیط لوله در محل شکست دقیقاً با نواحی دور از شکست مساوی است. در شکست‌های لبه‌نازک، تغییر شکل پلاستیک نواحی مجاور به شکست، باعث کاهش ضخامت دیواره می‌شود، طوری که لبه‌های شکست مانند چاقو تیزند (شکل ۱.۵)؛



شکل ۱.۵. بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت که بر اثر آن، لوله قبل از پارگی متورم شده است. به لبه‌های تیز شکست توجه کنید [1].



شکل ۲.۵. شکست طولی در یک لولهٔ سوپرهیتر که بر اثر مسدودشدن جزئی لوله در بالادست منطقهٔ خرابی اتفاق افتاده است. به لبه‌های کلفت شکست دقت کنید. محیط لوله در محل انفجار با دیگر نقاط تفاوتی ندارد. این نوع خرابی معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که درجهٔ حرارت لوله از ۷۳۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۱۳۵۰ درجهٔ فارنهایت) تجاوز کند [1].

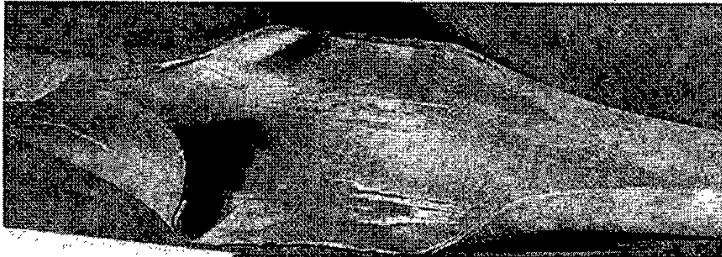
۵. در مواردی که دما بسیار بالا باشد، خرابی به سرعت رخ می‌دهد و شکست شدیدی ایجاد می‌شود. گاهی شدت این شکست در حدی است که باعث خم‌شدن لوله و حتی پارگی مجدد لوله در جهت محیطی می‌شود. خم‌شدن لوله به دلیل نیروی عکس‌عملی است که هنگام خروج سیال از محل خرابی، به لوله وارد می‌شود (شکل‌های ۳.۵ و ۴.۵)؛

۶. معمولاً ورم‌های بسیاری روی سطوح وجود ندارند، اما در مواقعی که قبلاً بیش‌گرمایش بلندمدت رخ داده باشد، ممکن است ورمی که دچار شکست شده ایجاد شود (شکل ۵.۵). در بیش‌گرمایش‌هایی که به سرعت اتفاق می‌افتند، معمولاً ورمی ایجاد نمی‌شود؛

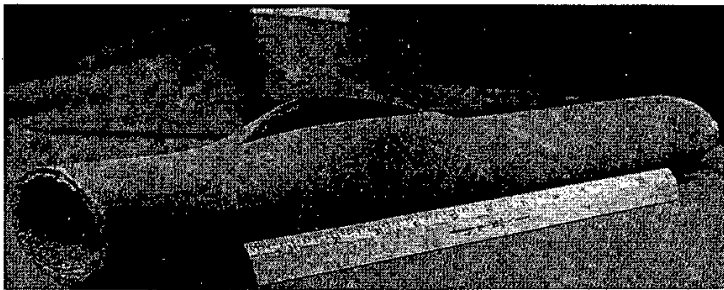
۷. برخی مواقع، بدون وقوع شکست، قطر لوله به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد.



شکل ۳.۵. شکست لبه‌نازک یک لولهٔ بویلر بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت. بر اثر نیروی عکس‌عمل ناشی از خروج سیال، لوله خم شده است و شکل محل گسیختگی شبیه مار کبری ("COBRA" APPEARANCE) می‌شود [2].



شکل ۴.۵. شکست شدید که بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت اتفاق افتاده و لوله بر اثر شدت انفجار، ۹۰۰ خم شده است [1].



شکل ۵.۵. شکست در یک ورم. این لوله پس از یک دوره بیش‌گرمایش بلندمدت، دچار بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت شدید شده است [1].

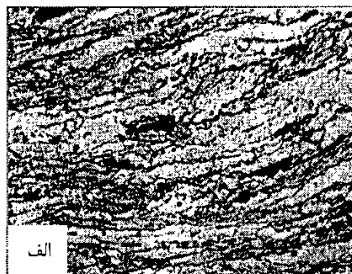
تذکر: بروز شکست طولی لبه‌کلفت به‌تنهایی نمی‌تواند دلیل بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت باشد. در صورتی‌که شکست لبه‌کلفت در محل جوش یا درز لوله رخ دهد، یا در نزدیکی محل شکست، نشانه‌هایی از تلفات فلز لوله مشاهده شود، هنگام تصمیم‌گیری درباره علت خرابی بر اساس شکل ظاهری باید محتاطانه عمل کرد: ممکن است شکست‌های لبه‌کلفت ناشی از بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، به‌راحتی با شکست‌های ناشی از خزش، خرابی‌های ناشی از تردشوندگی به‌واسطه هیدروژن<sup>۱</sup> و خرابی‌های ناشی از وجود برخی عیوب در لوله، اشتباه گرفته شوند. ممکن است نبود لایه‌های رسوب در محل خرابی، بر اثر جریان سیال خروجی از محل خرابی باشد.

ممکن است بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت پس از بیش‌گرمایش بلندمدت اتفاق بیفتد. در این صورت، بررسی‌های متالورژیکی برای تعیین عامل خرابی لوله ضروری است [1, 2].

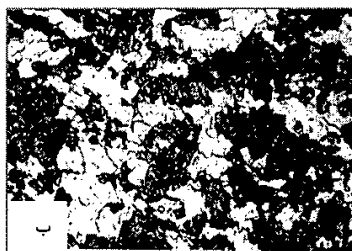
1 hydrogen embrittlement

### ۵.۵. بررسی ریزساختار در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت

شکست‌های ناشی از بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، معمولاً درون‌دانه‌ای<sup>۱</sup> هستند. در فولادهای کربنی و فولادهای کم‌آلیاژی، بسته به دمای وقوع شکست، می‌توان ریزساختار خاصی را مشاهده کرد. در دماهای کمتر از دمای تبلور مجدد، می‌توان دانه‌هایی را در نزدیکی محل شکست مشاهده کرد که طولشان بسیار زیاد شده است<sup>۲</sup> (شکل ۶.۵ الف). ممکن است بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در محدوده دمایی  $AC_1$  و  $AC_3$  (دماهای بحرانی)، ترکیبی از فریت و محصول‌های انتقالی بالاتر مانند پرلیت و باینیت مشاهده شوند<sup>۳</sup>. ممکن است وجود پرلیت و باینیت بر اثر سردشدن سریع فلز داغ<sup>۴</sup> با آب یا بخاری باشد که از لوله خارج شده است (شکل ۶.۵ ب) [2]. در ادامه نمونه‌هایی از ریزساختار لوله‌های دچار بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، بررسی خواهند شد (نمونه‌های چهارم، پنجم و ششم).



(الف) دانه‌های طولیل‌شده در نزدیکی محل شکست. این ریزساختار بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در دمای کمتر از دمای تبلور مجدد ایجاد شده است.



(ب) ریزساختار فولاد در نزدیکی محل شکست بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در دمای بین  $AC_1$  و  $AC_3$  و سپس خنک‌شدن سریع با آب یا بخار.

شکل ۶.۵. ریزساختار فولاد ۰/۱۸٪ کربن، از یک لوله بویلر که بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت دچار شکست شده است. هر دو نمونه در محلول ۲٪ نایتال اچ شده‌اند (بزرگ‌نمایی: ۲۵۰ برابر).

1. transgranular
3. upper transformation products

2. elongated grains
4. rapidly quenching

تذکر ۱: وجود نشانه‌های بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در ریزساختار لوله در محل شکست، نمی‌تواند دلیل قاطعی بر بیش‌گرمایش لوله هنگام بهره‌برداری باشد، زیرا شاید ریزساختار مذکور حین نصب لوله وجود داشته است. بنابراین در تهیه نمونه برای آزمایش‌های متالوگرافی، باید علاوه بر محل شکست، از نقطه‌ای با مقداری فاصله از محل شکست، از لوله‌های مجاور و در صورت امکان از لوله‌های استفاده‌نشده و مشابه لوله تخریب‌شده و ساخت همان کارخانه نمونه‌هایی تهیه کرد [2].

تذکر ۲: تغییرات ریزساختاری که هنگام بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در قطعه به وجود می‌آید، همیشه باعث خرابی قطعه نمی‌شوند. لوله‌هایی که تحت تأثیر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت‌اند، الزاماً نباید تعویض شوند. ممکن است به‌رغم بیش‌گرمایش لوله، خصوصیات مکانیکی لوله بدون تغییر باقی بمانند [1].

تذکر ۳: ممکن است خرابی‌های ناشی از بیش‌گرمایش بلندمدت و بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، مشابه یکدیگر به‌نظر برسند. حتی ممکن است این دو مکانیسم، هم‌زمان در ایجاد یک خرابی نقش داشته باشند. در این گونه موارد، تشخیص ترتیب وقوع آن‌ها بدون آزمایش‌های متالوگرافی، مشکل است [1].

تذکر ۴: گاهی بیش‌گرمایش بلندمدت با حمله‌های شیمیایی یا دیگر مکانیسم‌هایی که باعث ازبین‌رفتن فلز می‌شوند همراه است، درحالی‌که حمله‌های شیمیایی در بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت به‌ندرت اتفاق می‌افتند [1].

## ۵.۶. روش‌های پیشگیری از بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت

به‌طور کلی، راه‌حل بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، ممانعت از ایجاد آشفستگی و نوسان در بهره‌برداری عادی بویلر است. در این راستا توجه به چند نکته مفید است:

۱. درام‌ها، هدرها، قسمت‌های L شکل، لوله‌های افقی طویل و دیگر قسمت‌هایی که احتمال جمع‌شدن مواد زائد و رسوب در آن‌ها وجود دارد، بازدید و در صورت نیاز تمیز شوند. این کار، به‌ویژه وقتی خرابی پس از شستشوی بویلر اتفاق بیفتد، توصیه می‌شود؛
۲. سطح آب درام و مقدار تخلیه دائمی آب کنترل شود؛
۳. کیفیت احتراق بویلر کنترل شود؛
۴. راه‌اندازی بویلر به‌دقت کنترل شود.

تذکره: اگر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت فوراً پس از یک خرابی دیگر حادث شود، مسئله باید با دقت بیشتری بررسی شود، زیرا ممکن است یک خرابی باعث به‌هم‌خوردن چرخش آب در بویلر، کنده‌شدن رسوبات و محصولات خوردگی شود که شاید هر یک از این موارد، روی انتقال حرارت تأثیر بگذارند [1].

## ۷.۵. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت

□ نمونه اول [1]

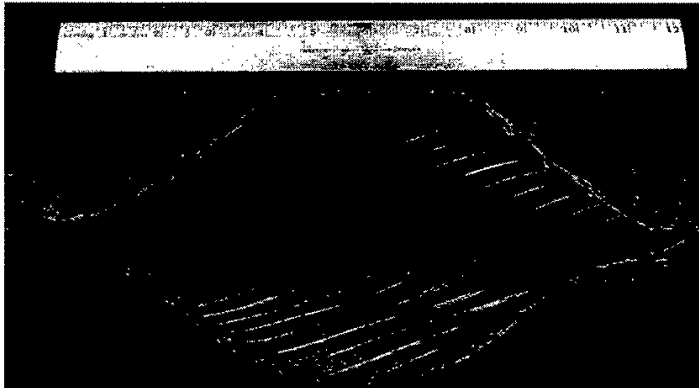
نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	دیواره آبی، قوس دماغه‌ای
نحوه قرارگرفتن نمونه:	شیب‌دار
عمر نمونه:	۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۲/۴ MPa (۱۸۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	لوله خان‌دار، قطر خارجی: ۶/۴ cm (۲/۵ in)
سوخت:	زغال پودر شده

علائم ناشی از خرابی: در این لوله خان‌دار، شکست لبه کلفت اتفاق افتاده است. سطوح شکست ناصاف‌اند و طول شکست ۳۰ سانتی‌متر (۱۲ اینچ) است (شکل ۷.۵). سطوح داخلی و خارجی هموارند و با لایه نازک، چسبنده و سیاه‌رنگ اکسید پوشیده شده‌اند. در هیچ محلی رسوب چندانی دیده نمی‌شود. در هیچ نقطه‌ای از مقطعی که به‌عنوان نمونه انتخاب شده است، تجمع اکسیدهای حرارتی مشاهده نمی‌شود.

علت شکست: شکست، اندکی پس از راه‌اندازی بویلر اتفاق افتاده است. کم‌بودن مقدار سیال خنک‌کن هنگام راه‌اندازی، باعث خرابی شده است. بررسی ریزساختار لوله در محل شکست نشان می‌دهد دمای فلز در این محل از ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد (۱۶۰۰ درجه فارنهایت) فراتر رفته است.

علت استفاده از خان در لوله‌ها: خان‌ها برای کاهش امکان تشکیل لایه بخار روی سطوح یا کانالیزه شدن بخار ایجاد می‌شوند. در این لوله، هیچ نشانه‌ای از ایجاد پوشش بخار<sup>۱</sup> یا کانالیزه شدن بخار مشاهده نمی‌شود.

نکته توجه برانگیز درباره این خرابی: در قسمت سرد لوله هیچ تغییری در ریزساختار لوله مشاهده نمی‌شود. این امر نشان می‌دهد حین شکست، آب در لوله وجود داشته است [1].



شکل ۷.۵. شکست لبه کلفت به شکل دهان ماهی در یک لوله خان دار. لبه‌های شکست کلفت و ناصاف‌اند. به فقدان رسوب‌های توجه برانگیز در سطوح دقت کنید.

□ نمونه دوم [1]

صنعت:	پالایشگاه
محل نمونه:	نزدیک درام بخار
نحوه قرار گرفتن نمونه:	دارای کمی انحراف از حالت عمودی
عمر نمونه:	۲۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۵/۵ MPa (۸۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۸/۳ cm (۳/۲۵ in)



شرایط بهره‌برداری از بویلر: بویلری که لوله موجود در شکل ۸.۵ از آن تهیه شده، در معرض نوسان‌های بار گسترده‌ای قرار داشته است. این نوسان‌ها، پس از نصب بویلر بازیابی که بویلر اصلی تهیه بخار بوده است، اعمال گردیده‌اند. این بویلر، اغلب در حالت آماده بوده و گاهی در بار بسیار پایین کار کرده و حتی از مدار خارج بوده است.



شکل ۸.۵. درز طولی که از گوشه شکست شروع شده است.

□ نمونه سوم [۱]

بازیاب	نوع بویلر:
سوپرهیتر	محل نمونه:
عمودی	نحوه قرار گرفتن نمونه:
۱۰ سال	عمر نمونه:
پلیمر	رژیم شیمیایی آب:
۴/۱ MPa (۶۰۰ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۶/۶ cm (۳ in)، دارای فین‌هایی به طول ۰/۵ cm (۰/۱۸۷۵ in)	مشخصه‌های لوله:
که به صورت یک پیچ با گام ۱/۱ cm (۰/۴۳۷۵ in) نصب شده‌اند.	
گازهای احتراق خروجی از توربین گاز	سوخت:

علائم ناشی از خرابی: شکست لوله، بزرگ، طولی و لبه‌نازک است. از گوشه شکست، یک ترک خطی و نازک در طول لوله منتشر شده است (شکل ۸.۵). به جز علائم کم‌عمق شبیه اثر سنبه،

سطوح داخلی صاف و هموارند. یک لایه نازک و یکنواخت از رسوب‌های روشن، در نقاط دور از محل شکست مشاهده می‌شود.

علت شکست: شکست بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در نتیجه کمبود سیال خنک‌کن ایجاد شده است. عیوب کوچکی که در سطح وجود داشته است (علائمی شبیه اثر سنبه)، مسیر پیشرفت شکست را مشخص کرده‌اند، اما نقش چندانی در ایجاد خرابی نداشته‌اند [1].

شرایط بهره‌برداری از بویلر: دمای گازهای ورودی به بویلر، بین ۶۵۰ تا ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد (۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ درجه فارنهایت) است. در این بویلر، انتقال آب به سوپرهیتر بر اثر بالابودن سطح آب و تولید کف، معمول است و بویلر هرگز شستشو داده نشده است.

علائم ناشی از خرابی: شکستی به طول ۱۰/۸ سانتی‌متر (۴/۲۵ اینچ) و به عرض ۴/۱ سانتی‌متر (۰/۱۶۲۵ اینچ) در یک ورم ایجاد شده است (شکل ۹.۵). یک لایه ضخیم و سیاه‌رنگ از اکسیدهای حرارتی در سطوح داخلی و خارجی وجود دارد که ضخامت آن در قسمت داغ لوله بیشتر است. رسوبی دارای سدیم، کلسیم، سیلیکون، آهن و به وزن ۴۱ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع (۳۸ گرم بر فوت‌مربع) درون لوله وجود دارد.

علت خرابی: لوله یک دوره بیش‌گرمایش بلندمدت ملایم را پشت سر گذاشته، اما خرابی لوله بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت شدید اتفاق افتاده است. در این بیش‌گرمایش، دمای لوله از ۷۳۰ درجه سانتی‌گراد (۱۳۵۰ درجه فارنهایت) بالاتر رفته و احتمالاً بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، بر اثر کمبود سیال خنک‌کن اتفاق افتاده است. کمبود سیال، ناشی از نشتی لوله‌های تخریب‌شده در بالادست این لوله بوده است.



شکل ۹.۵. شکست بزرگ در لوله سوپرهیتر یک بویلر سیکل ترکیبی. این لوله پس از شکست لوله‌های نزدیک آن، یک دوره بیش‌گرمایش بلندمدت را پشت سر گذاشته و سپس دچار بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت شده است.

تذکره: علاوه بر این لوله، چند لولهٔ دیگر نیز متحمل خرابی شده‌اند. لوله‌های نزدیک به این لوله، بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت (خزش) و بقیه بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت دچار خرابی شده‌اند [1].

□ نمونهٔ چهارم (بررسی ریزساختاری) [2]

صنعت:	نیروگاه
عمر نمونه:	۷ ماه
مشخصه‌های لوله:	قطر: ۵۰ mm (۲ in)، ضخامت نامی: ۵/۶ mm (۰/۲۲ in)
جنس:	ASME SA – 192

شرایط بهره‌برداری از بویلر: گزارش‌ها نشان می‌دهد ۲ ساعت قبل از راه‌اندازی، آب به‌قدر کافی در بویلر وجود داشته است. ۶ ساعت پس از راه‌اندازی بویلر، دو لولهٔ مجاور دچار شکست شده‌اند. در زمان وقوع خرابی، فشار و دمای بخار به ترتیب ۸/۶ مگاپاسکال (۱/۲۵ پوند بر اینچ مربع) و ۳۹۹ درجهٔ سانتی‌گراد (۷۵۰ درجهٔ فارنهایت) گزارش شده است (در این شرایط کاری، دمای جوشش ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد یا ۵۷۲ درجهٔ فارنهایت است).

علائم ظاهری خرابی: در تمام سطح خارجی لوله، لایهٔ اکسید مشاهده می‌شود. سطوح داخلی به‌طور یکسان با یک لایهٔ نازک و بسیار چسبنده از رسوب پوشیده شده است. بررسی‌های بویلر نشان می‌دهد هیچ لوله‌ای مسدود نشده است.

اندازه‌گیری ضخامت دیواره و قطر خارجی لوله‌ها نشان می‌دهد همهٔ لوله‌ها (شامل لوله‌های آسیب‌دیده و آسیب‌نندیده) باد کرده‌اند. نتایج این اندازه‌گیری، در جدول ۱.۵ آورده شده است. آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد جنس لوله‌ای که دچار شکست شده، با آنچه مستندها ذکر شده است یعنی ASME SA – 192، مطابقت دارد.

نمونه‌گیری: مقاطع لازم برای آزمایش متالوگرافی، از لولهٔ تخریب‌شده و نیز دو لولهٔ مجاور به آن که در ظاهر دچار مشکل نشده‌اند، تهیه شده است. در لولهٔ دچار شکست، نمونه‌ها از لبهٔ شکست، روبه‌روی محل شکست و با فاصلهٔ ۲۵۰ میلی‌متر (۱۰ اینچ) از محل شکست تهیه شده‌اند.

بررسی متالوگرافی نمونه‌ها: تمامی نمونه‌ها صیقل<sup>۱</sup> و اچ شده و با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر متالوگرافی شدند. ریزساختار نمونه‌ها و نتایج حاصل از بررسی این ریزساختار، در جدول ۲.۵ آمده است.

جدول ۱.۵. نتایج اندازه‌گیری ابعادی لوله‌ها

ضخامت دیواره mm (in)	قطر خارجی mm (in)	محل اندازه‌گیری قطعه
۵/۷-۷/۳ (۰/۲۲۶-۰/۲۸۶)	۵۰/۶-۵۱ (۱/۲۹۹-۲/۰۱۰)	لوله خریداری شده از کارخانه
۵/۱-۵/۷ (۰/۲۰۱-۰/۲۲۵)	حداقل: ۵۱/۸ (۲/۰۸۲)	دو لوله سالم پس از بهره‌برداری
۴/۶-۵/۶ (۰/۱۸۲-۰/۲۲۱)	۵۲/۴-۵۲/۹ (۲/۰۶۲-۲/۰۸۲)	لوله تخریب شده (در نزدیکی محل شکست)

جدول ۲.۵. نتایج آزمایش‌های متالوگرافی

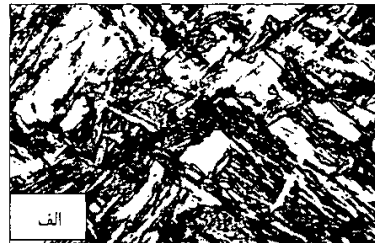
نتیجه	سختی	ریزساختار	محل نمونه‌گیری
دما از ۷۲۷ (F1340) °C 727 بالاتر رفته است.	۲۳-۲۴ (HRC)	ترکیبی از فریت و مارتنزیت یا باینیت سوزنی (شکل ۹.۵ الف). هیچ نشانه‌ای از ساختار کارسرد شده مشاهده نمی‌شود.	لبه شکست
دما از ۷۲۷ (F1340) °C 727 بالاتر رفته است.	۸۹ (HRB)	محصولات انتقالی کمتر نسبت به لبه شکست	روبه‌روی محل شکست
-	۸۰-۸۲ (HRB)	دارای نواحی کوچک و پراکنده‌ای از مارتنزیت یا باینیت در شبکه‌ای از فریت (شکل ۹.۵ ب)	با فاصله 250 mm از محل شکست
-	۸۲-۸۵ (HRB)	مقادیر چشمگیری مارتنزیت یا باینیت در شبکه‌ای از فریت (شکل ۹.۵ ج)	لوله سالم شماره ۱ (پس از بهره‌برداری)
-	۷۲-۷۳ (HRB)	کاربیدهای کروی در شبکه‌ای از مارتنزیت	لوله سالم شماره ۲ (پس از بهره‌برداری)

1. polished

علت خرابی: علت شکست لوله‌ها، بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت است. بررسی ریزساختار، سختی و ضخامت لایه رسوب درون لوله‌ها نشان می‌دهد دما در بیشتر نقاط بویلر از ۷۲۷ درجه سانتی‌گراد (۱۳۴۰ درجه فارنهایت) بالاتر رفته و در محل شکست به ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد (۱۶۰۰ درجه فارنهایت) رسیده است. در این دمای بالا، دو لوله ترکیده و آب خروجی باعث سردشدن ناگهانی لوله‌های داغ مجاور شده است. سردشدن ناگهانی لوله‌ها، باعث تشکیل مارتنزیت و دیگر محصولات انتقالی پایین‌تر<sup>۱</sup> شده است.

#### نکات توجه‌برانگیز در مورد این خرابی

- شرط لازم برای تشکیل محصولات انتقالی پایین‌تر در فولادهای کم‌کربن، بالاتر رفتن دمای فلز از ۷۲۷ درجه سانتی‌گراد (۱۳۴۰ درجه فارنهایت) و سپس کاهش سریع دماست.
- در ریزساختار لوله، نشانه‌ای از محصولات ناشی از بازپخت<sup>۲</sup> مشاهده نمی‌شود و این نشان می‌دهد لوله فقط یک بار بیش‌گرمایش شده است [2].

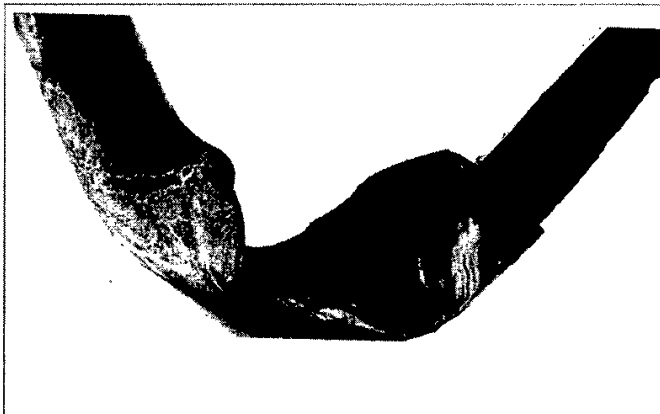


شکل ۱۰۵. ریزساختار سه نمونه لوله کربنی که به شدت بیش‌گرمایش شده‌اند: الف) ریزساختار لوله در مجاورت شکست؛ ب) ریزساختار لوله در فاصله ۲۵۰ میلی‌متر از محل شکست در لوله تخریب‌شده؛ ج) ریزساختار لوله سالم مجاور.

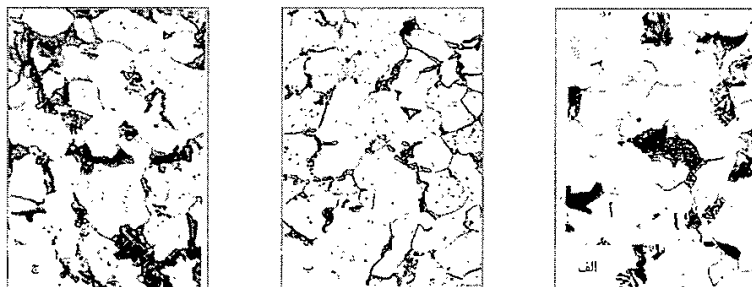
## □ نمونه پنجم (بررسی ریزساختاری) [2]

محل نمونه: سوپرهیتر  
 مشخصه‌های لوله: جنس: کربن: ۰/۱۵٪، مولیبدن: ۰/۱۳٪

علائم ناشی از خرابی: لوله موجود در شکل ۱۱.۵، از نوع بدون درز<sup>۱</sup> و دچار شکست است. این فولاد، در منطقه دور از آسیب، دانه‌های ریز فریت و ذرات پرلیت دارد (ساختار طبیعی برای این نوع فولاد، شکل ۱۲.۵ الف). در ناحیه شکست، فاز پرلیت از بین رفته است، کاربیدهای مولیبدن ( $Mo_2C$ ) در مرزدانه‌های فریت رسوب کرده و به شدت کروی شده‌اند (شکل ۱۲.۵ ب). در لبه‌های باریک شکست، تا اندازه‌ای پرلیت به مارتنزیت تبدیل شده است (شکل ۱۲.۵ ج). علت خرابی: با توجه به علائم خرابی، دما از مقدار  $AC_1$  (دمای بحرانی اول) بالاتر رفته و دست کم ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای بهره‌برداری عادی بوده است. در این دما، فولاد مولیبدنی کم‌آلیاژ موردنظر، استحکام خزشی بسیار پایینی دارد [13].



شکل ۱۱.۵. لوله سوپرهیتر که بر اثر افزایش درجه حرارت پاره شده است.



شکل ۱۲.۵. ریزساختار قسمت های گوناگون لوله سوپرهیتری که بر اثر دمای بالا دچار پارگی شده است؛ الف) ریزساختار لوله در خارج ناحیه خرابی، ب) ریزساختار لوله داخل ناحیه خرابی، در قسمتی که لوله پهن نشده است؛ ج) ریزساختار لوله در لبه نازک شکست، در ناحیه ترک‌دار لوله.

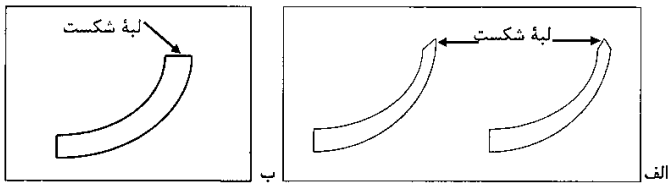
#### □ نمونه ششم (بررسی ریزساختاری) [۳]

صنعت:	نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی
محل نمونه:	سوپرهیت‌ر اولیه
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۲۰ سال
فشار درام:	۱۶/۸ MPA (۲۴۳۶ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۳/۸ in (۱/۵ in)، ضخامت: ۵/۸ cm (۲/۳ in)، جنس: 10CD5-05 (معادل SA 213 T11)
سوخت:	گاز و مازوت

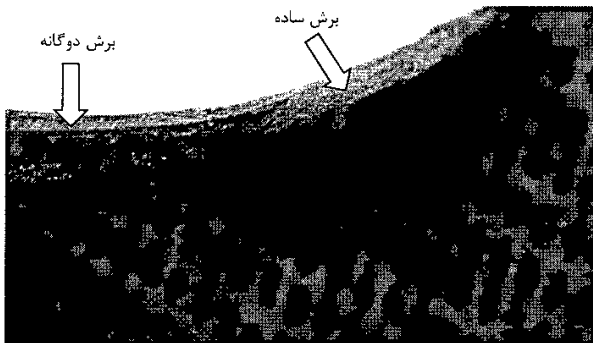
علائم خرابی: بر اثر شدت شکست، لوله به شدت خمیده شده که این امر نشانه بازشدن لحظه‌ای شکاف در لوله و خروج بخار در جهت عمود بر آن است (شکل ۱۳.۵). توجه دقیق به لبه‌های منطقه شکست نشان می‌دهد لبه‌های شکافی که ابتدا ایجاد شده است، زاویه ۴۵° نسبت به سطح لوله تشکیل می‌دهد، در صورتی که شکست نهایی عمود بر سطح لوله است (شکل ۱۴.۵). شکل ۱۵.۵، تصویری از نحوه شکست را در قسمتی که ابتدا شکاف ایجاد شده است نشان می‌دهد.



شکل ۱۳.۵. نمایی کلی از شکست لوله



شکل ۱۴.۵. کیفیت لبه‌های شکست؛ الف) دو نوع شکست برشی با زاویه ۴۵° (برش ساده و برش دوگانه)؛ ب) سطح شکست عمود بر سطح لوله.



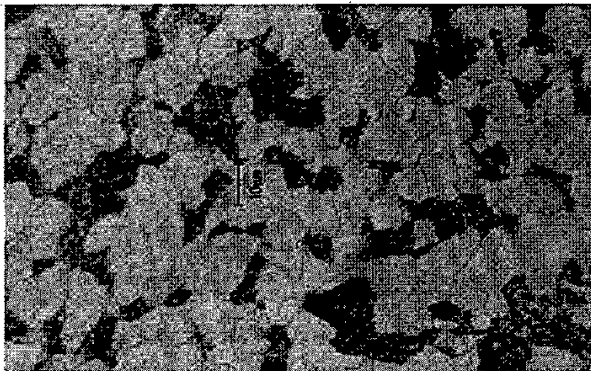
شکل ۱۵.۵. شکست برشی با زاویه ۴۵° (برش ساده و برش دوگانه) در لوله سوپرهیتر

در شکل ۱۶.۵، ساختار نمونه تهیه‌شده از لوله نو نشان داده شده است. شکل ۱۷.۵، ساختار نمونه تهیه‌شده از فاصله ۲۵ سانتی‌متری محل شکست را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، ساختار فریتی-پرلیتی اولیه کاملاً از بین رفته است؛ کاربیدها به مرزدانه‌ها مهاجرت کرده و در تمام سطح قطعه به‌صورت یکنواخت پخش شده‌اند.

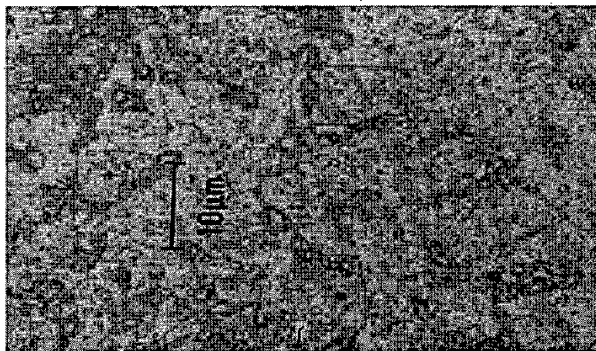


علت خرابی: گسیختگی. این لوله بر اثر بیش گرمایش کوتاه مدت اتفاق افتاده است. البته این لوله قبل از گسیختگی، متحمل بیش گرمایش بلندمدت نیز بوده است.

تذکر: شکست‌هایی که بر اثر افزایش سریع درجه حرارت اتفاق می‌افتند، با کاهش ضخامت آشکار در دیواره لوله همراه‌اند (ضخامت دیواره در این لوله، از ۵ میلی‌متر به ۳/۱۵ میلی‌متر کاهش یافته است). کاهش ضخامت بر اثر جاری شدن فلز در مجاورت منطقه شکست اتفاق می‌افتد. این پدیده می‌تواند تا مقداری که ناحیه شکست مانند لبه چاقو تیز شود، ادامه یابد. جاری شدن، با بادکردن مناطق مجاور منطقه شکست همراه است [۳].



شکل ۱۶.۵. ساختار فریتی-پربلیتی نمونه نو (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰۰ برابر، محلول حکاکی: نایتال ۲٪)



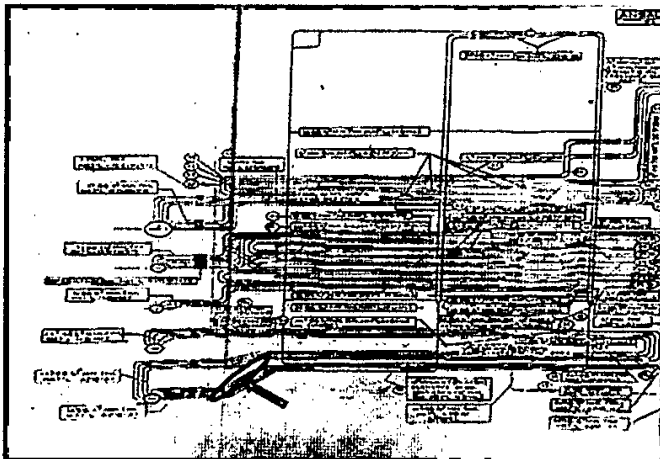
شکل ۱۷.۵. ساختار نمونه تهیه شده از فاصله ۲۵ سانتی‌متری منطقه شکست (بزرگ‌نمایی: ۱۵۰۰ برابر)

□ نمونه هفتم [۴]

صنعت:	نیروگاه بخار ۳۲۰ مگاواتی
محل نمونه:	بین دو خم انتهایی باندل سوپرهیتر اولیه
نحوه قرارگرفتن نمونه:	مایل
عمر نمونه:	بیش از ۳۵ سال
فشار درام:	۱۷۰ bar
مشخصه‌های لوله:	ضخامت: ۵/۶ mm، قطر خارجی: ۳۸ mm
جنس:	ASTM A213-Grade T22

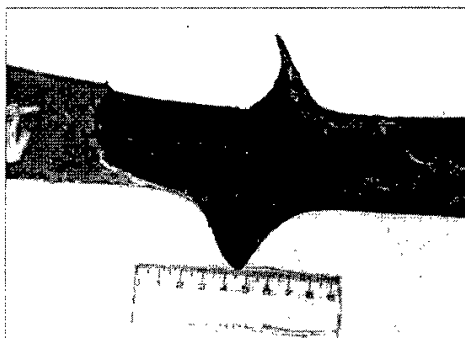
علامت ظاهری: خرابی روی داده به نمونه‌ای از لوله سوپرهیتر پلاتن یک نیروگاه بخاری مربوط است. در شکل ۱۸.۵ موقعیت تقریبی لوله مذکور در بویلر مشخص شده است. شایان ذکر است که محل شکست لوله، بین دو خم انتهایی باندل بوده و لوله از سطح زیرین (مقابل شعله) دچار ترکیدگی و شکست شده است (شکل ۱۹.۵).

این لوله از زمان نصب نیروگاه تا کنون تعویض نشده، یعنی حدود ۳۵ سال از آن بهره‌برداری شده است.



شکل ۱۸.۵. موقعیت لوله آسیب دیده در بویلر

همان‌طور که در شکل ۱۹.۵ مشخص است، لوله در قسمت گسیختگی خمیده شده که این خم به علت گسیختگی لحظه‌ای لوله و خروج شدید بخار در جهت عمود بر لوله و نیروی ناشی از تغییر جهت بخار به وجود آمده است. همچنین برخی قسمت‌های بدنه لوله که در مجاورت ترک بوده‌اند، بر اثر شدت انفجار به‌طور کامل شکسته و از لوله جدا شده‌اند. این رویداد می‌تواند ناشی از کاهش چقرمگی لوله بر اثر ترد شدن به‌واسطه بیش‌گرمایش بلندمدت و رسوب کاربیدها در مرز دانه‌ها باشد.



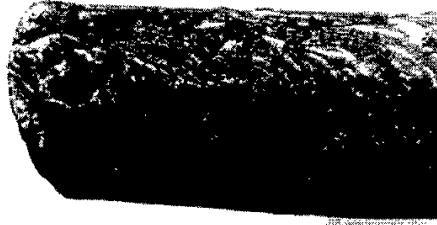
شکل ۱۹.۵. نمای یک ترک طولی به طول تقریبی ۱۵ سانتی‌متر در لوله

روی جداره خارجی لوله، محصولات خوردگی و پوسته اکسیدی (لایه رسوبی) نسبتاً ضخیم مشاهده می‌شود. وجود این لایه ضخیم از رسوبات روی لوله، موجب کاهش راندمان بویلر، افزایش مصرف سوخت و بیش‌گرمایش بخش‌هایی دیگر از بویلر می‌شود (شکل ۲۰.۵).

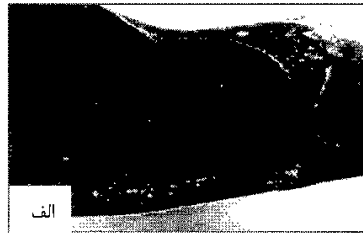
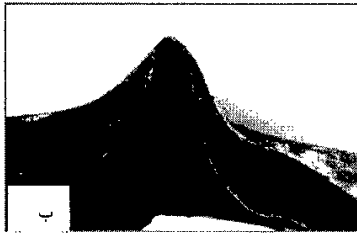
بر اساس شکل ۲۱.۵، ماهیت ماکروسکوپی شکست لوله در قسمت‌های گوناگون سطح شکست، دو نوع متفاوت و تلفیقی از ترد<sup>۱</sup> و نرم<sup>۲</sup> است.

در قسمتی از سطح شکست که قطعه‌ای از لوله به‌طور کامل جدا شده است، تغییر شکل پلاستیک ناچیز، سطح صاف و علائم ماکروسکوپی شکست ترد دیده می‌شود و می‌تواند به دلیل کاهش چقرمگی ماده بر اثر تغییرات ریزساختاری باشد (شکل ۲۱.۵.الف). همچنین در قسمت‌هایی از سطح شکست، تغییر شکل پلاستیک شدید، کاهش ضخامت لوله و نازک شدن لوله قبل از شکست رخ داده است (شکل ۲۱.۵.ب). این اتفاق ناشی از افزایش بیش از اندازه و

کوتاهمدت دمای کاری لوله، کاهش تنش تسلیم و درنهایت تغییر شکل پلاستیک چشمگیر، تیزشدن لبه شکست و رفتار شکست نرم است.



شکل ۲۰.۵. وجود لایه نسبتاً ضخیم رسوبی و محصولات خوردگی در سطح خارجی لوله



شکل ۲۱.۵. الف) قسمتی از سطح شکست با رفتار ترد و تغییر شکل پلاستیک بسیار کم؛ ب) نواحی دارای تغییر شکل پلاستیک شدید و رفتار نرم شکست.

بررسی ریزساختاری (ناحیه ترک لبه‌نازک): ریزساختار لبه‌نازک نشان داده شده در شکل ۲۲.۵، به‌وضوح کشیدگی دانه‌ها را در لبه تیز شکست نشان می‌دهد. کشیدگی دانه‌ها و تغییر شکل پلاستیکی شدیدی لوله در این ناحیه، بر اثر افزایش دمای بیش از حد و کوتاهمدت لوله در زمان بهره‌برداری بویلر یا مانور سریع روی آن، اتفاق افتاده است. چنین شرایطی می‌تواند موقع راه‌اندازی بویلر که هنوز جریان بخار کافی در لوله‌ها وجود ندارد اتفاق بیفتد که سبب گرمایش بیش از حد فلز و کاهش تنش تسلیم آن به‌صورت موضعی شده و تحت فشار داخلی لوله، به تغییر شکل شدید منجر می‌شود (بیش‌گرمایش کوتاهمدت).

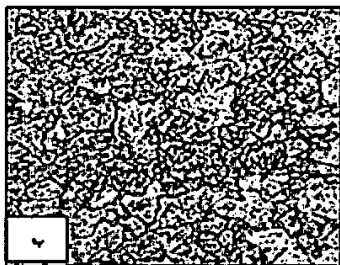
شکل ۲۳.۵ ریزساختار منطقه دورتر از لبه تیز را نشان می‌دهد. با افزایش فاصله از لبه تیز، میزان کشیدگی و تغییر شکل پلاستیک دانه‌ها به‌تدریج کاهش یافته است، به‌طوری‌که در شکل

۲۳.۵. ب دانه‌های هم‌محور، غالب تصویر را تشکیل داده‌اند. در این شکل، تغییرات شدید ریزساختاری، بهتر مشاهده می‌شود؛ ساختار اولیه لوله از بین رفته و کاربیدهای درشت مجزا در ساختار وجود دارد. با توجه به اینکه این لوله‌ها از گروه فولادهای کروم-مولیبدنی‌اند، ریزساختار لوله نو و کارنکرده این جنس، اغلب فریتی-پرلیتی است که در صورت بهره‌برداری درازمدت و در دمای بالا، به تدریج کاربیدها از ساختار پرلیت جدا شده و ریزساختار به دانه‌های فریتی تبدیل می‌شود که کاربیدها در مرز دانه‌های آن‌ها یا داخل ساختار تجمع کرده‌اند [6].

چنین ریزساختاری که به دنبال تجزیه ساختار پرلیتی اولیه به کاربیدهای مجزا و پراکنده در زمینه و مرز دانه‌های غالباً فریتی به وجود آمده و نیازمند صرف زمان طولانی است، به خوبی نشان‌دهنده فرارگیری و کارکرد بلندمدت فلز در دمای بالا و تخریب تدریجی ریزساختار آن به دلیل بیش‌گرمایش بلندمدت است. این شرایط، با توجه به گذشت بیش از ۳۵ سال از بهره‌برداری از این لوله و به‌ویژه افزایش دمای آن در زمان استفاده از سوخت گاز، طبیعی به نظر می‌رسد.



شکل ۲۲.۵. کشیدگی دانه‌ها، تغییرات ریزساختاری و حضور کاربیدها در ساختار لوله تیز ترک (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰ برابری) [۴]

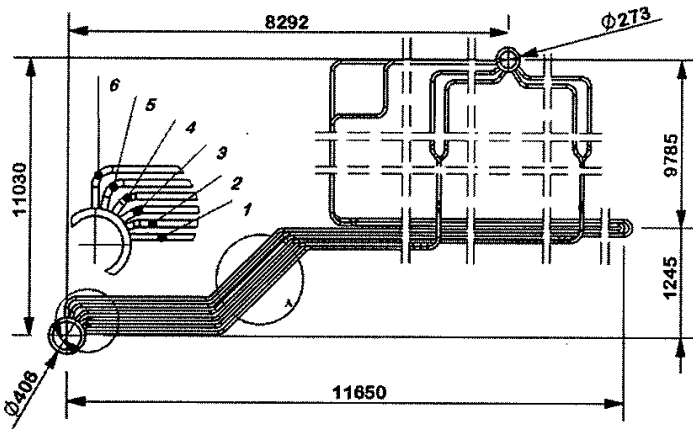


شکل ۲۳.۵. تغییرات شدید ریزساختاری و تجزیه پرلیت در ریزساختار دورتر از لوله نازک ترک. با فاصله گرفتن تدریجی، دانه‌ها از حالت کشیده (الف) به هم‌محور (ب) تغییر کرده‌اند.

رسوب کاربیدهای عمدتاً سخت و ترد در مرز دانه‌ها، انعطاف‌پذیری فلز را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و سبب کاهش چقرمگی آن می‌شود. رشد ترک و شکست لوله در این قسمت با ظاهر ماکروسکوپی ترد، ناشی از همین افت چقرمگی و نبود انعطاف‌پذیری کافی است. جدایش یک قطعه از لوله هنگام شکست در این منطقه نیز نشانه دیگری از شکست ترد لوله است. این تغییرات شدید ریزساختاری، مستلزم قرارگیری بلندمدت فلز در دمای بالا و تأیید دیگری بر غالب بودن مکانیسم آسیب بیش‌گرمایش بلندمدت، در شکست لوله است.

بررسی و بحث تکمیلی: به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر خرابی‌های سوپرهیترها، واحدهای مشابه در ایران، بررسی شده‌اند.

بررسی‌ها نشان می‌دهند درصد بالایی از خرابی‌های نیروگاه‌های مشابه، مربوط به سوپرهیتر اولیه (پلاتن) است. همچنین آمارها نشان می‌دهد تمامی خرابی‌های سوپرهیتر پلاتن، مربوط به ردیف‌های شماره ۵ و ۶ بوده‌اند. شکل ۲۴.۵، شماتیک محل قرارگیری لوله‌های ردیف ۵ و ۶ را نشان می‌دهد.



شکل ۲۴.۵. محل قرارگیری لوله در ردیف‌های پرحادثه ۵ و ۶ سوپرهیتر پلاتن [۵]

با توجه به دفعات زیاد و پرتکرار شکست در این ردیف‌ها، شرایط این لوله‌ها بیشتر بررسی شد. لوله‌های ۵ و ۶، دمای بالاتری نسبت به دیگر لوله‌ها (حدود ۲۵ درجه اختلاف نسبت به لوله‌های ۱ و ۲) دارند [7]. این تفاوت دما، ناشی از تفاوت طول لوله‌هاست (جدول ۲.۵ و شکل ۲۴.۵)، زیرا

با افزایش طول لوله، علاوه‌بر افزایش سطوح حرارتی و جذب حرارتی بیشتر، دبی بخار عبوری از این لوله‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر، افت فشار یکسان در طول همهٔ لوله‌ها به‌خاطر هدر ورودی و هدر خروجی مشابه است. در نتیجه، دبی در لوله با طول بیشتر کاهش می‌یابد. بنابراین دبی در لوله‌های ۵ و ۶ کمتر از دیگر لوله‌هاست و دمای آن دو نسبت به دیگر لوله‌ها، بالاتر می‌رود. در کنار مباحث مربوط به مسیر و طول لوله‌های آسیب‌دیده و جذب حرارتی بیشتر آن‌ها، لازم است به تأثیر نوع سوخت بر دمای کاری لوله‌ها اشاره کرد. بر اساس اطلاعات دریافتی از نیروگاه که تأثیر تغییر نوع سوخت مشعل‌های بویلر بر دمای بخار سوپرهیت را نشان می‌دهد، با افزایش تعداد مشعل‌های گازسوز، به‌تدریج دمای بخار سوپرهیت قبل از آب اسپری، افزایش می‌یابد. مثلاً با گازسوز شدن کامل مشعل‌ها، این دما به ۴۹۵ درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد که بسیار بیش از دمای طراحی (حداکثر ۴۴۵ درجهٔ سانتی‌گراد) است. این افزایش دما در تخریب و تغییرات شدید ریزساختاری و کاهش عمر کاری لوله‌ها، نقش بسزایی دارد [۴].

جدول ۲.۵. طول لوله‌های سوپرهیت پلاتن [۵]

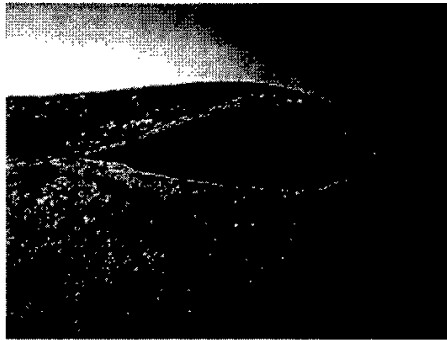
شمارهٔ لوله	لولهٔ ۱ و ۲	لولهٔ ۳ و ۴	لولهٔ ۵ و ۶
طول لوله (mm)	۲۷۲۰۰	۲۹۸۰۰	۳۹۲۰۰

□ نمونهٔ هشتم [۹]

صنعت:	نیروگاه بخار
محل نمونه:	دیوارهٔ آبی
نحوهٔ قرارگرفتن نمونه:	قائم
عمر نمونه:	۲ سال
فشار درام:	۱۷۰ bar
مشخصه‌های لوله:	جنس: ASTM A 213 Grade T11

علائم ظاهری: یک واحد نیروگاه پس از ۱۴ ماه خروج از مدار برای تعمیرات، وارد مدار شد، اما چند ساعت پس از راه‌اندازی، دوباره به‌دلیل گسیختگی لوله‌های دیوارهٔ آبی، از مدار خارج شد.

دو لوله کناری مستقیم<sup>۱</sup>، در یک گوشه در ارتفاع مشعل‌های ردیف اول و چهارم ترکیده‌اند. در لوله‌های آسیب‌دیده، ضخامت لوله در لبه ترک به ۲ میلی‌متر رسیده که این مقدار بسیار کمتر از ضخامت لوله نو (۵/۵ میلی‌متر) است. با توجه به کاهش تنش تسلیم (جاری‌شدن) فلزات با افزایش دما، این نتیجه حاصل می‌شود که لوله قبل از گسیختگی، دمای بسیار بالایی را که به کاهش مقاومت آن منجر شده تحمل کرده و بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در شکست آن نقش داشته است. شکل ۲۵.۵ نشان‌دهنده لبه‌های شکست است. در این تصویر کاهش ضخامت لوله در لبه شکاف، به‌وضوح مشاهده می‌شود.



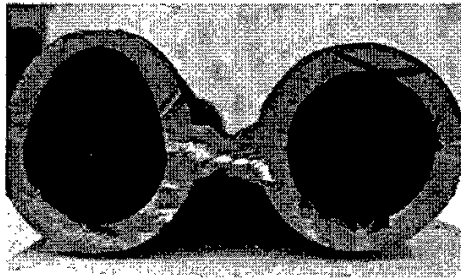
شکل ۲۵.۵. لبه شکاف ایجادشده در لوله

شکل ۲۶.۵ نشان می‌دهد که مقطع لوله آسیب‌دیده، دچار تغییر شکل چشمگیری شده و از حالت دایره‌ای خارج شده است. این تغییر شکل، حاکی از بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت یک سمت لوله (سمت آتش) است.

رسوب‌های خارجی و لایه اکسیدی داخلی، در محل گسیختگی از لوله جدا شده‌اند؛ یعنی لوله هنگام راه‌اندازی، به‌طور ناگهانی دچار شکست شده است. لایه‌های رسوبی و اکسیدی، به‌خاطر تردبودن، همراه با فلز لوله تغییر فرم نداده و ریخته‌اند (شکل ۲۷.۵). درحالی‌که در بیش‌گرمایش بلندمدت، تغییر شکل لوله بسیار کند است، شکست با ایجاد ترک کوچک شروع می‌شود و به‌دلیل آرام‌بودن تغییر شکل، لایه‌های رسوبی داخلی و خارجی از لوله جدا نمی‌شوند.

1. side wall



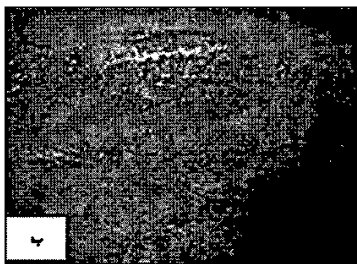


شکل ۲۶.۵. مقطع لوله کاملاً از حالت دایره‌ای خارج شده است.

بررسی متالوگرافی: برای بررسی ریزساختار متالورژیکی و ارزیابی تغییرات آن در دوره بهره‌برداری، چهار نمونه از نقاط گوناگون تهیه شد:

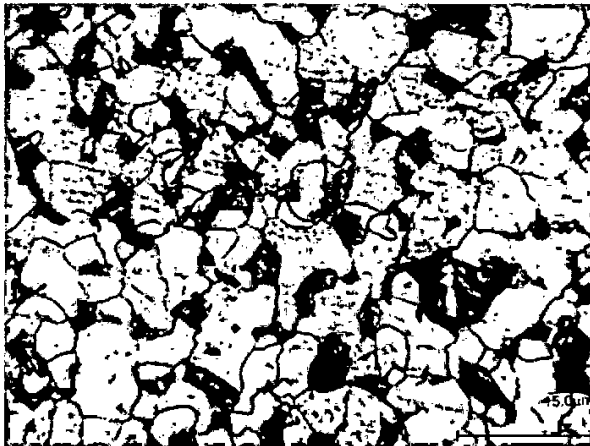
- نمونه ۱: سطح مقابل نقطه شکست، در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از محل شکست
- نمونه ۲: سطح مقابل نقطه شکست، در محل شکست
- نمونه ۳: سطح مقابل شعله، در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از محل شکست
- نمونه ۴: لبه شکاف

بررسی نمونه ۱: از آنجاکه این نمونه در معرض شعله و احتراق نبوده است، می‌توان انتظار داشت با توجه به دمای بهره‌برداری از این لوله، هیچ تغییری در ساختار اولیه آن ایجاد نشده باشد و به‌عنوان مرجع مقایسه به‌کار رود. شکل ۲۸.۵ ریزساختار این نمونه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ساختار فریتی-پرلیتی به‌صورت اولیه باقی مانده است. بررسی نمونه ۲: ریزساختار این نمونه مانند ساختار فلز نو و کاملاً سالم است.



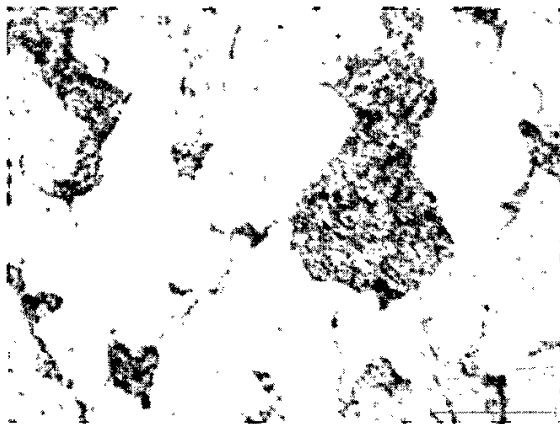
شکل ۲۷.۵. جدایش رسوبات خارج لوله در نزدیکی شکاف (ب) ریختن رسوبات داخل لوله (کنده شدن) رسوبات نشان‌دهنده ماهیت انفجاری شکست است.

بررسی نمونه ۲: برای بررسی تغییرات ساختاری احتمالی لوله هنگام بهره‌برداری و وجود بیش‌گرمایش بلندمدت، نمونه‌ای از سطح مقابل شعله در فاصله تقریبی ۳۰ سانتی‌متری از محل گسیختگی تهیه شده است. شکل ۲۹.۵ نشان می‌دهد که در این قسمت، تغییرات ساختاری بسیار ناچیز است و فقط تغییرات اندکی در مرزدانه‌های رسوب‌های کاربید دیده می‌شود. با مقایسه ساختار شکل ۲۹.۵ با کاتالوگ تغییرات ریزساختاری (مراحل کروی‌شدن کاربیدها، شکل ۲۸.۴)، مشخص می‌شود که فلز از نظر ساختاری آسیب ندیده است. این ساختار مشابه وضعیت B از کاتالوگ گفته شده است و اثبات می‌کند با وجود بیش از دو سال بهره‌برداری، هنوز تغییرات ساختاری ایجاد نشده و لوله تحت بیش‌گرمایش بلندمدت قرار نگرفته است.

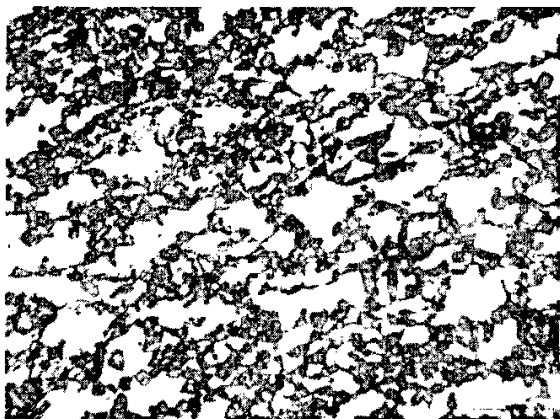


شکل ۲۸.۵. ساختار نمونه ۱ (دور از شکاف)، بزرگ‌نمایی: ۲۰۰ برابر

بررسی نمونه ۴: در این مرحله، نمونه تهیه‌شده از لبه شکاف بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۳۰.۵ دیده می‌شود، ساختار کاملاً تغییر کرده است و هیچ شباهتی به ساختار اصلی ندارد. علت شکل‌گیری چنین ساختاری، خنک‌شدن سریع پس از افزایش دما به بیش از دمای بحرانی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد است. گرم‌شدن تا این دما، تبدیل پرلیت به آستنیت را به‌دنبال دارد و بعد از خنک‌شدن سریع، آستنیت به بینیت تبدیل می‌شود [6]. دلیل این خنک‌شدن سریع، خروج آب از محل شکاف است (شکل ۳۱.۵). شکل ۳۰.۵ ساختار فریتی-بینیتی و تقریباً جهت‌دار دانه‌ها در ۵ میلی‌متری لبه شکست را نشان می‌دهد.



شکل ۲۹.۵. ساختار نمونه ۳، بزرگ‌نمایی: ۵۰۰ برابر

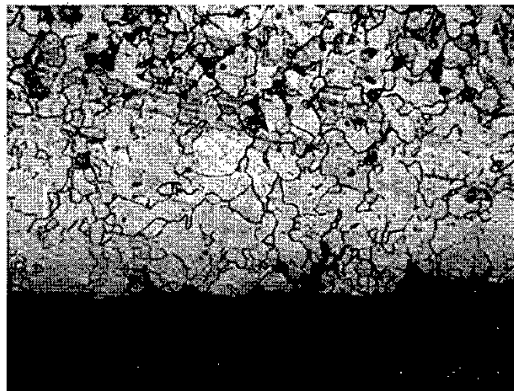


شکل ۳۰.۵. دانه‌بندی در فاصله ۵ میلی‌متری از لبه شکاف (بزرگ‌نمایی: ۲۰۰ برابر). با فاصله گرفتن از ناحیه شکست (تاج لوله)، فلز به دمای بحرانی نمی‌رسد و به ساختار اولیه لوله نزدیک می‌شود.

دی‌کربوره شدن سطح خارجی لوله: همان‌طور که در شکل ۳۲.۵ مشاهده می‌شود، کربن‌های نزدیک به سطح، بر اثر واکنش با هوای داغ و محصولات احتراق، از بین رفته و سطح عاری از کربن شده است. این پدیده اگرچه استحکام سطحی را کاهش می‌دهد، اما موجب گسیختگی آن نمی‌شود.



شکل ۳۱.۵. گسیختگی لوله و خروج آب از محل پارگی که موجب سردشدن سریع لوله و تشکیل ساختار بینیتی شده است.



شکل ۳۲.۵. کاهش کربن در نزدیکی سطح

علامت ناشی از خرابی: یک لوله دیواره آبی در نقاط گوناگون سمت شعله، دچار تعداد بسیاری ورم کردگی (تاول) کوچک (تا ۲ سانتی‌متر) شده است. عمر طراحی این نوع لوله، بیش از ۳۰ سال است، در حالی که لوله مذکور فقط ۲/۵ سال کار کرده است. رسوب‌های خارجی در قلعه بعضی از این برآمدگی‌ها (که نسبت به دیگر نقاط متورم، بیشتر دچار بادکردگی شده‌اند) ریخته است (شکل ۳۳.۵).



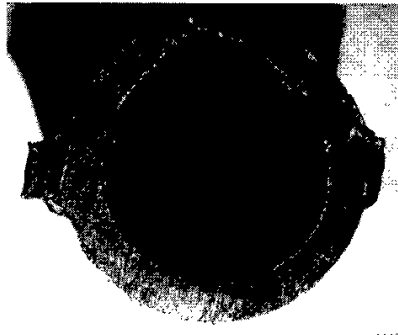
شکل ۳۳.۵. به دلیل تغییر شکل فلز و تردی رسوبات، رسوب محصولات احتراق در قلّه بعضی از نقاط متورم ریخته است.

□ نمونه نهم [۱۰]

صنعت:	نیروگاه
محل نمونه:	لوله دیواره آبی <sup>۱</sup>
نحوه قرارگرفتن نمونه:	قائم
عمر نمونه:	۲/۵ سال
شرایط کاری:	فشار ۱۷۰ bar، دما ۳۵۰°C
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵۵ mm، ضخامت: ۵/۵ mm
	جنس: 10CD5-05 (نزدیک به فولاد 14CrMo <sub>3</sub> )

با توجه به دستورالعمل‌های موجود، حداکثر ضخامت مجاز برای رسوب داخلی در لوله‌های این بویلر، ۶۵ تا ۷۰ میکرون است که در صورت رسیدن ضخامت لایه رسوبی به این اندازه، برای پیشگیری از بیش‌گرمایش لوله‌ها، اسیدشویی لازم است. در سمت داخلی این لوله، یک لایه اکسید بسیار ضخیم (با ضخامت تقریبی ۵۰۰ میکرون) دیده می‌شود که تمام سطح داخلی لوله را پوشانده و لایه‌ای مقاوم به انتقال حرارت در آن ایجاد کرده است. شکل ۳۴.۵ نمایی از سطح مقطع لوله را نشان می‌دهد.

از شکل ۳۴.۵ دو موضوع مهم برداشت می‌شود؛ اول اینکه کاهش ضخامت لوله در محل تاول است (۴ میلی‌متر). بیشترین ضخامت لوله در ناحیه سرد لوله دیده می‌شود (۵/۵ میلی‌متر) که در مقابل شعله مستقیم نبوده است. این کاهش ضخامت موضعی در محل تاول، یکی از مشخصه‌های بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت است. طی بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت، دمای قسمتی از لوله به‌طور موضعی در یک بازه زمانی نه‌چندان طولانی، بیش از حد افزایش می‌یابد و سبب کاهش تنش تسلیم ماده و تغییر شکل دائمی و پلاستیک‌شدن آن به‌صورت تغییر ضخامت لوله می‌شود [۱].



شکل ۳۴.۵. مقطع لوله، نازک‌شدگی در محل تاول و جدایش لایه ضخیم اکسیدی داخل لوله در محل تاول

دومین نکته به شکست و ریزش رسوب‌های داخلی لوله در نزدیکی ورم‌کردگی مربوط می‌شود که علت آن، تغییر شکل لوله با نرخ کرنش زیاد، هنگام بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت است. این رفتار، ناشی از نرمی فلز در دمای بالا است، درحالی‌که رسوبات به‌علت ترد بودن، هنگام تغییر شکل زیاد، دچار شکست شده و از لوله جدا می‌شوند (اتفاق مشابه برای رسوبات خارجی، شکل ۳۳.۵).

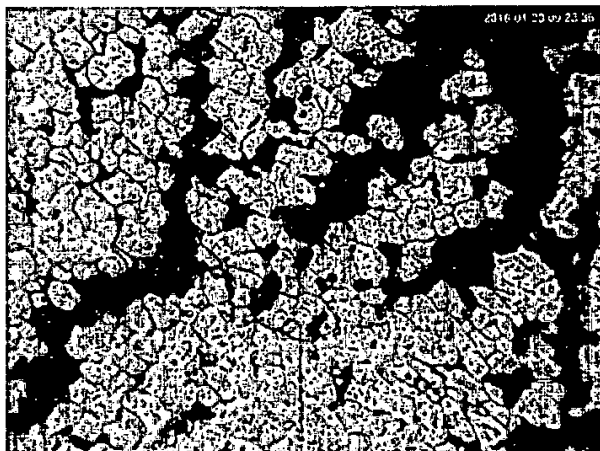
بررسی ریزساختاری: ریزساختار ناحیه مقابل ترک (سمتی که در معرض شعله نبوده است) شامل ساختار فریتی-پرلیتی، مشابه ساختار کارنکرده این لوله است. نکته مهم دیگر، تشابه ساختار متالوگرافی پشت لوله (که با شعله در تماس نیست) با ساختار سمت آتش لوله است. یکسان بودن ساختار متالوگرافی دو سمت لوله (سمت شعله و سمت مقابل) نشان می‌دهد لوله دچار بیش‌گرمایش بلندمدت نشده است. این موضوع با توجه به عمر کم لوله‌ها (۲/۵ سال)، بیش‌بینی‌پذیر بود.

اما ساختار متالوگرافی لبه ترک، کاملاً گویای بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت است. در این قسمت چون لوله تحت تنش (ناشی از فشار داخلی) بوده است، پدیده خزش از مرز دانه‌ها شروع شده و موجب جدایش مرز دانه‌ها (شکل ۳۵.۵)، انبساط موضعی، تاول‌زدن و رشد ترک شده است.

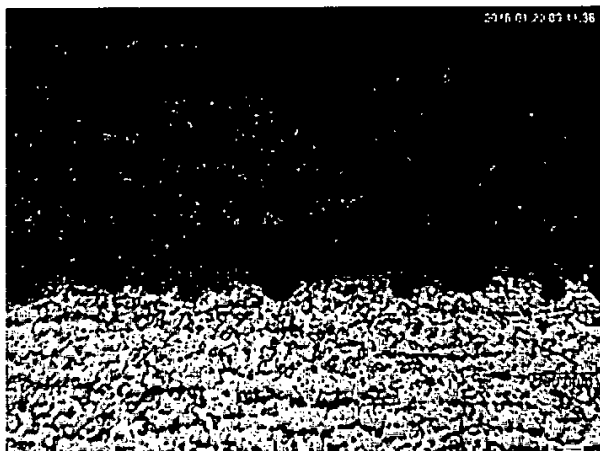
باید توجه داشت که این بیش‌گرمایش کاملاً موضعی بوده و در قسمت قلعه تاول‌ها اتفاق افتاده است و دیگر نواحی لوله، اعم از سمت آتش و سمت دیوار، تغییری نکرده‌اند.

تحلیل پدیده: دلیل افزایش دمای موضعی، زیادبودن ضخامت لایه اکسیدی داخل لوله است که موجب کاهش انتقال حرارت میان لوله و آب داخل آن می‌شود. چنان‌که در شکل ۳۶.۵ مشاهده می‌شود، ضخامت این لایه به بیش از ۴۰۰ میکرون رسیده، درحالی‌که حداکثر ضخامت مجاز آن ۶۵ تا ۷۰ میکرون است.

ضریب انتقال حرارت رسوب، به‌مراتب پایین‌تر از لوله است. این ضریب برای فولاد کربنی ۵۵ وات بر مترمربع در درجهٔ سانتی‌گراد است، درحالی‌که بیشترین مقدار این ضریب برای رسوبات حدود ۳/۶ وات بر مترمربع است؛ یعنی لایهٔ اکسیدی، تقریباً ۱۵ برابر کمتر، حرارت را از خود عبور می‌دهد (جدول ۳.۱۸).



شکل ۳۵.۵. جدایش شدید مرزدانه‌ها و ایجاد ترک‌های ماکروسکوپی



شکل ۳۶.۵. سطح داخلی لوله و ضخامت بیش از ۴۰۰ میکرونی لایهٔ اکسیدی داخل لوله.

با توجه به آنچه گفته شد، لایه رسوب تشکیل شده روی سطح داخلی لوله، مانع از انتقال حرارت کافی از طریق لوله به آب می‌شود. این موضوع مانع انتقال همه حرارت دریافتی از شعله (توسط لوله) به آب می‌شود. در نتیجه دمای لوله بالا می‌رود، رفتاری نرم از خود نشان می‌دهد و شروع به تاول زدن می‌کند. وقتی لوله دچار تاول زدگی می‌شود، سه اتفاق می‌افتد که پدیده را به سمت خرابی بیشتر و تشدید شرایط نامناسب سوق می‌دهد:

**الف) ریختن لایه رسوب‌های محصولات احتراق از نوک تاول‌ها:** با توجه به اینکه رسوب‌ها رفتاری ترد دارند، نمی‌توانند با نرخ بالا دچار کرنش و تغییر شکل شوند و از سطحی که به آن چسبیده‌اند، پیروی نمی‌کنند. در نتیجه لایه‌های رسوب دچار شکست شده و از لوله جدا می‌شوند. این موضوع برای رسوب‌های داخلی و خارجی لوله صادق است. اما آنچه در این بخش اهمیت دارد، ریزش رسوب‌های خارجی لوله (سمت آتش) است. ضخامت این لایه در بسیاری از نقاط به ۱ میلی‌متر و بیش از آن نیز می‌رسد. ریختن لایه اکسید سمت آتش سبب می‌شود لوله در معرض تشعشع مستقیم قرار گیرد و حرارت بیشتری جذب کند.

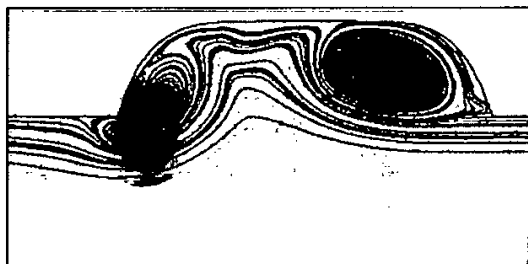
**ب) افزایش سطح انتقال حرارت در محل تاول‌ها:** علت این مسئله، افزایش سطح انتقال حرارت لوله با شعله، پس از تاول زدن است و چون سطح بیشتری در معرض تشعشع قرار می‌گیرد، دما به شکل موضعی افزایش می‌یابد.

**ج) کاهش انتقال حرارت به آب درون لوله:** ابتدا ممکن است به نظر برسد افزایش سطح گفته شده برای سمت آب هم وجود دارد، یعنی سمت آب نیز به دلیل افزایش سطح، انتقال حرارت بیشتری انجام دهد. اما باید توجه داشت که وجود یک فرورفتگی در سطح داخلی لوله می‌تواند سبب افزایش دما شود. علت این مسئله نیز، تغییر شکل جریان درون لوله است. وقتی یک فرورفتگی درون لوله ایجاد شود، جریان بدون ورود به حفره، از روی آن عبور می‌کند. این موضوع سبب کاهش فشار درون حفره و کشیده شدن جریان به درون فرورفتگی (تاول) می‌شود. پس از افزایش فشار داخل ناحیه فرورفته، جریان دوباره از چاله بیرون می‌آید و یک گردابه دیگر در ورودی چاله تشکیل می‌شود (شکل ۳۷.۵). این روند ادامه می‌یابد و به‌طور پیوسته، گردابه‌هایی از لبه خروجی چاله آزاد می‌شوند و به داخل جریان کشیده می‌شوند. در نهایت، دمای انتهای چاله (نوک تاول) بیشتر از حالتی می‌شود که چاله‌ای وجود نداشته باشد (شکل ۳۸.۵).

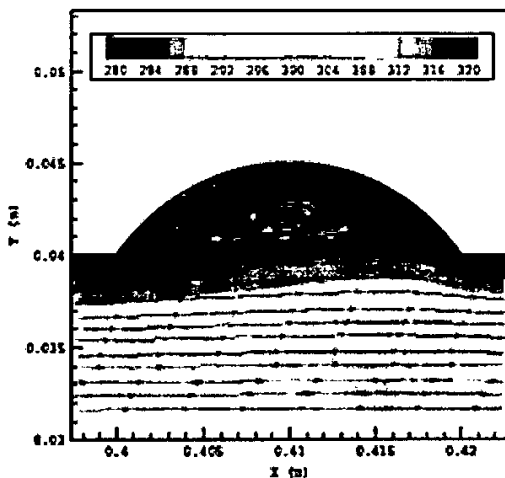
پس به سه دلیل یادشده، پدیده تاول زدن به سمت ناپایداری پیش می‌رود؛ قلّه تاول به‌طور مداوم گرم‌تر می‌شود تا ناگهان دچار شکست و نشتی شود.



ممکن است علاوه بر موارد یادشده، پدیدهٔ مخرب دیگری نیز رخ دهد. وقتی دمای قسمتی از لوله بیش از حد بالا رود، یک لایه از آب داخل لوله در مجاورت سطح، بخار می‌شود. به‌موجب این پدیده ضریب انتقال حرارت باز هم کمتر می‌شود (شکل ۱۶.۴). با افزایش شار حرارتی، دمای لوله به‌طور چشمگیری بالا می‌رود تا به ناحیهٔ سوختن لوله برسد، بی‌آنکه دمای آب به همان نسبت زیاد شود. پیشنهاد اجرایی: برای به‌حداقل‌رساندن احتمال وقوع خرابی‌های مشابه، پیشنهاد شده است اسیدشویی فوری بویلر و زدودن رسوبات داخلی قبل از آسیب‌رسیدن به دیگر بخش‌های بویلر، در دستورکار قرار گیرد.



شکل ۳۷.۵. خطوط جریان و ایجاد گردابه درون فرورفتگی [11]



شکل ۳۸.۵. خطوط جریان و توزیع دما درون یک حفرهٔ روی لوله [12]

## منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [2] ASM Handbook, Vol.11, "Failure Analysis and Prevention", 1992.
- [۳] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، حسین اصغری فریاد، بررسی و تحلیل وضعیت سوپرهیتر پلاتن واحد ۲ نیروگاه بندرعباس، شرکت مشانیر، آبان ۱۳۸۲.
- [۴] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، محمود سمیع‌زاده، تحلیل خرابی لوله‌های سوپرهیتر پلاتن نیروگاه بندرعباس (واحد چهار- حادثه ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۶)، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، خرداد ۱۳۹۶.
- [۵] علی اکبر شامی، بهینه‌سازی طرح سوپرهیتر پلاتن نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۷.
- [6] French, D., *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, Wiley Pub., 1983.
- [7] Shami, A., Moussavi Torshizi, S.E. & Jahangiri, A., "Failure Analysis and Remedial Solution Suggestion for Superheater Tubes of a Power Plant Boiler", *Trans Indian Inst Met* 73, 1729–1741 (2020). [https:// doi.org/10.1007/s12666-020-01968-y](https://doi.org/10.1007/s12666-020-01968-y).
- [۸] شامی، علی اکبر، سیدابراهیم موسوی ترشیزی و علی جهانگیری، «بررسی تجربی و محاسباتی خرابی سوپرهیتر پلاتن یک نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی»، مهندسی مکانیک مدرس (دوره ۲۰، شماره ۲)، ۵۱۴-۵۰۹، ۱۳۹۸.
- [۹] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و سیدحسین موسوی ترشیزی، بررسی علل خرابی لوله دیواره آبی بویلر واحد ۲ نیروگاه حرارتی بندرعباس (حادثه ۱۳۹۱/۹/۳۰)، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، اردیبهشت ۱۳۹۲.
- [۱۰] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و سیدحسین موسوی ترشیزی، بررسی علل تخریب لوله‌های دیواره آبی بویلر واحد ۲ نیروگاه بندرعباس، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، بهمن ۱۳۹۴.
- [11] [marian.fsik.cvut.cz/~bodnar/acoustics/](http://marian.fsik.cvut.cz/~bodnar/acoustics/)
- [12] <http://www.slideshare.net/akdatika/study-of-heat-transfer-characteristics-of-laminar-air>.
- [13] Naumann, Friedrich Karl, *Failure Analysis: Case Histories and Methodology*, Translators from The German Version: Dr. Claus G. Geotzel, Mrs. Lilo K. Geotzel. Max-Plank-Institut Für Eisenforschung

## خوردگی سمت آب

### مقدمه

اکسیژن متداول‌ترین ماده‌ای است که باعث خوردگی سطوح سمت آب می‌شود. مواد محلول دیگری مانند یون‌های کلرید و هیدروکسید نیز باعث خوردگی می‌شوند.

همچنین در بسیاری از فرایندهای صنعتی، از مواد شیمیایی آلی و غیرآلی استفاده می‌شود که می‌توانند به داخل بویلر نفوذ کنند و باعث آلودگی آب شوند. بسیاری از این مواد آلی و غیرآلی روی سطوح حرارتی بویلر رسوب می‌کنند و موجب خوردگی می‌شوند، یا باعث ایجاد کف در درام و انتقال آن به سوپرهیتورها<sup>۱</sup> می‌شوند. ورود این مواد همراه بخار به سوپرهیتورها، علاوه بر کاهش بازدهی توربین، باعث رسوب‌گذاری خوردگی زیاد در سوپرهیتورها، ری‌هیتورها، لوله‌های انتقال بخار و توربین می‌شود.

از آنجاکه در بسیاری از صنایع، تهیه آب با کیفیت مناسب بسیار مهم است، برحسب نیاز، مواد شیمیایی خاصی به آب سیکل تزریق می‌شود. چنانچه در استفاده از این مواد دقت لازم به عمل نیاید، آن‌ها می‌توانند باعث خوردگی سطوح داخلی شوند.

معمولاً مدتی پس از بهره‌برداری، رسوب‌هایی در لوله‌های بویلر ایجاد می‌شوند. روش مناسب برای حذف این رسوب‌ها، اسیدشویی بویلر است. اگر اسیدشویی درست انجام نشود، امکان خوردگی در بویلر وجود خواهد داشت.

در فصل‌های ۶ تا ۱۰، با تمرکز بر عوامل خوردگی سطوح سمت آب، به بررسی آن‌ها و مکانیسم‌های مرتبط می‌پردازیم.

در ضمیمه (ب) این کتاب، اطلاعاتی درباره رژیم‌های شیمیایی به‌کاررفته در بویلرهای درام‌دار، برای پیشگیری از خوردگی و رسوب‌گذاری ارائه شده است.



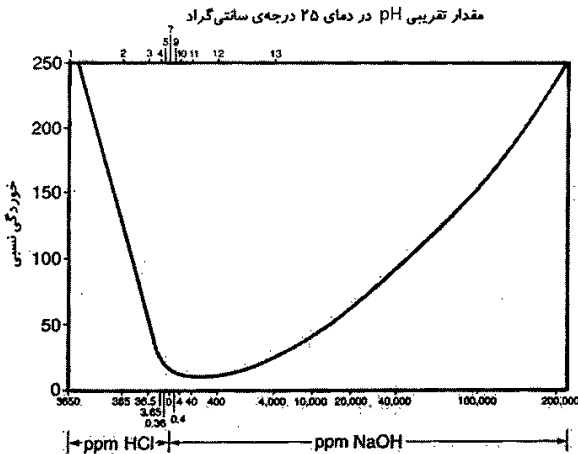
## فصل ۶

### خوردگی قلیایی

#### ۱.۶. مکانیسم خوردگی [1]

خوردگی قلیایی<sup>۱</sup> که به آن کندگی قلیایی<sup>۲</sup> و کندگی نرم<sup>۳</sup> نیز گفته می‌شود، واکنشی خورنده بین هیدروکسید سدیم تغلیظ‌شده و فلز است.

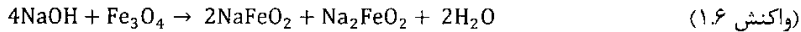
اکسیدهای آهن در هر دو محیط اسیدی و بازی خورده می‌شوند (شکل ۱.۶)، بنابراین فولاد در حضور هیدروکسید سدیم نیز خورده می‌شود<sup>۴</sup>. طی این واکنش، مواد با pH بالا مثل هیدروکسید سدیم، لایهٔ مگنتیت سطح فلز را در خود حل می‌کنند (واکنش ۱.۶).



شکل ۱.۶. خوردگی فولاد در دمای ۳۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۵۹۰ درجهٔ فارنهایت) در pH گوناگون

1. caustic corrosion
3. ductile gouging

2. caustic gouging
4. amphoteric nature of iron oxides



ممکن است پس از حل شدن مگنتیت، هیدروکسید سدیم مستقیماً با آهن وارد واکنش شده و باعث خوردگی آن شود (واکنش ۲.۶).



### ۲.۶. محل وقوع خوردگی [1]

به‌طور کلی، خوردگی قلیایی می‌تواند در مکان‌های زیر رخ دهد:

۱. لوله‌های حاوی آب که شار حرارتی بسیاری به آن‌ها وارد می‌شود؛
۲. لوله‌های افقی و شیب‌دار؛
۳. مکان‌های دارای رسوب زیاد؛
۴. پشت‌بند جوش‌ها و دیگر تجهیزاتی که در مسیر حرکت سیال، ناپیوستگی ایجاد می‌کنند، یا در نواحی مجاور به آن‌ها (در صورتی که در نواحی مذکور، انتقال حرارت انجام شود).

### ۳.۶. عوامل خوردگی [1]

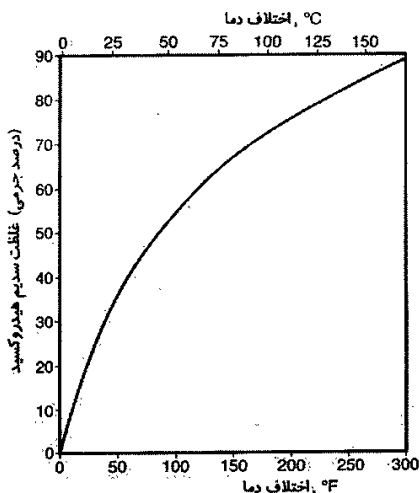
به‌طور کلی دو عامل در خوردگی قلیایی مؤثرند:

۱. وجود هیدروکسید سدیم یا نمک‌های مولد قلیا؛ هیدروکسید سدیم اغلب در حد غیرخورنده به آب بویلر افزوده می‌شود. هیدروکسید سدیم باقی‌مانده بر اثر احیای رزین‌های اشباع‌شده نیز می‌تواند وارد آب سیکل شود و شرایط قلیایی نامناسبی در آب ایجاد کند؛
- نمک‌های مولد قلیا ممکن است بر اثر نشتی در کندانسور یا در طول سیکل، باعث آلودگی آب شوند. کنترل ضعیف تجهیزات تغذیه‌کننده مواد شیمیایی یا عملکرد نامناسب آن‌ها نیز ممکن است باعث قلیایی شدن بیش از اندازه شود.
۲. مکانیسم‌های تغلیظ: از آنجاکه هیدروکسید سدیم و نمک‌های مولد قلیا، به‌ندرت در مقادیر خورنده در آب بویلر وجود دارند، برای ایجاد خوردگی، وجود مکانیسم‌های تغلیظ آن‌ها ضروری‌ست. سه مکانیسم تغلیظ اساسی در محیط بویلر وجود دارد:

۱. **alkaline-producing salts**: نمک‌هایی که محلول آن‌ها در آب شرایط قلیایی ایجاد می‌کند.

۲. رزین‌های آنیونی که جهت به‌کاررفته در حذف یون‌های منفی استفاده می‌شوند، پس از مدتی اشباع شده می‌شوند و عمل تبادل یون را انجام نمی‌دهند. جهت به‌منظور احیای این رزین‌ها، هیدروکسید سدیم به رزین تزریق می‌شود. پس از عملیات احیا و شستشوی رزین‌ها، هیدروکسید سدیمی که در رزین باقی می‌ماند، در آب حل شده می‌شود و که می‌تواند باعث خوردگی در مسیر سیکل شود.

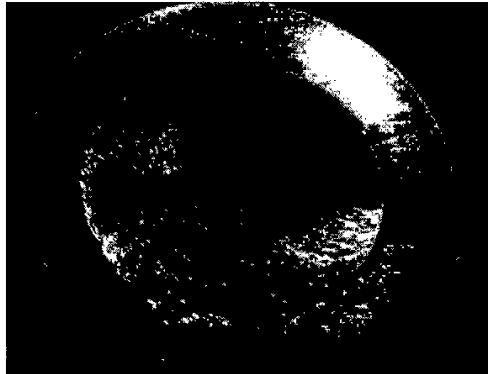
الف) آغاز جوشش لایه‌ای ناپایدار (DNB): جوشش نقطه‌ای، شرایطی است که در آن، حباب‌های جداگانه در نقاطی از سطح فلز تشکیل می‌شوند. معمولاً هنگام تشکیل حباب‌های بخار، مقادیر ناچیز مواد جامد موجود در آب بویلر، در سطح فلز (معمولاً در سطح جدایش آب و بخار) افزایش می‌یابد. با جداسدن حباب از سطح فلز، آب دوباره مواد جامد حل‌شده‌ی مانند هیدروکسید سدیم را در خود حل می‌کند (شکل ۱.۱۸). در ابتدای DNB، نرخ تشکیل حباب بخار از نرخ حل‌شدن مجدد مواد در آب بیشتر می‌شود. در چنین شرایطی، هیدروکسید سدیم و دیگر مواد جامد محلول و معلق، تغلیظ می‌شوند (شکل‌های ۱۵.۴ و ۲.۶). هیدروکسید سدیم و دیگر مواد خورنده‌ی تغلیظ‌شده، باعث از بین رفتن لایه‌ی نازک مگنتیت و در نهایت خورده‌شدن فلز می‌شوند. پس از شروع جوشش لایه‌ای پایدار (اتمام DNB)، لایه‌ای از بخار روی سطح تشکیل خواهد شد که در کناره‌هایش، مواد خورنده‌ی تغلیظ و موجب خورده‌شدن فلز در محیط این لایه می‌شوند. دیگر قسمت‌های فلز که زیر این لایه قرار می‌گیرند، تا اندازه‌ای سالم و دست‌نخورده باقی می‌مانند.



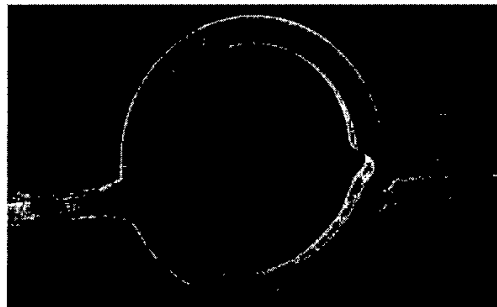
شکل ۲.۶. مقدار هیدروکسید سدیم در لایه‌ی تغلیظ‌شده‌ی آب بویلر

ب) رسوب: در مواقعی که رسوب روی سطح قرار می‌گیرد، شرایطی مشابه آنچه در مورد DNB گفته شد، ایجاد می‌شود. بخاری که در زیر این لایه‌ی رسوب — که عایق حرارتی است —

تشکیل می‌شود، از زیر لایه رسوب خارج می‌شود و مواد خورنده را در زیر لایه بر جای می‌گذارد. این مواد خورنده می‌توانند باعث خوردگی شدید در سطح فلز شوند (شکل ۳.۶).  
 ج) تبخیر در سطح آب: در محل‌هایی که لوله پُر نیست، تغلیظ (احتمالی) مواد خورنده بر اثر تبخیر، باعث خورده شدن فلز در امتداد سطح آب می‌شود. این امر در لوله‌های افقی و شیب‌دار، دو مجرای موازی و طولی ایجاد می‌کند (شکل ۴.۶). اگر لوله تقریباً پر باشد، مجراهای موازی به ناحیه‌ای خورده شده در قسمت بالایی لوله تبدیل می‌شوند (شکل ۵.۶). در لوله‌های عمودی، تغلیظ مواد خورنده در سطح آب، باعث ایجاد یک ناحیه خورده شده محیطی (در امتداد سطح آب) می‌شود.

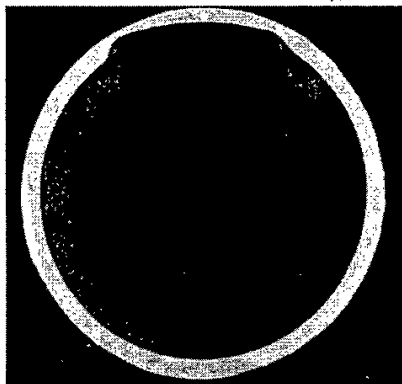


شکل ۳.۶. خوردگی قلبیایی عمیق در زیر رسوب‌های داخلی



شکل ۴.۶. خوردگی قلبیایی در امتداد سطح آب در طول لوله





شکل ۵.۶. خوردگی قلیایی در امتداد تاج لوله بر اثر تبخیر در سطح آب

#### ۴.۶. علائم خوردگی [۱]

در صورت دسترسی به سطوح خورده شده، می توان وجود حفره های نیم کروی<sup>۱</sup> و بیضوی<sup>۲</sup> مجزا را از علائم خوردگی قلیایی دانست. ممکن است این حفره ها با محصولات خوردگی متراکم که گاهی حاوی کریستال های براق مگنتیت اند، پر شوند. گاهی نیز یک لایه از رسوب های سخت یا محصولات خوردگی که حاوی کریستال های مگنتیت اند، ناحیه خورده شده را احاطه می کنند و (با) روی آن قرار می گیرند. به طور کلی، سطح فلز در محل خوردگی، پیرامونی هموار و گرد<sup>۳</sup> دارد. در صورت عدم دسترسی به سطوح خورده شده، ممکن است تکنیک های غیرمخری مثل تست های التراسونیک لازم آید. یک روش جالب برای بررسی احتمال خوردگی قلیایی، آنالیز بخار با آنالیزگر هیدروژن برای تعیین میزان هیدروژن موجود در آن است (با توجه به معادله خوردگی آهن (معادله ۲.۶)).

نکته ۱: تشخیص اینکه خوردگی در pH پایین یا pH بالا رخ داده، با بازدید ساده چشمی بسیار دشوار است. ممکن است برای تمییز آن ها، انجام آزمایش متالوگرافی لازم باشد. همچنین، تعیین و ارزیابی انواع مواد خورنده قابل تغلیظ که (احتمالاً) باعث آلودگی آب بویلر می شوند در تعیین نوع خوردگی مفید است.

نکته ۲: ممکن است محصولات خوردگی، محل های خوردگی قلیایی را پر کنند و در نتیجه وسعت، عمق و حتی وجود چنین محل هایی قابل شناسایی نباشند. ممکن است بازرسی محل های

1. hemispherical

2. elliptical

3. smooth and rolling contour

مشکوک، با استفاده از یک وسیلهٔ نوک‌تیز و سخت، در آشکارسازی خوردگی مؤثر باشد، اما به دلیل سخت بودن اغلب محصولات خوردگی، ممکن است برخی محل‌های خوردگی تشخیص داده نشوند. وجود کریستال‌های براق مگنتیت، به‌تنهایی نمی‌تواند خوردگی قلیایی را ثابت کند.

### ۵.۶. روش‌های پیشگیری از خوردگی [1]

وجود هم‌زمان هیدروکسید سدیم یا نمک‌های مولد قلیا و مکانیسم تغلیظ، باعث خوردگی قلیایی می‌شوند. ممکن است برخی راهکارها از خوردگی‌های ایجادشده بر اثر عوامل مذکور جلوگیری کنند:

۱. کاهش مقدار هیدروکسید سدیم آزاد: در بویلرهای فشاربالا، برای کاهش مقدار هیدروکسید سدیم از عملیات شیمیایی فسفات هماهنگ استفاده می‌شود؛

۲. جلوگیری از نشت مواد شیمیایی قلیایی<sup>۱</sup> از یون‌زدهای آب که با استفاده از مواد قلیایی احیا می‌شوند<sup>۲</sup>؛

۳. جلوگیری از نشت نمک‌های مولد قلیا در کندانسور: با توجه به مکانیسم‌های تغلیظ قدرتمندی که ممکن است در بویلر فعال باشند، نشتی —حتی در ppm کم نیز— احتمال خوردگی موضعی را افزایش می‌دهد؛

۴. جلوگیری از آلوده‌شدن بخار و آب در سیکل: هرچند ممکن است روش‌های یادشده از خوردگی‌هایی بر اثر وجود هیدروکسید سدیم یا نمک‌های مولد قلیا جلوگیری کند، اما جلوگیری از تغلیظ موضعی، مؤثرترین و درعین‌حال سخت‌ترین راه جلوگیری از خوردگی قلیایی است.

روش‌های پیشگیری از تغلیظ موضعی عبارت‌اند از:

۱. جلوگیری از آغاز جوشش لایه‌ای ناپایدار (DNB): این کار مستلزم حذف نقاط داغ بویلر است. همچنین باید پارامترهای بهره‌برداری بویلر کنترل شوند. نقاط داغ بر اثر احتراق بیش از حد، تنظیم‌نبودن مشعل‌ها، تغییر سوخت، کانالیزه‌شدن دود، تخلیهٔ دائمی<sup>۳</sup> بیش از اندازه و ... ایجاد می‌شوند؛

۲. جلوگیری از رسوب‌گذاری بیش از حد در سمت آب: پیشنهاد می‌شود از لوله‌ها به‌طور متناوب برای اندازه‌گیری ضخامت نسبی و مقدار رسوب لوله، نمونه‌برداری شود. نحوهٔ نمونه‌برداری از لوله‌ها، به‌طور مختصر در استاندارد ASTM D887-82 شرح داده شده است. البته قبل از اسیدشویی، باید با سازندگان بویلر مشورت کرد؛

۳. جلوگیری از تشکیل سطح آب در لوله‌ها: لوله‌های افقی و شیب‌دار برای ایجاد سطح آب مناسب‌اند. از جمله عوامل مؤثر در ایجاد سطح آب در لوله‌ها، می‌توان به پایین‌بودن بیش از حد سطح آب در درام، تخلیهٔ دائمی بیش از حد و کاهش سریع بار در مواقعی که فشار ثابت است اشاره کرد. در مورد اخیر، کاهش سرعت آب در ایجاد سطح آب مؤثر است.

## ۶.۶. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی قلیایی

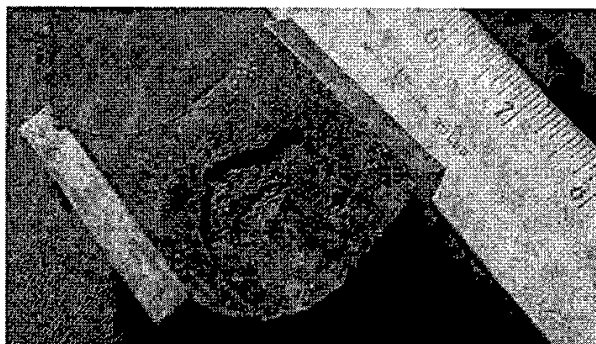
### □ نمونهٔ اول [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	دیوارهٔ پشتی
نحوهٔ قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۶ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۰/۳ MPa (۱۵۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷ cm (۲/۷۵ in)

شریط بهره‌برداری از بویلر: این بویلر طی دوره‌های ۱۸ تا ۲۴ ماهه، اسیدشویی شده است. علائم ناشی از خوردگی: دیوارهٔ پشتی یک بویلر زغال‌سوز سیکلونی<sup>۲</sup> در مدت یک ماه دچار خوردگی قلیایی زیاد شده است (شکل ۶.۶). این نوع خوردگی قبلاً نیز رخ داده بود. خوردگی یادشده، یک سال پس از آخرین اسیدشویی اتفاق افتاده است. با بررسی‌های چشمی، وجود یک لایهٔ سخت از محصولات خوردگی کریستالی و سیاه‌رنگ که محل خوردگی را پوشانده‌اند، مشخص می‌شود. اندازه‌گیری‌ها کاهش ۴۲ درصدی ضخامت لوله را نشان می‌دهد. بررسی‌های ریزساختاری نیز بیش‌گرمایش متوسطی را در ناحیهٔ خوردگی نمایان می‌کند.

1. utility

2. cyclone-fired boiler



شکل ۶.۶. ناحیه خوردگی قلیایی در سطح داخلی

علت خوردگی: شواهد نشان می‌دهد DNB باعث تغلیظ قلیا شده است. ممکن است ورود حرارت بیش از حد<sup>۱</sup> هنگام راه‌اندازی و دبی پایین آب تغذیه نیز در تغلیظ قلیا مؤثر بوده باشند.

□ نمونه دوم [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۲</sup>
محل نمونه:	دیواره آبی
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی و شیب‌دار، S شکل
عمر نمونه:	۲۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۳/۸ MPa (۲۰۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
سوخت:	زغال‌سنگ

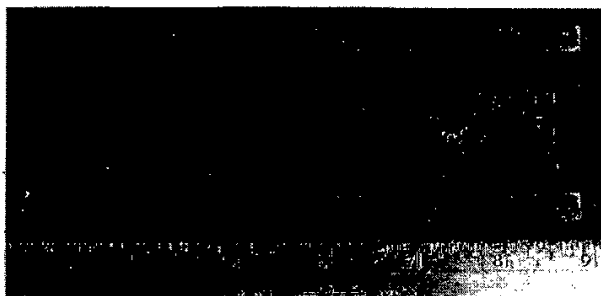
شرایط بهره‌برداری از بویلر: بویلر دچار خوردگی، ۴ سال قبل با شلانت تمیز شده و در بار نامی از آن بهره‌برداری شده است.

علائم ناشی از خوردگی: در بازدیدهای چشمی، ناحیه‌ای که با محصولات خوردگی سخت پوشیده شده است، مشاهده می‌شود. ضخامت این ناحیه بیشتر از دیگر قسمت‌هاست. این ناحیه

1. over firing

2. utility

در مجاورت یکی از خمها واقع شده است (شکل ۷.۶). دیواره سوراخ نشده است، اما بررسی سطح مقطع لوله در این ناحیه، خوردگی شدید فلز را نشان می‌دهد (شکل ۸.۶). علت خوردگی: خوردگی بر اثر تغلیظ هیدروکسید سدیم تا حد مقادیر خورنده در ناحیه‌ای رخ داده که پوشش پایدار بخار<sup>۱</sup> یا رسوب وجود داشته است. روش پیشگیری از خوردگی: ممکن است کنترل دقیق‌تر فرایند تصفیه آب، برای پیشگیری از این گونه چالش‌ها در آینده مفید باشد.



شکل ۷.۶. اکسیدهای آهن سخت روی سطح داخلی

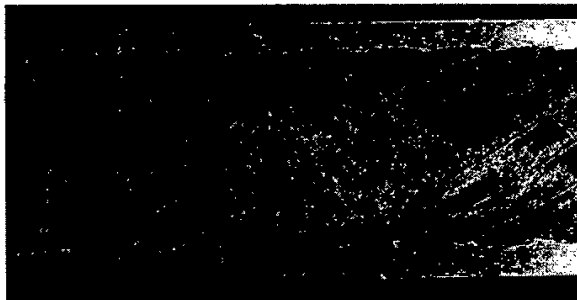


شکل ۸.۶. نواحی چاله‌مانند زیر اکسیدهای آهن

## □ نمونه سوم [1]

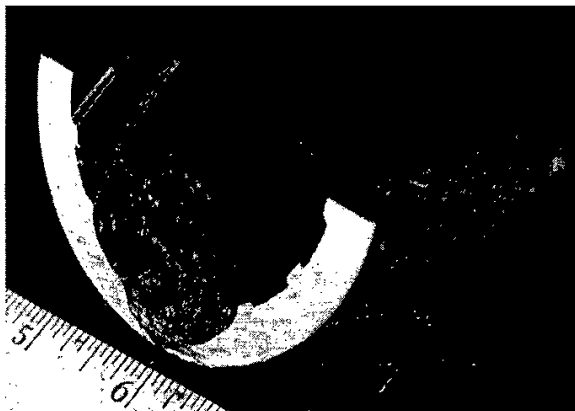
نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	لوله‌های سرباره‌گیر کف کوره <sup>۲</sup>
نحوه قرارگرفتن نمونه:	دارای شیب ۱۵°
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هم‌هنگ
فشار درام:	۱۵/۲MPa (۲۲۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)

علائم ناشی از خوردگی: در لوله‌های سرباره‌گیر کف کوره این بویلر، نشستی‌های کوچک فزاینده‌ای ایجاد شده است. سطح داخلی یکی از لوله‌ها در محل نشستی، در شکل ۹.۶ نشان داده شده است. در قسمت میانی ناحیه خوردگی بزرگ و بیضوی شکل این لوله خان‌دار<sup>۱</sup>، یک سوراخ کوچک مشاهده می‌شود (شکل ۱۰.۶). این ناحیه، ظاهری هموار دارد و پوشیده از برآمدگی‌های نامنظم و زبر و اکسیدهای آهن ورقه‌ورقه شده است. در دیگر قسمت‌های سطح داخلی، خوردگی ایجاد نشده است. علت خوردگی: از آنجاکه رسوبی در سطوح داخلی وجود ندارد و نشانه‌ای از سطح آب مشاهده نمی‌شود، ممکن است تغلیظ مواد قلیایی بر اثر جوشش متمرکز و شدید غیرنقطه‌ای (DNB) رخ داده باشد. این بویلر چند هفته از مدار خارج بوده است. ممکن است جوشش شدید غیرنقطه‌ای و موضعی، هنگام راه‌اندازی و قبل از کامل‌شدن چرخش نرمال بویلر، رخ داده باشد.



شکل ۹.۶. برآمدگی‌های ضخیم و نامنظم اکسیدهای آهن که روی سوراخ را پوشانده‌اند.

روش پیشگیری از خوردگی: یکی از روش‌ها، استفاده از خان در سطح داخلی به‌منظور گردابی کردن جریان آب، جلوگیری از جوشش شدید غیرنقطه‌ای و جلوگیری از جدایش بین فازهای مایع و بخار است. باین‌حال، بسیار جالب است که در این لوله خوردگی قلیایی شدید رخ داده است.



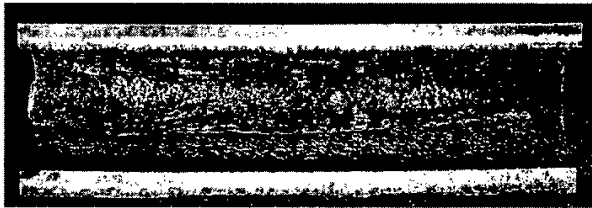
شکل ۱۰.۶. سوراخ در انتهای حفره خورده‌شده

#### □ نمونه چهارم [۱]

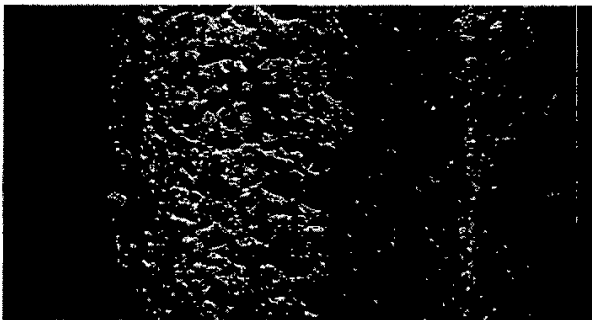
صنعت شیمی، کارخانه آمونیاک	صنعت:
بویلر بازیاب حرارتی	نوع بویلر:
پایین لوله آویزان Uشکل	محل نمونه:
در قسمت پایینی، افقی بوده و سپس با یک انحنا عمودی می‌شود.	نحوه قرارگرفتن نمونه:
۸ سال	عمر نمونه:
فسفات هماهنگ	رژیم شیمیایی آب:
۱۰/۳ MPa (۱۵۰۰ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۱/۹ cm (۰/۷۵ in)	مشخصه‌های لوله:
محصولات احتراق داغ	منبع حرارتی:

علائم ناشی از خوردگی: در یک لوله، سوراخی طولی و بزرگ ایجاد شده است. این خرابی بر اثر کاهش ضخامت دیواره حادث شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد نازک‌شدگی دیواره به طول تقریباً  $48/3$  سانتی‌متر (۱۹ اینچ)، در قسمت بالایی لوله ظاهر شده است که عمق و عرض آن با عمودی شدن لوله به آرامی کاهش می‌یابد (شکل ۱۱.۶). سطح شیار بسیار هموار است و محیطی تقریباً دایره‌ای دارد و با پوششی یکنواخت از اکسید آهن سیاه‌رنگ پوشیده شده است. در پیرامون شیار، سطح لوله مجموعه‌ای متراکم از حفره‌های نیم‌کروی و عمیق دارد که به صورت دسته‌های مجزا در کناره و انتهای شیار واقع شده‌اند (شکل ۱۲.۶). در سطوح داخلی عمودی، خوردگی ایجاد نشده است.

علت خوردگی: به دلیل ایجاد شیاری در سطح داخلی لوله، ضخامت لوله کاهش یافته و در نهایت لوله سوراخ شده است. شیار بر اثر تغلیظ هیدروکسید سدیم ایجاد شده است. تغلیظ هیدروکسید سدیم، بر اثر تجمع بخار و کانالیزه شدن آن، در قسمت‌های بالایی لوله‌های افقی و شیب‌دار رخ داده است. علاوه بر نقش مهم افقی و شیب‌دار بودن لوله، فلاکس حرارتی ورودی بالا در این ناحیه و جریان ناقص سیال خنک‌کن نیز در تجمع بخار نقش داشته‌اند.



شکل ۱۱.۶. شیاری به طول تقریباً  $35/6$  سانتی‌متر (۱۴ اینچ) از قسمت سوراخ‌شده



شکل ۱۲.۶. حفره‌های نیم‌کروی در مجاورت شیار (بزرگ‌نمایی:  $6/5$  برابر)



روش پیشگیری از خوردگی: ممکن است این مشکل با کاهش گرمای ورودی در این بخش از بویلر یا افزایش سرعت آب در لوله‌ها برطرف شود. با استفاده از لوله‌های خان‌دار نیز می‌توان از این نوع خرابی‌ها جلوگیری کرد. همچنین ممکن است کنترل دقیق‌تر فرایند شیمیایی تصفیه آب بویلر نیز مفید باشد.

□ نمونه پنجم [۱]

صنعت:	تولید شکر
محل نمونه:	بالای لوله بالابرنده <sup>۱</sup> ، نزدیک ورودی به درام بخار
نحوه قرار گرفتن نمونه:	شیب‌دار
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۳/۱ MPa (۴۵۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۴ cm (۳ in)
سوخت:	مازوت شماره ۶

علائم ناشی از خوردگی: در بازدیدهای چشمی، شیاری طولی در سطح داخلی و در امتداد قسمت بالایی لوله مشاهده شده است (شکل ۱۳.۶). در این قسمت، سوراخی ایجاد نشده، اما ۶۰٪ دیواره لوله خورده شده است. به‌طور کلی، در تمامی قسمت‌های بالایی سطح داخلی، خوردگی کم‌عمق رخ داده است (شکل ۱۴.۶). در این قسمت، ناحیه خوردگی رفته‌رفته باریک‌تر شده و در نزدیکی ورودی لوله به درام بخار، خاتمه یافته است.

کریستال‌های سیاه و براق مگنتیت، در شیار و اطراف آن وجود دارند. به‌طور کلی در ۶ لوله مجاور، خرابی مشابه رخ داده است.

علت خوردگی: جدایش بین فاز بخار و مایع<sup>۲</sup> در امتداد نواحی بالایی قسمت‌های شیب‌دار، باعث تغلیظ هیدروکسید سدیم شده است. ممکن است این جدایش ورود بیش از حد گرما را در کل لوله یا برخی نواحی آن ثابت کند.

روش پیشگیری از خوردگی: اگر تصحیح پارامترهای بهره‌برداری، از بروز خوردگی جلوگیری

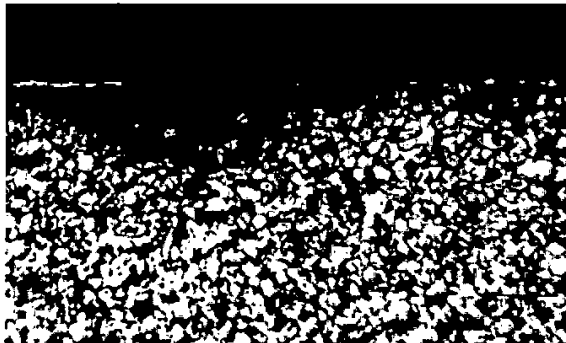
1. riser

2. steam channeling

شکل ۱۶.۶. خوردگی شدید و نازک‌شدگی موضعی سطح داخلی لوله  
 بررسی متالورژیکی: بررسی‌های متالورژیکی انجام شده روی لوله نو، محل گسیختگی لوله  
 کارکرده و نقطه دور از محل خرابی در لوله کارکرده، نشان می‌دهد هیچ تغییرات ساختاری  
 نامتعارفی از نوع بیش‌گرمایش بلندمدت یا کوتاه مدت، خزش و ... اتفاق نیفتاده است.  
 شکل ۱۸.۶ به‌وضوح از بین‌رفتن لایه محافظ داخلی و حمله مواد شیمیایی به فلز لوله را  
 نشان می‌دهد. این تصویر از محل نازک‌شدگی و نزدیک به سوراخ، تهیه شده است. تقریباً در  
 تمامی نقاط سطح داخلی لوله، تصاویر مشابهی دیده می‌شود.



شکل ۱۷.۶. نمای محل سوراخ‌شدگی از بیرون لوله



شکل ۱۸.۶. از بین‌رفتن لایه محافظ داخلی و حمله مواد شیمیایی

به فلز لوله در محل نازک‌شدگی و نزدیک به سوراخ لوله  
شکل ۱۹.۶ نمایی از آسیب‌دیدگی لایه محافظ و شروع خوردگی مرزدانه‌ای در منطقه دور  
از سوراخ را نشان می‌دهد.

بررسی‌های متالورژیکی نشان می‌دهد لایه محافظ  $Fe_3O_4$  در سطح داخلی لوله، به‌شدت  
آسیب دیده است. نفوذ آب به زیر لایه و بهره‌برداری هم‌زمان از بویلر، موجب تغلیظ مواد  
شیمیایی در زیر لایه شده و خوردگی را تشدید کرده است.



شکل ۱۹.۶. نمایی از آسیب‌دیدگی لایه محافظ و شروع خوردگی مرزدانه‌ای در منطقه دور از سوراخ

آنالیز آب بویلر: به‌منظور اطلاع از کیفیت آب بویلر، در زمان بهره‌برداری از چهار نقطه  
متفاوت آن نمونه‌برداری شده است:

- آب فیلتر رزین
- آب درام
- سوپرهیتر
- اکونومایزر

نتایج آزمایش نشان می‌دهد مقدار pH در نقاط گوناگون نمونه‌برداری، بین  $5/2$  تا  $11/5$  متغیر  
است. گرچه پارامترهای شیمیایی آب بویلر به ظرفیت، فشار، دما و نوع بویلر وابسته است و  
مقادیرشان در نقاط گوناگون بویلر، به مستندات ارائه‌شده از سوی سازنده بستگی دارد؛ اما می‌توان

گفت مقدار pH معادل ۱۱/۵، بسیار قلیایی است و باعث نوعی شکستگی بین‌کریستالی<sup>۱</sup> در فولاد می‌شود که به «شکندگی قلیایی» موسوم است. از طرفی، دامنه تغییرات یون کلر نیز خارج از محدوده به‌نظر می‌رسد و یون کلر عامل شدیدی برای خوردگی است. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، می‌توان گفت خوردگی لوله‌های سوپرهیتر، طی دو مرحله رخ داده است:

مرحله اول: پس از تست هیدرواستاتیکی و قبل از بهره‌برداری: بر اساس اطلاعات دریافتی، این بویلر پس از تعمیرات و انجام تست هیدرواستاتیک، به‌مدت بیش از دو ماه، بدون حفاظت و افزودن مواد اکسیژن‌زدا، پر از آب (آب مقطر) بوده است. طبق دستورالعمل سازنده، بویلر برای نگهداری طولانی‌مدت باید خشک شود. وجود طولانی‌مدت آب مقطر داخل بویلر، به‌ویژه داخل لوله‌های آلیاژی کروم‌دار، به‌هیچ‌وجه مجاز نیست، زیرا معمولاً آب مقطر، مقدار بسیاری یون کلر دارد که به‌شدت باعث خوردگی فولادهای آلیاژی می‌شود. آب مقطر، برای لوله‌های فولاد کربنی ساده، کمتر از فولادهای کروم‌دار مضر است.

مرحله دوم: حین بهره‌برداری: آنالیز آب نشان داد مواد شیمیایی در محدوده مجاز قیدشده در دستورالعمل‌های بهره‌برداری نیست و باید به‌دقت بر اساس دستورالعمل سازنده کنترل شود.

## منابع

[1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

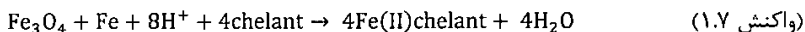
[۲] موسوی‌ترشیزی، سیدابراهیم، بررسی علل سوراخ‌شدگی لوله‌های سوپرهیتر بویلر کارخانه قند ذرفول، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، اسفند ۱۳۹۶.

## فصل ۷

### خوردگی شلانت [1]

#### ۱.۷. مکانیسم خوردگی

شلانت<sup>۱</sup> تغلیظ شده، مطابق واکنش ۷.۱ با لایه مگنتیت واکنش می دهد:



شلانت باعث حل شدن رسوبات و محصولات خوردگی می شود (شلانته کردن)<sup>۲</sup>.

#### ۲.۷. محل وقوع خوردگی

ناحیه ای که بیشتر اوقات دچار خوردگی شلانت می شود، درام بخار است. تجهیزات جداکننده بخار، به ویژه آن هایی که بر اساس خاصیت نیروی گریز از مرکز طراحی شده اند، برای این نوع خوردگی مستعدترند. همچنین این خوردگی در مسیرهای توزیع آب تغذیه، اکونومایزر، انتهای لوله های پایین آورنده و در ناحیه هایی از لوله های حامل آب با فلاکس حرارتی ورودی بالا، رخ می دهد. پروانه های پمپ های آب تغذیه که از مس و آلیاژهای مس ساخته شده اند نیز اگر در معرض مواد شلانت قرار گیرند، ممکن است دچار خوردگی شوند.

#### ۳.۷. عوامل خوردگی

خوردگی شلانت می تواند در شرایط گوناگونی رخ دهد. اغلب، وارد کردن بیش از حد شلانت به عنوان عامل خوردگی شلانت ذکر شده است، اما در حدود مقادیر مجاز مواد شلانت در آب که از سوی کارشناسان شیمی پیشنهاد می شود، امکان خوردگی در ناحیه هایی که یک مکانیسم

---

۱. chelant: یک ترکیب آلی و قادر به تشکیل یک ساختمان حلقوی که در آن، یون فلزی به صورت یک کمپلکس کوئوردیناسیون، تشکیل پیوند می دهد.

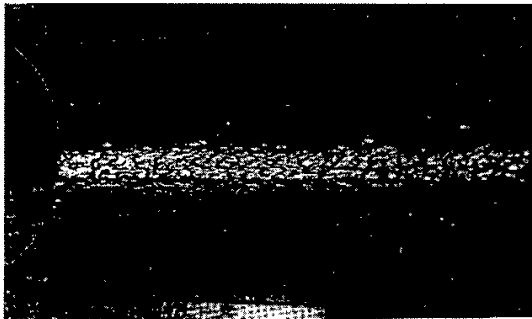
۲. به دلیل تشابه بسیار زیاد این خرابی با خرابی بر اثر خوردگی شتاب یافته با جریان و وجود عوامل مشترک، مؤکداً توصیه می شود هم زمان با این فصل، فصل ۱۷ نیز مطالعه شود.

تغلیظ فعال باشد، وجود دارد. مکانیسم اصلی و شاید تنها مکانیسمی که شلانت‌ها بر اثر آن تغلیظ می‌شوند، تبخیر است. از این رو ممکن است خوردگی در محل‌هایی رخ دهد که DNB اتفاق می‌افتد (شکل ۱.۷).

این نوع خوردگی، به اثرات سایشی سیال‌های با سرعت بالا حساس است و گاهی در محل‌هایی رخ می‌دهد که این سیال‌ها وجود دارند؛ حتی در غیاب انتقال حرارت. از این رو خوردگی شلانت در تجهیزات جداکننده درام‌های بخار که سطوح انتقال حرارتی ندارند، ظاهراً بر اثر سرعت بالای سیال رخ می‌دهد. به‌نظر می‌رسد مقادیر بالای اکسیژن و مقادیر بالای مواد شلانت، باعث ایجاد سطوح ناهموار می‌شوند.

#### ۴.۷. علائم خوردگی

در صورت در دسترس بودن تجهیزات خورده‌شده، می‌توان با بازدیدهای چشمی خوردگی شلانت را تشخیص داد. معمولاً سطوحی که تحت تأثیر شلانت‌ها خورده شده‌اند بسیار هموار و فاقد برجستگی‌اند. ممکن است در محل‌هایی که سرعت سیال کافی است، سطوح دارای موج دایره‌ای ملایمی باشند<sup>۱</sup> که در آن‌ها، علائمی مانند «دنباله ستاره دنباله‌دار»<sup>۲</sup> و «نعل اسب»<sup>۳</sup> قابل شناسایی است (شکل ۱.۷). این برجستگی‌ها در امتداد جریان سیال قرار می‌گیرند. سطح فلز به‌طور یکنواخت، با لایه نازکی از مواد سیاه یا سیاه براق پوشیده می‌شود. در سطحی که خوردگی فعال است، رسوب و محصولات خوردگی وجود نخواهند داشت.

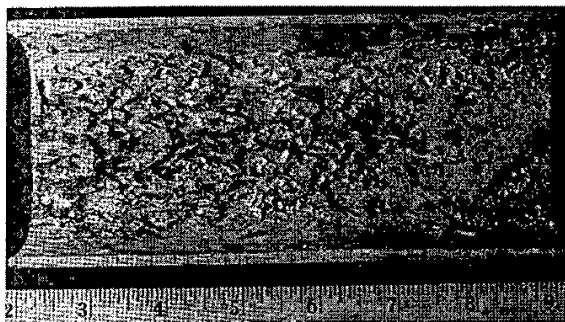


شکل ۱.۷. خوردگی به‌شکل دنباله ستاره دنباله‌دار و نعل اسب

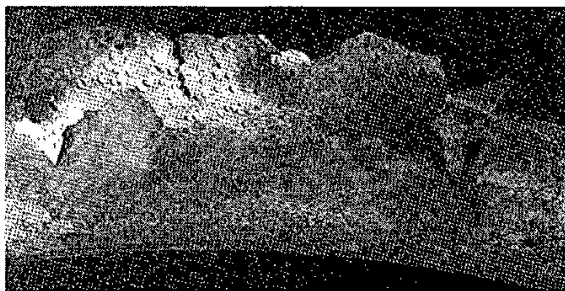
1. smoothly rolling contour  
3. horseshoe

2. comet tail

گاهی در حضور مقادیر بالای اکسیژن، ظاهر خوردگی تغییر می‌کند. در این موارد، نواحی کاملاً مشخصی از سطح فلز دچار خوردگی، دست‌نخورده باقی می‌مانند که با نواحی پهن و هموار خورده‌شده، احاطه شده‌اند (شکل ۲.۷). در برخی موارد مشاهده شده است که خوردگی شلانت، ظاهری زبر و ناهموار ایجاد می‌کند؛ مشابه آنچه که بر اثر خوردگی با اسید قوی ایجاد می‌شود.



شکل ۲.۷. خوردگی شلانت در حضور اکسیژن بیش از حد



شکل ۳.۷. شکست لوله پس از خوردگی شدید شلانت

در مواردی که دسترسی به تجهیزات خورده‌شده مشکل باشد — که معمولاً دربارهٔ لوله‌ها این مسئله وجود دارد — می‌توان برای تعیین احتمال خوردگی، از تست‌های غیرمخرب مثل آلتراسونیک استفاده کرد.

تذکر ۱: خوردگی شلانت، می‌تواند ظاهری هموار و فاقد برجستگی ایجاد کند. با توجه به این شکل ظاهری و این حقیقت که فلزهای خورده‌شده اغلب ظاهری سیاه و غیرفعال<sup>۱</sup> دارند، ممکن

1. passive

است فعال بودن خوردگی مشخص نشود. در چنین مواردی، شاید اندازه‌گیری ضخامت محل‌های مظنون در آشکارسازی مشکل، کارساز باشد.

تذکر ۲: ممکن است سایش معمولی توسط بخار یا آب با سرعت بالا، ظاهری بسیار مشابه آنچه که بر اثر خوردگی شلانت‌ها ایجاد می‌شود داشته باشد.

### ۵.۷. روش‌های پیشگیری از خوردگی

برای پیشگیری از خوردگی شلانت، کنترل دقیق مقدار شلانت و اکسیژن محلول در آب ضروری است. در این راستا اقداماتی توصیه می‌شود:

۱. دقت زیاد برای پیشگیری از ایجاد شرایط نامناسب در آب تغذیه؛
  ۲. دقت زیاد هنگام استفاده از شلانت‌ها در بویلرهای آلوده؛
  ۳. حذف نقاط داغ: این کار از خوردگی شلانت در لوله‌های حاوی آب جلوگیری می‌کند. نقاط داغ، اغلب بر اثر بهره‌برداری و نگهداری نادرست بویلر یا نواقص طراحی ایجاد می‌شوند. احتراق نامناسب، تنظیم‌نبودن مشعل‌ها، تغییر سوخت، کاتالیزه شدن دود، تخلیه دائمی بیش از حد و کنده‌شدن مواد عایق نیز در ایجاد نقاط داغ نقش دارند؛
  ۴. کاهش سرعت سیال و حذف سیال مغشوش: روی هم‌رفته، در بسیاری از موارد می‌توان با کاهش سرعت سیال و حذف سیال مغشوش، خوردگی شلانت را کاهش داد یا آن را حذف کرد؛
  ۵. استفاده از جداکننده‌های سیکلونی<sup>۱</sup> در درام: خوردگی شدید در سطوح داخلی درام، با استفاده از جداکننده‌های سیکلونی کاهش می‌یابد.
- تذکر: باید از قرارگرفتن مس و آلیاژهای مس در معرض شلانت‌ها جلوگیری کرد.

### ۶.۷. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر

#### خوردگی شلانت

علائم ناشی از خوردگی: هنگام تست هیدرواستاتیکی لوله‌ها، در چهار لوله مجاور به هم، خوردگی شدید سطوح داخلی در ۱۵ تا ۲۳ سانتی‌متر از طول لوله (۶ تا ۹ اینچ) رخ داده است (شکل ۴.۷). میزان خوردگی در نواحی گوناگون متغیر است. در قسمت‌هایی که خوردگی شدید رخ داده، ظاهر خوردگی یکنواخت و موج‌مانند<sup>۲</sup> است. در قسمت‌هایی که خوردگی متوسط رخ داده است، حفره‌های مجزا مشاهده می‌شود.

1. cyclone separator cans

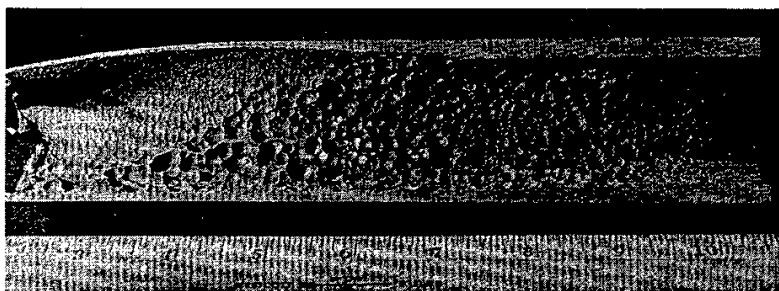
2. wave like



□ نمونه اول

صنعت:	فولاد
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای در نزدیک هدر پایینی دیواره آبی
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۴ سال
رژیم شیمیایی آب:	شلانت
فشار درام:	۶/۲ MPa (۹۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)
سوخت:	مازوت شماره ۶ و انواع گاز زائد <sup>۱</sup>

علت خوردگی: شلانت به‌تنهایی برای خوردگی کافی نبوده، بلکه خوردگی فلز بر اثر همکاری شلانت با اغتشاش موضعی ایجاد شده است. تمرکز خوردگی در طول مشخصی از لوله، نشان‌دهنده اهمیت سرعت و اغتشاش در مکانیسم‌های خوردگی - سایشی<sup>۲</sup> از جمله خوردگی شلانت است. میزان خوردگی در محل ورود آب از درام که جریان مغشوش می‌شود، شدیدتر است و با فاصله گرفتن از ورودی لوله، شدت خوردگی کمتر می‌شود، تاجایی که در محل ایجاد جریان آرام، خوردگی حذف می‌شود.



شکل ۴.۷. خوردگی شلانت در سطح داخلی، در محل ورود آب به لوله

□ نمونه دوم

صنعت:	فولاد
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای
نحوه قرارگرفتن نمونه:	خم عمودی
عمر نمونه:	۲۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	شلانت
فشار درام:	۵/۵ MPa (۸۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
سوخت:	blast-furnace gas

علائم ناشی از خوردگی: شکست بزرگ لوله دیواره‌ای که در شکل ۳.۷ نشان داده شده، اولین بار در این بویلر رخ داده است. لپه‌های شکست باریک شده است و در سطوح داخلی که خورده شده‌اند، مجموعه‌ای از حفره‌های نعلی شکل قرارگرفته در جهت جریان سیال، مشاهده می‌شود. این شکست در سمت سرد لوله رخ داده است. ظاهراً عایقی که برای محافظت از قسمت سرد لوله نصب شده، بر اثر برخورد بخار ناشی از یک لوله سوپرهیتر، جدا شده است. بررسی ریزساختار لوله نشان می‌دهد بیش‌گرمایش رخ نداده است.

□ نمونه سوم

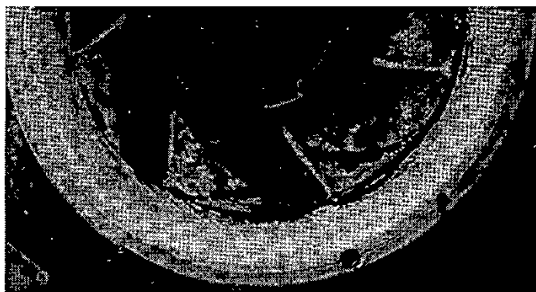
صنعت:	شیمیایی
محل نمونه:	پروانه پمپ آب تغذیه
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۳ سال
رژیم شیمیایی آب:	شلانت
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۲۰/۳ cm (۸ in)، جنس: برنز

علت خوردگی: بر اثر رسیدن گازهای داغ کوره به قسمت بدون حفاظ لوله، جوشش لایه‌ای ناپایدار (DNB) رخ داده و این امر باعث تغلیظ شلانت موجود در آب بویلر شده است. شلانت تغلیظ‌شده و سرعت سیال، باعث کاهش ضخامت دیواره شده‌اند (شکل ۳.۷). به‌این‌ترتیب،

کاهش ضخامت لوله تا زمانی که تنش‌های اعمالی بر اثر فشار داخلی، از حد استحکام کششی لوله بیشتر شده، ادامه یافته و لوله دچار شکست شده است.

علائم ناشی از خوردگی: در شکل ۵.۷ می‌بینیم که پره از پنجمین طبقه پمپ آب تغذیه جدا شده است. نواحی خورده‌شده، واضح و قابل شناسایی‌اند. محل‌های خورده‌شده اصولاً نواحی با اغتشاش زیاد هستند؛ مانند لبه‌های پره‌ها و دهانه خروجی. در این نواحی، حفره‌های نعلی‌شکل مشاهده‌پذیرند. بررسی سطوح آسیب‌دیده با استریومیکروسکوپ، دندریت‌های<sup>۱</sup> ناشی از ریخته‌گری و دیگر بخش‌های ساختار را نشان می‌دهد.

تذکر: شلانت‌ها در مس و آلیاژهای آن خورنده‌اند و بنابراین باید با فاصله کافی بعد از پروانه‌های ساخته‌شده از آلیاژ مس افزوده شوند.

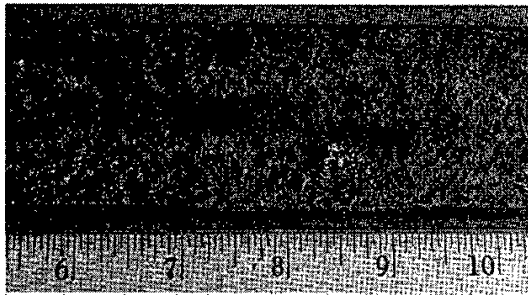


شکل ۵.۷. خوردگی شلانت در پمپ آب تغذیه

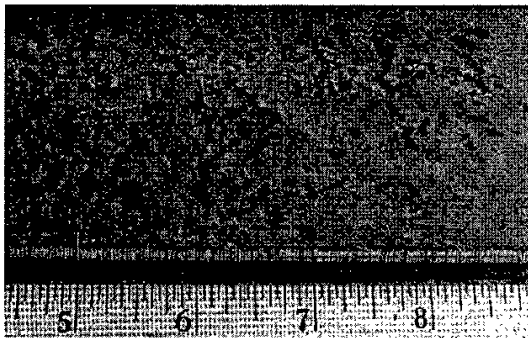
□ نمونه چهارم

محل نمونه:	انتهای لوله‌های پایین‌آورنده در درام بخار
نحوه قرارگرفتن نمونه:	دارای ۱۰° تا ۱۵° انحراف از حالت عمودی
عمر نمونه:	۲۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	شلانت
فشار درام:	۳/۳ MPa (۴۸۵ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)

علائم ناشی از خوردگی: در شکل ۶.۷، ظاهر سطوح داخلی دوازده لوله پایین‌آورنده مجاور که دچار خوردگی شدید شده‌اند، نشان داده شده است. هرچند طی ۱۷ سال، رژیم شیمیایی آب تغییری نکرده، اما این خوردگی طی ۷ ماه رخ داده است. لوله‌های خورده‌شده در یک انتهای بویلر و در فاصله ۲۳ سانتی‌متری (۹ اینچ) از مسیر آب تغذیه در درام بخار قرار دارند. حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی در سراسر سطح آب در درام بخار و در جداکننده‌های بخار مشاهده می‌شوند. نواحی خورده‌شده به‌طور یکنواخت و با ظاهری موج‌دار خورده شده‌اند. قسمت‌هایی از فلز نیز دست‌نخورده باقی مانده است (شکل ۷.۷). سراسر سطح داخلی، به مقدار کمی با رسوب‌ها و اکسیدهای آهن پوشیده شده است. فلز خورده‌شده زیر این رسوب‌ها و اکسیدهای آهن، با لایه سیاه براق پوشیده شده است.



شکل ۶.۷. سطح داخلی لوله پایین‌آورنده



شکل ۷.۷. سطح داخلی لوله پایین‌آورنده که خوردگی شلات را در حضور اکسیژن نشان می‌دهد.

علت خوردگی: مقادیر بیش از اندازه اکسیژن و وجود شلانت، باعث خوردگی شده‌اند. لایه اکسید آهن و رسوب‌هایی که سطوح خورده‌شده را پوشانده‌اند، نشان می‌دهند خوردگی اخیراً فعال نبوده، یعنی خوردگی به طرز منقطع رخ داده است. گمان می‌رود جریان آب تغذیه، در نواحی خورده‌شده قطع شده است.

روش پیشگیری از خوردگی: با کنترل اکسیژن محلول می‌توان از این نوع خوردگی پیشگیری کرد. جلوگیری از قطعی آب تغذیه نیز راه دیگر است.

## منابع

- [1] Port, Robert D., Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, 1991.



## فصل ۸

### خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری (Low-pH Corrosion During Service)

#### ۱.۸. مکانیسم خوردگی [1]

در موارد نادری، به دلیل ورود آلوده‌کننده‌های خاصی به آب بویلر، pH آب به‌طور کلی کاهش می‌یابد. در صورت آلوده‌شدن آب بویلرها با آب دریا، اسید هیدروکلرید و اسید سولفوریک - در بویلرهایی که آب به‌کاررفته در آن‌ها ظرفیت بافری<sup>۱</sup> پایینی دارد- و درحالی‌که حجم عمده آب دارای شرایط قلیایی است، ممکن است pH به‌طور موضعی تا مقادیر کمتر از ۵ نیز کاهش یابد. محیط با pH پایین، به حل‌شدن لایه نازک مگنتیت و درنهایت خورده‌شدن فلز زیر آن منجر می‌شود.

#### ۲.۸. محل وقوع خوردگی [1]

به‌طور کلی، خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری، می‌تواند در مکان‌های زیر رخ دهد:

- لوله‌های حاوی آب که فلاکس حرارتی بسیاری به آن‌ها وارد می‌شود.
- لوله‌های افقی یا شیب‌دار
- مکان‌های دارای رسوب زیاد
- پشت‌بند جوش‌ها<sup>۲</sup> و دیگر تجهیزاتی که در مسیر حرکت سیال ناپیوستگی ایجاد می‌کنند و در نواحی مجاور به آن‌ها (در صورتی که در نواحی یادشده انتقال حرارت انجام شود).

---

1. Buffering capacity: (Photography) The capacity of an alkali (e.g. sodium metaborate) in a developing solution to maintain a slow decrease in pH value [Chambers Dictionary of Science and Technology].

2. backing ring

## ۳.۸. عوامل خوردگی [۱]

برای ایجاد محیط با pH پایین، وجود هم‌زمان دو شرط لازم است:

۱. بهره‌برداری از بویلر در خارج از محدوده نرمال و پیشنهادی برای خواص آب؛ وجود مقداری اسید آزاد یا نمک‌های مولد اسید (نمک‌هایی که محلولشان شرایط اسیدی ایجاد می‌کند) در آب بویلر، می‌تواند باعث خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری شود. ممکن است این مشکل بر اثر نشتی در کندانسورهایی که برای تقطیر بخار از آب دریا یا آب برگشتی از برج خنک‌کن استفاده می‌کنند، رخ دهد. از دیگر منابع آلوده‌کننده آب، خروج مواد شیمیایی اسیدی از یک کانی‌زدای آب جبرانی<sup>۱</sup> است. آلودگی‌های باقی‌مانده پس از عملیات اسیدشویی، عملکرد نامناسب تجهیزات شیمی آب تغذیه و عدم کنترل آن‌ها نیز می‌تواند به‌صورت موضعی، باعث ایجاد محیط با pH پایین شود. شرایط اسیدی می‌تواند بر اثر ورود مواد آلوده‌کننده به سیکل نیز ایجاد شود.

۲. مکانیسم تغلیظ: از آنجاکه معمولاً اسید آزاد یا نمک‌های مولد اسید، در مقادیر خورنده در آب وجود ندارند، وجود مکانیسم‌هایی برای تغلیظ آن‌ها ضروری است. اصلی‌ترین مکانیسم‌های تغلیظ موجود در محیط بویلر عبارت‌اند از:

• آغاز جوشش لایه‌ای ناپایدار (DNB)

• رسوب

• تبخیر در سطح آب

اثر هر یک از این عوامل در بحث «خوردگی قلبیایی» (فصل ۶) توضیح داده شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت در نقاطی که جوشش اتفاق می‌افتد و وجود رسوب‌های متخلخل یا ترک‌ها مانع از اختلاط مناسب می‌شوند، تغلیظ رخ می‌دهد. لذا در محل‌هایی که رسوب و ترک وجود دارد، ممکن است تغلیظ نمک‌های مولد اسید، باعث هیدرولیز شدن نمک و در نتیجه ایجاد موضعی محیط با pH پایین شود (واکنش ۱.۸).



با توجه به اینکه ممکن است مکانیسم‌های تغلیظ قدرتمندی در بویلر فعال باشند، ممکن است نشتی مواد آلوده‌کننده حتی با ppm کم هم برای خوردگی اسیدی در آب غیربافری<sup>۲</sup> کفایت کند.



#### ۴.۸. علائم خوردگی [1]

در صورت دسترسی به سطوح خورده‌شده، مشاهده می‌شود که در این نواحی، مشابه خوردگی قلبیایی، خوردگی یکنواخت رخ داده و نواحی دایره‌شکل ایجاد شده‌اند. نواحی خورده‌شده اغلب با لایه غیرمحافظ از اکسید آهن پوشیده شده‌اند.

در صورت عدم دسترسی به سطوح خورده‌شده، ممکن است تکنیک‌های غیرمخربی مانند تست‌های آلتراسونیک لازم باشند. یک روش جالب در تعیین احتمال وقوع خوردگی اسیدی، آنالیز بخار برای تعیین میزان هیدروژن موجود در آن است (با توجه به واکنش خوردگی آهن؛ واکنش ۲.۶).

نکته ۱: تشخیص اینکه خوردگی در شرایط pH پایین رخ داده یا pH بالا، با بازدید ساده چشمی بسیار دشوار است. ممکن است برای تشخیص این دو از یکدیگر، انجام آزمایش‌های متالوگرافی لازم باشد. تعیین و ارزیابی انواع مواد خورنده قابل تغلیظ که ممکن است باعث آلودگی آب بویلر شوند نیز در تعیین نوع خوردگی مؤثر است.

نکته ۲: ممکن است محصولات خوردگی، محل‌های خورده‌شده را پر کنند و لذا ممکن است به وسعت، عمق و حتی وجود محل‌های خوردگی، پی برده نشود. بازرسی محل‌های مشکوک با استفاده از یک وسیله نوک‌تیز و سخت، به تشخیص خوردگی کمک خواهد کرد، اما از آنجاکه محصولات خوردگی اغلب سخت‌اند، ممکن است برخی محل‌های خورده‌شده نامشخص باقی بمانند.

#### ۵.۸. روش‌های پیشگیری از خوردگی [1]

از آنجاکه وجود هم‌زمان اسید آزاد یا نمک‌های مولد اسید و مکانیسم‌های تغلیظ، برای ایجاد محیط‌هایی با pH پایین لازم است، برای جلوگیری از خوردگی در pH پایین، باید به‌نحوی از ایجاد این دو عامل جلوگیری کرد. برای پیشگیری از وجود اسید آزاد یا نمک‌های مولد اسید در آب بویلر، موارد زیر توصیه می‌شود:

۱. جلوگیری از نشت نمک‌های مولد اسید مانند کلرید کلسیم و کلرید منیزیم در کندانسور

۲. جلوگیری از خروج مواد شیمیایی اسیدی از یون‌زدهای آب جبرانی

۳. جلوگیری از آلوده شدن بخار و آب در سیکل

هرچند این روش‌ها که بر مبنای جلوگیری از وجود اسید آزاد و نمک‌های مولد اسید پایه‌گذاری شده‌اند، می‌توانند از وقوع خوردگی جلوگیری کنند، اما جلوگیری از تغلیظ موضعی،

مؤثرترین روش برای جلوگیری از خوردگی در محیط اسیدی است. در این راستا می‌توان کارهایی انجام داد:

- جلوگیری از DNB: این روش معمولاً مستلزم حذف نقاط داغ و کنترل پارامترهای بهره‌برداری بویلر است. نقاط داغ، بر اثر احتراق نامناسب، تنظیم‌نبودن مشعل‌ها، تغییر سوخت، کانالیزه‌شدن دود و تخلیه دائمی بیش از حد ایجاد می‌شوند.
- جلوگیری از ایجاد رسوب زیاد در سمت آب: توصیه می‌شود برای اندازه‌گیری ضخامت نسبی و مقدار رسوب، به‌تنایب از لوله‌ها نمونه‌برداری شود. نحوه نمونه‌برداری از لوله‌ها در استاندارد 82 – ASTM D887 به‌طور خلاصه شرح داده شده است. البته در صورت نیاز به اسیدشویی، ابتدا باید با سازندگان بویلر مشورت کرد.
- جلوگیری از ایجاد سطح آب در لوله‌ها: لوله‌های افقی و شیب‌دار برای ایجاد سطح آب مناسب‌اند. از جمله عوامل مؤثر در ایجاد سطح آب، می‌توان به پایین‌بودن بیش از حد سطح آب، تخلیه دائمی بیش از حد و کاهش سریع بار (در مواقع فشار ثابت) اشاره کرد. در مورد اخیر، کاهش سرعت آب در ایجاد سطح آب مؤثر است.

## ۶.۸. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری

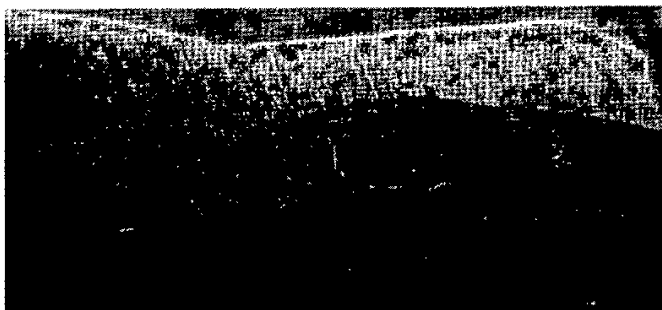
□ نمونه اول [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	دیواره کناری
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۳۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۴/۸ MPa (۲۰۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)

شرایط بهره‌برداری از بویلر: از بویلر در شرایط نامی بهره‌برداری شده است. علائم ناشی از خوردگی: خوردگی‌های پُرشمار، مشابه آنچه در شکل ۱.۸ مشاهده می‌شود، در یک بویلر رخ داده است که به تعویض لوله‌های زیادی انجامید. بیشتر تعویض‌ها در یکی از دیواره‌های بویلر انجام شده است. در شکل ۲.۸ وسعت و ظاهر ناحیه خورده‌شده نشان داده شده است. حفره‌ها<sup>۱</sup> با اکسیدهای آهن سخت و ضخیم و مس پوشیده شده‌اند. خوردگی‌ها اغلب در پایین‌دست جوش رخ داده‌اند.



شکل ۱.۸. خوردگی اسیدی



شکل ۲.۸. خوردگی عمیق در سطوح داخلی (بزرگنمایی: ۷/۵ برابر)

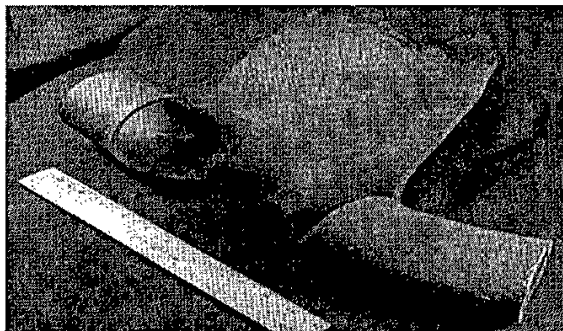
علت خوردگی: بررسی محصولات خوردگی سطوح داخلی حفره‌ها، وجود مقادیر چشمگیری کلرید را نشان می‌دهد. وقوع خوردگی‌های بسیار در پایین‌دست جوش، نشان می‌دهد متغوش شدن آب پس از خط جوش، در فراهم آمدن موقعیت مناسب برای تغلیظ مواد خورنده مؤثر بوده است.

□ نمونه دوم [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای
نحوه قرار گرفتن نمونه:	کمی منحرف از حالت عمودی
عمر نمونه:	۲۶ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۳/۱ MPa (۱۹۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۸/۳ cm (۳/۲۵ in)

علائم ناشی از خوردگی: شکل‌های ۳.۸ و ۴.۸ شکست بزرگی را در ناحیه‌ای از لوله که دچار خوردگی عمیق شده نشان می‌دهند. در سطح داخلی، نواحی اطراف ناحیه خورده شده، تحت تأثیر قرار نگرفته و کاملاً صاف و هموارند.

علت خوردگی: بررسی‌های چشمی و ریزساختاری نشان می‌دهد خوردگی بر اثر وجود محیط با pH پایین رخ داده است. ممکن است تغلیظ مواد خورنده در زیر رسوب‌ها رخ داده باشد (این رسوب‌ها هنگام شکست، از سطح داخلی کنده شده‌اند). همچنین ممکن است تغلیظ به علت وجود یک پوشش بخار که محصول جوشش غیرهسته‌ای است، رخ داده باشد. آزمایش‌های ریزساختاری، وقوع حمله هیدروژنی وسیعی را در دیواره لوله و زیر ناحیه خورده شده نشان می‌دهد (علت شکست لوله). وقوع حمله هیدروژنی بر اثر خوردگی اسیدی، نشان می‌دهد خوردگی حین بهره‌برداری بویلر رخ داده است.



شکل ۳.۸. شکست بر اثر خوردگی اسیدی



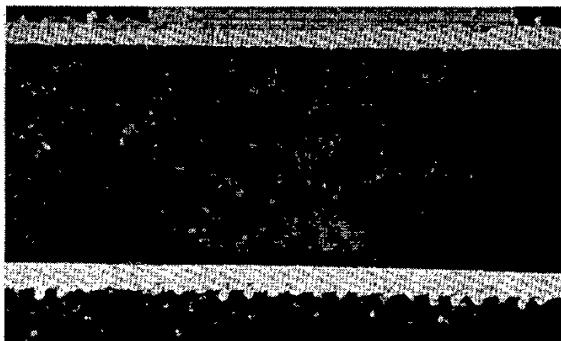
شکل ۴.۸. خوردگی فلز در ریشه شکست

□ نمونه سوم [1]

شیمیایی	صنعت:
اکونومایزر	محل نمونه:
افقی	نحوه قرارگرفتن نمونه:
۷ سال	عمر نمونه:
شلات	رژیم شیمیایی آب:
۱/۱ MPa (۱۵۵ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۶ cm (۲/۳۷۵ in)	مشخصه‌های لوله:

علائم ناشی از خوردگی: خرابی در اکونومایزر بویلر گازسوزی رخ داده که خوردگی بارها در آن اتفاق افتاده است. همچنین، خرابی فقط در قسمت داغ و در محل شروع سطوح فین‌دار رخ داده است (شکل ۵.۸). بر اثر خوردگی، ناحیه بیضوی بزرگی که با یک لایه ضخیم و ناصاف از اکسیدهای آهن سیاه و سخت پوشیده شده، ایجاد شده است.

علت خوردگی: بررسی ریزساختار اکسیدهای آهنی که ناحیه خورده شده را پوشانده‌اند، وجود ساختار پوسته‌پوسته شده را که از علائم خوردگی در pH پایین است، نشان می‌دهد. ورود ۴۰٪ فلاکس حرارتی بیش از مقدار طراحی، باعث جوشش غیرهسته‌ای در این ناحیه از اکونومایزر شده و در نتیجه، شرایط تغلیظ مواد خورنده فراهم شده است. منبع نمک‌های مولد اسید شناسایی نشده، اما ممکن است بر اثر نشت کلرید سدیم از نرم‌کننده آب<sup>۱</sup>، وارد آب بویلر شده باشند.



شکل ۵.۸. خوردگی در سطح داخلی و روبه‌روی فین‌ها

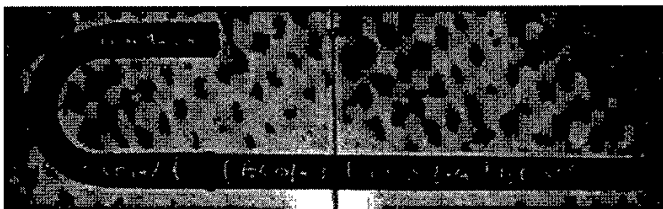
#### □ نمونه چهارم [۲]

کارخانه قند	صنعت:
لوله‌های اکونومایزر	محل نمونه:
افقی	نحوه قرارگرفتن نمونه:
۲۰ سال بهره‌برداری و ۱۰ سال خارج از مدار	عمر نمونه:
شلاتت	رژیم شیمیایی آب:
۴۰ bar	فشار کاری:

توجه: این نمونه خرابی، در دوره خارج‌بودن واحد از مدار اتفاق افتاده، اما به‌خاطر ربط موضوعی، در این فصل آمده است.

علت خرابی: بویلر این کارخانه قند، پس از ۲۰ سال فعالیت، حدود ۱۰ سال قبل، از مدار خارج شده و بدون رعایت دستورالعمل‌های نگهداری بویلر و با وجود آب داخل لوله‌ها تا زمان این بررسی، خارج از مدار بوده است. این نمونه را برای بررسی امکان ادامه بهره‌برداری، مطالعه کرده‌ایم. شکل ۶.۸ به ۷ قسمت تقسیم شده است. همچنین زانویی آن و قسمت جوش خورده در راستای لوله نصف شده‌اند.

لوله‌های اکونومایزر در میان نمونه‌های دریافت‌شده از این بویلر، بدترین وضعیت را دارند. در شکل ۷.۸ پوسیدگی لوله بسیار واضح است. ضخامت لوله‌های اکونومایزر در برخی نواحی به اندازه‌ای کاهش یافته است که با فشار ناچیزی، مقطع آن له می‌شود (شکل ۸.۸).



شکل ۶.۸. لوله اکونومایزر قبل از تقسیم شدن



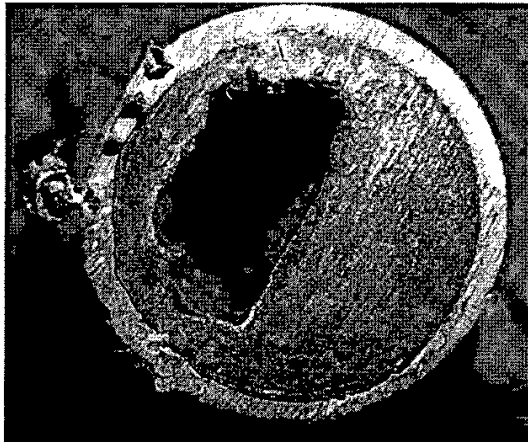
شکل ۷.۸. لوله اکونومایزر که بر اثر پوسیدگی دچار پارگی شده است.

دیگر مسئله چشمگیر درباره لوله اکونومایزر، مسدود شدن ۶۰٪ تا ۷۰٪ سطح مقطع لوله به وسیله رسوب داخلی آن است. این پدیده، به دوره بهره‌برداری از بویلر مربوط است (شکل ۹.۸).

با توجه به دمای بهره‌برداری از لوله‌های اکونومایزر، ساختار متالوگرافی این لوله‌ها تغییری نکرده است.



شکل ۸.۸. لوله اکونومایزر که دچار خوردگی شدید شده است.



شکل ۹.۸. لوله اکونومایزر که بیشتر مساحت آن با رسوب پر شده است.

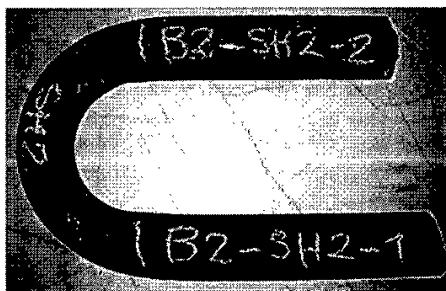


□ نمونه پنجم [۲]

صنعت:	کارخانه قند
محل نمونه:	لوله‌های سوپرهیتر
نحوه قرارگرفتن نمونه:	قائم
عمر نمونه:	۲۰ سال بهره‌برداری و ۱۰ سال خارج از مدار
رژیم شیمیایی آب:	شلاتت
فشار کاری:	۴۰ bar

توجه: این نمونه خرابی، در دوره خارج‌بودن واحد از مدار اتفاق افتاده، اما به‌خاطر ربط موضوعی، در این فصل آمده است.

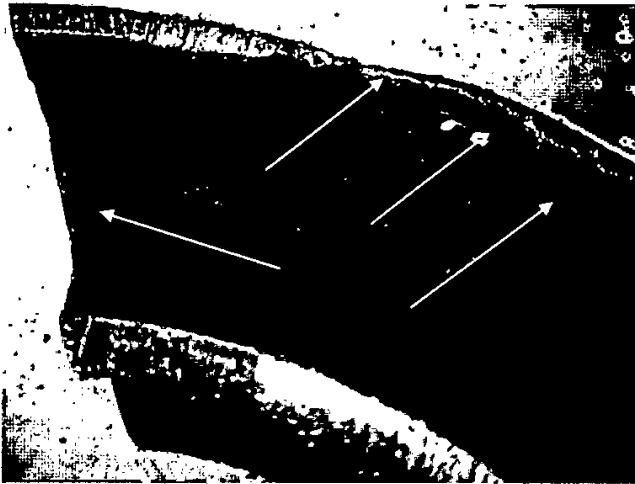
علت خرابی: بویلر این کارخانه قند، پس از ۲۰ سال فعالیت، حدود ۱۰ سال قبل از مدار خارج شده و بدون رعایت دستورالعمل‌های نگهداری بویلر و با وجود آب داخل لوله‌ها تا زمان این بررسی، خارج از مدار بوده است. این نمونه را برای بررسی امکان ادامه بهره‌برداری، مطالعه کرده‌ایم. لوله سوپرهیتر بررسی شده برای ارزیابی، به سه قسمت تقسیم و زانویی انتهایی آن نیز در راستای لوله نصف شده است (شکل ۱۰.۸). این لوله سوپرهیتر نسبت به دیگر لوله‌های این بویلر، متحمل آسیب بیشتری شده است. بیشترین آسیب این لوله نیز مربوط به محل خم آن است، به طوری که سوراخ‌هایی در آن دیده می‌شود (شکل ۱۱.۸). این سوراخ‌ها بر اثر خوردگی شدید، به شکل موضعی ایجاد شده‌اند؛ یعنی ضخامت لوله بر اثر خوردگی کم شده (شکل ۱۲.۸) و در نهایت به صفر رسیده است.



شکل ۱۰.۸. لوله سوپرهیتر قبل از برش

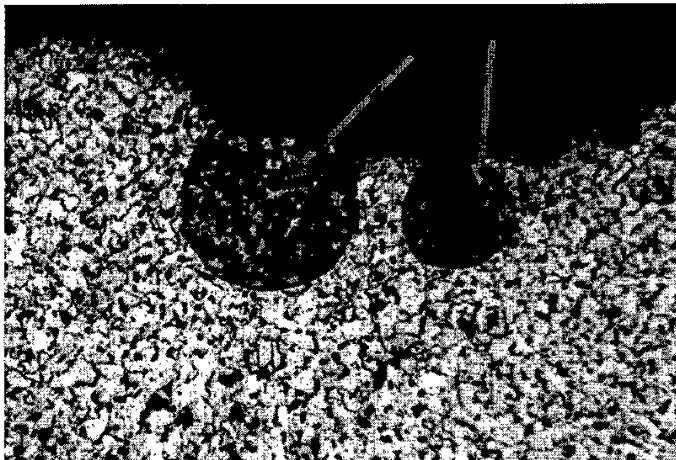


شکل ۱۱.۸. سوراخ‌های ایجاد شده در انتهای زانویی سوپرهیتر



شکل ۱۲.۸. کاهش ضخامت زانویی سوپرهیتر بر اثر خوردگی (سطح داخلی)

بررسی ساختار متالوگرافی نمونه (شکل ۱۳.۸) نشان می‌دهد تغییرات ساختاری ایجاد نشده و به‌لحاظ متالورژیکی نیز عمر چندانی از فلز سپری نشده است. تنها نکته توجه‌برانگیز، خوردگی شدید روی سطح داخلی و خارجی لوله است.



شکل ۱۳.۸. سطح داخلی زانویی سوپرهیتر و نفوذ خوردگی

### منابع

[1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

[۲] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، سیدحسین موسوی ترشیزی، ارزیابی وضعیت لوله‌های بویلر کارخانه قند دزفول، خرداد ۱۳۹۵.



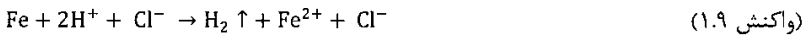
## فصل ۹

### خوردگی اسیدی حین اسیدشویی

#### [1] (low-pH corrosion during acid cleaning)

##### ۱.۹. مکانیسم خوردگی

خوردگی فولاد در اسیدها، نتیجه طبیعی ناپایداری ترمودینامیکی فولادها در چنین محیط‌هایی است. فولاد خودبه‌خود در اغلب اسیدها خورده می‌شود؛ یعنی آهن، اکسید می‌شود و یون‌هایش وارد محلول می‌شوند. یون‌های هیدروژن احیا شده و باعث تولید حباب‌های هیدروژن در سطح فلز می‌شوند (واکنش ۱.۹).



##### ۲.۹. محل وقوع خوردگی

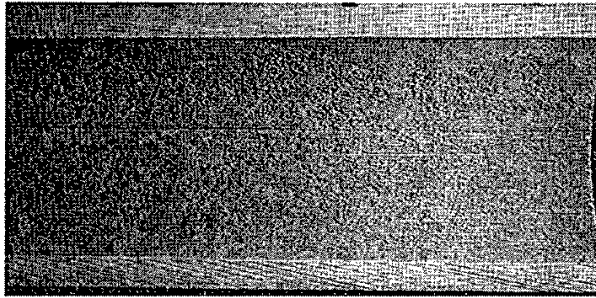
چنانچه پس از اسیدشویی، عملیات خنثی‌سازی به‌درستی انجام نشود، ممکن است سطوح داخلی بویلر بر اثر قرار گرفتن در شرایط اسیدی، دچار خوردگی شوند. انتهای لوله‌های درون درام لجن<sup>۱</sup> و درام بخار، جزء نخستین محیط‌هایی‌اند که دچار این نوع خوردگی می‌شوند. درپوش‌ها، دریچه‌های ورود افراد به درام<sup>۲</sup> و جوش‌های پوسته‌ها<sup>۳</sup> نیز می‌توانند دچار این نوع خوردگی شوند. همچنین، ممکن است سطوح انتقال حرارت (شکل ۱.۹) و قطعاتی که با جوشکاری به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۲.۹) دچار حمله شدید شوند. این خوردگی را می‌توان در انتهای ورقه‌ها یا صفحه‌های فولادی و انتهای پیچ‌ها نیز مشاهده کرد.

---

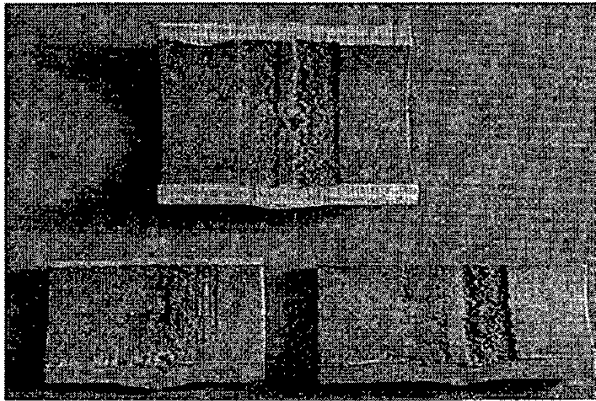
۱. mud drum: مخزن پایینی دیگ بخار که لجن نامحلول در آن جمع می‌شود.

2. drum man hole

3. shell welds

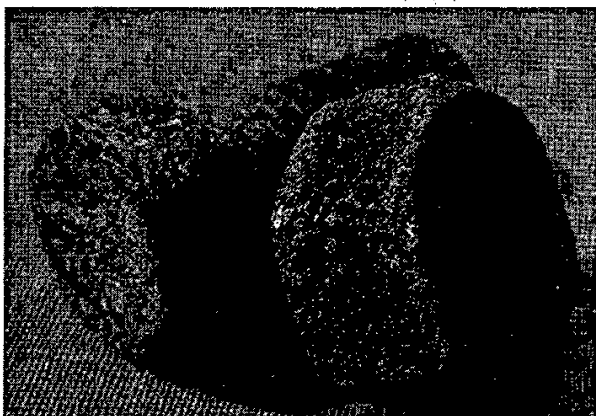


شکل ۱.۹. خوردگی اسیدی در سطح داخلی لوله دیواره آبی



شکل ۲.۹. خوردگی اسیدی در جوش

ممکن است ترک‌ها، پشت‌بندهای جوش و رسوب‌های باقی‌مانده از عملیات اسیدشویی، از خنثی‌سازی کامل اسید شوینده جلوگیری کنند. این امر موجب حمله موضعی شدید فلز در زمان بهره‌برداری بویلر می‌شود. به‌طور کلی، هر سطحی که در معرض اسید بوده مستعد خوردگی است (شکل ۳.۹)، اما ممکن است تمام سطوح بویلر به یک‌اندازه دچار خوردگی نشوند. ممکن است فلزات تحت تنش، اتصالات جوشکاری‌شده، شیارها و دیگر ناحیه‌هایی که از خنثی‌سازی اسید جلوگیری می‌کنند دچار خوردگی شدیدتری شوند.



شکل ۳.۹. خوردگی اسیدی در تجهیزات متصل کننده

### ۳.۹. عوامل خوردگی

به طور کلی، خوردگی اسیدی حین شستشوی بویلر، نتیجه عدول از شرایط و دستورالعمل‌های استاندارد است. عدول از این شرایط می‌تواند به دلایل گوناگونی مانند تجزیه حرارتی بازدارنده خوردگی<sup>۱</sup>، انتخاب نامناسب ماده شوینده یا قدرت نامناسب شوینده، شستشوی طولانی، دمای بالا یا خنثی‌سازی ناقص باشد.

### ۴.۹. علائم خوردگی

به طور کلی، برای تشخیص خوردگی اسیدی، باز دیده‌های ساده چشمی مناسب است. معمولاً سطوح خورده شده، بسته به شدت خوردگی، ظاهری زبر و ناصاف دارند (شکل‌های ۱.۹ و ۴.۹). در باز دیده‌های دقیق‌تر، می‌توان حفره‌های مجزا را که اغلب گود شده‌اند<sup>۲</sup> مشاهده کرد. در لوله‌های بویلر، حفره‌ها اغلب به صورت طولی در امتداد دیواره لوله قرار می‌گیرند. در سطوحی که باز دید چشمی آن‌ها میسر نیست، انجام تست‌های غیرمخرب مانند تست‌های آلتراسونیک یا جدا کردن قسمتی از لوله برای انجام آزمایش، لازم است. نکته<sup>۱</sup>: به طور کلی این نوع خوردگی ابتدا در انتهای لوله‌ها که در درام بخار و درام لجن قرار دارند، انتهای ورق‌ها و صفحه‌های فولادی و همچنین انتهای پیچ‌ها مشاهده می‌شود.

1. inhibitor

2. undercut



شکل ۴.۹. ناهمواری‌های ناشی از خوردگی اسیدی شدید

نکته ۲: حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی قوی و خرابی‌های ناشی از کلویتاسیون، با خوردگی ناشی از اسید قوی اشتباه گرفته می‌شوند. به‌طور کلی، تشخیص درست علت خرابی، با دانستن محل‌هایی میسر می‌شود که هر یک از این مکانیسم‌ها بیشتر فعال است. بنابراین توجه به چند نکته می‌تواند کارساز باشد:

- در مجموع، در تمامی سطوح قرار گرفته در معرض اسید، خوردگی توسط اسید قوی رخ می‌دهد.
- احتمال رخ دادن خوردگی اکسیژنی در نواحی خاصی مانند اکونومایزر، خم‌های برگشتی در سوپرهیترا و همچنین امتداد سطح آب در درام بخار بیشتر است.
- کلویتاسیون اغلب در پروانه پمپ‌ها رخ می‌دهد.
- ممکن است نمونه‌های خاصی از خوردگی شلانت، مشابه خوردگی اسیدی باشند، اما خوردگی شلانت به محل‌های خاصی مانند سطوح داخلی درام‌های بخار محدود است.

### ۵.۹. روش‌های پیشگیری از خوردگی

- کاهش خوردگی اسیدی در بویلر، نیازمند کنترل دقیق تمامی فرایندهای اسیدشویی است. موارد زیر فقط مثال‌هایی از پارامترهای بهره‌برداری گوناگون است که باید حین اسیدشویی کنترل شوند:
۱. تعیین وزن رسوب‌ها: انتخاب چند لوله مناسب برای اندازه‌گیری وزن رسوب‌ها، به تعیین قدرت اسید شوینده، زمان شستشو و مقدار اسید لازم برای شستشوی مناسب بویلر کمک می‌کند؛
  ۲. آنالیز رسوب‌ها: این کار به تعیین اسیدهای شوینده مناسب و ترتیب استفاده از آن‌ها، کمک می‌کند؛



۳. دمای محلول شوینده: دمای محلول و دمای فلز باید به نحوی مطمئن کمتر از دمای تجزیه حرارتی ماده بازدارنده باشند؛

۴. پایش! مقدار آهن، مس و قدرت محلول شوینده<sup>۲</sup>، باید حین شستشوی بویلر به طور متناوب پایش شوند. پس از قرارگیری بویلر در معرض اسید، کیفیت شیمیایی ماده خنثی کننده نیز باید پایش شود؛

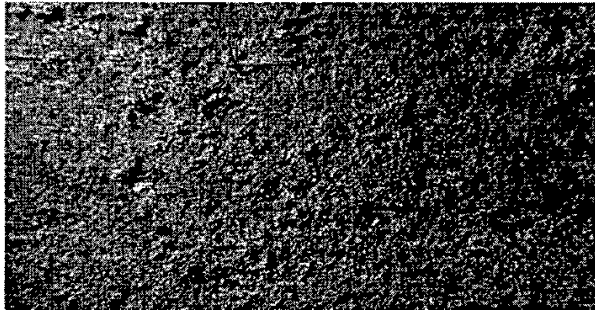
۵. بازدید چشمی: پس از شستشو، باید از لوله‌ها، و درام‌های لجن و بخار، بازدید به عمل آورد. تذکر: برای پیشگیری از این خوردگی، مواد بازدارنده به محلول اسیدشوی بویلر اضافه می‌شوند.

## ۶.۹. بررسی چند نمونه از مشکلات به وجود آمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی اسیدی حین اسیدشویی

### □ نمونه اول

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۳</sup>
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۳/۵ MPa (۱۹۶ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)
محلول شوینده:	اسید سیتریک

علائم ناشی از خوردگی: سطح نمونه ظاهری شبیه سطح حکاکی شده دارد و به رنگ فلزی و براق است. آزمایش دقیق، وجود نواحی نامنظمی از فلز خورده نشده را نشان می‌دهد که حدود ۰/۱۲ میلی‌متر بالاتر از نواحی خورده شده قرار دارند (شکل ۵.۹). سراسر سطوح داخلی، در هر دو سمت داغ و سرد، به طور مشابه دچار خوردگی شده‌اند.



شکل ۵.۹. ظاهر خوردگی با اسید سیتریک (بزرگنمایی: ۷/۵ برابر)

علت خوردگی: با توجه به شرایط موجود، خوردگی با اسید (اسید سیتریک) و حین اسیدشویی رخ داده است. شایان ذکر است که خوردگی یکسان در تمام سطح داخلی، نشانه خوردگی ناشی از اسیدشویی است.

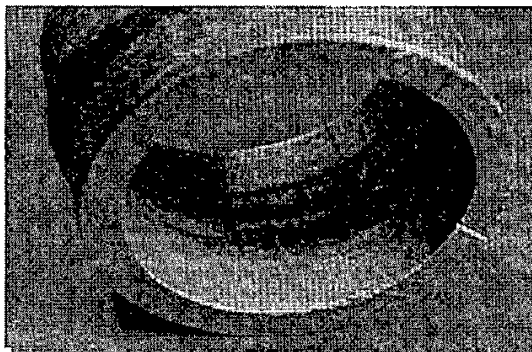
تذکر: به‌طور کلی، حمله اسیدهای آلی به سطوح فلزی، تفاوت‌های چشمگیری با آنچه که بر اثر اسیدهای معدنی ایجاد می‌شود دارد و در زمان‌های مساوی، اسیدهای آلی خوردگی کمتری ایجاد می‌کنند. همچنین، معمولاً ظاهر سطوح فلزی قرارگرفته در معرض اسیدهای آلی، در مقایسه با اثر به‌جامانده از اسیدهای معدنی قوی، ناهمواری کمتر و کم‌عمق‌تری<sup>۱</sup> دارند.

□ نمونه دوم

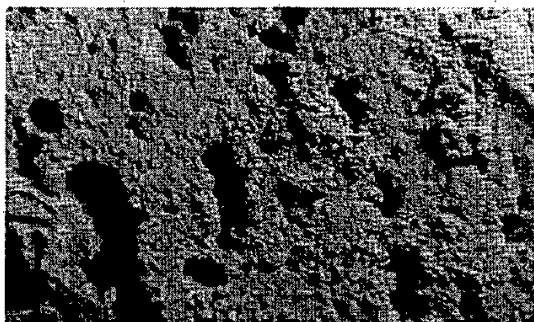
نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۲</sup>
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای کناری
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۳۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۰/۳ MPa (۱۵۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
محلول شوینده:	اسید معدنی

علائم ناشی از خوردگی: در سطوح مقابل جوش‌های محیطی، تعدادی حفره نسبتاً عمیق و متداخل مشاهده می‌شود (شکل ۶.۹). در دیگر نواحی نیز خوردگی رخ داده است (شکل ۷.۹). در این نواحی، خوردگی اغلب در امتداد درز لوله است.

علت خوردگی: ممکن است تجمع خوردگی در محل جوش، بر اثر تنش‌های پسماند موجود در جوش و حفره‌ها و درزهای موجود در آن قسمت باشد. همچنین ممکن است خوردگی در امتداد درز لوله، به‌خاطر جدایش ناخالصی‌ها در محل درز و ترک‌های ایجادشده بر اثر ذوب ناقص درز هنگام تولید لوله باشد. وجود رسوب‌هایی روی محل‌های خوردگی، نشان می‌دهد خوردگی در گذشته و شاید حین آخرین اسیدشویی، ایجاد شده است.



شکل ۶.۹. خوردگی اسیدی در جوش



شکل ۷.۹. خوردگی اسیدی در سطح داخلی لوله (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر)

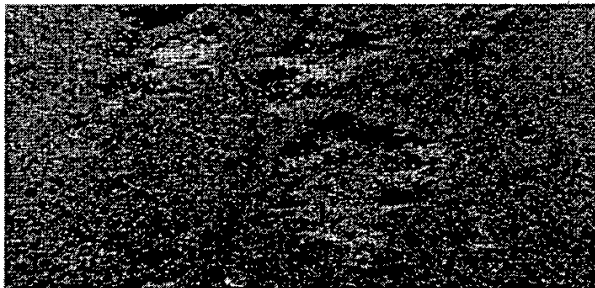
□ نمونه سوم

نوع بویلر:	کاغذسازی
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۱۶ سال
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۴/۱ MPa (۶۰۰ psi)
محلول شوینده:	اسید معدنی

علائم ناشی از خوردگی: بازدید چشمی سطوح، بخش‌های کم‌عمقی را که بر اثر خوردگی نامنظم فلز، در بالا و پایین سطوح ایجاد شده‌اند، نشان می‌دهد. مکان‌های خورده‌شده در ردیف‌های موازی قرار گرفته‌اند. شکل ۸.۹ ظاهر خوردگی را نشان می‌دهد. پوششی از اکسید آهن گوشه‌های تیز خوردگی را از بین برده است.

علت خوردگی: خوردگی فلز از نوع خوردگی اسیدی است. هرچند سطوح ناهموار و گودشده که معمولاً در خوردگی با اسید قوی ظاهر می‌شوند وجود ندارند، اما برخی علائم صحت تشخیص را تقویت می‌کنند:

- نقاط خوردگی، در راستای نورد فولادی که صفحه از آن ساخته شده است، ردیف‌های موازی تشکیل داده‌اند.
- وقوع خوردگی در جوش و قسمت انتهایی لوله که در درام بخار قرار دارد.
- سطح مقطع‌های ناهموار و گودشده که در آزمایش‌های متالوگرافی تشخیص‌پذیرند.

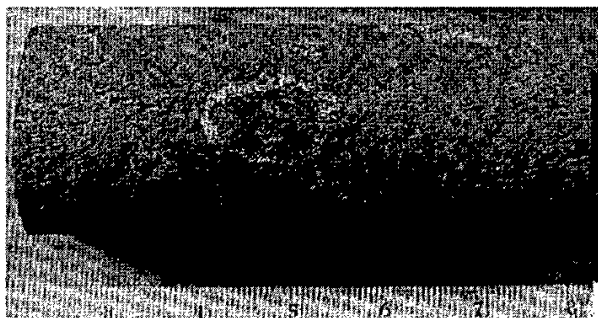


شکل ۸.۹. خوردگی فلز با اسید قوی (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر)

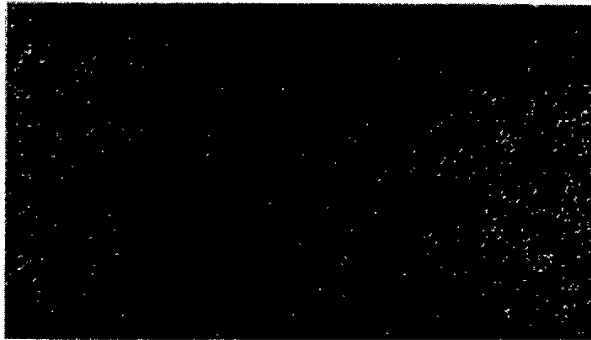
□ نمونه چهارم

نوع بویلر:	نساجی
محل نمونه:	لوله آتشی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	افقی
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۰/۷ MPa (۱۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)
محللول شوینده:	اسید معدنی

علائم ناشی از خوردگی: حین تست هیدرواستاتیکی بویلر پس از اسیدشویی آن، چند لوله دارای نشتی مشاهده شده است. آزمایش یکی از این لوله‌ها، وجود حفره‌های فراوانی را نشان می‌دهد (شکل ۹.۹). سطوح خارجی این لوله‌ها با یک لایه از اکسیدهای قهوه‌ای‌رنگ پوشیده شده‌اند. علت خوردگی: هرچند احتمال دارد برخی حفره‌ها بر اثر مقدار بالای اکسیژن موجود در آب بویلر، در زمان‌هایی که از بویلر بهره‌برداری نمی‌شده است<sup>۱</sup> ایجاد شده باشند، اما عامل اصلی خوردگی، کنترل ناکافی بر عملیات اسیدشویی با اسید معدنی قوی است. تذکر: در شکل ۱۰.۹ به تعداد زیاد حفره‌ها، خوردگی کلی و درزهای طولی ریز که از علائم خوردگی با اسید قوی‌اند توجه کنید.



شکل ۹.۹. خوردگی اسیدی در سطوح خارجی لوله در یک بویلر لوله آتش



شکل ۱۰.۹. نمایی نزدیک از سطح خارجی لوله نشان داده شده در شکل ۹.۹

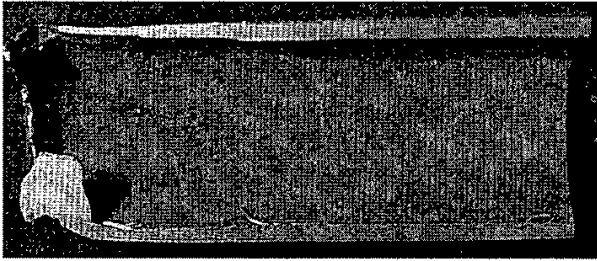
□ نمونه پنجم

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۳۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات و مقادیر کمی هیدروکسید اضافی
فشار درام:	۶ MPa (۸۷۵ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)
محلول شوینده:	اسید معدنی

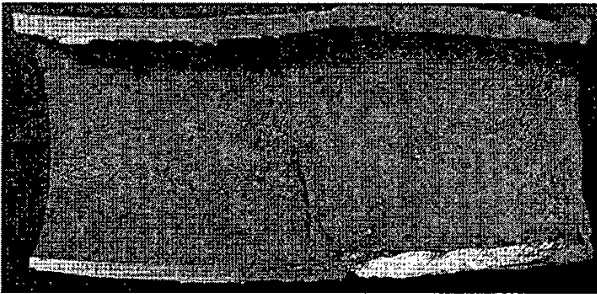
علائم ناشی از خوردگی؛ پس از آسیدشویی بویلر، خرابی نشان داده شده در شکل‌های ۱۱.۹ و ۱۲.۹، دیده شده است. بازدید دقیق این لوله‌ها، درزهای بسیار کوچک و ناپیوسته‌ای را نشان می‌دهد که در طول سطوح داخلی منتشر شده‌اند. این درزها که ظاهراً هم‌زمان با علائمی شبیه اثر سنبله<sup>۲</sup> ایجاد شده‌اند، در محل ورود لوله به درام عمیق‌ترند. شکل ۱۲.۹، درزهای عرضی عمیقی را در بخش‌هایی از لوله که داخل درام قرار دارد نشان می‌دهد. بررسی مقاطعی از سطوح لوله، بیان می‌کند که سطوح ناصاف‌اند و اکسیدهای آهنی که معمولاً در سطح لوله وجود دارد، در آن‌ها مشاهده نمی‌شود.

1. utility

2. faint mandrel mark



شکل ۱۱.۹. درزهای طولی در نزدیکی محل ورود لوله به درام



شکل ۱۲.۹. درزهای عرضی در نزدیکی محل ورود لوله به درام

علت خوردگی: خوردگی با اسید معدنی قوی، علت ظاهر شدن و عمیق شدن علائم شبیه اثر سنبه در قطر داخلی و همچنین گسترش درزهای عمیق در محل ورود لوله‌ها به درام است. ظهور و عمیق شدن علائم شبیه اثر سنبه، به وجود تنش‌های پسماند در فلز که هنگام ساخت لوله ایجاد شده‌اند نیز بستگی دارد. وجود درزهای عمیق در قسمت‌هایی از لوله واقع در درام، به وجود تنش‌های پسماند ناشی از عملیات نورد لوله نیز بستگی دارد. درزها در جهات گوناگون منتشر شده‌اند.

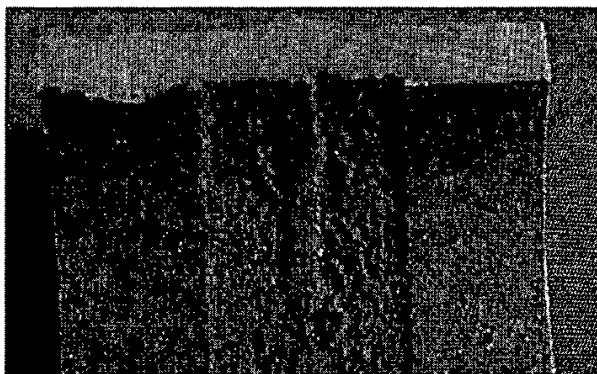
تذکر: خوردگی اسید معدنی در سطوح فلزی تحت تنش، در مقایسه با سطوح بدون تنش، بیشتر است. دلیل این امر، مقدار انرژی بالای فلز تحت تنش است.

□ نمونه ششم

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۳۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۰/۳ MPa (۱۵۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
محللول شوینده:	اسید معدنی

علائم ناشی از خوردگی: شکل‌های ۲.۹ و ۱۳.۹، خوردگی سطوح داخلی لوله‌های دیواره‌ای را روبه‌روی جوش نشان می‌دهند. بررسی مقاطعی از سطح داخلی در محل خوردگی، نشان می‌دهد محل خوردگی، گود شده و ناصاف است.

علت خوردگی: وجود تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، باعث شده است پس از قرار گرفتن سطوح در معرض اسید قوی، خوردگی بیشتر در مجاورت جوش رخ دهد.



شکل ۱۳.۹. خوردگی اسیدی در جوش‌ها

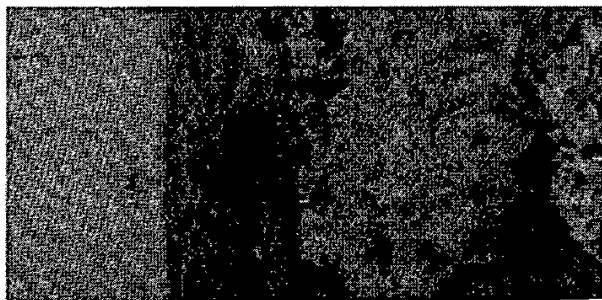


## □ نمونه هفتم

نوع بویلر:	کاغذسازی
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۳ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۸/۶ MPa (۱۲۵۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۷ cm (۲/۲۵ in)
محلول شوینده:	اسید معدنی

علائم ناشی از خوردگی: در بازدید دقیق سطوح داخلی جوش، خوردگی بسیار متمرکزی مشاهده می‌شود که بر اثر آن، سطوح ناصافی ایجاد شده است (شکل ۱۴.۹).

علت خوردگی: معیوب بودن جوش و قرار گرفتن آن در معرض اسید قوی، طی ۵ دوره اسیدشویی در مدت ۱۳ سال، عوامل سوراخ شدن لوله‌اند. ترک‌ها و حفره‌های موجود در جوش، محل‌هایی‌اند که ممکن است در پی خنثی‌سازی بعد از عملیات اسیدشویی، مقداری اسید در آن‌ها به‌جا بماند. خوردگی اسیدی می‌تواند درزها و حفره‌های جوش را بزرگ‌تر و عمیق‌تر کند و به سوراخ شدن ناگهانی دیواره لوله در محل جوش منجر شود. بر اثر سایش ناشی از خروج بخار، خرابی‌های دیگری نیز در لوله‌های مجاور ایجاد شده است.



شکل ۱۴.۹. خوردگی اسیدی سطح داخلی جوش (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر)

منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

## فصل ۱۰

### خوردگی اکسیژنی [1]

#### ۱.۱۰ مکانیسم خوردگی

یکی از انواع خوردگی که اغلب با آن مواجه ایم، بر اثر قرار گرفتن بویلر در معرض اکسیژن محلول ایجاد می‌شود. از آنجاکه تشکیل اکسیدهای آهن، جزء خواص طبیعی آهن است، اگر شرایط ترمودینامیکی مناسب باشد، فولادها خودبه‌خود اکسید خواهند شد. به‌طور کلی، شرایط زمانی برای این امر مساعد است که فولادی که با لایهٔ محافظ اکسید آهن (مگنتیت) پوشیده نشده است، در معرض آب حاوی اکسیژن قرار گیرد. در این صورت، واکنش ۱.۱۰ رخ خواهد داد.



جلوگیری از این واکنش، دلیل اصلی فرایندهای شیمیایی و مکانیکی هوازدایی است که معمولاً در تصفیهٔ آب به‌کار می‌روند. به‌طور کلی، انجام این فرایندها حین بهره‌برداری موفقیت‌آمیزند، بنابراین خوردگی اکسیژنی<sup>۱</sup> در بویلر به زمان‌هایی محدود می‌شود که خارج از مدار است. به‌طور مثال، رطوبتی که در زمان خارج از مدار بودن، در دیواره‌های یک سوپرهیتر تقطیر می‌شود، اکسیژن اتمسفر را در خود حل می‌کند. لایهٔ مگنتیت محافظ، بر اثر تنش‌های انقباضی که موقع سرد شدن سوپرهیترها تا دمای محیط، به آن اعمال می‌شود، می‌شکند. نقاطی که مگنتیت محافظ آن‌ها دچار شکست شده است، نقش آند را ایفا می‌کنند. در این نقاط، رطوبت دارای اکسیژن می‌تواند با فلز واکنش دهد.

علاوه بر سوراخ شدن دیوارهٔ لوله، خوردگی اکسیژنی از منظری دیگر نیز مشکل‌ساز است. حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی، می‌توانند به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کنند. در نتیجه این حفره‌ها برای ایجاد ترک‌های خستگی- خوردگی، خوردگی قلیایی و دیگر مکانیسم‌های خرابی که تنش در آن‌ها مؤثر است، محل‌های مناسبی‌اند.

### ۲.۱۰. محل وقوع خوردگی

خوردگی اکسیژنی در بویلرهای در حال بهره‌برداری نامعمول است و اغلب در بویلرهایی که از مدار خارج باشند، رخ می‌دهد. گرچه خوردگی در تمامی قسمت‌های بویلر محتمل است، اما اغلب در لوله‌های سوپرهیتر اتفاق می‌افتد. در لوله‌های ری‌هیتر، به‌ویژه در محل‌هایی که رطوبت می‌تواند در خم‌ها و فرورفتگی‌های لوله جمع شود نیز امکان خوردگی وجود دارد.

در بویلرهای در حال بهره‌برداری، اولین مناطقی که دچار این نوع خوردگی می‌شوند، اکونومی‌زر و هیترهای آب تغذیه‌اند. در موارد آلودگی شدید به اکسیژن، ممکن است سطوح فلزی در دیگر قسمت‌های بویلر، مانند سطوحی که در امتداد سطح آب در درام بخار قرار دارند و تجهیزات جداکننده بخار در درام نیز دچار خوردگی شوند. در این موارد، حتی اگر زمان آلودگی به اکسیژن کوتاه باشد، خوردگی چشمگیری می‌تواند ایجاد شود.

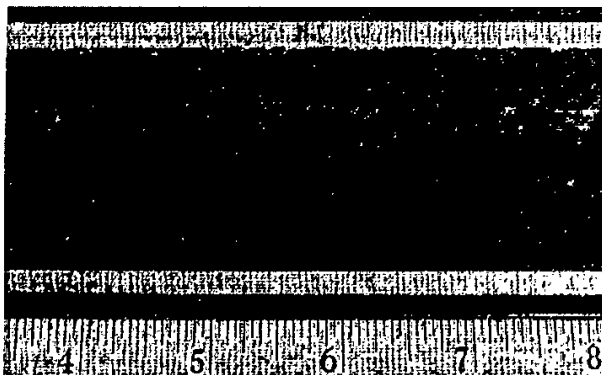
### ۳.۱۰. عوامل خوردگی

سه عامل رطوبت (یا آب)، اکسیژن محلول و وجود یک سطح فلزی فاقد لایه محافظ، در شروع و گسترش خوردگی اکسیژنی مؤثرند. سطح فلزی فاقد لایه محافظ، در سه حالت می‌تواند وجود داشته باشد:

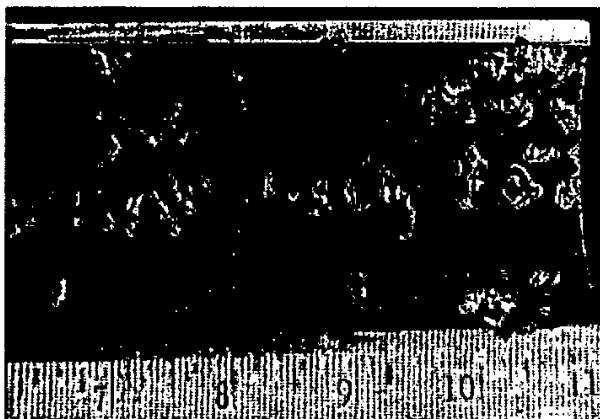
۱. سطح فلز برهنه باشد (به‌طور مثال پس از اسیدشویی)؛
  ۲. سطح فلز با یک لایه محافظ کم‌اثر یا بی‌اثر از اکسیدهای آهن، مانند هماتیت ( $Fe_2O_3$ ) پوشیده شده باشد (هماتیت قرمز رنگ است)؛
  ۳. سطح فلز با یک لایه اکسید محافظ مانند مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) که سیاه‌رنگ است، پوشیده شده باشد، اما این پوشش ناپیوستگی و ترک داشته باشد. شکست یا ایجاد ترک در مگنتیت، به‌شدت تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی و حرارتی اعمال‌شده حین بهره‌برداری بویلر است. این تنش‌ها حین راه‌اندازی، خاموش‌کردن و همچنین حین نوسان‌های سریع بار بویلر، افزایش می‌یابد و در نتیجه مخرب‌ترند. با توجه به کیفیت آب بویلر، ترک‌های ایجادشده در لایه مگنتیت، حین بهره‌برداری عادی بویلر به‌سرعت بازسازی می‌شوند. اما اگر مقدار اکسیژن بالا باشد، ترک‌های موجود در مگنتیت، چه حین بهره‌برداری و چه زمان خارج از مدار بودن، نمی‌توانند به‌طور مناسب بازسازی شوند و در نتیجه خوردگی شروع می‌شود.
- تذکر: خوردگی آب با افزایش دما و مواد جامد محلول در آن و کاهش pH، افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، امکان خوردگی با افزایش اکسیژن، بیشتر می‌شود.

#### ۴.۱۰. علائم خوردگی

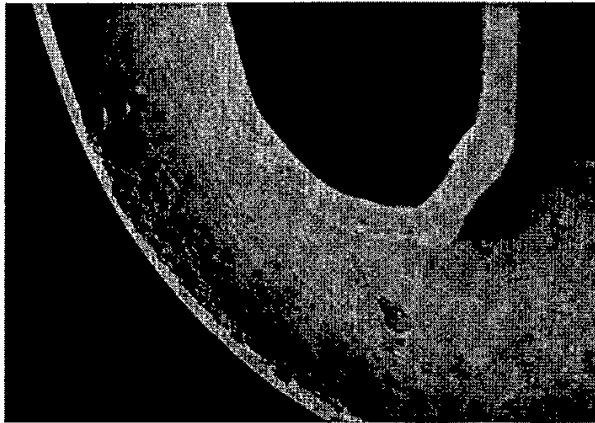
در صورتی که سطوح خورده شده در دسترس باشند، بازدید ساده چشمی برای تشخیص خوردگی کافی است. نتیجه واکنش رطوبت اکسیژن دار با سطح فاقد لایه محافظ، می تواند حفره های عمیق، مجزا و اغلب نیم کروی باشد (شکل ۱.۱۰). گاهی این حفره ها با لایه ای از محصولات خوردگی پوشیده می شوند (شکل ۲.۱۰). حفره ها غالباً در قسمت های لاشکل سوپر هیترا که جمع شدن آب محتمل است، ایجاد می شوند (شکل ۳.۱۰).



شکل ۱.۱۰. حفره های خوردگی اکسیژنی در مقطعی از لوله سوپر هیترا



شکل ۲.۱۰. اکسید آهنی که روی حفره ها را پوشانده است.



شکل ۳.۱۰. حفره‌های خوردگی اکسیژنی در پایین قسمت آویزان سوپرهیتر

اگر دسترسی به سطوح خورده شده ممکن نباشد، ممکن است تکنیک‌های غیرمخرب مانند تست‌های آتراسونیک لازم باشد.

تذکر: گاهی محصولات خوردگی که به صورت برآمدگی‌هایی محل حفره‌ها را می‌پوشانند، با رسوب‌های ساده اشتباه گرفته می‌شوند. با توجه کافی به برخی نکات، می‌توان برآمدگی‌های ایجاد شده بر اثر محصولات خوردگی را به نحوی صحیح تشخیص داد:

- برآمدگی‌های ناشی از محصولات خوردگی، روی محل‌های خوردگی قرار می‌گیرند و ممکن است تحت تأثیر سرعت سیال، در جهت سیال کشیده شوند.
- برآمدگی‌های ناشی از محصولات خوردگی، معمولاً پوسته خارجی سخت و ترد، به رنگ مایل به قرمز دارند. این پوسته، هسته پر حجم و تیره محصولات خوردگی را در بر گرفته است.

### ۵.۱۰. روش‌های پیشگیری از خوردگی

پس دریافتیم که سه عامل رطوبت یا آب، اکسیژن و فقدان لایه محافظ مناسب در سطح فلز، در خوردگی اکسیژنی مؤثرند. با توجه به این مطلب و بسته به شرایط گوناگون بویلر، روش‌هایی برای پیشگیری از خوردگی اکسیژنی مناسب‌اند:

۱. بویلرهای در حال بهره‌برداری: در بویلرهای در حال بهره‌برداری، آب به‌طور دائمی وجود دارد. پوشش مگنتیت محافظ نیز به‌طور مداوم از بین می‌رود و سپس بازسازی می‌شود؛ بنابراین در

هر لحظه، انفصال و ترک‌هایی در مگنتیت وجود خواهد داشت. از آنجاکه آب و محل مناسب برای خوردگی وجود دارند، کاهش خوردگی اکسیژنی با کاهش مقدار اکسیژن محلول میسر است. از دلایل وجود بیش از حد اکسیژن محلول، به‌طور مثال می‌توان به عملکرد بد هوازدا، نشت هوا و تغذیه نامناسب مواد شیمیایی جذب‌کننده اکسیژن<sup>۱</sup> اشاره کرد (منابع نشت هوا در جدول ۱۰.۱۰ آمده است). کنترل مقدار اکسیژن در ورودی اکونومایزر، به‌ویژه در بارهای پایین، توصیه می‌شود؛

۲. بویلرهای خارج از مدار<sup>۲</sup> - روش نگهداری تر<sup>۳</sup>: یک بویلر خارج از مدار حین نگهداری تر، در معرض شرایط مشابه بویلرهای در مدار قرار دارند (البته تا وقتی خوردگی اکسیژنی موردنظر باشد). بنابراین، روش جلوگیری از خوردگی، کاهش مقدار اکسیژن تا کمترین حد و جلوگیری از بالا رفتن مقدار آن است. به‌طور کلی، این روش نگهداری مستلزم پرکردن کامل بویلر از آب، استفاده از مواد شیمیایی جذب‌کننده اکسیژن، حفظ pH در مقادیر مناسب و چرخش متناوب آب است؛

۳. بویلرهای خارج از مدار - روش نگهداری خشک<sup>۴</sup>: موفقیت‌آمیز بودن حفاظت یک بویلر خارج از مدار با روش نگهداری خشک، به حذف رطوبت و (یا) اکسیژن بستگی دارد. یک فرآیند مناسب برای محافظت بویلر حین نگهداری خشک، می‌تواند شامل استفاده از مواد خشک‌کن و لایه نیتروژن و چرخش دائمی هوای خشک (رطوبت نسبی کمتر از ۰.۳۰٪) باشد؛

۴. پس از شستشوی شیمیایی: حفاظت بویلر پس از اسیدشویی، با ایجاد لایه اکسید آهن محافظ روی سطح فلز انجام می‌شود. معمولاً این کار با شستشوی دقیق سطوح با آب و پس از آن، جوشش آب در سطوح<sup>۵</sup> انجام می‌شود. حین جوشش<sup>۶</sup>، می‌توان از محلول کربنات سدیم و دیگر مواد قلیایی استفاده کرد.

## ۶.۱۰. محل‌های نشت هوا

هیت‌های آب تغذیه فشارپایین که اغلب حین بهره‌برداری در بارهای پایین، تحت فشار منفی قرار دارند، اجازه نشت هوا به داخل آب تغذیه از طریق شیرهای دارای نشتی، پمپ‌ها، فلنج‌ها و... می‌دهند. دیگر محل‌های نشت هوا در جدول ۱۰.۱۰ ذکر شده است.

1. oxygen-scavenging chemicals

2. idle boilers

3. wet lay-up

4. dry lay-up

5. post boil-out

6. post boil-out-passivation

جدول ۱.۱۰. محل‌های نشت هوا

محل‌های نشت هوا	موقعیت
آب‌بندها <sup>۱</sup>	توربین
فلنج‌ها، سرپوش <sup>۲</sup> و اتصالات ارتجاعی <sup>۳</sup>	
منافذ <sup>۴</sup>	
شیرها	
منفذها و فلنج‌ها	کندانسور
درپوش <sup>۵</sup>	
مسیرهای عبور افراد <sup>۶</sup>	
گیج اندازه‌گیری سطح آب <sup>۷</sup>	
شیرها، گیج‌ها، فلنج‌ها	پمپ تخلیه آب از کندانسور
آب‌بندی‌های محور پمپ	
شیرها	هیتر آب تغذیه
دیافراگم‌های سوراخ‌شده	دیگر قسمت‌های سیکل
شیرها	
اتصالات ارتجاعی	
تانک‌های فشارشکن <sup>۸</sup>	

۷.۱۰. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

### اثر خوردگی اکسیژنی

□ نمونه اول

کاغذسازی	صنعت:
سوپر‌هیتر	محل نمونه:
افقی، عمودی	نحوه قرارگرفتن نمونه:
۱۰ سال	عمر نمونه:
نگهداری خشک با استفاده از لایه نیتروژن	شیوه حفاظت:
قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)	مشخصه‌های لوله:

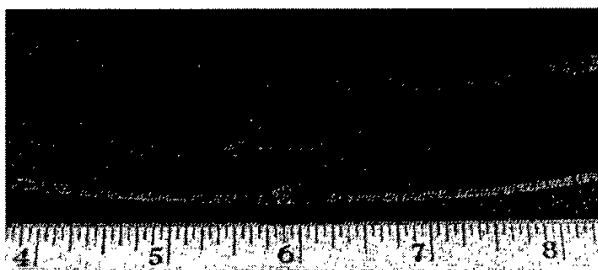
1. gland seals
3. expansion joints
5. boot
7. sight glass

2. hood
4. penetrations
6. manways
8. flash tanks



علائم ناشی از خوردگی: حفره‌های خوردگی اکسیژنی که در شکل‌های ۱۰.۱۰ و ۴.۱۰ نشان داده شده‌اند، هنگام تست هیدرولیکی یک بویلر بازیاب که در طول تابستان به صورت تر نگهداری شده است، مشاهده شده‌اند. سوپرهیترها به صورت خشک و با گاز نیتروژن نگهداری شده‌اند. محصولات خوردگی که تحت تأثیر نیروی گرانش، از قسمت‌های عمودی پایین آمده‌اند، در شکل ۱۰.۱۰ مشاهده می‌شوند. حلقه بیضوی که حفره‌ها را در قسمت افقی احاطه کرده، نشان می‌دهد در این محل، استخری از تقطیر وجود داشته است (شکل ۴.۱۰). آزمایش دقیق با استفاده از میکروسکوپ استریوسکوپي کم‌مصرف<sup>۱</sup>، وجود ترک‌های انقباضی در مگنتیت محافظ را در محل تشکیل حفره‌ها نشان می‌دهد.

علت خوردگی: واضح است که به‌رغم نگهداری خشک، لوله در معرض رطوبت ناشی از تقطیر بخار و همچنین اکسیژن اتمسفر قرار گرفته است.



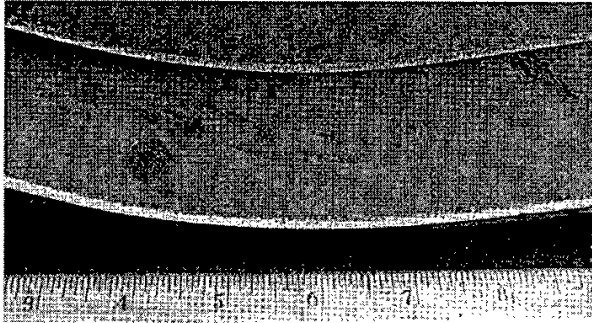
شکل ۴.۱۰. حلقه‌های آب بیضوی که حفره ناشی از خوردگی اکسیژنی را در خم لاشکل احاطه کرده‌اند.

□ نمونه دوم

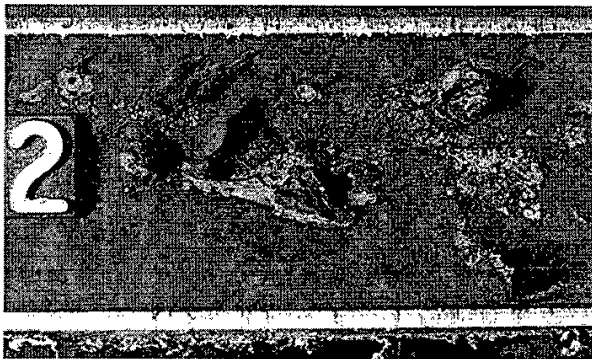
کاغذسازی	صنعت:
محدوده انتقال حرارت با روش جابه‌جایی <sup>۲</sup>	محل نمونه:
در جهت‌های گوناگون	نحوه قرار گرفتن نمونه:
۱۵ سال	عمر نمونه:
نگهداری تر، هیدرازین، مورفولین <sup>۳</sup>	شیوه حفاظت:
۴/۸ MPa (۷۰۰ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲ in)	مشخصه‌های لوله:

1. low-power stereoscopic microscope      2. convection bank  
3. morpholine

علامت ناشی از خوردگی: شکل‌های ۵.۱۰ تا ۷.۱۰، نمونه‌هایی از حفره‌های ایجادشده را نشان می‌دهند. در شکل‌های ۶.۱۰ و ۷.۱۰ نیز برآمدگی‌های ناشی از اکسیدهای آهن<sup>۱</sup> نشان داده شده‌اند. علت خوردگی: حفره‌ها ناشی از خوردگی اکسیژنی‌اند که به‌خاطر نامناسب‌بودن نحوه نگهداری تر، ایجاد شده است. ممکن است تغذیه نامناسب مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا و (یا) ایجاد مشکل در سیستم چرخش عادی آب، علت این خوردگی باشند. در شکل ۵.۱۰، جابه‌جایی محصولات خوردگی بر اثر نیروی گرانش مشاهده می‌شود. وجود این محصولات نشان می‌دهد حین نگهداری تر، آب ساکن بوده، یا جریان بسیار کمی داشته است. اگر جریان آب کافی بود، محصولات خوردگی در جهت جریان قرار می‌گرفتند.



شکل ۵.۱۰. حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی روی سطوح داخلی



شکل ۶.۱۰. برآمدگی‌های محصولات خوردگی که روی حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی را پوشانده‌اند.

1. tubercle



شکل ۲.۱۰. برآمدگی‌های محصولات خوردگی که روی حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی را پوشانده‌اند.

□ نمونه سوم

تولید بخار برای گرمایش	صنعت:
مسیر آب سیکل	محل نمونه:
افقی	نحوه قرار گرفتن نمونه:
۹ سال	عمر نمونه:
آمین خنثی‌کننده	رژیم شیمیایی آب:
قطر خارجی: ۳/۲ cm (۱/۲۵ in)	مشخصه‌های لوله:

شرایط بهره‌برداری از بویلر: بویلر دچار خوردگی، روزانه ۸ تا ۱۰ ساعت کار کرده است. علائم ناشی از خوردگی: در شکل ۸.۱۰، مشکلی که بارها در مسیر آب کندانسۀ یک بویلر ایجاد شده است، مشاهده می‌شود.

علت خوردگی: زنگ مایل به قرمز اکسیدهای آهن و وجود برآمدگی‌های ناشی از محصولات خوردگی روی حفره‌ها، نشان می‌دهند خوردگی از نوع اکسیژنی است. لوله‌های آب کندانسۀ، تحت فشار بوده و آب را در دمای ۱۰۴ درجه سانتی‌گراد (۲۲۰ درجه فارنهایت) منتقل

می‌کرده‌اند. اکسیژن، در سیستمی با این شرایط، می‌تواند وجود داشته باشد، اما احتمال اینکه پس از سرد شدن واحد (وقتی سیستم از مدار خارج شده است) به داخل سیستم مکش شده باشد، بیشتر است.

روش پیشگیری از خوردگی: ممکن است استفاده از رژیم شیمیایی آمین لایه‌ای<sup>۱</sup> برای خنثی‌سازی، به‌جای خنثی‌سازی ساده با آمین، در کاهش این نوع خوردگی مؤثر باشد.



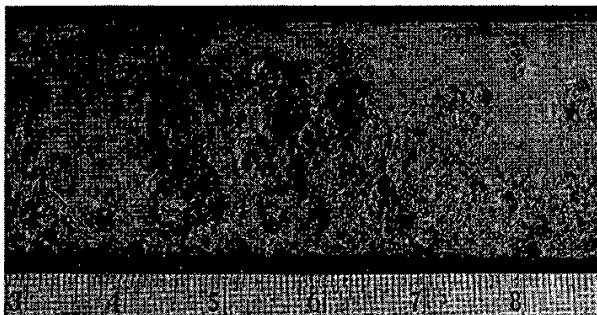
شکل ۸.۱۰. سطح داخلی لوله آب‌کندانه

□ نمونه چهارم

تولید بخار برای گرمایش	صنعت:
بویلر لوله آتشی	محل نمونه:
افقی	نحوه قرار گرفتن نمونه:
۴ سال	عمر نمونه:
پلیمر و سولفیت سدیم	رژیم شیمیایی آب:
قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)	مشخصه‌های لوله:

علائم خوردگی: شکل ۹.۱۰ سطح خارجی لوله یک بویلر لوله آتشی را نشان می‌دهد که دچار خوردگی شدید شده است. رسوب — که می‌تواند باعث خوردگی شود — در لوله وجود ندارد.

علت خوردگی: خوردگی شدیدی که در این لوله رخ داده، بر اثر وجود اکسیژن است. در این بویلر، تزریق مواد اکسیژن زدا، به مدت یک هفته قطع شده است. شاید حفره‌ها در این بازه‌های زمانی که مواد اکسیژن زدا به آب تزریق نشده‌اند، ایجاد و منتشر شده باشند.



شکل ۹.۱۰. حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی در سطح داخلی لوله آتشی

#### منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

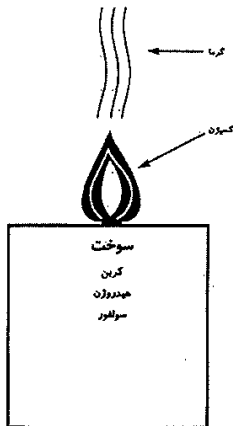


## خوردگی سمت آتش

### مقدمه

در تعریفی ساده، احتراق واکنش سریع اکسیژن با عناصر شیمیایی اصلی سوخت (کربن، هیدروژن و گوگرد) است که نتیجه آن، آزاد شدن حرارت و تشکیل محصولات احتراق است (شکل ۱.۱۱). از سوختن سوخت و مواد ناخالصی موجود در آن، محصولات احتراق — مونواکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ )، بخار آب ( $H_2O$ )، دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) و تری‌اکسید گوگرد ( $SO_3$ ) — و خاکستر تولید می‌شود.

محصولات جانبی احتراق	(CO) کربن مونو اکسید
	( $CO_2$ ) کربن دی اکسید
	( $H_2O$ ) بخار آب
	( $SO_2$ ) گوگرد دی اکسید
	( $SO_3$ ) گوگرد تری اکسید



محصولات احتراق ناشی  
از احتراق سوخت‌ها

بدون توجه به حالت فیزیکی اولیه سوخت، ممکن است بر اثر احتراق، سوخت به یک یا هر سه حالت ماده (جامد، مایع و گاز) تبدیل شود. در تجهیزات احتراق معمولاً دمای گازهای حاصل از سوختن، از ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد (۳۰۰۰ درجه فارنهایت) در مشعل تا ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد (۳۰۰ درجه فارنهایت) یا کمتر در خروجی دودکش تغییر می‌کند. ممکن است بر اثر سرد شدن محصولات احتراق (از مشعل‌ها تا دودکش)، محصولات گازی تقطیر شده و محصولات احتراق مایع به جامد تبدیل شوند.

محصولات احتراق به‌ندرت به‌شکل اکسید خالص باقی می‌مانند و درعوض برای تشکیل ترکیبات و کمپلکس‌های جدید، با یکدیگر وارد واکنش می‌شوند. گاهی ممکن است این ترکیبات جدید، دمای ذوب کمتری از دمای ذوب مواد تشکیل‌دهنده‌شان داشته باشند. وجود چنین موادی، معمولاً علت مشکلات مربوط به خوردگی سمت آتش است. در فصل‌های ۱۱ تا ۱۵، انواع خوردگی سمت آتش بررسی خواهند شد.



## فصل ۱۱

### خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی [۱]

#### ۱.۱۱. مکانیسم خوردگی

خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی<sup>۱</sup> زمانی اتفاق می‌افتد که خاکسترهای گداخته حاوی وانادیم، با ترتیب زیر، روی سطح لوله تشکیل شوند:

۱. ترکیبات دارای وانادیم و سدیم موجود در سوخت، پس از سوختن، به شکل  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{V}_2\text{O}_5$  اکسید شوند؛

۲. ذرات خاکستر تولیدشده به سطح فلز بچسبند ( $\text{Na}_2\text{O}$  نقش عامل چسباننده را ایفا می‌کند)؛

۳.  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{V}_2\text{O}_5$  در سطح فلز واکنش داده و مایعی را تشکیل دهند؛

۴. مایع تشکیل شده، لایه محافظ مگنتیت ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) را از بین ببرد و فلز زیر آن را در معرض اکسیداسیون سریع قرار دهد.

در این نوع خوردگی، پنتااکسید وانادیم ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) و کمپلکس‌های وانادیم نقش کاتالیزور را در اکسیداسیون ایفا می‌کنند. اکسیداسیون سریع، ضخامت دیواره را کاهش می‌دهد و باعث افزایش تنش در ناحیه نازک‌شده می‌شود. افزایش تنش به همراه دمای بالای فلز، به شکست خزشی می‌انجامد.

تذکر: خوردگی لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر بر اثر خاکسترهای گداخته‌ای با دمای ذوب بین ۵۹۳ تا ۷۰۴ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه فارنهایت)، نقش مهمی در پیشگیری از روند روبه‌رشد افزایش دمای بخار بویلرها در اوایل دهه ۱۹۶۰ داشته است. می‌توان گفت اکنون همه بویلرهای صنعتی، برای حداکثر دمای بخار در محدوده ۵۵۱ تا ۵۳۸ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰۰ تا ۱۰۲۵ درجه فارنهایت) طراحی می‌شوند.

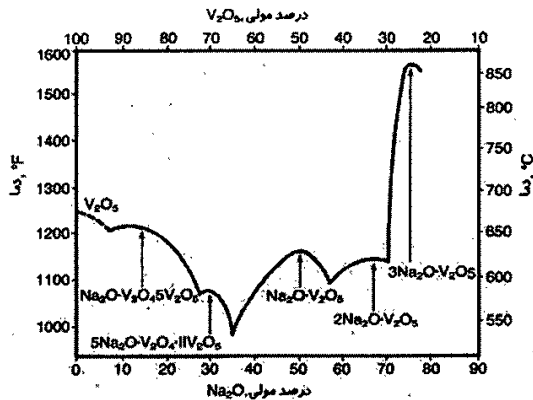
### ۲.۱۱. محل وقوع خوردگی

خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی، نوعی خوردگی است که در فاز مایع و در دمای بالا، در محل‌هایی که دمای فلز در محدوده ۵۹۳ تا ۸۱۶ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه فارنهایت) باشد، رخ می‌دهد. این نوع خوردگی که در سوپرهیترها و ری‌هیترهای بویلرها به‌ویژه بویلرهای صنعتی، دیده می‌شود، لوله‌های حامل جریان، تکیه‌گاه‌ها و اتصالاتی را که دمای سطحشان از دمای لوله‌های حامل جریان بیشتر است تحت تأثیر قرار می‌دهد.

### ۳.۱۱. عوامل خوردگی

امکان افزایش خاکسترهای خورنده در موارد زیر وجود دارد:

۱. استفاده از مازوتی که دارای مقادیر بالای وانادیم، سدیم، گوگرد و ترکیب این عناصر باشد؛
۲. هوای اضافی بیش از حد برای تشکیل  $V_2O_5$  وجود داشته باشد؛
۳. دمای فلز از ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۰ درجه فارنهایت) بالاتر رود. با افزایش دما، محدوده ترکیبات  $Na_2O \cdot V_2O_5$  که مایع تشکیل می‌دهند، گسترش می‌یابد (شکل ۱.۱۱)؛
۴. تغییر میزان سوخت؛
۵. تغییر نوع سوخت.



شکل ۱.۱۱. رابطه میان دما و ترکیبات مایعی که دارای  $Na_2O$  و  $V_2O_5$  هستند.

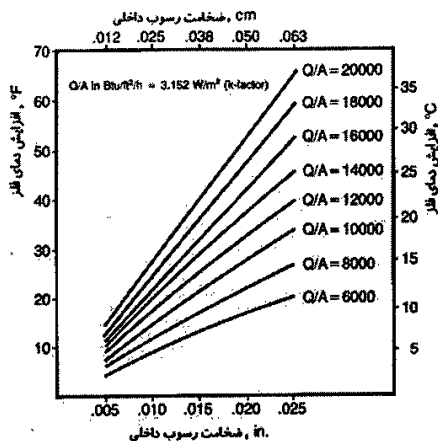
تذکر: با توجه به شکل ۲.۱۱، با افزایش ضخامت لایه رسوب‌های داخلی، دمای فلز نیز افزایش می‌یابد، زیرا رسوب‌ها مثل عایق حرارتی عمل می‌کنند. از این رو در واحدهای قدیمی‌تر که ممکن است لایه‌های ضخیمی از رسوب‌های داخلی داشته باشند، دمای فلز افزایش می‌یابد و احتمال دارد از دمای ذوب کمپلکس‌های سدیم-وانادیم بالاتر رود. اگر این امر رخ دهد، احتمال وقوع مشکلات نامنتظره مربوط به خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی افزایش می‌یابد؛ حتی اگر پارامترهای بهره‌برداری و ماهیت شیمیایی سوخت، بدون تغییر باقی مانده باشند.

#### ۴.۱۱. علائم خوردگی

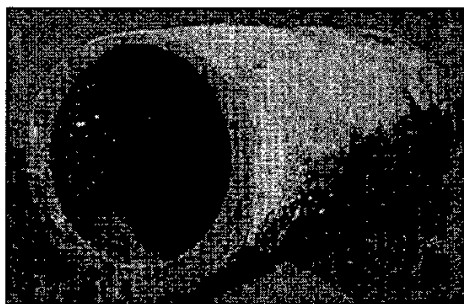
شکل ۳.۱۱ ظاهر خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی را در یک لوله ساخته شده از فولاد کم‌آلیاژ نشان می‌دهد. شکل ۴.۱۱ نیز مقطعی از یک لوله ری‌هیتر ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن را که دچار خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی شده است، نشان می‌دهد.

شکل ۵.۱۱ خوردگی یک لوله ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن را در محل یک اتصال نشان می‌دهد. اتصالاتی که در مسیر محصولات احتراق قرار دارند، به‌عنوان یک فین انتقال حرارت عمل می‌کنند و باعث افزایش دما در پایه اتصال می‌شوند.

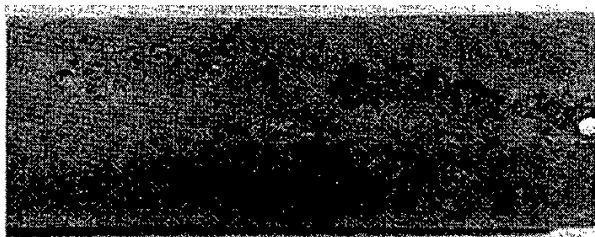
به‌طور کلی، در هر نقطه‌ای که دمای فلز از ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۰ درجه فارنهایت) بیشتر شود، خوردگی شدید ناشی از خاکستر مواد نفتی رخ می‌دهد.



شکل ۲.۱۱. رابطه میان افزایش دمای فلز و ضخامت رسوب داخلی لوله‌های حامل بخار



شکل ۳.۱۱. کاهش ضخامت دیواره بر اثر خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی.  
نرخ خوردگی ۰/۷۶ میلی‌متر در سال (۳۰ میلی‌اینچ در سال) است.



شکل ۴.۱۱. خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی در یک لوله ری‌هیتر زنگ‌نزن



شکل ۵.۱۱. خوردگی دما بالا در محل وصل شدن یک اتصال به یک لوله ری‌هیتر زنگ‌نزن (قسمت بالایی شکل)

### ۵.۱۱. روش‌های پیشگیری از خوردگی

اولین گام در مقابله با خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی، آنالیز شیمیایی سوخت و خاکستر برای تعیین احتمال وجود ترکیبات خورنده است. همچنین آگاهی از نقطه ذوب خاکستر مهم و توصیه شده است.

پیشگیری از خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی، با کنترل عوامل مؤثر در خوردگی انجام می‌شود. می‌توان برخی کارها را انجام داد:

۱. اگر سوخت‌هایی که دارای مقادیر خیلی کم وانادیم، سدیم و گوگردند قابل شناسایی نباشند، افزودن موادی به سوخت برای جلوگیری از تشکیل یونکتیک‌هایی با دمای ذوب پایین<sup>۱</sup> توصیه می‌شود. ثابت شده است که استفاده از ترکیبات منیزیم، به لحاظ اقتصادی در کاهش مشکلات ناشی از خوردگی خاکستر مواد نفتی مؤثر است. منیزیم، کمپلکسی را با وانادیم تشکیل می‌دهد ( $3MgO.V_2O_5$ ) که دمای ذوب آن به اندازه کافی بالاتر از دمای ایجاد شده در اغلب سوپرهیترها و ری‌هیترهاست؛

۲. برای کاهش امکان تشکیل  $V_2O_5$ ، احتراق بویلر باید با مقادیر کمتری از هوای اضافی انجام شود؛

۳. باید از افزایش دمای سوپرهیترها و ری‌هیترها به مقادیر بالاتر از ۵۹۳ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۰ درجه فارنهایت) اجتناب شود؛

۴. بویلرهایی که سوپرهیتر و ری‌هیتر آن‌ها قابلیت تخلیه دارند<sup>۲</sup>، باید برای جلوگیری از ایجاد رسوب‌های داخلی زیاد، به‌طور متناوب شستشوی شیمیایی شوند.

تذکر: بازدیدهای سالانه ضخامت دیواره لوله با استفاده از تست‌های آلتراسونیک، می‌تواند احتمال خرابی در آینده را نشان دهد. در صورت وقوع خرابی، بررسی ضخامت دیواره می‌تواند وسعت و شدت خرابی را مشخص کند.

### منابع

[1] Port, Robert D., Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, 1991.



## فصل ۱۲

### خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ [1]

#### ۱.۱۲. مکانیسم خوردگی

قرار گرفتن مواد معدنی موجود در زغال سنگ در معرض دمای بالا، حین احتراق زغال سنگ، باعث آزاد شدن ترکیبات قلیایی فرآر و اکسیدهای گوگردی می شود. خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ<sup>۱</sup> هنگامی رخ می دهد که خاکستر معلق، روی سطوحی با دمای بین ۵۶۶ تا ۷۳۲ درجه سانتی گراد (۱۰۵۰ تا ۱۳۵۰ درجه فارنهایت) رسوب می کند. ترکیبات قلیایی فرآر و ترکیبات گوگرددار روی خاکستر معلق، تقطیر می شوند و در سطح جدایش فلز و رسوب، برای تشکیل سولفات های قلیایی<sup>۲</sup> مانند  $K_3Fe(SO_4)_3$  و  $Na_3Fe(SO_4)_3$  با خاکستر واکنش می دهند. خاکستر گداخته سبب ذوب اکسید محافظی می شود که فلز را پوشانده است و در نتیجه فلز زیر آن در معرض اکسیداسیون سریع قرار می گیرد. کاهش ضخامت دیواره بر اثر این نوع خوردگی، باعث افزایش تنش در دیواره می شود. تنش زیاد دیواره و دمای بالای فلز، به شکست منجر می شود.

#### ۲.۱۲. محل وقوع خوردگی

خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ، نوعی خوردگی دمابالا و در فاز مایع است که در فلزاتی که دمای سطح آن ها بین ۵۶۶ تا ۷۳۲ درجه سانتی گراد (۱۰۵۰ تا ۱۳۵۰ درجه فارنهایت) است، رخ می دهد. می توان گفت، این نوع خوردگی معمولاً در سوپرهیترها و ری هیترها اتفاق می افتد. اغلب شدت خوردگی در لوله هایی که دمای بخار درونشان بالاتر است، بیشتر خواهد بود. به طور کلی، بیشترین نرخ خوردگی در لوله های خروجی سوپرهیتراهای تشعشعی و ری هیترهای پلاتن مشاهده می شود.

---

1. coal-ash corrosion

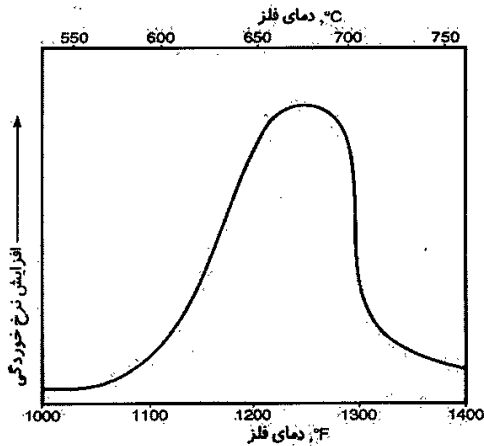
2. complex alkali sulfates

### ۳.۱۲. عوامل خوردگی

عوامل خوردگی ناشی از خاکستر زغال‌سنگ عبارت‌اند از:

۱. استفاده از زغال‌سنگی که خاکستر خورنده ایجاد می‌کند: خوردگی می‌تواند بر اثر هر نوع زغال‌سنگ بتمنس<sup>۱</sup> ایجاد شود، اما احتمال خوردگی بر اثر زغال‌سنگ‌هایی که بیش از ۳/۵٪ گوگرد و ۰/۲۵٪ کلر دارند، بیشتر است؛

۲. شرایطی که باعث شود دمای فلز در محدوده ۵۶۶ تا ۷۳۲ درجه سانتی‌گراد (۱۰۵۰ تا ۱۳۵۰ درجه فارنهایت) قرار گیرد: نرخ خوردگی رابطه غیرخطی با دما دارد، به طوری که در دماهای بین ۶۷۷ تا ۷۳۲ درجه سانتی‌گراد (۱۲۵۰ تا ۱۳۵۰ درجه فارنهایت) به حداکثر می‌رسد. در دماهای بالاتر، به دلیل تجزیه حرارتی مواد خورنده، نرخ خوردگی به سرعت کاهش می‌یابد (شکل ۱.۱۲).



شکل ۱.۱۲. رابطه غیرخطی میان دما و نرخ خوردگی

### ۴.۱۲. علائم خوردگی

به طور کلی، سطوح خورده‌شده دارای شیارند و ظاهری زبر و ناصاف دارند (شکل ۲.۱۲). علائم

1. Bituminous Coal: long-flame coals, containing high proportion of volatile hydrocarbons; generally classed as coking and noncoking (chambers dictionary of science and technology).



خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ، بسته به جنس لوله، متفاوت است. می توان بر اساس جنس لوله های به کار رفته در بویلر، علائم خوردگی را دسته بندی کرد:

۱. فولادهای زنگ نزن آستنیتی: لوله های ساخته شده از فولادهای زنگ نزن آستنیتی، ممکن است ظاهری آبله مانند<sup>۱</sup> پیدا کنند.

۲. فولادهای کربنی کم آلیاژ: معمولاً در سطح برخورد محصولات احتراق به لوله های ساخته شده از فولادهای کربنی کم آلیاژ، دو ناحیه پهن در زوایای  $30^{\circ}$  تا  $45^{\circ}$  ایجاد می شود (شکل ۳.۱۲).



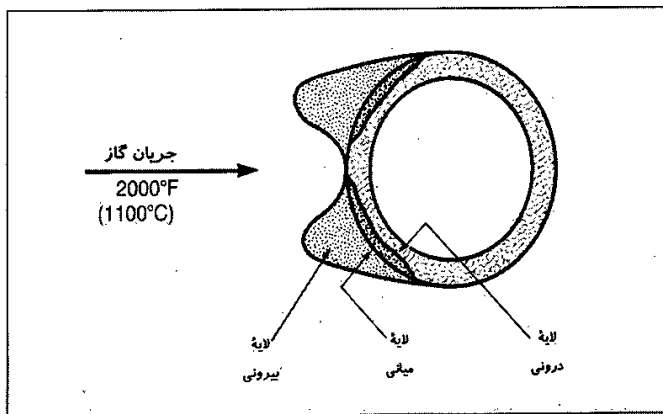
شکل ۲.۱۲. لوله سوپر هیتتر ASME SA213-T22 که بر اثر کاهش ضخامت ناشی از خوردگی با خاکستر زغال سنگ، دچار شکست شده است.

در این نوع خوردگی، همیشه یک رسوب جوش شده<sup>۲</sup> یا سرباره ای<sup>۳</sup> وجود دارد که به شدت به سطح فلز چسبیده است. این رسوب، شامل سه لایه مجزا است (شکل ۳.۱۲): لایه خارجی که یک لایه حجیم از خاکستر معلق متخلخل است؛ لایه میانی که شامل سولفات های قلبیایی محلول در آب است که رنگی مایل به سفید دارند. رسوب های این لایه عامل خوردگی اند. معمولاً این لایه ۰/۷۹ تا ۶/۳۵ میلی متر ضخامت دارد. و لایه نازک درونی که ترکیبی از اکسیدهای آهن سیاه براق و سولفیدهاست که در سطح فلز قرار دارد. این لایه به ندرت از حدود ۳/۲ میلی متر ضخیم تر می شود.

اندازه گیری ضخامت با استفاده از تست های آلتراسونیک در زوایای  $30^{\circ}$  تا  $45^{\circ}$ ، در سمتی از لوله که محصولات احتراق به آن برخورد می کنند، وقوع خوردگی چشمگیری را نشان خواهد داد.

1. pock marked  
3. slag-type

2. sintered



شکل ۳.۱۲. لایه‌های رسوب در خوردگی ناشی از خاکستر زغال‌سنگ

### ۵.۱۲. روش‌های پیشگیری از خوردگی

به‌طور کلی، آنالیز شیمیایی سوخت، رسوب‌ها و خاکستر، برای شناسایی نوع مواد خورنده موجود توصیه می‌شود. ممکن است تعیین دمای ذوب خاکستر نیز ارزشمند باشد. با توجه به عوامل مؤثر در این نوع خوردگی، ممکن است مخلوط کردن زغال‌سنگ‌ها (برای کاهش درصد مواد خورنده) و نیز کاهش دما مفید باشد. برای کاهش دمای فلز، موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- کاهش دمای بخار
- تمیز کردن متناوب سوپرهیترها و ری‌هیترها با قابلیت تخلیه به‌منظور جلوگیری از ایجاد رسوب‌های داخلی
- طراحی مجدد نواحی خورده‌شده به‌منظور کاهش نرخ انتقال حرارت
- اگر خوردگی شدید نباشد، ممکن است برخی راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه برای رفع مشکل وجود داشته باشد:
- تعویض متناوب لوله‌ها
- استفاده از لوله‌های ضخیم‌تر
- استفاده از پوشش‌های حرارتی<sup>۱</sup>
- جوشکاری لایه‌ای<sup>۲</sup>

1. thermal spray coating

2. pad welding

• استفاده از سپرهای فولادی زنگ‌نزن روی نواحی خورده‌شده (این کار عمر لوله را افزایش می‌دهد).

• مواد افزودنی به سوخت برای مقابله با خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ در مواقعی که خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ شدید باشد، ممکن است پوشش لوله‌ها با یک آلیاژ مقاوم مفید واقع شود. البته مواد افزودنی به سوخت برای مقابله با خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ، به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست.

در صورت آگاهی از وقوع خوردگی، تست‌های آلتراسونیک تعیین ضخامت برای شناسایی وسعت و شدت خوردگی مفیدند.

## ۶.۱۲. بررسی یک نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر

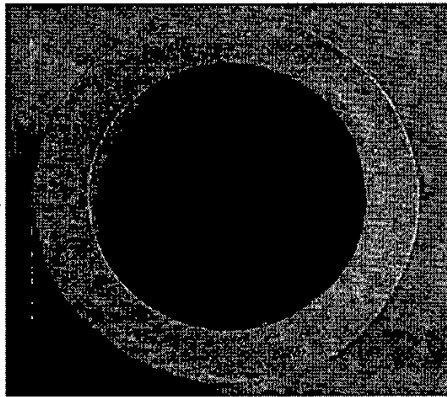
### خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	خروجی سوپرهیتر ثانویه
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۲۱ سال
رژیم شیمیایی آب:	AVT
فشار درام:	۱۷/۲ MPa (۲۵۰۰ psi)
دمای بخار:	۵۶۶ °C (۱۰۵۰ °F)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۴ cm (۲/۱۲۵in).
سوخت:	جنس: فولاد زنگ‌نزن استنیسی (SS321) زغال سنگ، خاکستر: ۱۰٪، گوگرد: ۷٪

شرایط بهره‌برداری از بویلر: از این بویلر به‌طور مداوم بهره‌برداری شده است. علائم ناشی از خوردگی: بویلی که لوله‌های نشان‌داده‌شده در شکل‌های ۴.۱۲ و ۵.۱۲ از آن جدا شده‌اند، در خروجی سوپرهیتر ثانویه دچار خوردگی درازمدت بوده است. ۱۰ خرابی مجزا در دوره ۳ساله رخ داده است.



شکل ۴.۱۲. سطح خارجی ناحیه خورده شده؛ به ظاهر آبله‌مانند سطح که از ویژگی‌های خوردگی در فولاد زنگ‌نزن است توجه کنید.



شکل ۵.۱۲. مقطعی از لوله که از بین رفتن فلز را نشان می‌دهد.

لوله ارائه شده برای آزمایش، دچار خرابی نشده، اما دچار خوردگی شدیدی به عرض  $2/5$  سانتی‌متر در سطح خارجی شده است. اندازه‌گیری‌ها، کاهش ضخامت دیواره لوله را به اندازه  $2/2$  میلی‌متر نشان می‌دهد. آزمایش‌های ریزساختاری، وجود یوتکتیک‌های جامد شده از خاکستر گداخته را که سطح خارجی ناحیه خورده شده را پوشانده‌اند، و آنالیز شیمیایی ماده‌ای که ناحیه خورده شده را پوشانده است، وجود مقادیر زیاد آهن، گوگرد، پتاسیم و ترکیبات خاکستر معلق را نشان می‌دهند.

#### 1. solidified eutectics of slag

فصل ۱۲. خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ ۲۵۱

علت خوردگی: شواهد حاصل از بازدیدهای چشمی، ریزساختاری و آنالیز شیمیایی، علت از بین رفتن فلز را خوردگی ناشی از خاکستر زغال سنگ بر اثر تشکیل سولفات‌های قلیایی<sup>۱</sup> در سطح فلز بیان می‌کند.

## منابع

[1] Port, Robert D., Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, 1991.



## فصل ۱۳

### خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آبی [1]

#### ۱.۱۳. مکانیسم خوردگی

خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آبی<sup>۱</sup> هنگامی تشدید می‌شود که احتراق سوخت، ناقص باشد. احتراق ناقص، باعث آزاد شدن ترکیبات گوگردار فرآر می‌شود که در دماهای بالا، پیروسولفات<sup>۲</sup> تشکیل می‌دهند. ممکن است پیروسولفات‌های سدیم و پتاسیم ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$  و  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ ) دمای ذوب ۴۲۷ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ درجه فارنهایت) و حتی کمتر داشته باشند. هر دو ترکیب یادشده فعالیت شیمیایی بالایی دارند. این خاکسترهای گداخته، لایه مگنتیت محافظ روی سطح لوله را ذوب می‌کنند و باعث خوردگی سریع فلز در امتداد تاج لوله<sup>۳</sup> می‌شوند.

#### ۲.۱۳. محل وقوع خوردگی

همان‌طور که از عنوان فصل برمی‌آید، این نوع خوردگی، سمت آتش لوله‌های دیواره آبی بویلرهای زغال‌سوز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بویلرهایی که فاصله میان مشعل و دیواره کناری یا مشعل و دیواره پشتی‌شان کم است، اغلب دچار این نوع خوردگی می‌شوند. خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آبی، مکرراً در محدوده جعبه توزیع هوا<sup>۴</sup> یا مشعل مشاهده می‌شود.

#### ۳.۱۳. عوامل خوردگی

از جمله عوامل اصلی ایجاد خوردگی لوله‌های دیواره آبی، می‌توان موارد زیر را نام برد:

۱. اکسیژن ناکافی در محدوده مشعل؛

۲. احتراق ناقص؛

۳. برخورد دائمی یا متناوب شعله با دیواره کوره؛

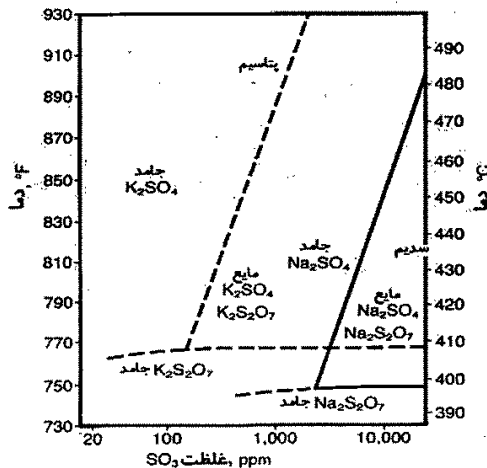
1. waterwall-fire-side corrosion

2. pyrosulfate

3. crown of tube

4. wind box

۴. استفاده از زغال‌سنگ‌هایی که قادرند خاکستر با دمای ذوب پایین تشکیل دهند. بسته به مقدار  $SO_3$  موجود در نمک، ممکن است دمای ذوب  $K_2S_2O_7$  از ۳۹۶ درجه سانتی‌گراد (۷۷۰ درجه فارنهایت) کمتر و برای  $Na_2S_2O_7$ ، در حدود ۳۸۷ درجه سانتی‌گراد (۷۵۴ درجه فارنهایت) باشد (شکل ۱.۱۳). با افزایش دما، مقدار  $SO_3$  لازم برای ایجاد فاز مایع نیز به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در نتیجه، احتمال تشکیل فاز مایع پیروسولفات‌های سدیم و پتاسیم، فقط در سطوح سردی مانند لوله‌های دیواره‌آبی وجود دارد.



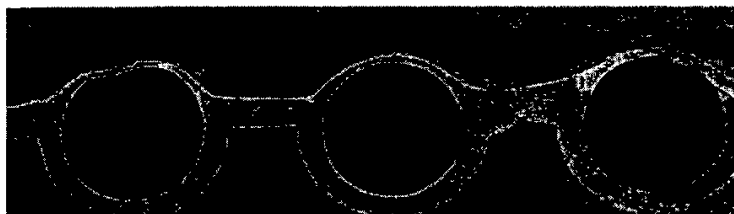
شکل ۱.۱۳. رابطه دما و غلظت  $SO_3$  برای تولید فازهای جامد و مایع  $Na_2SO_4 \cdot SO_3$  و  $K_2SO_4 \cdot SO_3$

### ۴.۱۳. علائم خوردگی

موارد زیر را می‌توان از علائم خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره‌آبی دانست:

۱. این خوردگی بیشتر در امتداد تاج لوله اتفاق می‌افتد. همچنین ممکن است در چند لوله که در موقعیت یکسانی قرار دارند، رخ دهد (شکل ۲.۱۳)؛
۲. ممکن است نواحی خورده‌شده، با لایه‌های ضخیم و غیرعادی محصولات خوردگی شامل اکسید آهن و سولفید آهن، پوشیده شده باشند. گاهی مسیر حرکت پیروسولفات‌های مایع در نواحی خورده‌شده، مشاهده‌پذیرند.





شکل ۲.۱۳. از بین رفتن شدید فلز سمت آتش در لوله‌های دیواره آبی

نکته ۱: ممکن است آنالیز شیمیایی سوخت و خاکستر، برای تعیین میزان مواد خورنده لازم باشد. تعیین میزان کامل بودن احتراق، می‌تواند نشان‌دهنده فعال بودن خوردگی باشد. احتراق نامنظم، عملکرد نامناسب مشعل‌ها، شعله بلند و میزان کربن بالای خاکستر (۳٪ یا بیشتر) نیز نشان‌دهنده خوردگی احتمالی در لوله‌های دیواره آبی است.

نکته ۲: ممکن است در نواحی مظنون به خوردگی، استفاده از تست‌های ضخامت‌سنجی آلتراسونیک، فعال بودن، وسعت و نرخ خوردگی را مشخص کند.

### ۵.۱۳. روش‌های پیشگیری از خوردگی

از آنجاکه عوامل مؤثر در این نوع خوردگی به کیفیت احتراق وابسته‌اند، کاهش یا حذف این نوع خوردگی می‌تواند با اعمال تغییرات مناسب در فرایند احتراق محقق شود. این تغییرات می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

۱. بهبود بازده سوختن با آسیاب کردن زغال‌سنگ در اندازه‌های کوچک‌تر و یکنواخت‌تر؛
۲. موازنه سوخت در مشعل‌ها؛
۳. تنظیم مشعل‌ها برای جلوگیری از برخورد شعله با دیواره؛
۴. افزایش و توزیع مجدد هوای ثانویه<sup>۱</sup>؛
۵. در صورتی که شدت خرابی زیاد نباشد، ممکن است جوشکاری نواحی خورده‌شده<sup>۲</sup> مناسب باشد؛
۶. اگر خرابی شدید باشد، ممکن است نصب لوله‌های ضخیم‌تر یا لوله‌های ساخته‌شده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی، استفاده از پوشش‌های حرارتی، روکش‌دار کردن لوله‌ها<sup>۳</sup> و استفاده از سپرهای محافظ<sup>۴</sup> مقرون به‌صرفه باشد.

1. secondary air  
3. cladding of tubes

2. patch welding  
4. shields

نکته ۱: تجربه نشان داده است با اصلاحات فوق، بهبود کمی در احتراق حاصل می‌شود. برای بهبود اساسی، ممکن است اعمال تغییراتی در طراحی کوره ضروری باشد.

نکته ۲: تا کنون<sup>۱</sup> افزودنی‌های سوخت، به لحاظ اقتصادی در کاهش خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آبی موفقیت‌آمیز نبوده‌اند.

نکته ۳: برای تعیین وسعت و شدت خرابی موجود، از آزمایش‌های ضخامت‌سنجی آلتراسونیک استفاده می‌شود.

### ۶.۱۳. بررسی چند نمونه از مشکلات به وجود آمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی سمت آتش لوله‌های دیواره آبی

#### □ نمونه اول

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	لوله کف بویلر
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۳۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۴/۸ MPa (۲۱۵۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)، دارای گل‌میخ <sup>۲</sup>
سوخت:	زغال سنگ، خاکستر: ۱۳٪

علائم ناشی از خوردگی: ۶ لوله سقف بویلر طی چند هفته دچار خرابی مشابه شکل ۳.۱۳ شده‌اند. بازدید چشمی سطح خارجی یکی از لوله‌ها، وجود شکافی طولی و عمیق در ریشه «گل‌میخ» را نشان می‌دهد (شکل ۳.۱۳). این سطح با خاکسترهای سخت، چسبنده و به رنگ روشن، پوشیده شده است. آنالیز شیمیایی خاکسترهای سمت آتش، وجود ۴۲٪ گوگرد و ۱۸٪ سدیم را نشان می‌دهد. pH محلول ۱ درصدی از رسوب، ۲/۹ است. آزمایش‌های ریزساختاری،

۱. تاریخ انتشار منبع [۱] سال ۱۹۹۱ است.

هیچ تغییر بیش‌گرمایشی در فلز لوله نشان نمی‌دهند، اما شکاف‌های عمیق و درون‌دانه‌ای، با یوتکتیک سولفات<sup>۱</sup> سرچشمه‌گرفته از سطح خارجی، پر شده‌اند.



شکل ۳.۱۳. ترک طولی در مجاورت یک گل‌میخ. ترک بر اثر تنش ناشی از فشار داخلی و وجود نمک‌های مذاب ایجاد شده است.

علت خوردگی: بازدیدهای چشمی و ریزساختاری به‌همراه آنالیز شیمیایی خاکستر، نشان می‌دهد ترک نشان‌داده‌شده در شکل ۳.۱۳، بر اثر نفوذ پیروسولفات سدیم مذاب، در فضای مرزدانه‌های فلز دیواره لوله و حین بهره‌برداری از بویلر ایجاد شده است. تنش اعمالی بر اثر فشار داخلی نیز در نفوذ درون‌دانه‌ای مؤثر بوده است. آزمایش‌های ریزساختاری نشان می‌دهد این حمله به ناحیه کوچکی اطراف ترک اصلی محدود شده است. وجود پیروسولفات‌های سدیم نشان‌دهنده احتراق ناقص در منطقه احتراق<sup>۲</sup> است. ممکن است این شرایط بر اثر اکسیژن ناکافی در محدوده مشعل و آسیاب نامناسب زغال‌سنگ ایجاد شده باشد. همچنین فقدان اکسیژن کافی در محدوده مشعل، احتمالاً بر اثر کافی‌نبودن هوای اضافی بوده است.

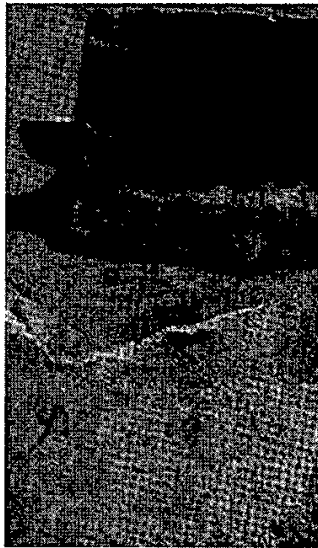
1. complex sulphate eutectic

2. fire box

□ نمونه دوم

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	مجاور به ورودی هوای اولیه در یک بویلر بازیاب
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۰ سال
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
جنس:	فولاد کربنی به همراه روکشی از فولاد زنگ‌نزن
سوخت:	black liquor

علائم ناشی از خوردگی: خوردگی فلز، به یک ناحیه بیضوی در سطح خارجی و به مرکزیت فین محدود شده است (شکل ۴.۱۳). روکش ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن و مقداری از فولاد کربنی زیر آن، خورده شده است.



شکل ۴.۱۳. خوردگی فلز در اطراف یک فین بر اثر قرارگرفتن پوشش فولادی زنگ‌نزن لوله در معرض نمک سدیم مذاب

ناحیه خورده شده با یک لایه قهوه‌ای رنگ از محصولات خوردگی و رسوب‌ها پوشیده شده است. آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد این لایه حاوی ۵۲٪ آهن، ۲۴٪ سدیم و ۱۴٪ کربنات است. علت خوردگی: شواهد چشمی و ریزساختاری به همراه آنالیز محصولات خوردگی، نشان می‌دهند خوردگی، ناشی از قرار گرفتن فلز در معرض نمک سدیم مذاب است. ممکن است دمای ذوب این نمک بر اثر وجود کربنات کاهش یافته باشد. نرخ خوردگی فلز در این نوع خوردگی، بسته به دمای فلز و طراحی کوره تغییر می‌کند. خوردگی‌هایی با نرخ ۰/۷۶ میلی‌متر در سال (۳۰ میلی‌اینچ در سال) نیز گزارش شده‌اند.

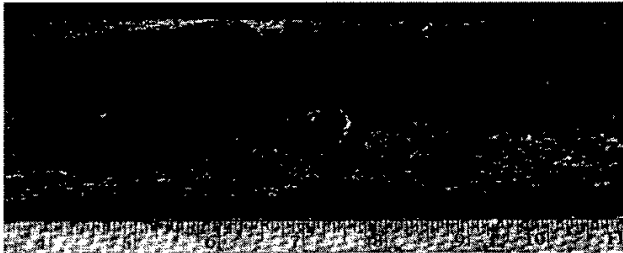
روش‌های پیشگیری از خوردگی: کاهش این مشکل نیازمند پرکردن شیارهای ایجاد شده زیر فین‌هاست تا مسیر عبور محصولات احتراق مسدود شود. پیش‌بینی می‌شود به کمک جوش از جنس فولاد زنگ‌نزن با نیکل بالا و همین‌طور پوشش حرارتی، بازسازی خرابی بسیار موفقیت‌آمیز باشد.

□ نمونه سوم

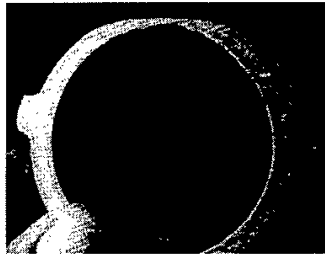
صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای مربوط به یک بویلر بازیاب
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۳ سال
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۶ MPa (۸۷۵ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)
سوخت:	black liquor

علائم ناشی از خوردگی: خوردگی مشاهده‌پذیر در شکل‌های ۵.۱۳ و ۶.۱۳، در لوله‌های دیواره‌ای رخ داده است که در فاصله ۱۲/۲ متر (۴۰ فوت) بالاتر از کف کوره و ۱/۲ متر (۴ فوت) بالاتر از مشعل سوخت مایع قرار داشته‌اند. قبلاً خرابی‌هایی از این نوع رخ نداده بود. نمونه نشان داده شده، قبل از جدا کردن با آب شسته شده و ممکن است آب، مواد مذاب منجمد شده را از سطح جدا کرده باشد. سمت آتش این بویلر، هر سال دو بار با آب شستشو شده است.

سوراخی به قطر ۹/۵ میلی‌متر روی تاج لوله و در مرکز ناحیه‌ای که به شدت خورده شده، ایجاد شده است (شکل ۵.۱۳). خوردگی، ناحیه گودشده عمیق و بهنی ایجاد کرده که سطح را تخت و هموار کرده است. آزمایش‌های ریزساختاری، هیچ نشانه‌ای از بیش‌گرمایش نشان نمی‌دهند. علت خوردگی: محدودشدن خوردگی به ناحیه مشعل سوخت مایع، نشان می‌دهد حین بهره‌برداری از مشعل سوخت مایع، یک فاز مذاب خورنده با دمای ذوب پایین، به‌طور موضعی ایجاد شده است. بنابراین در این مورد، خوردگی فقط حین استفاده از سوخت مایع که به‌صورت متناوب بوده، رخ داده است. به‌رحال مجموع خوردگی طی ۱۳ سال بهره‌برداری، ظاهراً برای بروز این نوع خرابی کافی بوده است.



شکل ۵.۱۳. ایجاد سوراخ در محل خوردگی شدید فلز



شکل ۶.۱۳. از بین رفتن شدید فلز در امتداد تاج لوله بر اثر قرارگرفتن در معرض فاز مذاب

## منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

## فصل ۱۴

### خوردگی قسمت‌های سرد حین بهره‌برداری

(cold-end corrosion during service)

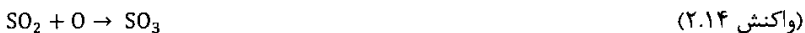
#### ۱.۱۴. مکانیسم خوردگی [1]

در اغلب سیستم‌های احتراق، دمای محصولات احتراق، از ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد (۳۰۰۰ درجه فارنهایت) در شعله تا ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد (۲۵۰ درجه فارنهایت) یا کمتر در دودکش، کاهش می‌یابد. این تغییر دما، باعث تغییرات فیزیکی و شیمیایی فراوانی در اجزای محصولات احتراق می‌شود. در میان تغییراتی که اغلب به وجود می‌آید، واکنش بین بخار آب و تری‌اکسید گوگرد برای تشکیل اسید سولفوریک ( $SO_3$ )، از دردمسازترین موارد است.

وقتی دود سرد می‌شود، اسید سولفوریک در فاز بخار تشکیل می‌شود. اگر بخار اسید سولفوریک با یک سطح نسبتاً سرد برخورد کند، ممکن است به شکل اسید سولفوریک مایع تقطیر شود. خوردگی ناشی از تقطیر اسید سولفوریک روی سطوح فلزی، «خوردگی قسمت‌های سرد» نامیده می‌شود، زیرا به طور کلی نواحی سردتر سیستم احتراق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور کلی، این مسئله در احتراق سوخت‌هایی رخ می‌دهد که گوگرد یا ترکیبات گوگرددار داشته باشند. گوگرد موجود در سوخت با ترتیب زیر به دی‌اکسید گوگرد تبدیل می‌شود:



نسبت کمی (۱٪ تا ۳٪) از دی‌اکسید گوگرد تولیدشده، با واکنش مستقیم با اکسیژن اتمی در مشعل، به شکل تری‌اکسید گوگرد اکسید می‌شود:



چنانچه اکسید فریک<sup>۱</sup>، پنتااکسید وانادیم یا نیکل وجود داشته باشند، امکان اکسیداسیون کاتالیزوری نیز برای تشکیل  $SO_3$  وجود خواهد داشت:

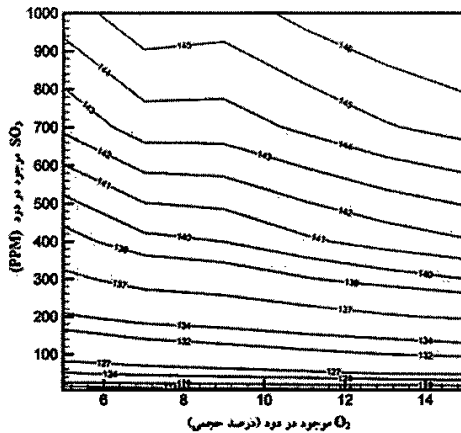
1. ferric oxide



امکان وقوع خوردگی در هر نقطه‌ای که دمای فلز از نقطه شبنم اسید سولفوریک کمتر باشد، وجود دارد. زیر نقطه شبنم، اسید سولفوریک روی سطوح فلزی تقطیر می‌شود و فلز را دچار خوردگی می‌کند:



باید توجه داشت که منظور از دما، دمای فلز است، یعنی اگر دمای دود بالاتر از نقطه شبنم باشد، امکان خوردگی در محل‌هایی که دمای فلز از دمای نقطه شبنم کمتر است، وجود دارد. هر ۱٪ افزایش بخار آب، تقریباً ۱ درجه سانتی‌گراد دمای نقطه شبنم را افزایش می‌دهد. رسوب‌های روی سطح نیز بر نقطه شبنم تأثیر گذارند. دمای نقطه شبنم یک سطح تمیز نسبت به یک سطح رسوب‌گرفته، می‌تواند تا ۶ درجه سانتی‌گراد کمتر باشد. در شکل ۱.۱۴، به‌منظور تخمین مناسب دمای نقطه شبنم اسیدی، در شرایطی که ۱۰٪ حجمی بخار آب در محصولات احتراق وجود دارد و فشار محصولات احتراق نیز ۱ اتمسفر است، نمودار تغییر دمای نقطه شبنم با  $\text{O}_2$  و  $\text{SO}_2$  موجود در دود رسم شده است. در افزایش فشار محدود، هر ۰/۱ اتمسفر افزایش فشار محصولات احتراق، دمای نقطه شبنم اسیدی را حدود ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. باید توجه داشت که حداقل دمای خروجی باید ۵ تا ۱۰ درجه از این دما بالاتر باشد تا از مشکلات مربوط به خوردگی انتهای سرد پیشگیری شود [۲].

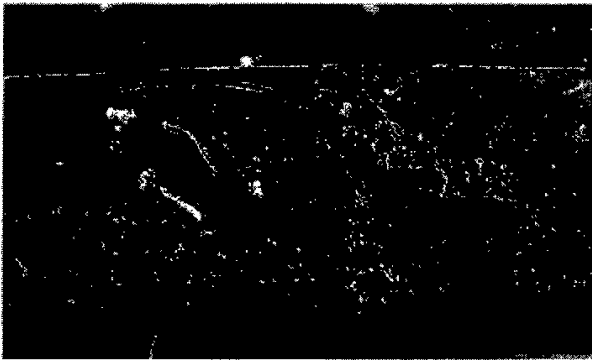


شکل ۱.۱۴. دمای نقطه شبنم دود با ۱۰٪ حجمی بخار آب و فشار ۱ اتمسفر [۲]



### ۲.۱۴. محل وقوع خوردگی [1]

خوردگی قسمت‌های سرد در محل‌هایی رخ می‌دهد که دمای فلز از دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک موجود در دود کمتر شود. مشکلات به‌وجودآمده بر اثر این نوع خوردگی، اغلب اجزایی از بویلر را که دمای دودشان پایین است، مثل اکونومایزر، پیش‌گرمکن هوا، فن مکش هوا و دودکش، تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل ۲.۱۴، خوردگی نقطه شبنم ناشی از میعان اسید سولفوریک در سطح بیرونی یک لوله نشان داده شده است.



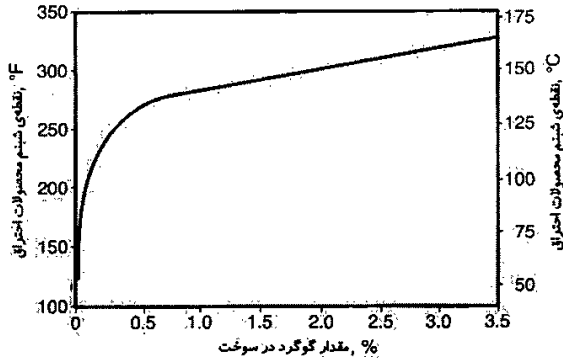
شکل ۲.۱۴. خوردگی نقطه شبنم ناشی از تری‌اکسید گوگرد

### ۳.۱۴. عوامل خوردگی [1]

سه عامل در خوردگی قسمت‌های سرد مؤثرند:

۱. وجود مقادیر خورنده تری‌اکسید گوگرد: مقدار تری‌اکسید گوگرد تولیدشده با افزایش میزان هوای اضافی، زمان توقف گازهای حاصل از احتراق، دمای گاز، مقدار کاتالیزورهای موجود و میزان گوگرد سوخت، افزایش می‌یابد (شکل ۳.۱۴)؛
۲. وجود رطوبت در محصولات احتراق: مقدار رطوبت تولیدشده، به عوامل بسیاری مانند حجم رطوبت موجود در سوخت، رطوبت ناشی از احتراق، نشتی لوله‌های بویلر و بخار دوده زدها بستگی دارد؛
۳. وجود فلزات با دمای سطح پایین‌تر از نقطه شبنم اسید سولفوریک: نقطه شبنم اسید سولفوریک، با افزایش مقدار تری‌اکسید گوگرد و رطوبت موجود در محصولات احتراق، افزایش می‌یابد.

دمایی که اسید سولفوریک تقطیر می‌شود (نقطه شبنم اسید سولفوریک)، بسته به میزان غلظت تری‌اکسید گوگرد و بخار آب، از ۱۱۶ تا ۱۶۶ درجه سانتی‌گراد (۲۴۰ تا ۳۳۰ درجه فارنهایت) و حتی تا مقادیر بالاتر تغییر می‌کند.



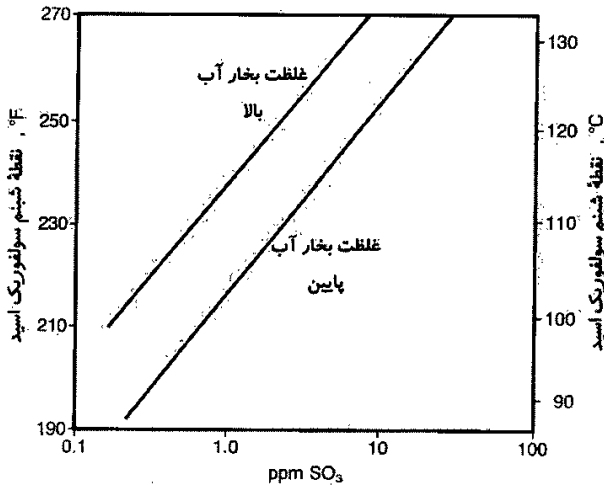
شکل ۴.۱۴. رابطه میان درصد گوگرد مازوت و نقطه شبنم گازهای حاصل از احتراق

در شکل ۴.۱۴ رابطه کلی میان غلظت تری‌اکسید گوگرد و نقطه شبنم نشان داده شده است. تذکر: شدت خوردگی قسمت‌های سرد، هنگام استفاده از سوخت‌های گازی ترش<sup>۱</sup> بسیار زیاد است، درحالی‌که شدت آن در سوخت‌های نفتی کمتر است. شدت خوردگی ناشی از زغال‌سنگ کمترین مقدار را دارد. بر اثر احتراق گاز طبیعی، بخار آب بسیاری تولید می‌شود و بنابراین بر اثر سوختن هم‌زمان گاز طبیعی و مازوتی که گوگرد و وانادیم دارند، در مقایسه با مواقعی که صرفاً از سوخت‌های نفتی استفاده می‌شود، خوردگی شدیدتری ایجاد می‌شود.

#### ۴.۱۴. علائم خوردگی [1]

خوردگی قسمت‌های سرد غالباً به‌صورت موضعی ایجاد نمی‌شود. سطوح خورده‌شده معمولاً یکنواخت و فاقد برجستگی‌اند. ممکن است سطوح زیر و دارای رنگی شبیه زنگار<sup>۲</sup> نیز مشاهده شوند. تذکر: ممکن است سطوح فلزی دچار این نوع خوردگی، با رسوب‌ها و (یا) محصولات خوردگی پوشیده شوند. این مسئله تشخیص خوردگی را با توجه به ظاهر آن مشکل می‌سازد.

همچنین، معمولاً در خوردگی قسمت‌های سرد، نواحی خورده‌شده هموار، یکنواخت و فاقد برجستگی‌اند که بسیار شبیه سطح اصلی و سالم است. بنابراین برای شناسایی وقوع احتمالی خوردگی، اندازه‌گیری ضخامت لوله به کمک تکنیک‌های آلتراسونیک مناسب است. برای مشخص کردن احتمال وقوع خوردگی با توجه به ظاهر لوله، می‌توان قسمتی از آن را جدا و سطح لوله و ضخامت آن را با لوله نو مقایسه کرد.



شکل ۴.۱۴. رابطه میان مقدار SO<sub>2</sub> دود و نقطه شبنم اسید سولفوریک

### ۵.۱۴. روش‌های پیشگیری از خوردگی [1]

با کنترل عوامل خوردگی، خوردگی قسمت‌های سرد اجتناب‌پذیر می‌شود. در این راستا، می‌توان کارهایی انجام داد:

۱. جلوگیری از حضور مقادیر خورنده تری‌اکسید گوگرد در دود. در این راستا، انجام کارهایی ضروری است:

الف) مقدار هوای اضافی بویلر ۵٪ یا کمتر باشد؛

ب) مقدار نشت هوا حداقل شود؛

ج) از سوخت‌های کم‌گوگرد استفاده شود.

۲. جلوگیری از حضور رطوبت بیش از حد در گازهای احتراق. در این راستا، انجام کارهایی

ضروری است:

الف) از سوخت‌های کم‌رطوبت استفاده شود؛

ب) از نشتی لوله‌های بویلر جلوگیری شود؛

ج) مقدار دوده‌زدایی با بخار کاهش یابد.

۳. حذف فلزات با دمای سطح پایین‌تر از نقطهٔ شبنم اسید سولفوریک. در این راستا، غالباً

تغییرات اساسی در طراحی لازم است.

تذکر: افزودن مواد شیمیایی خاصی به سوخت<sup>۱</sup> و (یا) اضافه‌کردن مواد خاصی در

قسمت‌های سرد<sup>۲</sup>، راه‌حل‌های شیمیایی رفع این مشکل‌اند.

## ۶.۱۴. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

### اثر خوردگی قسمت‌های سرد

□ نمونهٔ اول [1]

کاغذسازی	صنعت:
اکونومایزر	محل نمونه:
عمودی	نحوهٔ قرارگرفتن نمونه:
۲۰ سال	عمر نمونه:
۴/۱ MPa (۶۰۰ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)	مشخصه‌های لوله:
black liquor	سوخت:

علائم ناشی از خوردگی: شکل ۵.۱۴، نمای نزدیکی از سطح خارجی یک لولهٔ اکونومایزر را که

دچار خوردگی کلی شده است، نشان می‌دهد. به ظاهر «آبله‌مانند» سطح توجه کنید.

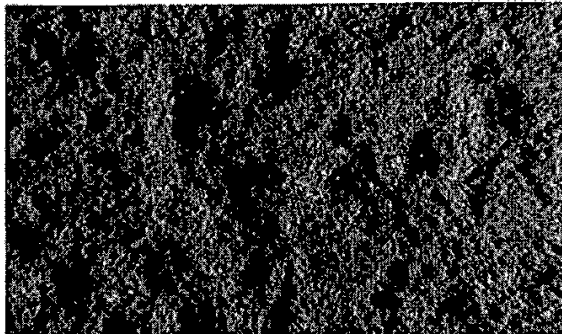
علت خوردگی: خوردگی در بخش‌هایی از اکونومایزر که اسید سولفوریک موجود در

محصولات احتراق تقطیر می‌شود، رخ داده است.

1. fuel additives

2. cold-end additives

این نوع خوردگی به‌طور کلی محل ورود آب به اکونومایزر، یعنی نقاط انتهایی که دمای فلز پایین است را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۵.۱۴. ظاهر آبله‌مانند لوله اکونومایزری که در معرض اسید سولفوریک تقطیر شده قرار گرفته است (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر).

□ نمونه دوم [1]

صنعت:	شکر
محل نمونه:	اکونومایزر
نحوه قرارگرفتن نمونه:	افقی
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۴/۸ cm (۱/۸۷۵ in)
سوخت:	مازوت شماره ۶ (گوگرد: ۱/۹٪)

علائم ناشی از خوردگی: خوردگی و سوراخ‌شدن لوله شکل ۶.۱۴، مشکل مزمن این بویلر است. سطح خارجی (شامل سطوح فین‌دار) به‌طور کامل و یکنواخت دچار خوردگی شده است. در بسیاری از موارد، خوردگی شدید در امتداد محل اتصال فین به لوله، باعث جدایش فین‌ها از لوله شده است. آنالیز رسوب‌ها و محصولات خوردگی روی سطوح خورده‌شده با روش انکسار اشعه X، نشان می‌دهد این مواد از سولفات‌های آهن هیدراته<sup>۱</sup> تشکیل شده‌اند. pH محلول ۱ درصدی این مواد، ۲/۳ اندازه‌گیری شده است.

1. hydrated iron sulfate

علت خوردگی: خوردگی حین بهره‌برداری و بر اثر تقطیر اسید سولفوریک روی سطوح سرد لوله ایجاد شده است.



شکل ۶.۱۴. خوردگی و سوراخ شدن لوله اکونومایزر فین دار، بر اثر قرارگرفتن در معرض اسید سولفوریک تقطیر شده. به جدایی فین‌ها از دیواره لوله توجه کنید.

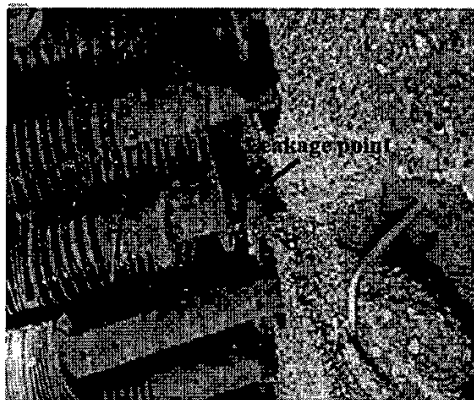
□ نمونه سوم [3]

صنعت:	شیمیایی
محل نمونه:	اکونومایزر بویلر بازیاب
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۴/۸ cm (۱/۸۷۵ in).
	ضخامت اولیه: ۴ mm، قطر داخلی: ۲۴ mm.
	جنس: ASTM A106

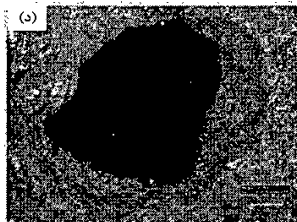
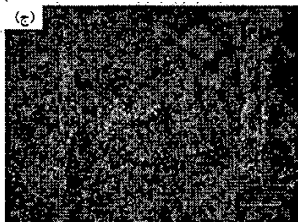
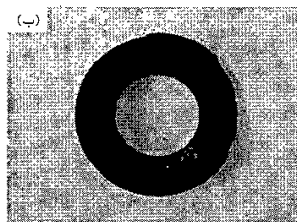
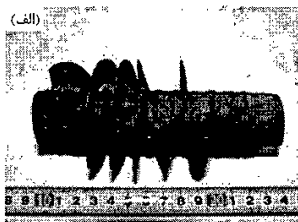
علائم ناشی از خوردگی: همان‌طور که در شکل ۷.۱۴ دیده می‌شود، سطح خارجی لوله‌ها پوشیده از رسوب و نشان‌دهنده خوردگی شدید است. بخشی از فین‌ها کاملاً خورده شده و یک لوله نیز سوراخ شده است.

چنان‌که در شکل ۸.۱۴ دیده می‌شود، فین‌ها به‌حدی خورده شده‌اند که اتصال میان لوله و فین از بین رفته و فین ماریچی به‌راحتی جدا شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود، سطح لوله آسیب‌دیده با رسوب‌های قرمز رنگ پوشیده شده است. محل اتصال فین به لوله، کاملاً از لوله محو شده است و آثار لبه‌های فین از بین رفته‌اند (شکل ۸.۱۴ ج). پارگی در لبه سوراخ لوله نامنظم است (شکل ۸.۱۴ د). ضخامت دیواره اطراف پارگی به کمتر از ۳ میلی‌متر کاهش یافته است. ضخامت باقی‌مانده و قطر داخلی نمونه‌ها در جدول ۱.۱۴ آمده است.



شکل ۷.۱۴. نقطه نشی در لوله‌های فین‌دار [3]



شکل ۸.۱۴. مورفولوژی لوله فین‌دار: (الف) نمونه لوله سوراخ‌شده فین‌دار؛ (ب) فین ماریبج؛ (ج) اثر ماریبج فین بر لوله؛ (د) سوراخ ایجادشده روی لوله [3].

جدول ۱.۱۴. ضخامت باقیمانده و متوسط قطر داخلی لوله‌های آسیب‌دیده [3]

نمونه	ضخامت اولیه (mm)	ضخامت باقی‌مانده (mm)	قطر داخلی اولیه (mm)	قطر داخلی متوسط (mm)
لولهٔ فین‌دار	۴	۲/۷۴	۲۴	۲۳/۴۴
لولهٔ ساده	۴	۱/۶۸	۲۴	۲۳/۷۲

چهار نمونه از رسوب‌های جمع‌آوری‌شده از لوله‌ها و فین‌های خورده‌شده با آنالیزور کربن-گوگرد مادون قرمز و آنالیزور اکسیژن-نیتروژن-هیدروژن، به ترتیب برای تعیین دقیق محتوای گوگرد و نیتروژن آزمایش شدند. نتایج تجزیه و تحلیل در جدول ۲.۱۴ آمده است. مجموع گوگرد موجود در چهار نمونه، به بیش از ۰/۱٪، و در نمونهٔ ۳ (بیشترین مقدار) به ۰/۶۹٪ رسیده است. بنابراین، گوگرد به مقدار چشمگیری در رسوب‌ها وجود دارد.

جدول ۲.۱۴. محتوای گوگرد و نیتروژن رسوب‌ها (درصد وزنی) [3]

شمارهٔ نمونه	۱	۲	۳	۴
سولفور	۰/۳۱۹	۰/۲۹۵	۰/۱۶۹۰	۰/۱۵۸
نیتروژن	۰/۰۷۵	۰/۰۶۹	۰/۰۷۷	۰/۰۶۲

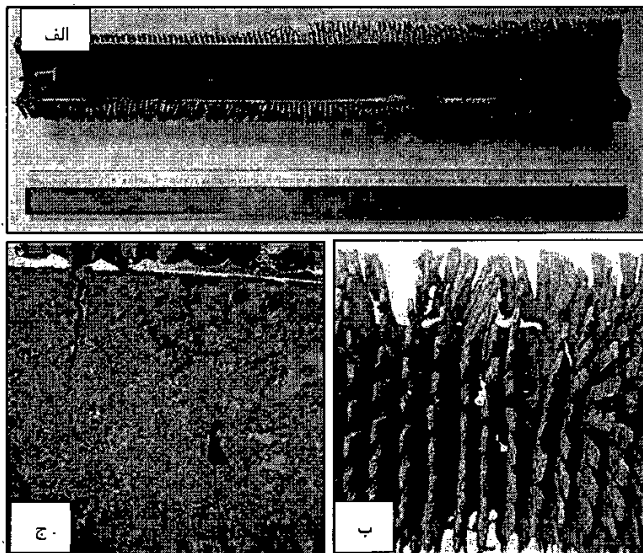
بیشتر رسوب‌ها به رنگ قرمز-قهوه‌ای و تعدادی از آن‌ها سیاه هستند. پراش پرتو X (XRD) برای تشخیص اجزای رسوب در دو رنگ گوناگون استفاده شده است. طیف XRD نشان می‌دهد رسوب‌های قهوه‌ای از  $Fe_2O_3$  با مقدار کمی  $Fe_3O_4$  تشکیل شده‌اند و رنگ‌های سیاه عمدتاً  $Fe_3O_4$  هستند.

علائم ناشی از خوردگی: در این بویلر پیش‌تر خوردگی و سوراخ‌شدگی در قسمت خم متصل به هدر بالا رخ می‌داد. لوله‌های منطقهٔ خم با طولی در حدود ۶۰ سانتی‌متر، با لولهٔ آلیاژی T11 در نقاط مشکل‌دار تعویض شده‌اند، اما خرابی‌های جدید در ارتفاع پایین (در فاصلهٔ حدوداً ۴ متری از هدر بالا) اتفاق افتاده است (وقوع هم‌زمان خوردگی یا نشتی در حدود ۳۰ نقطه). در شکل ۹.۱۴، تصویر نمونه به‌همراه جزئیاتی از مکان سوراخ‌ها نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، لایهٔ اکسیدی داخل لوله، در نزدیکی سوراخ‌ها کاملاً از بین رفته است. همچنین خوردگی و کنده‌شدن فین‌ها، حتی در محل‌هایی که لوله سوراخ نشده است، به‌وضوح مشاهده می‌شود.



□ نمونه چهارم [۴]

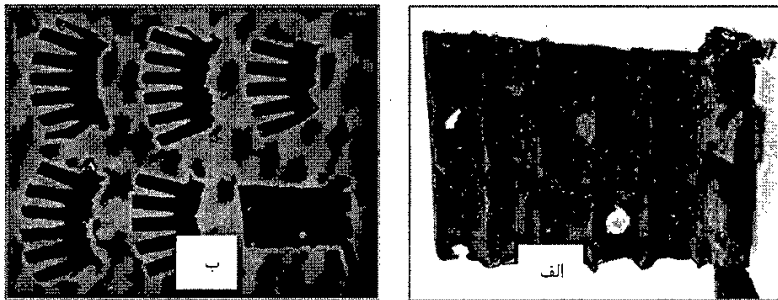
نوع بویلر:	بویلر بازیاب نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله‌های اواپراتور فشار ضعیف
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۳ سال
رژیم شیمیایی آب:	اکسیژنه
شرایط کاری:	فشار: ۲-۳ bar
	دما: ۱۲۷ °C
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵۱ mm، ضخامت: ۳/۲ mm
	جنس: SA192
سوخت:	گاز و گازوییل



شکل ۹.۱۴. الف) نمای داخلی؛ ب) نمای خارجی؛ ج) سطح داخلی لوله در بزرگ‌نمایی بیشتر.

در شکل ۱۰.۱۴ قسمتی از جداره بیرونی لوله مشاهده می‌شود. فین‌های کنده‌شده هیچ اتصالی به لوله ندارند و پس از بُرشکاری آن قسمت از لوله، به‌راحتی از لوله جدا شدند. همچنین ۳ سوراخ ایجادشده در فاصله میان فین‌ها، نمایانگر رخداد خوردگی از سطح بیرونی - با عواملی که در فضای میان فین‌ها تشدید شده‌اند - است.

در شکل ۱۱.۱۴ نمای ضخامت لوله نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که از ۶ ردیف فین، فقط یک ردیف به لوله اتصال دارد و ۵ ردیف دیگر به‌واسطه خوردگی از سطح لوله جدا شده‌اند. بررسی‌های ظاهری نشان می‌دهد شروع و گسترش سوراخ‌شدگی‌ها از سطح بیرونی لوله بوده است. همچنین در تصاویر سطح داخلی، لایه محافظ در همه سطح به‌جز اطراف سوراخ‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰.۱۴. الف) بخشی از جداره بیرونی و ۳ سوراخ ایجادشده؛ ب) فین‌های جداشده.



شکل ۱۱.۱۴. نمایی از ضخامت جداره در بخشی از لوله که فین‌ها کاملاً به‌واسطه خوردگی از بین رفته‌اند.

شناسایی رسوب‌های تشکیل‌شده روی سطح بیرونی لوله‌ها: محصولات احتراق کوره، روی سطوح خارجی لوله‌ها به‌شکل گرده‌های آجری و قهوه‌ای‌رنگ جمع می‌شوند. این رسوب‌ها عمدتاً خاکستر سوخت‌اند که با ذرات اکسید آهن تجمع یافته‌اند. به‌منظور شناسایی ترکیب شیمیایی، چند گرم از رسوب‌ها از لابه‌لای فین‌ها جمع‌آوری شده و بر اساس استاندارد مرجع ASTM E1621 (2013)، عملیات شناسایی XRF و XRD روی آن انجام گرفته است. نکته مهم در این نتایج، وجود  $SO_3$  است (جدول ۳.۱۴)؛ درحالی‌که حضور مقادیر بسیار اندک گوگرد حتی در حد ppm نیز می‌تواند مشکل‌زا باشد.

آزمون تعیین ترکیب شیمیایی با روش XRD: ابتدا نمونه رسوب خرد و سپس آزمون بر اساس استاندارد BS EN 13925-2 انجام شده است. بررسی طیف‌ها حاکی از حضور سه نوع اکسید آهن با ترکیب‌های شیمیایی مگنتیت  $Fe_3O_4$ ، هماتیت  $Fe_2O_3$  و گوتیت  $FeO(OH)$  است.

جدول ۳.۱۴. آنالیز نمونه رسوب جمع‌آوری‌شده از لابه‌لای فین‌ها

درصد ترکیب وزنی	درصد ترکیب وزنی	درصد ترکیب وزنی	درصد ترکیب وزنی	درصد ترکیب وزنی	درصد ترکیب وزنی	درصد ترکیب وزنی	درصد ترکیب وزنی
$Na_2O$	۰/۲	$MgO$	۰/۶	$Al_2O_3$	۰/۵	$SiO_2$	۰/۷
$SO_3$	۰/۲	Cl	<۰/۰۱	$K_2O$	<۰/۰۱	CaO	<۰/۰۱
$BaO$	۰/۱	L.O.I	۲/۹	La & Lu	<۰/۰۱	-	-

بررسی متالوگرافی و ریزساختاری نمونه نشان می‌دهد هیچ تغییر ساختاری در لوله ایجاد نشده است. بررسی نمونه‌های تهیه‌شده با هدف اندازه‌گیری ضخامت لایه محافظ اکسیدی داخل لوله نشان می‌دهد این لایه سطح داخلی لوله را پوشانده و فقط در اطراف سوراخ‌های لوله، لایه محافظ آسیب دیده و از بین رفته است.

## منابع

[1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

[۲] ذبیحیان، فرشید و حسین شریفی، «بررسی اثرات سرمایه‌های ورودی به توربین گاز بر عملکرد بویلر بازیاب»، هجدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۲، ۲۹۵-۳۰۴.

[3] Qun Ding, Xiao-Feng Tang, Zhen-Guo Yang, "Failure Analysis on Abnormal Corrosion of Economizer Tubes in a Waste Heat Boiler", *Engineering Failure Analysis*, (73), 2017, 129-138. DOI:10.1016/j.engfailanal.2016.12.011.

[۴] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و مجید واثقی، بررسی علل شکست لوله‌های بویلر بازیافت در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، اردیبهشت ۱۳۹۹.

## فصل ۱۵

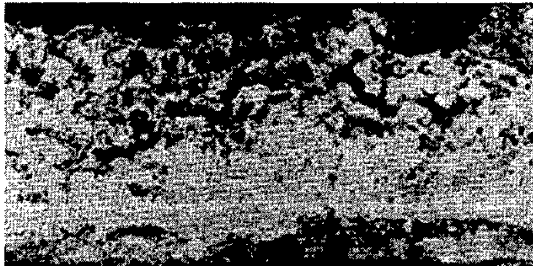
### خوردگی نقطه شبنم در دوره‌های خارج از مدار بودن [1]

#### ۱.۱۵. مکانیسم خوردگی

خوردگی نقطه شبنم در دوره‌های خارج از مدار بودن<sup>۱</sup> می‌تواند به خوردگی چشمگیر سطوح فلزی منجر شود. وقتی بویلر سرد می‌شود، ممکن است دمای سطح خارجی لوله‌ها از دمای نقطه شبنم کمتر شده و در نتیجه رطوبت در سطوح لوله‌ها تشکیل شود. ترکیب رطوبت با رسوب‌های گوگردی، یک الکترولیت اسیدی ایجاد می‌کند که می‌تواند باعث خوردگی تا نرخ‌های ۱۲/۷ میلی‌متر در سال (۵۰۰ میلی‌اینچ در سال) شود. شکل ۱.۱۵ یک لوله پوشیده از خاکستر را که دچار خوردگی نقطه شبنم شده است، قبل از جدایش رسوب‌ها نشان می‌دهد. شکل ۲.۱۵ نیز سطح خورده‌شده را پس از جدایش رسوب‌ها نشان می‌دهد.

#### ۲.۱۵. محل وقوع خوردگی

این خوردگی می‌تواند در اکونومایزر و هر محل دیگری از بویلر که سطوح خارجی با رسوب‌های گوگردی مولد اسید پوشیده شده‌اند، رخ دهد.



شکل ۱.۱۵. رسوب‌های سنگین در سمت آتشی لوله بویلر

1. dew point corrosion during idle periods

### ۳.۱۵. عوامل خوردگی

عوامل مؤثر در ایجاد این نوع خوردگی عبارت‌اند از:

۱. قرارگرفتن خاکستر گوگرددار روی سطوح لوله؛

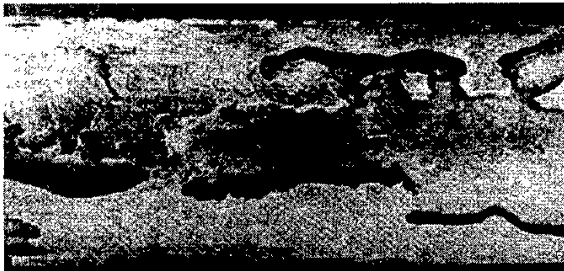
۲. کم‌ترشدن دمای فلز از نقطه شبنم اسید سولفوریک.

ممکن است در حضور رطوبت، خاکستر گوگرددار یک الکترولیت اسیدی تشکیل دهد که می‌تواند باعث خوردگی شود.

### ۴.۱۵. علائم خوردگی

در مواقعی که رسوب‌ها از سطح جدا شوند، وقوع خوردگی با بازدید ساده چشمی قابل شناسایی است (شکل ۲.۱۵). اغلب بخشی از فلز، خورده می‌شود و بخش دیگر دست‌نخورده باقی می‌ماند. خوردگی به سطوحی محدود است که با خاکستر گوگرددار پوشیده شده‌اند. همچنین، آنالیز رسوب‌های سطح لوله، در تشخیص خوردگی نقطه شبنم مفید است.

تذکر: ممکن است تا وقتی رسوب‌ها از سطح جدا نشده‌اند، چشم قادر به تشخیص این نوع خوردگی نباشد. ظاهر نامنظم خوردگی فلز، در تشخیص آن از خوردگی قسمت‌های سرد سودمند است.



شکل ۲.۱۵. خوردگی موضعی و شدید که پس از جداکردن رسوب‌ها مشخص شده است. نواحی مجاور به رسوب‌ها، خورده نشده‌اند.

### ۵.۱۵. روش‌های پیشگیری از خوردگی

پیشگیری از این نوع خوردگی، با کنترل عوامل مؤثر میسر است. همان‌طور که گفته شد، دو عامل مؤثر در خوردگی نقطه شبنم، وجود خاکستر گوگرددار که در ترکیب با آب، الکترولیت‌های

اسیدی تشکیل می‌دهند و کاهش دمای فلز سمت آتش به زیر نقطه شبیم اسید سولفوریک است. به منظور جلوگیری از ایجاد خاکستر گوگرددار، برخی کارها پیشنهاد می‌شود:

۱. استفاده از سوخت‌هایی با گوگرد کمتر: مقدار خاکستر خورنده تشکیل شده را کاهش می‌دهد یا از ایجاد آن جلوگیری می‌کند؛

۲. جداکردن رسوب سمت آتش از سطوح فلزی: لازم است بلافاصله پس از خاموش کردن بویلر، با استفاده از پاشش آب با فشار بالا، تمامی سطوح شسته شوند. سپس باید برای خنثی‌سازی مواد اسیدی باقی‌مانده روی سطوح، آهک‌شویی<sup>۱</sup> انجام شود. در ادامه باید سطوح فلزی را در معرض هوای خشک قرار داد؛

۳. پوشاندن سطح فلزات سمت آتش با یک ماده نفتی سبک، برای محافظت در برابر زنگ‌زدن؛  
 ۴. قراردادن ظرف‌های حاوی آهک زنده<sup>۲</sup> در بویلر هنگام خاموش‌بودن آن: این کار به خشک نگه‌داشتن هوا کمک خواهد کرد. البته باید به‌طور منظم آهک جدید جایگزین کرد.

به‌طور کلی، نگهداری دمای فلز در بالای نقطه شبیم ممکن نیست، مگر اینکه دمای آب بویلر در دمای بالاتر از نقطه شبیم حفظ شود.

## ۶.۱۵. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر خوردگی نقطه شبیم در دوره‌های خارج از مدار بودن

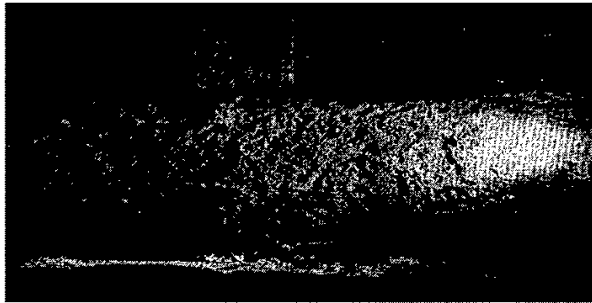
□ نمونه اول

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	لوله دیواره‌ای، ۲ ft زیر سقف
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۲ سال
فشار درام:	۴/۱ MPa (۶۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
سوخت:	black liquor

1. lime wash

2. unslaked lime

علائم ناشی از خوردگی: خوردگی نشان داده شده در شکل ۳.۱۵ که تماماً زیر ماده عایق اتفاق افتاده، نمونه‌ای است از آنچه که در محدوده بالایی کوره بویلر، در اطراف دریچه‌های ورودی رخ داده است. این بویلر دو بار در سال با آب شستشو شده، اما پس از شستشو خشک نشده است. اندازه‌گیری‌ها، ۱۶٪ کاهش ضخامت دیواره لوله را نشان می‌دهند. علت خوردگی: وجود رسوب‌های گوگرددار که پس از شستشو، از سطوح فلزی جدا نشده‌اند. خوردگی از این نوع، در ناحیه‌هایی معمول است که امکان جمع شدن آب وجود دارد (مانند زیر مواد عایق). در موارد مشابه، نرخ خوردگی تا ۱/۲۷ میلی‌متر در سال (۵۰ میلی‌اینچ در سال) نیز گزارش شده است.



شکل ۳.۱۵. خوردگی زیر ماده عایق در زمان‌های خارج از مدار بودن

□ نمونه دوم

صنعت:	فولاد
محل نمونه:	لوله پایین‌آورنده، با فاصله ۱۲ in از درام بخار
نحوه قرار گرفتن نمونه:	با شیب ۴۵°
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)
ساخت:	مازوت با گوگرد زیاد

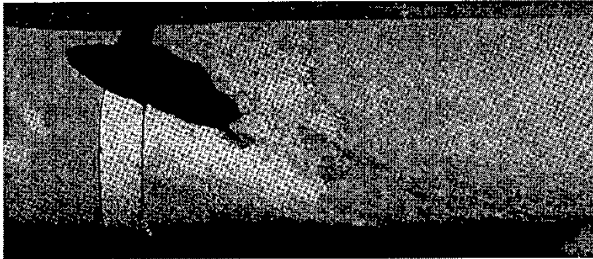
علائم ناشی از خوردگی: لوله نشان داده شده در شکل ۴.۱۵، یکی از چند لوله مشابهی است که هنگام بازدید سمت آتش، خرابی آن‌ها مشاهده شده است. لوله با زاویه ۴۵° نصب شده و



شیار بزرگی در جهت قائم در آن ایجاد شده است. مشاهده می‌شود که شیار مستقیماً در راستای چکه کردن آب از اکونومایزر در بالای لوله‌ها ایجاد شده است.

علت خوردگی: طی بازدید از اکونومایزر، در مجموعه‌ای از لوله‌ها سوراخ مشاهده شده است. سوراخ‌ها در مسیر چکه کردن پیش‌گرمکن هوایی بالای اکونومایزر واقع شده‌اند. حین بازدید از قسمت پایینی پیش‌گرمکن هوا که به تازگی با آب شستشو شده است، تجمعی از رسوب‌های مرطوب در حال چکه مشاهده می‌شود. pH آب در حال چکه از این رسوب‌ها ۲ است. آنالیز این رسوب‌ها با آنالیز اشعه ایکس، وجود مقادیر بالای گوگرد را نشان می‌دهد. شستشوی ناقص رسوب‌ها در پیش‌گرمکن هوا، منبع ایجاد آب بسیار خورنده بوده که در هر لوله‌ای که در مسیر چکه کردن آب قرار داشته، باعث خوردگی شده است.

از دیدگاه مهندسی خوردگی، بروز این مشکل نشان‌دهنده اهمیت «در نظر گرفتن بویلر به عنوان یک مجموعه پیوسته» است؛ به عبارتی، شرایط یک بخش از سیستم، می‌تواند بر دیگر بخش‌هایی که به لحاظ فیزیکی مجزا هستند، اثر زیان‌آور بگذارد.



شکل ۴.۱۵. ایجاد شیار و سوراخ شدن لوله شیب‌دار بر اثر چکه کردن آب خورنده از بالای لوله

## منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

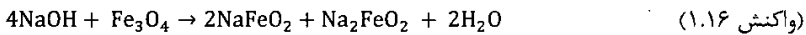


## فصل ۱۶

### حمله هیدروژنی

#### ۱.۱۶. مکانیسم حمله هیدروژنی [1]

در هر محلی که واکنش‌های خوردگی به تولید هیدروژن اتمی منجر شوند، امکان حمله هیدروژنی<sup>۱</sup> وجود دارد. این خوردگی‌ها ممکن است از نوع خوردگی در pH بالا یا pH پایین باشند. یکی از انواع خوردگی در pH بالا، خوردگی قلبایی بر اثر وجود هیدروکسید سدیم<sup>۲</sup> است. هیدروکسید سدیم تغلیظ‌شده، لایه مگنتیت سطح را در خود حل می‌کند:



با از بین رفتن لایه مگنتیت محافظ، آب می‌تواند مستقیماً با آهن وارد واکنش شود و

هیدروژن اتمی تولید کند:



ممکن است هیدروکسید سدیم نیز به‌تنهایی با آهن واکنش دهد و هیدروژن اتمی تولید کند:



در صورت تولید هیدروژن اتمی، ممکن است هیدروژن‌ها به داخل فولاد نفوذ کنند، مقداری از آن‌ها در مرزخانه‌ها و در مجاورت آخال‌ها<sup>۳</sup> با یکدیگر ترکیب شوند و مولکول هیدروژن تولید کنند. مقداری از این هیدروژن‌ها نیز با کاربردهای آهن موجود در فلز واکنش می‌دهند و متان تولید می‌کنند:



مولکول‌های متان و هیدروژن، با توجه به اینکه قابلیت انتشار در فولاد ندارند، ابتدا در مرزخانه‌ها جمع می‌شوند. فشار ناشی از این گازها، در نهایت باعث جدایی مرزخانه‌ها و ایجاد ترک‌های ریز ناپیوسته می‌شود. با به‌هم پیوستن ترک‌های ریز، استحکام کاهش می‌یابد، طوری که

1. hydrogen damage

2. caustic corrosion

۳. inclusion: ناخالصی‌های نافلز که در جریان انجماد وارد فلز می‌شوند: سولفورها، سیلیکات‌ها، آلومین‌ها و ...

تنش‌های اعمالی بر اثر فشار بویلر، از استحکام کششی فلز بیشتر می‌شود و شکست رخ می‌دهد. ممکن است هیدروژن اتمی بر اثر خوردگی‌های pH پایین نیز تولید شود. این هیدروژن‌ها می‌توانند به داخل فلز نفوذ کنند و مطابق آنچه که در مورد هیدروژن‌های اتمی ناشی از خوردگی قلیایی توضیح داده شد، مولکول هیدروژن یا متان تشکیل دهند.

### ۲.۱۶. محل وقوع حمله هیدروژنی [1]

با توجه به اینکه حمله هیدروژنی نتیجه مستقیم واکنش‌های خوردگی الکتروشیمیایی است که طی آن‌ها هیدروژن اتمی آزاد می‌شود، این خرابی اغلب در سطوح داخلی لوله‌هایی رخ می‌دهد که آب در آن‌ها جریان دارد.

این نوع خرابی، معمولاً در نواحی دارای فلاکس حرارتی بالا، زیر لایه‌های ضخیم رسوب، در لوله‌های افقی یا شیب‌دار، در پشت‌بند جوش‌ها و نواحی مجاور به آن‌ها (اگر در این نواحی انتقال حرارت انجام گیرد) و در نزدیکی دیگر تجهیزاتی که به‌نحوی موجب اغتشاش جریان‌اند، رخ می‌دهد. تجربه نشان داده است این نوع خرابی به‌ندرت در بویلرهایی با فشار کمتر از ۶/۹ مگاپاسکال (۱۰۰۰ پوند بر اینچ‌مربع) رخ می‌دهد.

### ۳.۱۶. عوامل حمله هیدروژنی [1]

همه عوامل موجد خوردگی‌های pH بالا و پایین، در ایجاد حمله هیدروژنی نیز مؤثرند. این عوامل در مباحث «خوردگی قلیایی» و «خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری» بررسی شده‌اند. به‌طور کلی می‌توان وجود مواد اسیدی یا بازی و وجود مکانیسم تغلیظ را عوامل مؤثر در حمله هیدروژنی دانست.

### ۴.۱۶. علائم و روش‌های شناسایی حمله هیدروژنی [1]

به‌طور کلی، تشخیص چشمی حمله هیدروژنی قبل از وقوع خرابی ناممکن است. در بویلرهایی که در فشارهای بالاتر از ۱۰۰۰ پوند بر اینچ‌مربع کار می‌کنند، محل‌هایی که دچار خوردگی pH بالا و پایین می‌شوند، مظنون به وقوع حمله هیدروژنی‌اند.

هرچند تکنیک‌های آلتراسونیک خاصی برای مشخص کردن حمله هیدروژنی ابداع شده‌اند، اما به‌طور کلی، تشخیص حمله هیدروژنی با استفاده از تست‌های غیرمخرب، دشوار است. ممکن

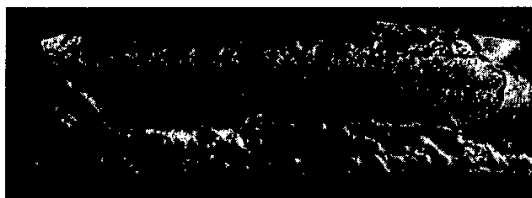
است بررسی ضخامت با روش آلتراسونیک، محل‌های وقوع خوردگی را که محل‌های مظنون به حمله هیدروژنی‌اند شناسایی کند.

در صورت وقوع خرابی، می‌توان برخی موارد را از علائم حمله هیدروژنی دانست:

۱. شکست از نوع طولی و لبه‌کلفت باشد (شکل ۱.۱۶)؛
۲. در سطح داخلی محل شکست، مقداری از فلز بر اثر خوردگی از بین رفته باشد؛
۳. مهم‌ترین نشانه حمله هیدروژنی، کنده‌شدن قسمت بزرگ و مستطیل‌شکلی از دیواره لوله است (شکل ۲.۱۶)؛
۴. ترک‌های ایجادشده از نوع مرزدانه‌ای باشند (شکل ۴.۱۶).



شکل ۱.۱۶. شکست لبه‌کلفت بر اثر حمله هیدروژنی. به خوردگی سطوح داخلی لوله توجه کنید.



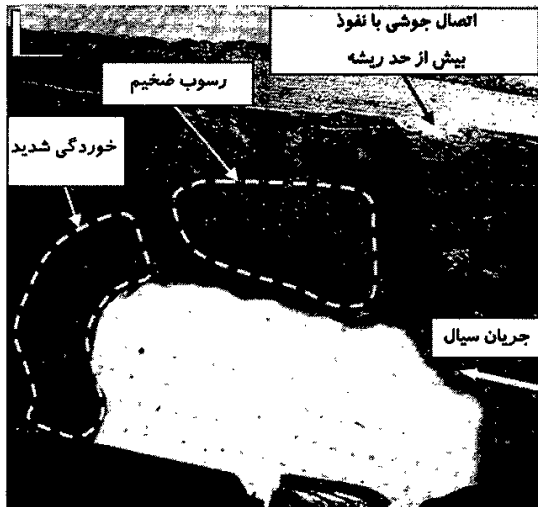
شکل ۲.۱۶. کنده‌شدن بخش بزرگی از لوله بر اثر حمله هیدروژنی

در یک بویلر با فشار ۱۴/۳ مگاپاسکال (۲۰۷۵ پوند بر اینچ مربع)، به خوردگی در امتداد مسیر شکست توجه کنید.

در این نوع تخریب در سطح داخلی لوله (سمت آتش)، رسوبات درشت، سخت و ضخیم و ناحیه موضعی با خوردگی شدید<sup>۱</sup> که به علت خوردگی قلیایی و ... در لوله‌های بویلر اتفاق می‌افتد و به تشکیل حفره، شیار و علائم دیگر منجر می‌شود—مشاهده می‌شود (شکل ۳.۱۶).

این رسوبات درشت به‌عنوان مکان‌های تغلیظ برای اکسیژن و آلودگی‌های ایجادکننده شرایط اسیدی و بازی عمل می‌کنند.

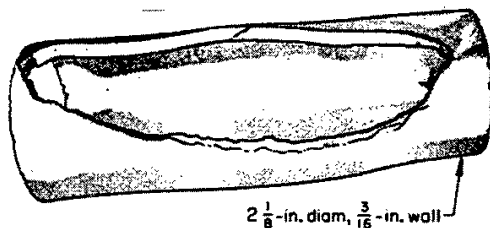
تذکر ۱: حمله هیدروژنی، اغلب شکست‌های لبه‌کلفت ایجاد می‌کند. مکانیسم‌های خرابی دیگری مانند خوردگی تحت تنش، خستگی- خوردگی، شکست‌های تحت تنش و بیش‌گرمایش‌های شدید نیز شکست‌های لبه‌کلفت ایجاد می‌کنند. بنابراین ممکن است تشخیص چشمی حمله هیدروژنی از دیگر خرابی‌ها دشوار باشد. به‌طور مثال، حمله هیدروژنی همیشه با خوردگی همراه است، درحالی‌که در شکل‌های دیگر خرابی -به‌استثنای خستگی- خوردگی که معمولاً از حفره‌ها شروع می‌شود- خوردگی واضحی رخ نمی‌دهد. در اغلب لوله‌هایی که دچار حمله هیدروژنی شده‌اند، قسمتی از فلز به‌شکل پنجره مستطیل‌شکل به بیرون پرتاب می‌شود (شکل ۵.۱۶). این حالت در دیگر خرابی‌ها رایج نیست.



شکل ۳.۱۶. سطح داخلی تیوب لوله در مجاورت شکست که دارای رسوبات ضخیم و خوردگی است.



شکل ۴.۱۶. ترک‌های ناپیوسته و ریز مرزدانه‌ای، بر اثر تشکیل متان در مرزدانه‌ها. به دی کربوره شدن ذرات پرلیت توجه کنید (نواحی سیاه‌رنگ).



شکل ۵.۱۶. جدا شدن قسمت پنجره‌ای شکل از لوله‌های کربنی و کم‌آلیاز بویلر بر اثر حمله هیدروژنی [2]

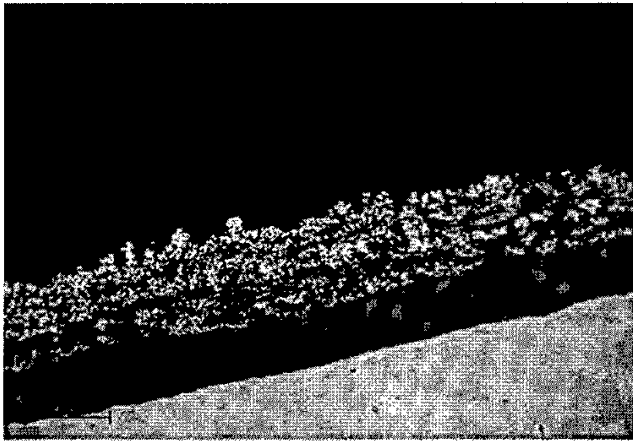
تذکر ۲: برای تعیین اینکه حمله هیدروژنی بر اثر کدام خوردگی pH بالا یا پایین به وجود آمده است، می‌توان کیفیت شیمیایی آب تغذیه و کیفیت شیمیایی منابع آلوده‌کننده آب بویلر را بررسی کرد. به‌طور مثال، یکی از موارد معمول آلوده‌شدن آب بویلر، نشتی آب خنک‌کن در کندانسور است. منبع تأمین آب خنک‌کن تعیین می‌کند که نشتی آب، کدام یک از شرایط اسیدی یا بازی را در بویلر ایجاد می‌کند. آب تازه رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، ذرات جامدی دارند که در محیط بویلر هیدرولیز می‌شوند و شرایط بازی ایجاد می‌کنند. بنابراین اگر آب لازم برای خنک کردن کندانسور از این منابع تأمین شود، نشتی آب در کندانسور می‌تواند شرایط لازم برای خوردگی قلیایی را در محیط بویلر فراهم کند. اما اگر آب کندانسور از دریا یا از آب بازگشتی از برج خنک‌کن تأمین شود، ممکن است این آب ذرات جامدی داشته باشد که بتوانند در محیط بویلر، برای تشکیل محلول اسیدی هیدرولیز شوند.

تذکر ۳: حضور مس به‌علت اثرات گالوانیک، خوردگی را تشدید می‌کند و با تولید هیدروژن آزاد بیشتر در فصل مشترک لوله و آب، آسیب هیدروژنی را گسترش می‌دهد [۳].

تذکر ۴: ممکن است تشخیص قطعی حمله هیدروژنی، نیازمند آزمایش‌های متالوگرافی باشد. مشاهده دی‌کربوره‌شدن و تخریب کامل پرلیت، تأییدکننده نفوذ هیدروژن به دیواره لوله است (شکل ۴.۱۶). همچنین، فشار ناشی از گاز متان باعث ایجاد تعداد بسیاری ترک ریز ناپیوسته و مرزدانه‌ای در ساختار فولاد می‌شود.

تذکر ۵: در برخی موارد، در غیاب لایه دی‌کربوره، با نفوذ هیدروژن و تشکیل مولکول هیدروژن نیز تردی هیدروژنی اتفاق افتاده است، [4، ۱۰].

تذکر ۶: وجود ذرات مس در لایه اکسید داخلی نیز از نشانه‌های خرابی تردی هیدروژنی محسوب می‌شود. حضور مس به علت اثرات گالوانیکی، خوردگی را تشدید می‌کند و با تولید هیدروژن آزاد بیشتر در فصل مشترک لوله و آب، آسیب هیدروژنی را گسترش می‌دهد. شکل ۶.۱۶ حضور ذرات مس در لایه اکسیدی را نشان می‌دهد [4].



شکل ۶.۱۶. حضور ذرات مس در لایه اکسیدی [4]

تذکر ۷: بررسی خواص مکانیکی [۵]: هیدروژناسیون<sup>۱</sup> دیواره‌های آبی بویلر، به افت نرمی و افزایش تردی فلز، به‌ویژه در سمت آتش، منجر می‌شود. جوکیک<sup>۲</sup> و همکاران نشان دادند که استحکام تسلیم فولاد ۱۰۲۰ تخریب شده در مجاورت شکست پنجره‌ای حدود ۲۰۰ مگاپاسکال

۱. hydrogenation: عمل تبدیل به هیدروژن



از مقدار حداقل نمونه استاندارد بالاتر است و درصد ازدیاد طول به مقدار چشمگیری پایین تر از نمونه استاندارد است. همچنین درجه تردی بسیار بالا نشان دهنده افت چشمگیر خواص نرمی لوله‌های دیواره جانبی بویلر در مجاورت شکست پنجره‌ای به‌علت تغلیظ هیدروژن در طول بهره‌بردای بویلر است (جدول ۱.۱۶). از درجه تردی هیدروژنی (I85) با فرمول زیر، به‌عنوان معیار افت داکتیلیته فلز استفاده می‌شود:

$$I85 = (\delta 5_{\text{new}} - \delta 5H) / \delta 5_{\text{new}}$$

که در آن، I85 درجه تردی هیدروژنی،  $\delta 5_{\text{new}}$  درصد ازدیاد طول نمونه دیواره جانبی استفاده‌نشده و  $\delta 5H$  درصد ازدیاد طول نمونه دیواره جانبی شکسته شده است.

جدول ۱.۱۶. خواص مکانیکی لوله در شرایط بهره‌برداری گوناگون [۵]

شماره	مشخصات نمونه	تنش تسلیم (MPa)	تنش کششی (MPa)	تغییر طول (%)	شاخص تردی (%)
۱	لوله آسیب‌دیده، سمت آتش	۴۰۳	۴۸۱	۱۳/۲	۵۷/۸
۲	لوله آسیب‌دیده، سمت مقابل	۳۲۳	۴۶۰	۲۶/۳	۱۵/۹
۳	لوله جدید	۳۱۲	۴۷۱	۳۱/۳	-

تذکر ۸: تست اولتراسونیک و تست‌های غیرمخرب: آسیب هیدروژنی در موقعیت‌های تصادفی و گسسته در لوله‌های بویلر اتفاق می‌افتد و از همین رو، برای تعیین موقعیت خوردگی شدید که مطنون به خوردگی هیدروژنی است، تست اولتراسونیک مناسب است. به خان‌های درون لوله‌ها نیز باید توجه کرد و از محصولات خوردگی تمییز داد.

مناسب‌ترین روش‌ها برای شناسایی آسیب هیدروژنی، روش برگشتی اولتراسونیک پیشرفته<sup>۱</sup>، روش‌های مبتنی بر تصویربرداری ضخامت، نسبت سرعت و برگشتی<sup>۲</sup> و متالوگرافی در آزمایشگاه یا در محل (رپلیکا) هستند [۹].

1. Advanced Ultrasonic Backscatter Techniques (AUBT)
2. Method based on TOFD, thickness mapping, backscatter and velocity ratio

### ۵.۱۶. روش‌های پیشگیری از حمله هیدروژنی [1]

برای پیشگیری از حمله هیدروژنی در بویلر، باید از ایجاد دو عامل مؤثر در حمله هیدروژنی یعنی محیط‌های خورنده با pH بالا یا پایین و مکانیسم‌های تغلیظ جلوگیری کرد. برای حذف محیط‌های خورنده با pH بالا یا پایین، مواردی توصیه می‌شود:

۱. کاهش مقدار هیدروکسید سدیم آزاد در آب: این کار در مواردی مفید واقع می‌شود که حمله هیدروژنی در شرایط pH بالا رخ داده است؛

۲. کنترل صحت عملکرد تجهیزات به کاررفته در حذف مواد معدنی از آب؛

۳. جلوگیری از نشتی در کندانسور: با توجه به مکانیسم‌های تغلیظ خطرناکی که ممکن است در بویلر فعال باشند، حتی نشت بسیار کم مواد آلوده‌کننده نیز می‌تواند برای خوردگی موضعی و حمله هیدروژنی کافی باشد؛

۴. جلوگیری از آلوده شدن بخار و آب در طول سیکل: جلوگیری از تغلیظ موضعی مواد خورنده، مؤثرترین راه و درعین حال دشوارترین راه جلوگیری از حمله هیدروژنی است.

برای جلوگیری از ایجاد مکانیسم‌های تغلیظ، کارهایی توصیه می‌شود:

۱. جلوگیری از آغاز جوشش لایه‌ای ناپایدار (DNB): برای جلوگیری از DNB، باید از ایجاد نقاط داغ در بویلر جلوگیری کرد. این کار مستلزم کنترل پارامترهای بهره‌برداری است. نقاط داغ می‌توانند بر اثر احتراق نامناسب<sup>۱</sup>، تنظیم‌نبودن مشعل‌ها، تغییر سوخت، محدودشدن مسیر حرکت دود به یک کانال باریک (کانالیزه شدن دود) و تخلیه دائمی بیش از حد ایجاد شوند؛

۲. جلوگیری از رسوب‌گذاری بیش از حد در سمت آب: باید در دوره‌های مشخص (معمولاً سالانه) برای تعیین ضخامت نسبی و مقدار رسوب ایجادشده، از لوله‌ها نمونه‌برداری کرد. دستورالعمل‌های نمونه‌برداری در استاندارد ASTM D887-82 آمده است. قبل از اسیدشویی باید با سازندگان بویلر مشورت کرد؛

۳. جلوگیری از ایجاد سطح آب: لوله‌های افقی و شیب‌دار برای ایجاد سطح آب مناسب‌اند. از جمله عوامل ایجاد سطح آب، می‌توان به پایین‌بودن بیش از حد سطح آب، تخلیه دائمی بیش از حد و کاهش سریع بار در مواقع فشار ثابت اشاره کرد. در مورد اخیر، کاهش سرعت آب در ایجاد سطح آب مؤثر است [1].

به طور کلی، انجام موارد زیر در پیشگیری از حمله هیدروژنی مؤثر است [2]:

۱. انتخاب مواد مقاوم به حمله هیدروژنی: افزودن کروم و مولیبدن به فولاد، مقاومت فولاد به حمله هیدروژنی را تقویت می‌کند؛
۲. استفاده از پوشش‌های مناسب روی سطوح: در انتخاب پوشش‌ها، باید به مقاوم‌بودن آن‌ها در شرایط محیط دقت کرد؛
۳. بازپخت: در فولادهای با استحکام بالا، بازپخت در دمای بالا و برای مدت طولانی، باعث کاهش مقدار هیدروژن موجود در فلز می‌شود. اما باید توجه داشت که بازپخت، باعث کاهش استحکام و افزایش چقرمگی نیز می‌شود؛
۴. ایجاد تنش‌های پس‌ماند فشاری در سطح: این کار، سطح را در برابر ایجاد ترک مقاوم می‌کند. تکنیک‌های ساچمه‌زنی<sup>۱</sup>، ماسه‌پاشی<sup>۲</sup> و نورد سطحی<sup>۳</sup> برای ایجاد تنش‌های پس‌ماند فشاری مناسب‌اند. هنگام جوشکاری فولادهای با استحکام بالا، پیش‌گرمایش قطعه و انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری، در جلوگیری از ایجاد تنش‌های پس‌ماند و ترک‌های ریز مؤثر است؛
۵. استفاده از الکترودهای کم‌هیدروژن برای جوشکاری: علاوه‌بر استفاده از الکترودهای مناسب، باید آن‌ها را در محیط خشک نگهداری کرد، زیرا آب و بخار آب، از منابع اصلی تأمین هیدروژن‌اند؛
۶. کاهش تنش.

## ۶.۱۶. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

### اثر حمله هیدروژنی

□ نمونه اول [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی
محل نمونه:	قسمت دماغه‌ای
نحوه قرارگرفتن نمونه:	شیب‌دار
عمر نمونه:	۲۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۴/۳ MPa (۲۰۷۵ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)

1. shot peening  
3. face milling

2. grit blasting

شرایط بهره‌برداری از بویلر: بویلر از نوع چرخش اجباری با دبی بخار تولیدی ۱۳۴,۰۰۰ کیلوگرم بر ساعت که طی دو سال منتهی به خرابی، در شرایط بار نامی کار کرده است. قبل از وقوع خرابی، اسیدشویی شده است.

علائم ناشی از خرابی: بر اثر وقوع این خرابی (شکل ۲.۱۶) که یک مشکل تکراری در لوله‌های سقفی و دماغه‌ای این بویلر است، بخش بزرگ و مستطیل‌شکلی از لوله جدا شده و یک شکست لبه‌کلفت با سطوح ناصاف پدید آمده است. در گوشه‌های ناحیه شکست، ترک‌های کوچک فراوانی ایجاد شده است.

بررسی دقیق نشان می‌دهد دیواره داخلی در امتداد سطح شکست نازک شده است. در برخی نقاط، نواحی خورده‌شده با لایه ضخیمی از اکسید آهن سخت و سیاه‌رنگ پوشیده شده است. اکسید آهنی که نواحی خورده‌شده را پوشانده، کمی پوسته‌پوسته است. در قسمت‌های فاقد این لایه می‌توان ترک‌های عمیق طولی را مشاهده کرد.

بررسی ریزساختاری ناحیه شکست، وجود ترک‌های ریز ناپیوسته و مرزدانه‌ای را نشان می‌دهد. در این مطالعات، هیچ نشانه‌ای از بیش‌گرمایش دیده نمی‌شود.

علت خرابی: علت حمله هیدروژنی است. بررسی لایه‌های اکسید آهن مشخص کرد که حمله هیدروژنی در زمانی رخ داده که آب بویلر بر اثر نشتی در کندانسور به نمک‌های مولد اسید<sup>۱</sup> (مانند کلریدها) آلوده شده است.

□ نمونه دوم [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۲</sup>
محل نمونه:	دیواره آبی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۷ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۴/۵ MPa (۲۱۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)

علائم ناشی از خرابی: خرابی در لوله‌های دیواره آبی بالای مشعل‌ها ایجاد شده است. شکست لبه کلفت است. سطح داخلی به‌طور سطحی خورده شده و عاری از هر نوع رسوبی است (شکل ۱۰۱۶).

بررسی ریزساختاری، وجود ترک‌های ناپیوسته را دقیقاً زیر ناحیه خورده‌شده نشان می‌دهد که در جهت‌های گوناگون منتشر شده‌اند. اکسیدهای آهنی که نواحی خورده‌شده را پوشانده‌اند، به‌شدت پوسته‌پوسته شده‌اند. در این خرابی، تغییرات ریزساختاری ناشی از بیش‌گرمایش، مشاهده نمی‌شود.

علت خرابی: بررسی مستندات نشان می‌دهد بر اثر نشستی مقدار کمی نمک کلریدی در کندانسور، pH آب بویلر کاهش یافته است. نمک‌های مولد اسید و DNB در محل شکست، باعث حمله هیدروژنی شده‌اند.

تذکر: معمولاً در خرابی‌های ناشی از حمله هیدروژنی، ترک‌های ریز منتشرشده در جهت‌های گوناگون مشاهده می‌شوند [1].

#### □ نمونه سوم [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی
محل نمونه:	دیواره آبی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۲ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۳ cm (۲/۵ in)

علائم ناشی از خرابی: شکست از نوع لبه‌کلفت و در سراسر ناحیه‌هایی که دچار خوردگی شده‌اند، رخ داده است. خرابی در پایین‌دست جوشی که تا حدی در سطح داخلی نیز نفوذ کرده، ایجاد شده است (شکل ۷۰۱۶).

بررسی‌های ریزساختاری در قسمت‌های مجاور نواحی خورده‌شده، ترک‌های ریز ناپیوسته و نامنظم را در دیواره لوله نشان می‌دهد. ناحیه خورده‌شده با لایه‌های ضخیم و چگال اکسید آهن پوشیده شده است. این بررسی‌ها هیچ نشانه‌ای از بیش‌گرمایش نشان نمی‌دهند.



شکل ۷.۱۶. شکست بر اثر حمله هیدروژنی. به وقوع شکست پس از جوش محیطی توجه کنید.

علت خرابی: تغلیظ بسیار موضعی مواد خورنده بر اثر DNB در سطح فلز، باعث خوردگی و درنهایت حمله هیدروژنی شده است. DNB بر اثر اغتشاش جریان پس از جوش محیطی رخ داده و بررسی لایه‌های اکسید آهن نشان می‌دهد خوردگی و حمله هیدروژنی در محیط با pH پایین اتفاق افتاده است. این محیط بر اثر تغلیظ نمک‌های مولد اسید ایجاد شده است. نکته توجه برانگیز درباره این خرابی: با توجه به خرابی‌های فراوان بر اثر حمله هیدروژنی ناشی از خوردگی قلیایی، لزوم انجام تعمیرات اساسی در بویلر و ایجاد تغییرات چشمگیر در کیفیت شیمیایی آب تغذیه احساس می‌شود. بنابراین برنامه شیمیایی فسفات هماهنگ، جایگزین برنامه شیمیایی قلیابیت آزاد<sup>۱</sup> شده است. خرابی نشان داده شده در شکل ۷.۱۶ هنگامی رخ داده که تغییرات یادشده در کیفیت شیمیایی آب تغذیه ایجاد شده بود [1].

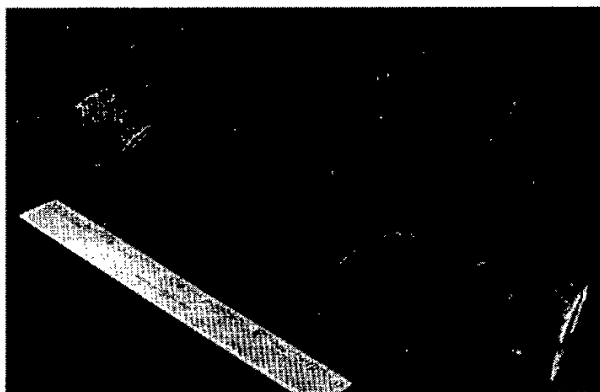
□ نمونه چهارم [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۲</sup>
محل نمونه:	لوله‌های پلاتن <sup>۳</sup>
عمر نمونه:	۲۶ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۴/۳ MPa (۲۰۸۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۸/۳ cm (۳/۲۵ in)

1. low-solid free alkalinity  
3. platen tube

2. utility

علائم ناشی از خرابی: ۶ ماه پس از اسیدشویی بویلر، در قسمت‌هایی از لوله بویلر که دچار خوردگی شده‌اند، شکستی طولی و لبه‌کلفت ایجاد شده است (شکل‌های ۸.۱۶ و ۹.۱۶). این اولین خرابی مشاهده شده در لوله‌های این قسمت از بویلر است. در قسمت‌هایی که شکستی رخ نداده، سطوح داخلی، صاف و فاقد آثار خوردگی‌اند. بررسی‌های ریزساختاری قسمت‌های خورده شده، وجود مجموعه‌ای از ترک‌های نامنظم و ناپیوسته را در دیواره لوله و زیر ناحیه خورده شده نشان می‌دهند. در این بررسی‌ها، هیچ نشانه‌ای از بیش‌گرمایش به چشم نمی‌خورد.



شکل ۸.۱۶. شکست بر اثر خوردگی اسیدی و حمله هیدروژنی



شکل ۹.۱۶. خوردگی فلز در ریشه شکست

علت خرابی: بررسی‌های چشمی و ریزساختاری لوله نشان می‌دهد قرارگرفتن در محیط خورنده با pH پایین، باعث حمله هیدروژنی شده است. از آنجا که شستشوی نواحی پلاتن بویلر کار راحتی نیست، به‌نظر می‌رسد پس از اسیدشویی، خنثی‌سازی به‌طور کامل انجام نشده و مقداری اسید زیر رسوب‌ها به‌جا مانده است. این رسوب‌ها باعث ایجاد محیط با pH پایین حین بهره‌برداری از بویلر شده‌اند [1].

□ نمونه پنجم [1]

نوع بویلر:	بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>
محل نمونه:	قسمت دماغه‌ای دیواره آبی <sup>۲</sup>
نحوه قرارگرفتن نمونه:	با زاویه ۴۵°
عمر نمونه:	۲۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هم‌هنگ
فشار درام:	۱۳/۸ MPa (۲۰۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)

علائم ناشی از خرابی: شکست لبه‌کلفت نشان داده شده در شکل ۱۰.۱۶، یکی از خرابی‌های پُرشمار و تکراری است که در قسمت دماغه‌ای دیواره آبی و لوله‌های سقف بویلر رخ داده است. به‌موجب این مشکل، این ناحیه از بویلر از نو ساخته شده است.

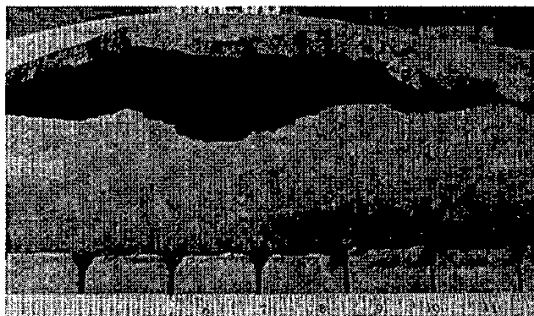
شکست در بخش‌هایی از لوله رخ داده است که در سطح داخلی، دچار خوردگی عمیق شده‌اند (شکل ۱۱.۱۶). ظاهر موج‌مانند ناحیه خوردگی، با اکسید آهن سیاه‌رنگی پوشیده شده است.

بررسی‌های ریزساختاری در زیر ناحیه خورده شده، ترک‌های ریزی را نشان می‌دهد که در جهت‌های گوناگون منتشر شده‌اند. این بررسی‌ها هیچ نشانه‌ای از بیش‌گرمایش نشان نمی‌دهند. علت خرابی: تغلیظ موضعی هیدروکسید سدیم بر اثر DNB، باعث خوردگی قلیایی و درنهایت حمله هیدروژنی شده است [۱].

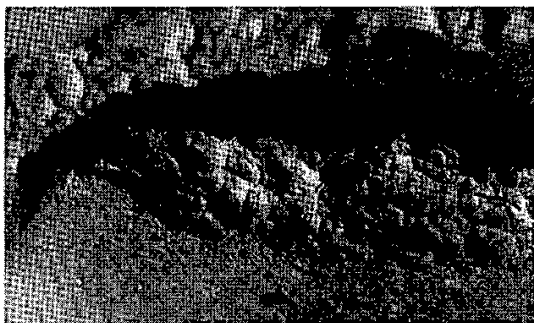
1. utility

2. nose slope





شکل ۱۶.۱۰. شکست لبه کلفت



شکل ۱۶.۱۱. ظاهر یکنواخت و موج‌مانند سطح داخلی که بر اثر خوردگی قلیایی ایجاد شده است.

□ نمونه ششم [۶]

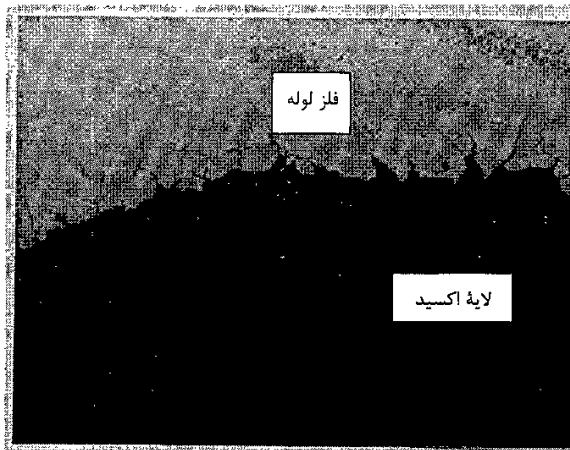
نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی	نوع بویلر:
سویرهتر اولیه (پلاتن)	محل نمونه:
افقی	نحوه قرارگرفتن نمونه:
۲۰ سال	عمر نمونه:
فسفات هماهنگ	رژیم شیمیایی آب:
۱۶/۸ MPa (۲۴۳۶ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۳/۸ cm (۱/۵ in)	مشخصه‌های لوله:
جنس: ۱۰CD5-05 (معادل SA213-T11)	سوخت:
گاز و مازوت	

علامت ناشی از خرابی: شکل ۱۲.۱۶ ظاهر شکست ایجاد شده در یک لوله سوپرهیتر را نشان داده است. مشاهده می‌شود که نیمی از سطح لوله در منطقه شکست از محل خود جدا و به بیرون پرتاب شده است؛ یعنی ابتدا یک طرف لوله شکافته شده و سپس بر اثر فشار بخار، دریچه‌ای در لوله ایجاد شده است.

در بررسی‌های ریزساختاری، ترک‌هایی در فصل مشترک لوله با لایه اکسید داخلی مشاهده می‌شود (شکل ۱۳.۱۶). این شکل، تصویر نمونه متالوگرافی شده را پس از صیقل‌کردن<sup>۱</sup> و قبل از اچ‌کردن نشان می‌دهد. با توجه به شکل و تعداد ترک‌ها به‌نظر می‌رسد ترک‌ها مرزدانه‌ای باشند.



شکل ۱۲.۱۶. نمایی کلی از شکست لوله



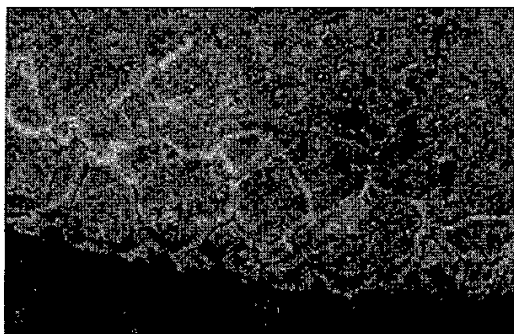
شکل ۱۳.۱۶. ترک‌های موجود در فصل مشترک لایه اکسید و سطح داخلی لوله، برای نمونه اچ‌نشده (بزرگ‌نمایی: ۵۰۰ برابر)

## 1. polishing

شکل ۱۴.۱۶ ترک‌های نشان‌داده‌شده در شکل ۱۳.۱۶ را پس از اچ کردن با محلول نایتال ۲٪ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مرزدانه‌ای بودن ترک‌ها تأیید می‌شود. جالب اینکه در پیشاپیش ترک‌ها (خطوط سفید)، کاربیدهای مرزدانه‌ای از بین رفته‌اند و ترک‌ها در همین امتدادها پیش رفته‌اند.

علت خرابی: از قرار معلوم، از بین رفتن کاربیدها نشانه نفوذ هیدروژن به داخل فلز و ترکیب آن با کربن موجود در کاربیدهاست. نفوذ هیدروژن دو مشکل پدید آورده؛ اولاً کاربیدها تاجایی که هیدروژن به داخل فلز نفوذ کرده است، از بین رفته‌اند و کربن موجود در آن‌ها با هیدروژن ترکیب شده است؛ ثانیاً از ترکیب کربن و هیدروژن، گاز متان تولید شده و در مرزدانه‌ها گیر کرده و این امر موجب تضعیف مرزدانه‌ها و شکست قطعه شده است. منشأ ایجاد هیدروژن در این لوله، نشستی آب دریا به سیکل از طریق کندانسور است.

چنان‌که گفته شد، این نوع شکست نشانه حمله هیدروژنی است؛ یعنی فولاد بر اثر نفوذ هیدروژن به مرزدانه‌ها ضعیف شده و وقتی تنش‌های ناشی از فشار داخلی، به حد مقاومت فلز رسیده، لوله گسیخته شده است.



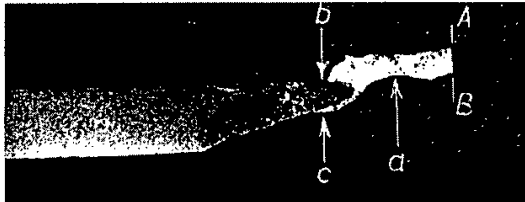
شکل ۱۴.۱۶. ترک‌های نشان‌داده‌شده در شکل قبل پس از اچ کردن با محلول نایتال ۲٪ (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰۰ برابر)

□ نمونه هفتم [1]

محل نمونه:	دیواره پستی کوره
عمر نمونه:	۴/۵ سال
فشار درام:	۱۰ MPa (۱۴۵۰ psi)

شرایط بهره‌برداری از بویلر: با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از بهره‌برداران بویلر، احتمال دارد دما از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر رفته باشد.

علائم ناشی از خرابی: در محل جوش مربوط به یک لوله که در دیواره پشتی بویلر قرار داشته، پس از ۴/۵ سال بهره‌برداری، حفره‌هایی ایجاد شده است. محصولات خوردگی با رنگ آبی مایل به سیاه، روی حفره‌ها را پوشانده‌اند که به راحتی می‌توان آن‌ها را از پوشش قرمزرنگی که دیگر قسمت‌های سطح داخلی را پوشانده است، تمییز داد. مقطع‌های طولی و عرضی از نواحی خورده‌شده، در شکل‌های ۱۵.۱۶ و ۱۶.۱۶ نشان داده شده است.



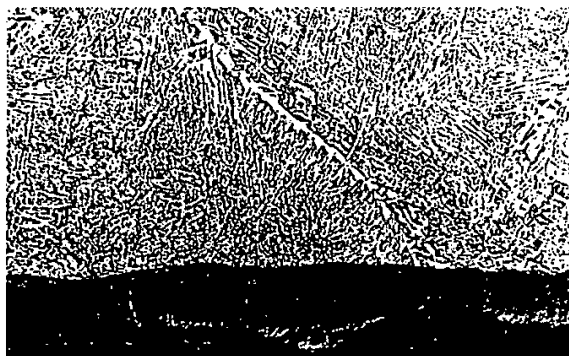
شکل ۱۵.۱۶. مقطع طولی در جوش. قسمت پایینی شکل، سطح داخلی و قسمت راست شکل، جوش را نشان می‌دهد (اچ‌شده در picral).



شکل ۱۶.۱۶. مقطع عرضی در جوش (مقطع A-B در شکل ۱۵.۱۶). قسمت بالایی شکل، سطح داخلی لوله و قسمت چپ شکل، ناحیه حفره‌دار را نشان می‌دهد (اچ‌شده در picral، بزرگ‌نمایی: ۱۰۰ برابر).

سطح مقطع جوش از سمت داخل لوله به شدت کاهش یافته و با یک لایه سیاه و پوسته‌پوسته‌شده<sup>۱</sup> از مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) پوشیده شده است. ضخامت لایه اکسید در این قسمت، از ضخامت این لایه در سطح خارجی لوله بیشتر است (شکل ۱۷.۱۶). خرابی در نواحی مجاور به جوش که حین جوشکاری دچار بیش‌گرمایش شده‌اند نیز رخ داده و در نقاطی که اندازه دانه‌های فلز لوله طبیعی است، متوقف شده است. اکسیداسیون فولاد، در مرزدانه‌هایی که دانه‌های آستنیت درشت‌ترند، عمیق‌تر است (شکل ۱۸.۱۶).

نواحی داخلی نیز که آکنده از ترک‌های ریز در مرزدانه‌ها و صفحات مناسب شبکه فلز لوله<sup>۱</sup> هستند، دی‌کربوره شده‌اند. در طول لوله، شدت خوردگی با افزایش فاصله از جوش کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه، در مقطع عرضی نیز شدت خوردگی با افزایش فاصله از حفره‌ها کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل‌های ۱۹.۱۶. الف تا ج نشان داده شده است.



شکل ۱۷.۱۶. ساختار مقطع طولی در لبه داخلی درز جوش (نقطه A در شکل ۱۵.۱۶). لایه ضخیم مگنتیت که پوسته‌پوسته شده، در شکل مشخص است (اچ‌شده در picral، بزرگ‌نمایی: ۱۰۰ برابر).

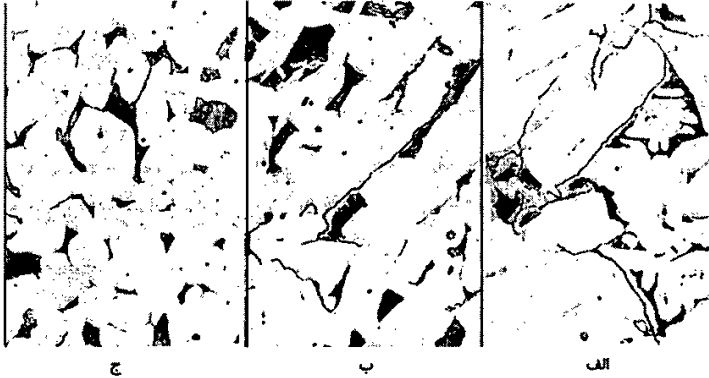


شکل ۱۸.۱۶. ساختار مقطعی طولی در مرز داخلی ناحیه انتقال (ناحیه C در شکل ۱۵.۱۶)، وقوع اکسیداسیون و حمله هیدروژنی در مرزدانه‌ها و صفحات شبکه آلیاژ فلز مشخص است (اچ‌شده در picral، بزرگ‌نمایی: ۱۰۰ برابر).

علت خرابی: با توجه به شکل‌های ۱۹.۱۶. الف تا ج، ترک‌ها بر اثر حمله هیدروژنی ایجاد شده‌اند. ترک‌های ایجادشده، سطوح مناسبی برای اکسیدشدن فراهم کرده‌اند.

---

1. preferred lattice plane



شکل ۱۹.۱۶. مقطع عرضی که کاهش حمله هیدروژنی در سطح داخلی لوله را با افزایش فاصله از ناحیه حفره دار (الف به سمت ج) نشان می‌دهد (اچ‌شده در picral، بزرگ‌نمایی: ۲۰۰ برابر).

می‌توان تشکیل نشدن لایه اکسید محافظ را علت وقوع موضعی خرابی در جوش و نواحی دانه‌درشت مجاور به آن دانست. دو دلیل تشکیل نشدن این لایه عبارت‌اند از:

۱. ایجاد سرباره‌های جوش

۲. اغتشاش استخر مذاب در لبه‌های اتصال جوش

روش پیشگیری از خرابی: جوش دیگری که به‌طور چشمگیر دانه‌های ریزتری داشته، دچار خرابی کمتری شده است. بنابراین جلوگیری از بیش گرمایش محل جوشکاری و ایجاد جرقه، امری ضروری است (به‌خصوص در مورد لوله‌های بخار فشاربالای بویلرها، باید به این نکته توجه داشت) [۷].

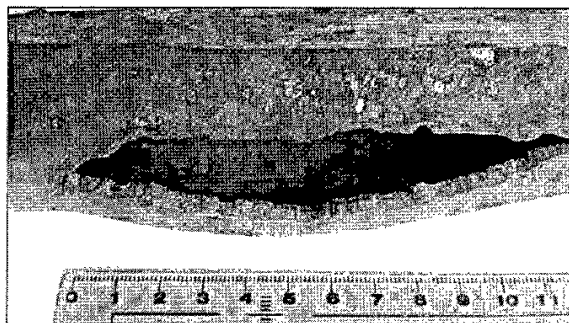
□ نمونه هشتم [8]

نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی	صنعت:
لوله دیواره آبی	محل نمونه:
قائم	نحوه قرارگرفتن نمونه:
۳۰ سال	عمر نمونه:
۱۶/۸ MPa (۲۴۳۶ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۴۴/۵mm، ضخامت: ۵/۶ mm	مشخصه‌های لوله:
جنس: T12 (معادل 13CrMo4-5 و 1.7335)	
گاز و مازوت	سوخت:

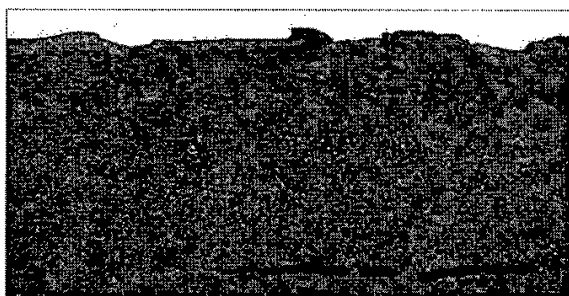
علائم ظاهری: شکل ۲۰.۱۶ وضعیت کلی لوله آسیب دیده را نشان می دهد. آثار اندکی از سایش یکنواخت در سطح بیرونی، ناشی از تماس با محصولات احتراق، هویداست که در شرایط کاری این لوله در محدوده شمال است، اما ترکی به طول ۱۱ سانتی متر با لبه های کلفت مشاهده می شود.

بررسی های درون لوله آسیب دیده، حاکی از وجود یک ترک طولی روی سطح داخلی و در امتداد پارگی اصلی است. شکل ۲۱.۱۶ تصویر ترک داخلی را با بزرگ نمایی بیشتر نشان می دهد. این ترک به واسطه ایجاد پارگی اصلی با نرخ کرنش نسبتاً بالا، در سطح داخلی ایجاد شده که نشانه کاهش چقرمگی شکست لوله است.

یک نکته مهم دیگر، حضور ترک های عمیق عرضی پر شمار در لبه پارگی اصلی است. این ترک های محیطی و عرضی در سطح داخلی لوله مشاهده می شوند (شکل ۲۱.۱۶). تعداد و عمق این ترک ها حاکی از کاهش چقرمگی است.

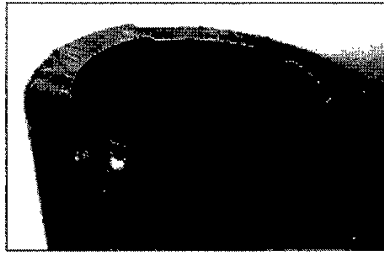


شکل ۲۰.۱۶. وضعیت کلی آسیب لوله دیواره آبی (شکست لبه کلفت)



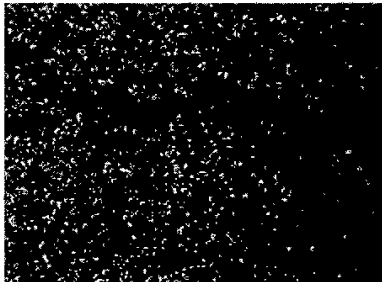
شکل ۲۱.۱۶. ترک های عمیق عرضی پر شمار و طولی در سطح داخلی لوله

علائم ناشی از خوردگی: در شکل ۲۲.۱۶ تصویر سطح داخلی لوله نشان داده شده است. حفره‌های پرشماری با شکل‌های گوناگون، اما اغلب در جهت حرکت سیال، دیده می‌شوند. بررسی وضعیت ظاهری نشان می‌دهد لوله‌ها دچار تخریب هیدروژنی، بیش‌گرمایش بلندمدت و خوردگی شده‌اند. از سوی دیگر، لبه‌کلفت بودن ترک، برهان دیگری بر این مطلب است که ترک بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت و بهره‌برداری نامتعارف ایجاد نشده است.



شکل ۲۲.۱۶. تصویر سطح داخلی لوله آسیب‌دیده

بررسی ریزساختاری: از آنجاکه لوله‌های دیواره آبی فقط از یک سمت در معرض جذب حرارت تشعشعی‌اند و نیمی از لوله در معرض جذب حرارت نیست، انتظار می‌رود فقط ساختار نیمی از لوله دستخوش تغییر شده باشد. شکل‌های ۲۳.۱۶ و ۲۴.۱۶ سطوح داخلی در ناحیه پشت‌به‌آتش و سمت آتش را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ناحیه پشت‌به‌آتش، تغییرات ساختاری اندکی رخ داده است که با توجه به عمر کاری لوله، طبیعی به‌نظر می‌رسد. اما در سمت آتش، ضمن تجزیه ریزساختار، تعداد بسیاری ریزترک به‌همراه ترک‌های مرزخانه‌ای پیوسته، دیده می‌شود.



شکل ۲۴.۱۶. ریزساختار مربوط به سمت آتش



شکل ۲۳.۱۶. ریزساختار مربوط به سمت پشت‌به‌آتش  
نمونه سی‌ساله

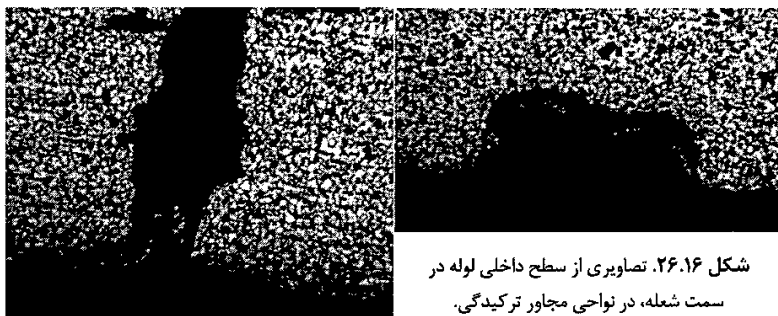


شکل ۲۵.۱۶ ریزساختار لوله را در میانه ضخامت در سمت شعله نشان می‌دهد. ریزساختار در این ناحیه، بیشتر به سمت تجزیه فاز پرلیت و رسوب کاربیدها روی مرزدانه‌ها پیش رفته است.



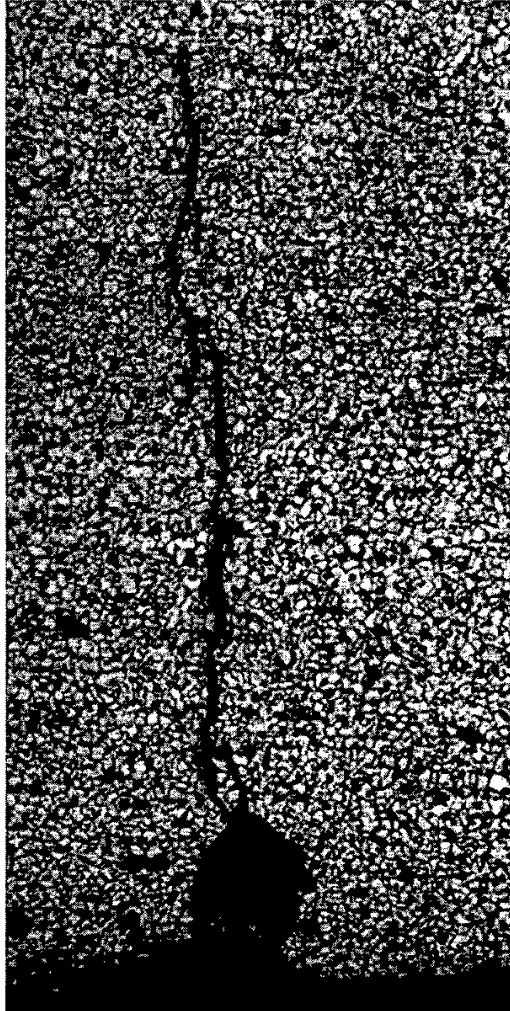
شکل ۲۵.۱۶. ساختار متالورژیکی میانه ضخامت لوله سمت شعله

شکل ۲۶.۱۶ تصاویری از یک حفره در سطح داخلی لوله (سمت شعله) در ناحیه مجاور ترک را نشان می‌دهد. در این تصاویر، به‌طور کلی روند خوردگی، کاهش ضخامت موضعی و در نهایت تمرکز تنش و پیدایش ترک، به‌خوبی مشاهده می‌شود. حضور ذرات مس در ضخامت لایه اکسیدی داخل لوله و پیشروی ترک از همین مناطق، به‌وضوح دیده می‌شود (به آنالیز شکل ۳۷.۱۶، توجه شود). همچنین شکل ۲۶.۱۶، ب نشان می‌دهد در هر محلی که شدت رسوب ذرات مس افزایش یافته، خوردگی گسترش یافته است.



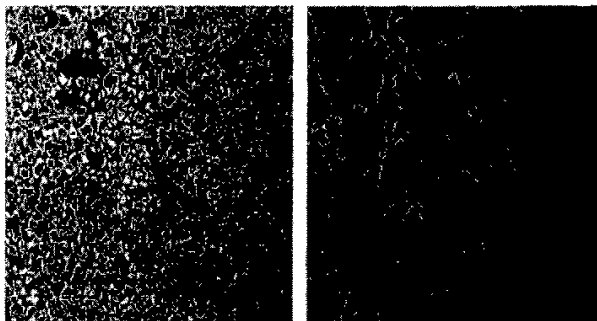
شکل ۲۶.۱۶. تصاویری از سطح داخلی لوله در سمت شعله، در نواحی مجاور ترکیدگی.

شکل ۲۷.۱۶ ساختار و هندسه یک ترک اشاعه‌یافته از سطح داخلی و پیشروی آن در میانه ضخامت لوله را نشان می‌دهد. رشد چنین ترکی که به‌طور منفرد و بدون انشعابات پُرشمار گسترش یافته است، وقوع پدیده خزش را نامحتمل می‌کند.



شکل ۲۷.۱۶. ساختار و هندسه یک ترک که از محل تجمع مس آغاز و در ضخامت لوله پیش رفته است.

شکل ۲۸.۱۶ تصاویر مربوط به نمونه طولی تهیه شده از ناحیه نزدیک به ترک را در وسط ضخامت نمونه نشان می‌دهد. خوردگی شدید مرزدانه‌ای بر اثر خوردگی هیدروژنی به وضوح مشاهده می‌شود.

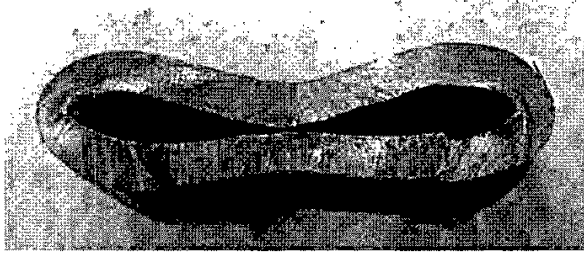


شکل ۲۸.۱۶. ریزساختار مرکز نمونه طولی نزدیک به ترک با دو بزرگنمایی متفاوت

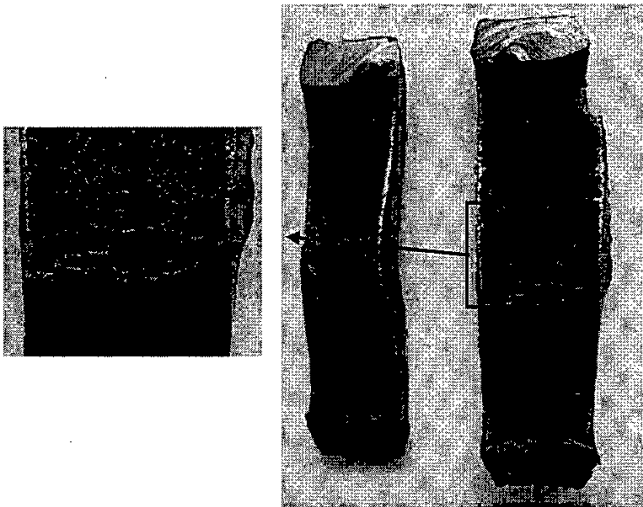
حضور عنصر مس: در بررسی‌های ریزساختاری در تصاویر جداره داخلی لوله، رسوبات زردرنگ بسیاری در سمت تابش، در سمت مقابل، درون لایه‌های رسوبی و حفره‌های ایجاد شده، مشاهده شده است. اگرچه شناسایی منشأ ورود یون مس به آب، نیازمند بررسی‌های دقیق است، اما با توجه به اینکه لوله‌های کندانسور معمولاً از جنس آلیاژهای مس هستند، به واسطه خوردگی و سایش، مس می‌تواند وارد آب شوند. در صورتی که یون مس در آب بویلر وجود داشته باشد، می‌تواند طبق واکنش ۵.۱۶، فرایند خوردگی فولاد بویلر را تسریع کند [4]:



آزمون کیفی چقرمگی شکست: در علم مواد، چقرمگی شکست، ضریب شدت تنش بحرانی یک ترک تیز است که در آن، انتشار ترک به‌طور ناگهانی، سریع و نامحدود می‌شود. یکی از روش‌های متداول بررسی کیفی استحکام در مقابل شکست موضعی در لوله‌ها، آزمون چقرمگی شکست است. در این آزمون، نمونه حلقوی از محل موردنظر تهیه و سپس با فشردن در دستگاه پرس (همانند شکل ۲۹.۱۶) له می‌شود تا به صورت کیفی، محل و نوع ترک‌دار شدن سطح بررسی شود. برای بررسی کیفیت ترک‌های ایجاد شده در سطوح داخلی، نمونه حلقوی بریده می‌شود (شکل ۳۰.۱۶).



شکل ۲۹.۱۶. نمونه حلقوی فشرده‌شده برای آزمون کیفی چقرمگی شکست



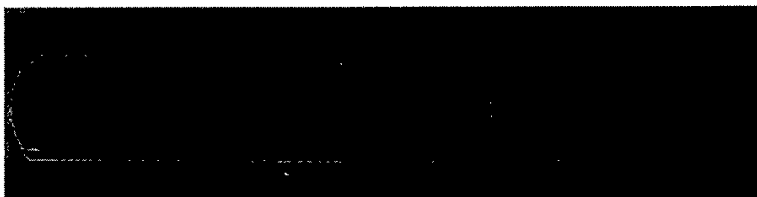
شکل ۳۰.۱۶. نمونه‌های برش خورده پس از انجام آزمون کیفی چقرمگی شکست

همان‌طور که در شکل ۳۰.۱۶ مشخص است، پس از انجام تست چقرمگی شکست، در سطح داخلی لوله در سمت آتش (نمونه سمت راست شکل ۳۰.۱۶ الف)، ترک‌های پرشمار و ریزی ناشی از اعمال تنش‌های کششی ایجاد شده است. در حالی که در سمت مقابل (نمونه سمت چپ شکل ۳۰.۱۶ الف) که پشت دیواره آبی قرار دارد، بخش عمده پوسته اکسیدی روی سطح ترک خورده و فلز تقریباً بدون تغییر باقی مانده است.

علائم خرابی: در لوله دیواره آبی، یک ترک مستقیم بلند (به طول تقریبی ۲/۵ متر) در راستای طول لوله ایجاد شده است (شکل ۳۱.۱۶).

## □ نمونه نهم {۱۰}

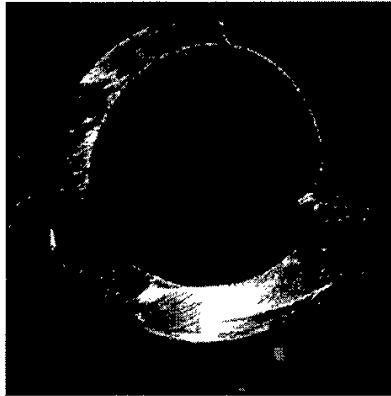
صنعت:	نیروگاه
محل نمونه:	لوله‌های دیواره آبی
نحوه قرار گرفتن نمونه:	قائم
عمر نمونه:	۵ سال
فشار کاری:	۱۷۰ bar
مشخصه‌های لوله:	جنس: ASME SA192



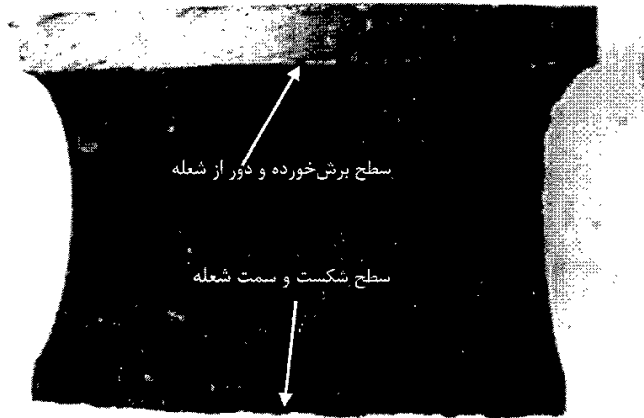
شکل ۳۱.۱۶. نمای کلی قطعه‌ای از لوله تخریب‌شده؛ این ترک به طول ۲/۵ متر امتداد یافته است.

شکل ۳۲.۱۶ مقطع عرضی لوله، غیریکنواختی ضخامت لوله و بیضوی شدن آن را نشان می‌دهد. بیشترین ضخامت لوله برابر با ۶/۳ میلی‌متر (ضخامت اولیه لوله)، به ناحیه‌ای مربوط است که در مقابل شعله مستقیم قرار نداشته و کمترین ضخامت هم مربوط به لبه ترک (سمت شعله) برابر با ۴/۶ میلی‌متر است. این تغییر ضخامت می‌تواند یکی از مشخصه‌های بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت در نتیجه بهره‌برداری نامناسب از بویلر و تغییرات سریع بار (مانورهای سریع بویلر) باشد. بر اثر این بیش‌گرمایش، دمای قسمتی از لوله به‌طور موضعی و در یک بازه زمانی کوتاه، بیش از حد افزایش یافته است.

شکل ۳۳.۱۶ نمایی از سطح داخلی لوله را نشان می‌دهد. لایه محافظ ترد و سیاه‌رنگ  $Fe_3O_4$ ، بخش چشمگیری از سطح داخلی لوله را پوشانده و قسمتی از این لایه اکسیدی که در مجاورت لبه شکست بوده، ریخته است. این لایه به دلیل ماهیت ترد رسوب‌ها، هنگام تغییر شکل سریع لوله — بر اثر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت — و در لحظه شکست نهایی آن، خرد شده و از سطح جدا شده است.



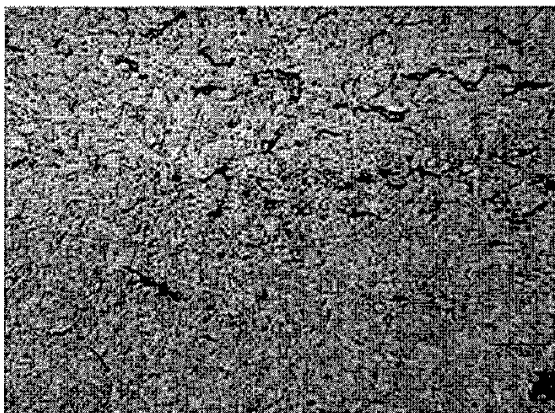
شکل ۳۲.۱۶. سطح مقطع عرضی لوله و تغییر ضخامت ایجادشده (بیضی شدن مقطع)



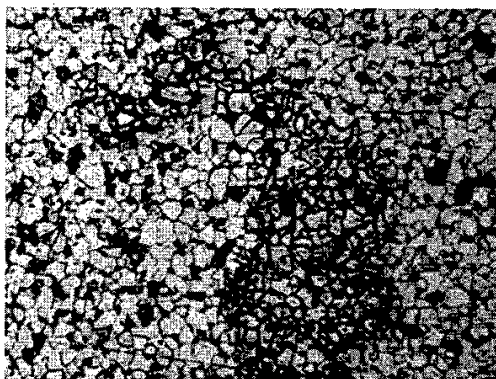
شکل ۳۳.۱۶. نمای داخلی لوله و آثار خوردگی آن

شکل ۳۳.۱۶ نشان می‌دهد شکست به شکل لبه کلفت، طولی و با ظاهر و مشخصات ماکروسکوپی شکست ترد اتفاق افتاده است. نوع شکست که نشان از حداقل تغییر شکل پلاستیک هنگام شکست و نیز رشد سریع و ناگهانی ترک دارد، مؤید تردشدن فلز و کمبودن چقرمگی آن در موضع ترک است.

بررسی ریزساختاری (متالوگرافی): شکل ۳۴.۱۶ تصویر متالوگرافی مقطع طولی از ناحیه مجاور ترک را نشان می‌دهد. ریزساختار نواحی مجاور ترک که در سمت شعله بوده، اغلب به صورت تیغه‌های سوزنی شکل است که می‌تواند معرف حضور مارتنزیت و بینیت باشد. سختی نسبتاً بالای لوله در این نواحی (HV ۳۱۵) نیز حضور فازهای سخت و به‌ویژه مارتنزیت را تأیید می‌کند. تغییر ساختار از نوع فریتی-پرلیتی به مارتنزیتی نشان می‌دهد دمای فلز لوله به‌صورت موضعی بسیار افزایش یافته و فلز وارد منطقه آستنیت شده است. با تداوم بهره‌برداری از لوله و شکست آن و خروج سریع آب از محل ترک، نواحی مجاور ترک به‌سرعت سرد و ساختار سوزنی شکل عمدتاً مارتنزیتی ایجاد شده است. این شواهد به‌همراه تغییر ضخامت لوله در نواحی گوناگون، تأییدی بر بیش‌گرمایش کوتاه‌مدت لوله به‌طور موضعی و در سمت شعله است. همچنین، در نواحی گوناگون، خوردگی شدید مرزدانه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۳۵.۱۶). حضور ریزترک‌های مرزدانه‌ای و ناپیوسته، ظاهر شکست ماکروسکوپی ترد و ترک طولی از نوع لبه‌کلفت، همگی از مشخصه‌های فرایند تردی هیدروژنی<sup>۱</sup> و آسیب هیدروژنی<sup>۲</sup> هستند.

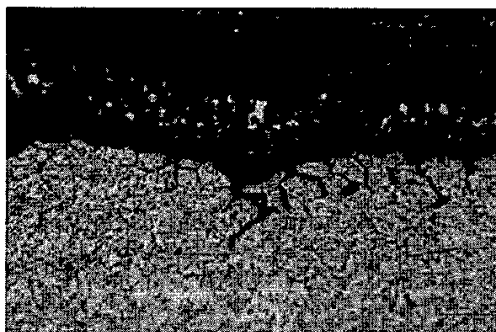


شکل ۳۴.۱۶. ریزساختار مقطع طولی ناحیه مجاور ترک



شکل ۳۵.۱۶. ریزساختار مربوط به مرکز نمونه طولی نزدیک به ترک

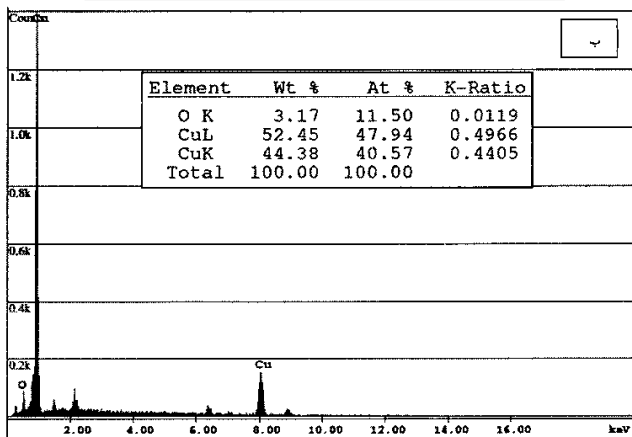
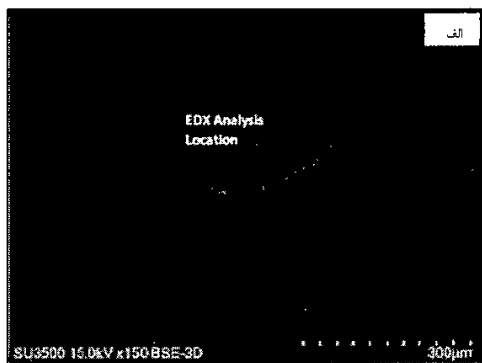
مشاهده عنصر مس: در بررسی‌های ریزساختاری در تصاویر مربوط به جداره داخلی لوله در سمت شعله، رسوب‌های زردرنگ درون لایه رسوبی و نزدیک دیواره مشاهده شده است (شکل ۳۶.۱۶). برای بررسی دقیق‌تر این ذرات، از آنالیز عنصری نیمه کمی EDX با میکروسکوپ الکترونی روبشی ۲ استفاده شده است. شکل ۳۷.۱۶ الف حضور یکی از این ذرات در لایه رسوب داخل لوله، در تصویر SEM را نشان می‌دهد. نتیجه آنالیز EDX این ذره، در شکل ۳۷.۱۶ ب نشان داده شده است. این نتایج، در مجموع حضور تقریبی بیش از ۹۶٪ وزنی عنصر مس را در ذره یادشده نشان می‌دهد که احتمال مطرح‌شده در تصاویر متالوگرافی را تأیید می‌کند.



شکل ۳۶.۱۶. وجود ذرات زردرنگ در لایه اکسیدی سطح داخلی لوله در سمت شعله

1. Energy Dispersive X-Ray Analysis
2. Scanning Electron Microscope (SEM)





شکل ۳۷.۱۶ الف) حضور یک ذره مشخص در لایه رسوبی داخل لوله و محل آنالیز نیمه کمی عنصری در تصویر SEM. ب) نتیجه آنالیز EDX.

### منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [2] *ASM Handbook, Vol.11*, "Failure Analysis and Prevention", 1992.
- [3] "Severe Under-deposit Corrosion Inducing Hydrogen Embrittlement in Water Wall Tubes", See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/315714925>
- [4] Djukic, M.B., Sijacki Zeravcic, V., Bakic, G.M., Sedmak, and A., Rajcic, B., "Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model", *Engineering Failure Analysis*, Volume 58, Part 2, 485-498, 2015.

- [۵] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و حسین اصغری فریاد، بررسی و تحلیل وضعیت سوپرهیتر پلاتن واحد ۲ نیروگاه بندرعباس، شرکت مشانیر، آبان ۱۳۸۲.
- [6] Naumann, Friedrich Karl, *Failure Analysis: Case Histories and Methodology*, Translators from The German Version: Claus G. Geotzel, Lilo K. Geotzel, Max-Planck-Institut Für Eisenforschung.
- [۷] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، مجید وانقی، گزارش مصور و علت یابی ترکیب لوله واتروال بویلر واحد ۴ نیروگاه بندرعباس، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، آبان ۱۳۹۶.
- [8] US patent' US4685334A - Method for ultrasonic detection of hydrogen damage
- [9] Babobian, R., "Localized Corrosion: Cause of Metal Failure", *West Conshohocken, PA: ASTM*, 145- 163, 1971.
- [۱۰] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، محمود سمیع‌زاده، بررسی علل تخریب لوله‌های دیواره آبی بویلر واحد ۳ نیروگاه بندرعباس، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، اردیبهشت ۱۳۹۴.

## فصل ۱۷

### خوردگی شتاب یافته با جریان

#### ۱.۱۷. مکانیسم خوردگی

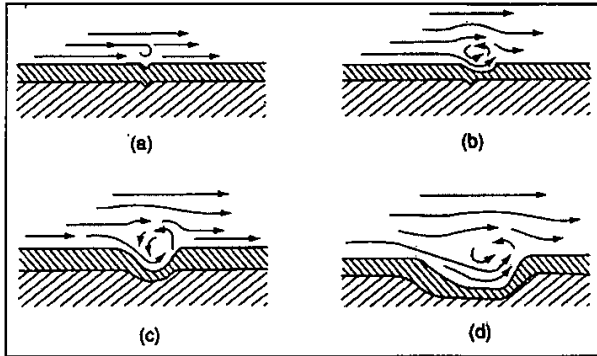
خوردگی شتاب یافته با جریان<sup>۱</sup> یا خوردگی-سایشی عبارت است از افزایش نرخ خوردگی یا از بین رفتن یک فلز بر اثر حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز. این حرکت که معمولاً بسیار سریع است، آثار سایش مکانیکی به دنبال دارد. یون‌های فلزی حل شده روی سطح فلز، بر اثر حرکت سیال روی سطح باقی نمی‌مانند یا محصولات جامد حاصل از خوردگی، به شیوه مکانیکی از سطح فلز جدا می‌شوند. خوردگی سایشی عموماً دارای ظاهری شیاردار<sup>۲</sup>، موجی شکل، حفره‌های کروی شکل و ناهموار است و معمولاً این اشکال در جهت خاصی قرار گرفته‌اند [۱]. شکل ۱.۱۷ شماتیک وقوع خوردگی سایشی بر اثر عبور سیال اغتشاش یافته را نشان می‌دهد [2].

وقوع خوردگی سایشی در محل خم یک لوله نیز در شکل ۲.۱۷ مشاهده می‌شود. بر اساس این تصویر، نحوه جوشکاری لوله از سطح بیرونی طوری بوده که منطقه جوش به سطح داخلی لوله نفوذ و یک ناهمواری ایجاد کرده است. این ناهمواری غیرعادی ناشی از نفوذ بیش از حد جوش<sup>۳</sup> می‌تواند سبب اغتشاش جریان سیال عبوری و متعاقباً وقوع خوردگی سایشی در نواحی پشت منطقه جوش شود. شاهد این مدعا، وجود حفره‌های جهت‌دار در نزدیکی محل شکست (بعد از جوش) و هر دو نیم‌قوس داخلی و خارجی است (شکل ۲.۱۷). این در حالی است که در ناحیه‌ای کمی پایین‌تر، در مجاورت خم لوله، اغلب حفره‌های ناشی از خوردگی سایشی، مطابق انتظار در نیم‌قوس خارجی مشاهده می‌شود و نیم‌قوس داخلی تا حد بسیار از این اتفاق مصون مانده است [3].

۱. Flow Accelerated (Assisted) Corrosion (FAC): به دلیل تشابه بسیار زیاد این خرابی با خرابی ایجاد شده بر اثر خوردگی شلات و وجود عوامل مشترک، تأکید می‌شود هم‌زمان فصل ۷ نیز مطالعه شود.

2. gullies

3. excess penetration



شکل ۱.۱۷. شماتیک وقوع خوردگی سایشی بر اثر عبور سیال مغشوش [2]



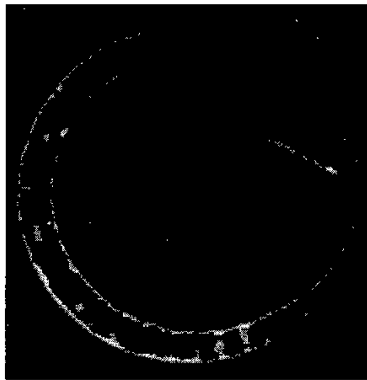
شکل ۲.۱۷. وقوع خوردگی سایشی در محل خم یک لوله [3]

اغتشاش سیال، وقوع خوردگی سایشی و به‌وجود آمدن حفره‌های پر شمار در سطح، ناهمواری فزاینده سطحی داخل لوله ایجاد می‌کند که خود موجب تشدید اغتشاش جریان سیال است. در نتیجه، به تدریج نرخ خوردگی سایشی افزایش می‌یابد و به‌طور پیوسته موجب کاهش ضخامت لوله در نزدیکی جوش می‌شود. این فرایند تا وقتی ضخامت موضعی لوله از مقدار بحرانی ضخامت برای تحمل فشار داخلی آن کمتر شود ادامه می‌یابد و به شکست نهایی منجر می‌شود [4].

خوردگی تشدید شده به‌واسطه جریان سیال، به دلیل تأثیر آن بر ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه، نیازمند مراقبت ویژه است [۱].

در حال حاضر پدیده FAC، در میان اصلی‌ترین خرابی‌های لوله در بویلرهای بازیافت، در درجه دوم اهمیت قرار دارد (پس از خستگی حرارتی). در حقیقت سطوحی که از جنس فولاد کربنی‌اند، با یک لایه اکسید مغناطیسی محافظ که روی فلز تشکیل می‌شود، در برابر حملات خوردنده‌ها محافظت می‌شوند. پدیده FAC به معنای از بین رفتن این لایه محافظ با جریان آب عبوری از روی سطوح فولاد کربنی است. از بین رفتن لایه محافظ عملاً سبب می‌شود سطح لوله برای خوردگی مستعدتر شود و به تدریج، به نازک شدن لوله و در نهایت سوراخ شدن آن می‌انجامد. شکل ۳.۱۷ نمونه‌ای از این نازک‌شدگی را نشان می‌دهد [5].

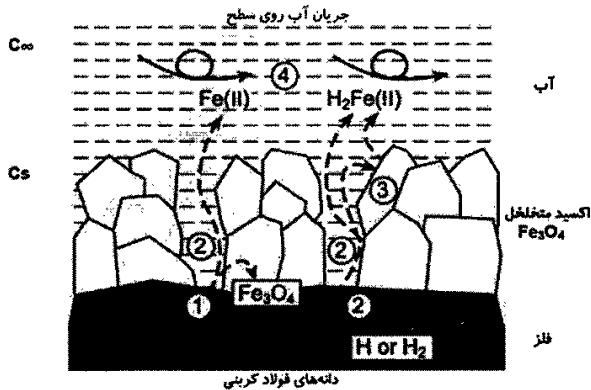
معمولاً دو نوع لایه اکسیدی روی فولادهای کربنی تشکیل می‌شود؛ اولی به شکل آهن مغناطیسی  $Fe_3O_4$  در شرایط احیا تشکیل می‌شود و دومی به شکل ترکیبات آهن، یعنی هیدرات اکسید آهنی  $FeOOH$  در شرایط اکسیداسیون. هرگاه نرخ انحلال لایه محافظ از نرخ رشد این لایه بیشتر شود، پدیده FAC آغاز می‌شود و وقتی جریان سیال سبب کنده‌شدن پوسته‌های لایه اکسید شود، این پدیده شدت می‌یابد.



شکل ۳.۱۷. نحوه آسیب‌رساندن پدیده FAC که به نازک‌شدگی لوله منجر شده است [5].

در شکل ۴.۱۷ طرحواره‌ای از رخداد پدیده FAC، نحوه انحلال و کنده‌شدن پوسته‌های اکسیدی و خورد شدن اکسید آهن مغناطیسی در سطح لوله نشان داده شده است. در سرعت‌های پایین، جریان سیال از نوع آرام و موازی با سطح فلز است؛ سرعت از حدود صفر روی سطح لوله، به حداکثر مقدار خود در محور مرکزی لوله می‌رسد و رشد لایه  $Fe_3O_4$ ، از خوردگی بیشتر لوله

جلوگیری می‌کند. اما در سرعت‌های بالاتر، اثر اصطکاک میان آب و لایهٔ اکسیدی، دو مولفهٔ شعاعی و محوری سرعت جریان — که به‌طور نامنظم نوسان می‌کنند — را تغییر می‌دهد و جریان سیال، تصادفی و مغشوش می‌شود. در چنین شرایطی، رشد لایهٔ  $Fe_3O_4$  مختل می‌شود و نمی‌تواند نقش محافظتی خود را به‌درستی ایفا کند و در نتیجه پدیدهٔ FAC رخ می‌دهد [4].



شکل ۴.۱۷. طرحوارهٔ مکانیسم پدیدهٔ FAC [6]

## ۲.۱۷. بررسی از دیدگاه سیالاتی

در سیستم‌های لوله‌کشی، لازم است سیال از اتصالات، خم‌ها و مسیرهایی با مقاطع متغیر عبور کند. این امر، موجب بروز پدیدهٔ جدایش در سیال و همچنین تلفات انرژی بیشتر در محل جدایش و اغتشاش سیال می‌شود. نتایج تجربی فراوان و متنوعی برای این افت انرژی بر اثر اغتشاش و جدایش به‌دست آمده است [4].

ممکن است در منابع گوناگون راجع به مطالعهٔ یک جریان خاص، مقادیر متفاوتی گزارش شود. از این‌رو اطلاعات ارائه‌شده در این فصل، به‌عنوان نمونه ارائه شده‌اند. در یک طراحی ضعیف، ممکن است افت انرژی چشمگیری در محل تغییر مقطع لوله اتفاق بیفتد. اگر ورودی جریان با گوشه‌های تیز باشد، در محل گوشه‌ها جدایش ایجاد می‌شود و پدیدهٔ انقباض ورودی<sup>۱</sup> شکل می‌گیرد. در این محل، جریان باید با ایجاد شتاب موضعی از مقطع باریک‌شده بر اثر انقباض مسیر عبور کند. سه هندسهٔ متفاوت و اصلی برای ورود به مقطع باریک‌تر در شکل ۵.۱۷ نشان داده شده است.

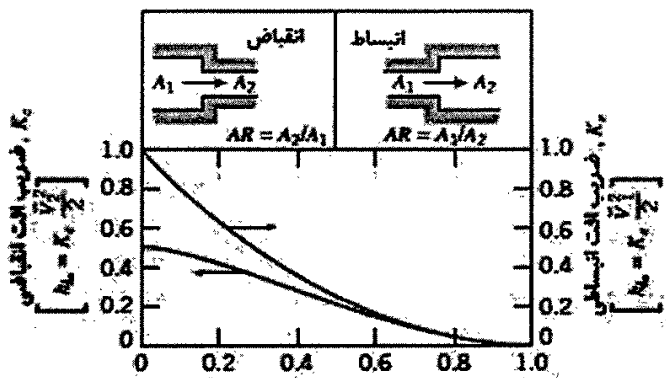
1. vena contracta

مشاهده می‌شود که ضریب افت، به‌طور چشمگیری با گرد شدن زاویه لبه کاهش می‌یابد و برای انحنای گوشه با نسبت  $r/D > 0.15$  می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

نوع ورودی	ضریب افت								
تورفته	0.78								
گوشه‌دار	0.5								
گرد	<table border="1"> <tr> <td><math>r/D</math></td> <td>0.02</td> <td>0.06</td> <td><math>\geq 0.15</math></td> </tr> <tr> <td><math>K</math></td> <td>0.28</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> </tr> </table>	$r/D$	0.02	0.06	$\geq 0.15$	$K$	0.28	0.15	0.04
$r/D$	0.02	0.06	$\geq 0.15$						
$K$	0.28	0.15	0.04						

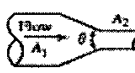
شکل ۵.۱۷. ضریب افت در انواع ورودی به لوله‌ها [2]

ضرایب افت برای افزایش یا کاهش لحظه‌ای مقاطع دایره‌ای در شکل ۶.۱۷ نشان داده شده‌اند. افت انرژی ناشی از تغییر تدریجی مقطع، با به‌کارگیری شیپوره یا نازل میان دو قسمت لوله با مقاطع متفاوت، کاهش می‌یابد. اطلاعات لازم راجع به ضریب افت نازل‌ها در جدول ۱.۱۷ ارائه شده‌اند. توجه شود که ستون انتهایی این جدول (داده‌ها برای  $\theta = 180^\circ$ ) مؤید شکل ۶.۱۷ است.



شکل ۶.۱۷. ضریب افت برای جریان در تغییر مقطع‌های لحظه‌ای [8]

جدول ۱.۱۷. ضریب افت برای کاهش تدریجی مقطع دایره‌ای و مستطیلی [3]



	۱۸۰	۱۵۰	۱۲۰	۹۰	۵۰ تا ۶۰	۱۵ تا ۴۰	۱۰	زاویه $\theta$ (درجه) $A_2/A_1$
ضریب افت	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۵
	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۵
	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۰

### ۳.۱۷. عوامل FAC

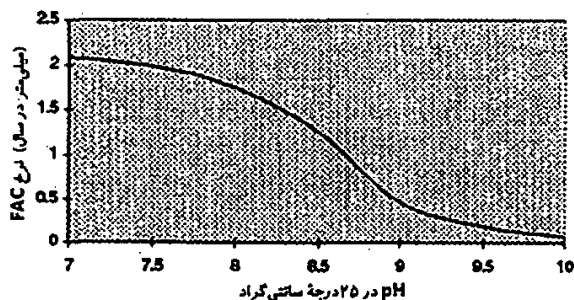
عمده‌ترین پارامترهای مؤثر در پدیده FAC عبارت‌اند از [9]:

۱. شیمی آب (pH و غلظت اکسیژن)
  ۲. طراحی اولیه هارپ
  ۳. خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد مورد استفاده در ساخت هارپ
  ۴. شرایط فیزیکی آب (دما)
  ۵. ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال (سرعت سیال)
- در ادامه، این موارد به تفصیل بررسی می‌شوند.

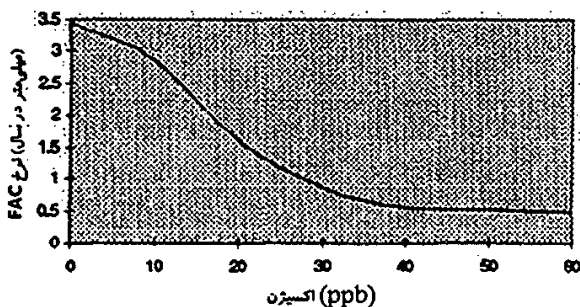
#### ۱.۳.۱۷. شیمی آب (pH و غلظت اکسیژن)

روابط pH و غلظت اکسیژن با پدیده FAC، به ترتیب در نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۷.۱۷ و ۸.۱۷ نشان داده شده‌اند. در شکل ۷.۱۷ مشاهده می‌شود که با افزایش pH از مقدار ۷، نرخ سایش ناشی از پدیده FAC به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. به‌طور مثال، این شکل نشان می‌دهد در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با تغییر pH از ۸ به ۹، نرخ FAC با ضریب ۴ کاهش می‌یابد. شکل ۸.۱۷ میزان تغییرات نرخ FAC را برحسب غلظت اکسیژن در آب نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت اکسیژن در آب، نرخ FAC کاهش می‌یابد (این موضوع به دلیل افزایش سرعت تشکیل لایه اکسیدی محافظ روی سطح است). رابطه موجود برای مقادیر پایین اکسیژن گویاست. در غلظت‌های بالاتر از ۱۵۰ ppb، نرخ FAC مستقل از غلظت اکسیژن خواهد بود [9].





شکل ۱۷.۷. رابطه نرخ FAC با PH در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد [9]



شکل ۱۷.۸. رابطه نرخ FAC با غلظت اکسیژن در آب [9]

### ۲.۳:۱۷. طراحی اولیه هارپ

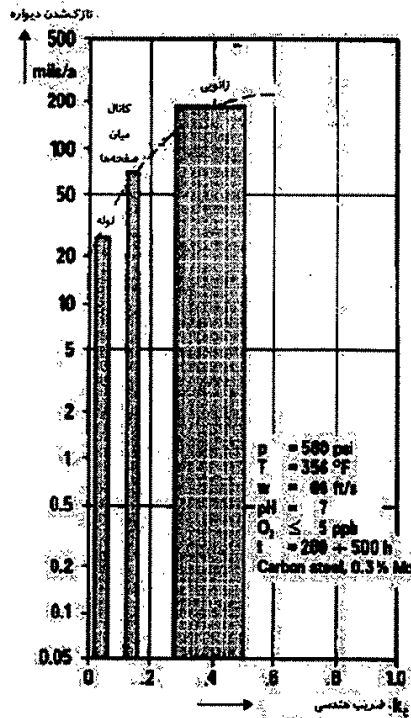
اجزایی که به دلیل نوع طراحی داخلی، باعث افزایش اغتشاش<sup>۱</sup> در جریان سیال می شوند، بسیار مستعد تحمل آسیب به واسطه خوردگی شتاب یافته با جریان اند. جدول ۲.۱۷ رابطه هندسه<sup>۲</sup> اجزا با نرخ سایش را برای قطعات ساخته شده از فولاد کربنی نشان می دهد. بیشترین نرخ سایش به سه راهی ها<sup>۳</sup> و کمترین نرخ به لوله های مستقیمی مربوط است که طولشان بیش از ۱۰ برابر قطرشان باشد [9]. منبع [۱۰] بیان می کند اولین نشانه های FAC در نقاط تکین هندسی<sup>۴</sup> مانند خم ها<sup>۵</sup> و دوشاخه ای ها مشاهده می شوند. این مسئله در شکل ۹.۱۷ نیز نشان داده شده است.

1. turbulence
3. tees
5. bends

2. geometry
4. singularity

جدول ۲.۱۷. جدول رابطه اجزای فولاد کربنی و نرخ سایش [9]

نرخ سایش نسبی	هندسه اجزای فولادی
۱/۰	صفحه‌ها و لوله‌های عمود بر جریان
۰/۷۵	سرهایی‌ها از جریان اصلی به جریان‌های انشعابی و اصلی
۰/۶۰	سرهایی‌ها از جریان فرعی به جریان‌های اصلی
۰/۵۲	خم، $r/D = 0.5$
۰/۳۰	خم، $r/D = 1.5$
۰/۲۳	خم، $r/D = 2.5$
۰/۱۶	لوله‌های ورودی
۰/۱۵	سرهایی‌های پایین‌دست
۰/۰۴	لوله‌های بلند، به‌جز لوله‌های ورودی



شکل ۹.۱۷. رابطه ضریب هندسی و کاهش ضخامت (سایش) [11]

### ۳.۳.۱۷. خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد مورد استفاده در ساخت هارپ

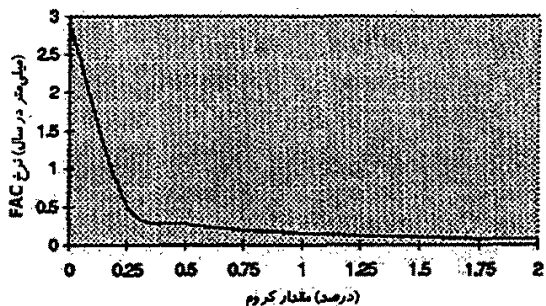
برخی عناصر آلیاژی می‌توانند به‌طور مؤثری نرخ FAC را کاهش دهند. بیشترین تأثیر را می‌توان در عنصر کروم<sup>۱</sup> مشاهده کرد. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی عملاً در مقابل FAC ایمن است و فولادهای کروم-مولیبدن نیز عملکرد مقبولی دارند. شکل ۱۰.۱۷ تأثیر عنصر آلیاژی کروم را بر نرخ سایش ناشی از FAC نشان می‌دهد [9].

فولاد کربنی در مقابل این پدیده بسیار آسیب‌پذیر است. مقاومت فولادهای کروم‌دار و زنگ‌نزن در مقایسه با فولاد کربنی فاقد کروم، در مقابل FAC، در جدول ۳.۱۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که وجود مقدار کمی کروم (در حد ۰/۱٪)، فولاد را در مقابل سایش-خوردگی تا ۳۴ برابر مقاوم‌تر می‌کند. منبع [۱۸] لوله‌ها و سیستم‌های ساخته شده از فولاد کربنی را در صورت احراز یکی از شرایط زیر، در معرض سایش-خوردگی نمی‌داند:

- وجود دست‌کم ۱/۲۵٪ کروم
- دمای کمتر از ۹۳ درجه سانتی‌گراد
- وجود اکسیژن بیش از ۱۰۰۰ ppb

### ۴.۳.۱۷. شرایط فیزیکی آب (دما)

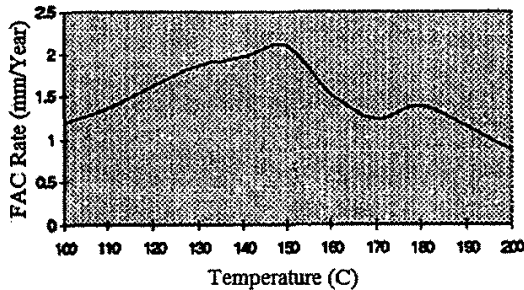
بیشترین نرخ FAC مربوط به محدوده دمایی ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای جریان‌های تک‌فاز و حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد برای جریان‌های دوفاز است. برای دماهای کمتر از ۵۰ درجه و بیشتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ FAC دارای مقادیری کمتر از منحنی دمایی نشان داده شده در شکل ۱۱.۱۷ است [9].



شکل ۱۰.۱۷. تأثیر درصد کروم روی نرخ FAC [9]

جدول ۳.۱۷. مقاومت فولادهای کربنی حاوی کروم و فولاد زنگ‌نزن در مقایسه با فولاد کربنی بدون کروم [12]

مقاومت FAC برای آلباز نسبت به فولاد کربنی	ترکیب نامی (فقط کروم و مولیبدن)	مواد
۱۰	0.10% Cr	A106B+0.10%Cr
۳۴	1.25% Cr, 0.50% Mo	P11
۶۵	2.25% Cr, 1.00% Mo	P22
>۲۵۰	18% Cr	304

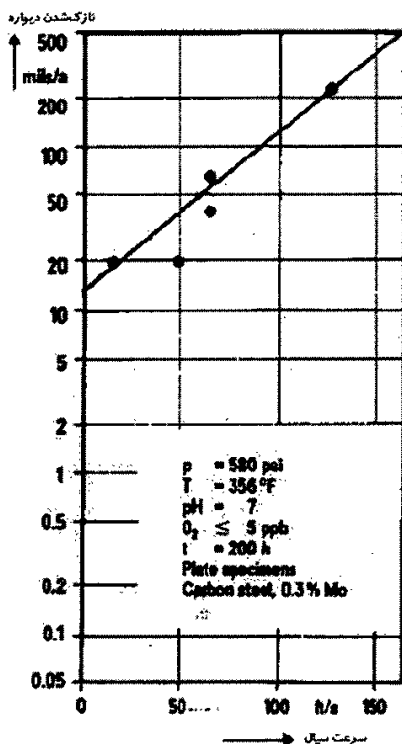


شکل ۱۱.۱۷. تأثیر دما بر نرخ FAC [9]

بررسی‌های انجام‌شده در منبع [13]، بازه بالایی دما را ۲۰۴ درجه سانتی‌گراد و فقط در یک مورد ۲۳۲ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. بر اساس نظریه‌های موجود، در دماهای بالاتر، لایه زنگی شکل می‌گیرد که در مقابل مکانیسم سایب شدت‌یافته بر اثر جریان، مقاوم‌تر است و در نتیجه شدت آسیب کاهش می‌یابد.

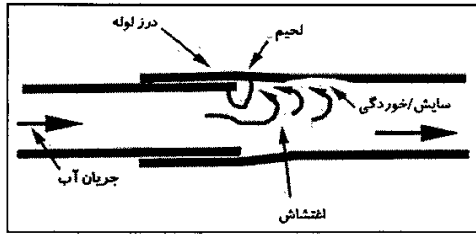
#### ۵.۳.۱۷. ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال (سرعت سیال)

در منبع [9] بیان می‌شود که افزایش سرعت جریان، نرخ FAC را افزایش می‌دهد. برای این پارامتر، حد آستانه وجود دارد. در سرعت‌های کمتر از آستانه، شرایط خوردگی یکنواخت فراهم می‌شود و نرخ FAC تابع سرعت نیست. برای فولاد کربنی، معمولاً سرعت‌های کمتر از ۲ متر بر ثانیه پیشنهاد می‌شود. شکل ۱۲.۱۷ رابطه کاهش ضخامت و سرعت جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷.۱۲. رابطه سرعت جریان و کاهش ضخامت [11]

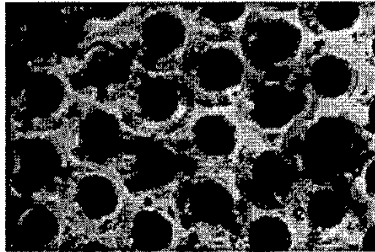
در سیستم‌های لوله‌کشی، لازم است سیال از اتصال‌ها، خم‌ها و مسیرهایی با مقاطع متغیر عبور کند. این امر موجب بروز پدیده جدایش در سیال و تلفات انرژی بیشتر در محل جدایش و اغتشاش سیال می‌شود [14]. منبع [4] بیان می‌کند که برای بررسی جریان سیال درون لوله‌ها و اطراف محل اتصال به هدر، ابتدا باید مدل‌سازی ریاضی با استفاده از قوانین بقا انجام شود. شکل ۱۳.۱۷ شماتیک وقوع خوردگی سایشی بر اثر اغتشاش سیال بعد از عبور از یک محل اتصال ناهم‌سطح را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳.۱۷. شماتیک وقوع خوردگی سایشی بر اثر اغتشاش سیال بعد از عبور از یک محل اتصال ناهم سطح [8]

#### ۴.۱۷. محل وقوع خوردگی

این نوع خرابی معمولاً در لوله‌هایی که سرعت جریان آب بیش از حد مجاز باشد اتفاق می‌افتد؛ یعنی در اکونومایزرهای واحدهای بخاری و سیکل ترکیبی، اواپراتورهای HP سیکل ترکیبی و در محل اتصال لوله‌ها به صفحه نگهدارنده انتهای لوله‌ها<sup>۱</sup> در هیترهای فشارقوی نیروگاهی (شکل ۱۴.۱۷). این خوردگی همچنین در محل‌های بروز پدیده اغتشاش (محل اتصال لوله‌ها به هدر) و تغییر مومنتم سیال (در محل خم لوله‌ها) رخ می‌دهد.



شکل ۱۴.۱۷. بروز پدیده FAC در صفحه نگهدارنده انتهای لوله‌های یک هیتر فشار قوی در یک نیروگاه بخار ۳۲۰ مگاواتی.

#### ۵.۱۷. روش‌های پیشگیری از FAC

از آنجاکه عوامل این نوع خوردگی، به کیفیت و سرعت جریان، pH و دمای آب و جنس لوله وابسته‌اند، بنابراین کاهش یا حذف پدیده FAC می‌تواند با اعمال تغییرات مناسب در این عوامل محقق شود.

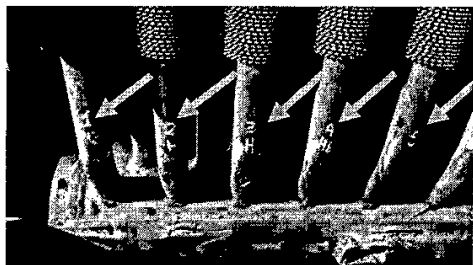
## ۶.۱۷. بررسی چند نمونه از مشکلات به وجود آمده در بویلر صنایع گوناگون بر

### اثر پدیده FAC

علائم ظاهری: محل وارد آمدن آسیب‌های مذکور، در ناحیه اتصال لوله‌های پایین آورنده به هدر بالا و پایین، و همین‌طور محل خمیدگی این لوله‌هاست. در مجموعه حاضر، در هر بویلر بازیاب، دو هارپ قرار دارد و در هر هارپ، ۳۹ ردیف لوله نصب شده است. در این ۳۹ ردیف لوله، آب در دو مجموعه ۵ ردیفی در دو طرف هارپ (مجموعاً ۱۰ ردیف) به پایین می‌آید<sup>۱</sup> و از ۲۹ ردیف لوله، آب میانمی به بالا بازمی‌گردد؛ هر ردیف نیز خود شامل ۳ لوله است. شایان ذکر است که از این ۳ لوله، تنها لوله وسط به‌طور مستقیم به هدرهای پایین و بالا متصل می‌شود و دو لوله کناری، با ایجاد خم به هدرها وارد می‌شوند. واضح است که به دلیل تفاوت تعداد لوله‌های پایین آورنده نسبت به لوله‌های بالا برنده (۱۰ لوله در مقابل ۲۹ لوله)، سرعت آب در لوله‌های پایین آورنده از بالا رنده‌ها بیشتر بوده که همین امر منشأ آسیب (FAC) لوله‌هاست. مسئله گفته شده، متأثر از طراحی بویلر است.

### □ نمونه اول [۱۵]

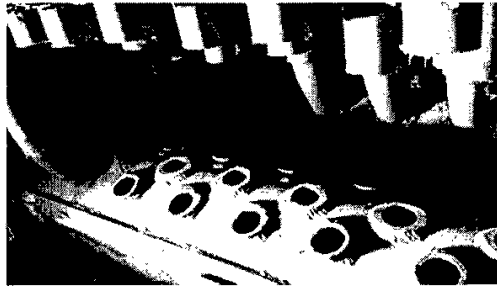
صنعت:	نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله‌های اکونومایزر بویلر بازیافت
نحوه قرار گرفتن نمونه:	لوله‌ها عمودی و محل خرابی در محل اتصال لوله‌ها به هدرهای بالا و پایین
عمر نمونه:	۲/۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	AVT (All Volatile Treatment)
شرایط کاری:	دمای آب: ۲۰۰°C، فشار داخلی: ۱۳۵ تا ۱۵۰ bar
مشخصه‌های لوله:	جنس: فولاد ASTM A178 Grade C



شکل ۱۵.۱۷. محل‌های ضخامت‌سنجی شده در محل خم لوله‌ها

1. downcomer

2. risers

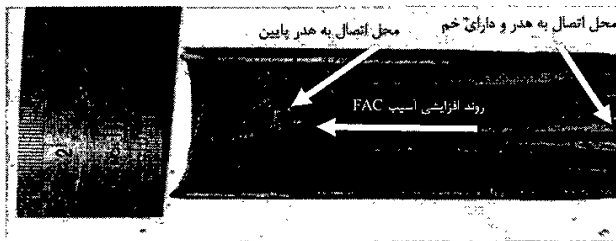


شکل ۱۶.۱۷. نمای کلی از موقعیت آسیب وارد شده به واحد

بازرسی چشمی: بازرسی چشمی، آثار سایش شدید و موضعی به واسطه خوردگی تشدید شده با جریان (FAC) را در سطح داخلی و محل اتصال لوله‌ها به هدر نشان می‌دهد. وجود حفره‌های پُرشمار در سطح داخلی، با توجه به عمر بهره‌برداری از بویلر، غیرعادی است و به بررسی‌های بیشتر نیاز دارد.

بررسی نمونه‌های آسیب‌دیده در دو بخش نزدیک به هدر بالا و پایین انجام شده است. همچنین در هر بخش، تفاوت لوله‌های میانی (لوله‌های مستقیم و بدون خم در محل اتصال به هدر) و لوله‌های کناری (همراه با خم در محل اتصال به هدر) از نقطه‌نظر ویژگی‌های سطح داخلی بیان شده است.

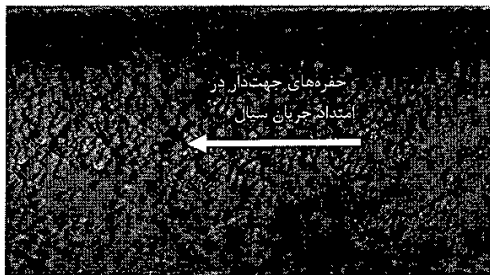
لوله‌های متصل به هدر پایین: شکل ۱۷.۱۷ نمای کلی از سطح داخلی لوله آسیب‌دیده در سمت هدر پایین را بعد از برش طولی نشان می‌دهد. منطقه خم لوله و آسیب که کمی بعد از خم شروع می‌شوند، در شکل نشان داده شده است.



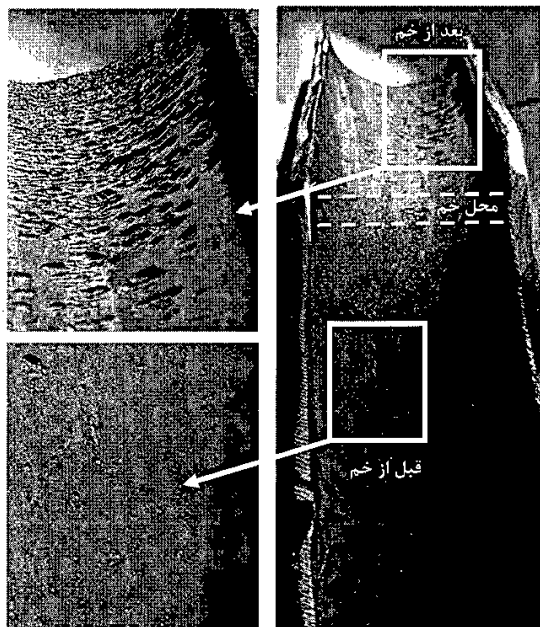
شکل ۱۷.۱۷. نمای کلی از سطح داخلی لوله آسیب‌دیده ورودی به هدر پایین در محل اتصال به هدر



در سطوح داخلی لوله‌ها، حفره‌های پرشماری با شکل‌های گوناگون اما جهت‌دار، دیده می‌شود. تعداد و تمرکز این حفره‌ها در نیم‌قوس خارجی پس از خم، به مراتب بیش از نیم‌قوس داخلی پس از خم است (شکل ۱۹.۱۷). این مسئله در همه لوله‌ها مشهود است. شکل ۱۸.۱۷ مورفولوژی جهت‌دار این حفره‌ها را در بزرگ‌نمایی بیشتر نشان می‌دهد.



شکل ۱۸.۱۷. مورفولوژی جهت‌دار حفره‌های داخل لوله



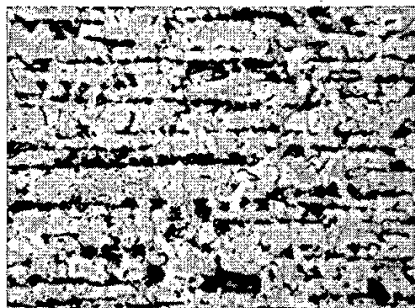
شکل ۱۹.۱۷. شدت آسیب وارده به لوله ورودی به هدر پایین، قبل و پس از خم، و شکل‌گیری حفره‌های جهت‌دار در جهت جریان سیال

در شکل ۲۰.۱۷ سطح داخلی لوله میانی (لوله مستقیم در محل اتصال به هدر) نمایش داده شده است. دو نکته تأمل برانگیز است. اولاً، این لوله‌ها نیز دچار آسیب شده‌اند. ثانیاً میزان آسیب کمتر از لوله‌های خم‌شده کناری است. هر دو نکته مؤید این مطلب‌اند که پدیده FAC لزوماً به واسطه خم اتصال به هدرها ایجاد نشده است؛ گرچه وجود خم، این پدیده را تشدید کرده است.

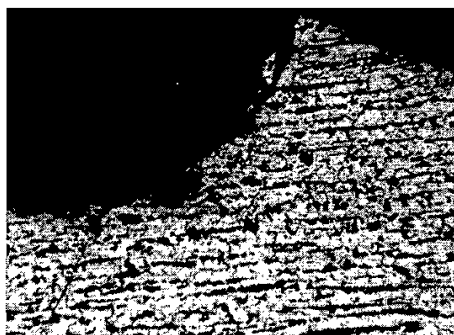


شکل ۲۰.۱۷. تصویر سطح داخلی لوله میانی مستقیم

لوله‌های متصل به هدر بالا: علاوه بر مشاهدات مشابه با لوله‌های ورودی به هدر پایین، نکته دیگری که در بازرسی چشمی تشخیص‌پذیر است، کاهش شدید و تقریباً یکنواخت ضخامت در لوله‌های کناری، نسبت به ضخامت لوله میانی است. در این لوله‌ها، ضخامت تقریباً نصف شده است. بررسی ریزساختاری: شکل ۲۱.۱۷ ریزساختار کلی لوله در میانه ضخامت آن را نشان می‌دهد. در این شکل، ریزساختار شامل فریت و پرلیت است که ریزساختار متداول فولاد به کاررفته در ساخت لوله‌های آسیب‌دیده است. همچنین این تصویر نشان می‌دهد در شرایط بهره‌برداری از لوله، تغییر چندانی در ریزساختار رخ نداده است. جهت‌داربودن دانه‌ها در ریزساختار که به ساختار نواری معروف است، نشانگر جهت نورد در فرایند تولید لوله است. با توجه به شکل ۲۲.۱۷ اثری از لایه اکسید محافظ روی سطح داخلی مشاهده نمی‌شود. بنابراین، وقوع پدیده FAC درون لوله که به کنده‌شدن لایه محافظ اکسیدی منجر شده است، تأیید می‌شود.



شکل ۲۱.۱۷. ریزساختار لوله در میانه ضخامت لوله (بزرگنمایی: ۲۰۰ برابر)



شکل ۲۲.۱۷. ریزساختار سطح داخلی لوله و فقدان لایه اکسید محافظ در این سطح

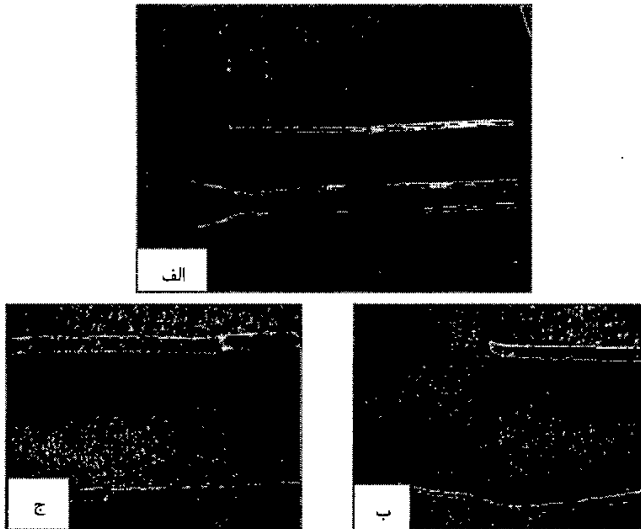
□ نمونه دوم [۱۶]

صنعت:	نیروگاه بخار
محل نمونه:	محل خم لوله‌های اکونومایزر
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۳۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	CWT (فسفات و هیدرازین)
فشار کاری:	۱۲۵ bar
مشخصه‌های لوله:	جنس: ASME SA210

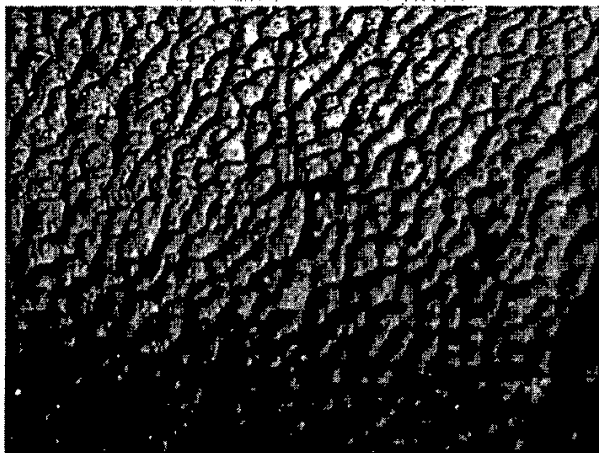
علائم ظاهری: شکل ۲۳.۱۷ برش طولی لوله گسیخته را نشان می‌دهد. نکته توجه‌برانگیز، کاهش شدید موضعی ضخامت لوله بوده که با نزدیک شدن به محل خم، در محل گسیختگی به کمتر از ۰/۵ میلی‌متر رسیده است. شایان ذکر است که قطر خارجی لوله در دورترین نقطه از محل گسیختگی، ۵۰ میلی‌متر و ضخامت اولیه لوله، ۴/۸ میلی‌متر است.

نکته جالب دیگر، وجود حفره‌های جهت‌دار خوردگی در سطح داخلی لوله است که تقریباً در تمامی نقاط (به‌صورت جهت‌دار) ایجاد شده‌اند (شکل ۲۳.۱۷). شکل ۲۴.۱۷ این حفره‌ها را با بزرگ‌نمایی بیشتر نشان می‌دهد.

شکل ظاهری سطح داخل لوله، وجود حفره‌ها و جهت‌داربودن آن‌ها، خوردگی سایشی را اثبات می‌کند. به‌نظر می‌رسد پایین‌بودن pH آب و سرعت زیاد آن در محل خم، در درازمدت موجب این فرسایش شده باشد. البته منطقه آسیب‌دیده، در نزدیکی محل تزریق مواد شیمیایی قرار دارد و غلظت مواد در این ناحیه بیشتر است.

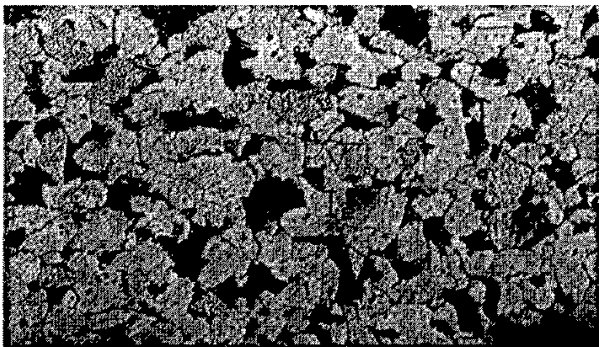


شکل ۲۳.۱۷. برش طولی لوله گسیخته شده؛ کاهش ضخامت موضعی در محل و حفره‌های جهت‌دار ایجاد شده در سطح داخلی آن.



شکل ۲۴.۱۷. حفره‌های سطح داخلی لوله با بزرگ‌نمایی بیشتر

بررسی ریزساختاری: شکل ۲۵.۱۷ مقطع عرضی لوله را نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که هیچ‌گونه تغییر ساختاری روی نداده است. فازهای فریت و پرلیت کاملاً سالم و مطابق انتظار از ماده نو، مشاهده می‌شوند.

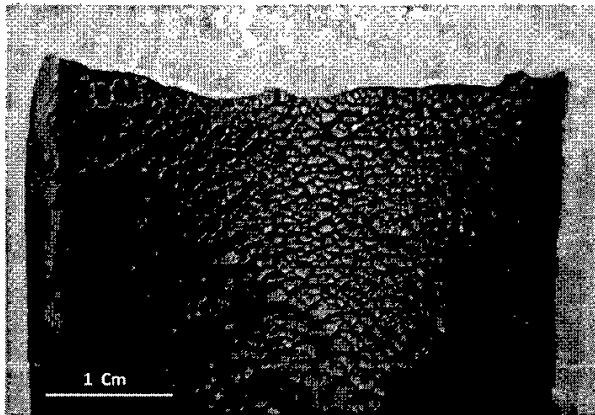


شکل ۲۵.۱۷. ساختار مقطع عرضی لوله (اچ شده با نایتال، بزرگ‌نمایی: ۵۰۰ برابر)

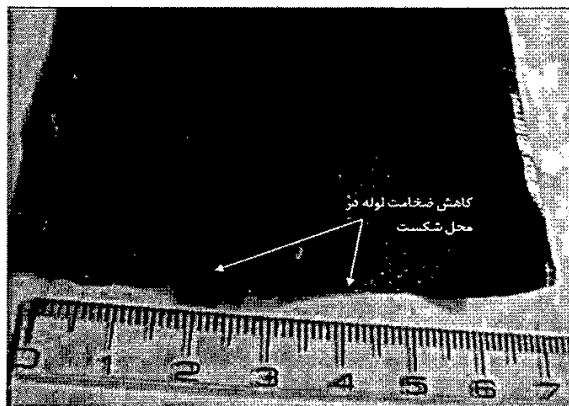
□ نمونه سوم [۱۷]

صنعت:	نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله‌های اکتونومایزر بویلر باز یافت
نحوه قرار گرفتن نمونه:	لوله‌ها عمودی و محل خرابی در محل اتصال لوله‌ها به هدرهای بالا و پایین
عمر نمونه:	۲/۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	AVT (All Volatile Treatment)
شرایط کاری:	دمای آب: ۲۰۰°C، فشار داخلی: ۱۳۵ bar تا ۱۵۰ bar
مشخصه‌های لوله:	فولاد ASTM A178 Grade C

بررسی وضعیت ظاهری: این شکست‌ها در محل جوش لوله به هدر بالا مشاهده شده است. شکل ۲۶.۱۷ نازک‌شدگی لوله در محل نزدیک به شکست را نشان می‌دهد. این لوله‌ها ۴ ماه قبل از گسیختگی، تعویض و لوله ضخیم‌تر از جنس T22 جایگزین شده بود، اما دوباره (بسیار سریع) سوراخ شده است. این تجربه نشان می‌دهد فولاد با درجه بالاتر هم مشکل را کاملاً برطرف نمی‌کند، بلکه فقط زمان سوراخ شدن را به تأخیر می‌اندازد (شکل ۲۷.۱۷).



شکل ۲۶.۱۷. حفره‌های ایجاد شده در سطح داخلی لوله



شکل ۱۷.۲۷. لوله‌های نزدیک به هدر بالا

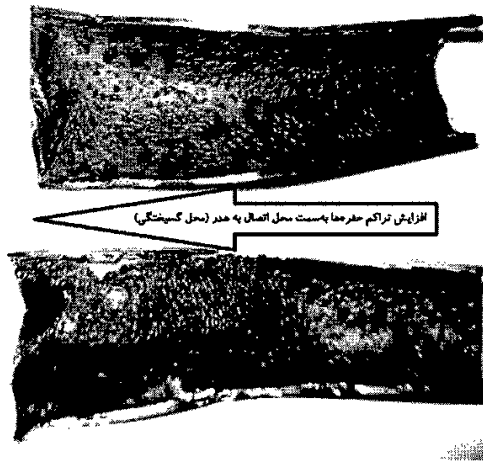
□ نمونه چهارم [۱۸]

صنعت:	نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله‌های اوپراتور دی‌آریتور
نحوه قرار گرفتن نمونه:	محل خم‌ها و محل اتصال لوله‌ها به هدرهای بالا و پایین
عمر نمونه:	۲/۵ سال
شرایط کاری:	دمای آب: $200^{\circ}\text{C}$ ، فشار داخلی: ۱۲۵ bar تا ۱۵۰ bar
مشخصه‌های لوله:	فولاد ASTM A178 Grade C

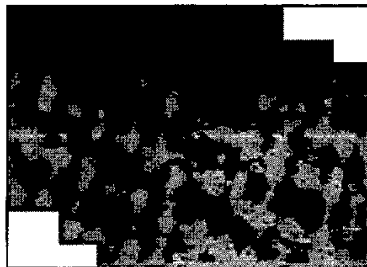
علائم ظاهری: این بررسی در پی وقوع چند شکست (گسیختگی) در خم‌های هارپ‌های اوپراتور دی‌آریتور بویلرهای بازیافت یک نیروگاه سیکل ترکیبی، انجام شده است. شکل ۲۸.۱۷ نمای سطح داخلی لوله تخریب شده را پس از برش طولی نشان می‌دهد. مناطق شکست و خم لوله در شکل نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، اولاً تراکم حفره‌ها در قسمت داخلی خم به مقدار چشمگیری کمتر از خارج خم است؛ ثانیاً تراکم حفره‌ها در سطح داخلی لوله و خارج خم، با نزدیک شدن به محل اتصال به هدر، افزایش می‌یابد.

شکل ۲۹.۱۷ تصویری با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر از یک حفره را نشان می‌دهد. نکته تأمل‌برانگیز، فقدان لایه محافظ اکسیدی داخل حفره‌هاست که این موضوع، بروز پدیده FAC را قطعی و تأیید می‌کند.

بر اساس آزمایش فولادهای ساده کربنی در محدوده دمایی ۲۵ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، پایین‌ترین میزان حلالیت  $Fe_3O_4$  در محدوده pH بین ۹ و ۱۰ اتفاق می‌افتد و توصیه می‌شود برای برداشت کمینه آهن، pH در محدوده  $(\pm 0.2)$  ۹/۴ حفظ شود [19]؛ درحالی‌که pH آب در این بویلر، بین ۸ تا ۸/۵ است.



شکل ۲۸.۱۷. نمای کلی از سطوح داخلی لوله تخریب‌شده بعد از برش طولی که نشان‌دهنده افزایش تراکم حفره‌ها به سمت محل اتصال به هدر (محل گسیختگی) است.



شکل ۲۹.۱۷. تصویر با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر از یک حفره از نمونه اچ‌نشده



گرچه این پدیده فعلاً در محل خم‌ها و محل اتصال لوله‌ها به هدر رخ داده است، اما با گذر زمان، احتمال بروز این مشکل در دیگر قسمت‌های لوله‌ها که سرعت آب بیشتر است، وجود دارد. با توجه به حساسیت شدید فولادهای کربنی ساده به FAC، لازم است در نقاط بحرانی (محل خم لوله تا اتصال به هدر) با لوله‌های آلیاژی کروم دار، ترجیحاً ASTM A-355 Gr. P22 که دارای ۲/۲۵٪ کروم و ۱٪ مولیبدن هستند، تعویض شوند.

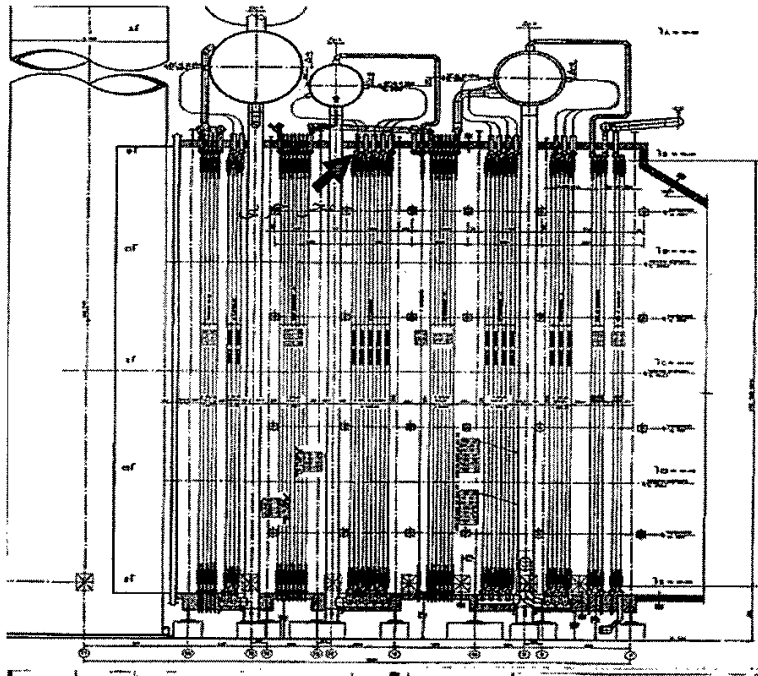
□ نمونه پنجم [۲۰]

نیروگاه سیکل ترکیبی	صنعت:
لوله‌های اوابراتور	محل نمونه:
عمودی	نحوه قرار گرفتن نمونه:
۱۳ سال	عمر نمونه:
CWT	رژیم شیمیایی آب:
دمای سیال داخل لوله: ۱۷۵C-۱۸۰°	شرایط کاری:
دمای فلز: ۲۵۰°C	
فشار سیال: حداکثر ۱۰ bar	
جنس: فولاد ASTM A178 Grade C	مشخصه‌های لوله:

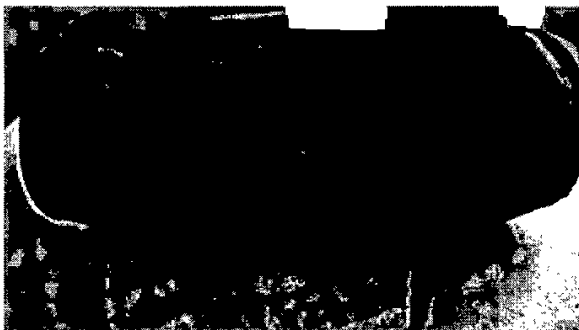
علائم ظاهری: تعدادی از لوله‌های پایین آورنده درام IP، از ناحیه زانویی دچار تخریب شده‌اند. شکل ۳۰.۱۷ موقعیت قرارگیری لوله‌های تخریب شده روی نقشه بویلر و شکل ۳۱.۱۷ تصویر ظاهری یکی از لوله‌های تخریب شده را نشان می‌دهد. مشاهدات میکروسکوپی حاکی از آن است که در همه نمونه‌ها، کاهش ضخامت در سطوح داخلی به کاهش ضخامت شدید و در نهایت تخریب منتهی شده است.

برای مشاهده همه جوانب لوله و به ویژه سطوح داخلی آن، نمونه‌ها در امتداد طولی لوله بریده شده‌اند. شکل ۳۲.۱۷ نمای کلی از سطح داخلی لوله تخریب شده را پس از برش نشان می‌دهد. مناطق شکست و خم لوله مشخص شده‌اند. در سطوح داخلی، حفره‌های پرشماری با شکل‌های گوناگون و به صورت جهت دار دیده می‌شوند. تعداد و تمرکز این حفره‌ها در نیم‌قوس خارجی خم، بسیار بیش از نیم‌قوس داخلی است و تقریباً در تمام مسیر لوله، از قسمت شکست

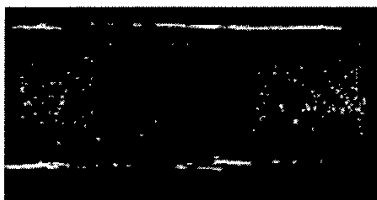
تا انتهای تصویر، مشاهده پذیر است. ارزیابی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد ساختار فلز، فریتی-پرلیتی و کاملاً سالم و دست‌نخورده است و هیچ‌گونه تغییرات ساختاری ناشی از درجه حرارت و دیگر عوامل، در آن مشاهده نمی‌شود. این مشاهده با شرایط و دمای کاری لوله‌ها هم‌خوانی دارد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده روی لوله‌ها، می‌توان نتیجه گرفت مکانیسم اصلی شکست لوله‌ها، پدیده خوردگی سایشی ناشی از سرعت و اغتشاش بیش از حد مجاز جریان آب بوده است. این خرابی باعث ایجاد حفره‌های جهت‌دار پرشمار، کاهش تدریجی ضخامت و درنهایت گسیختگی لوله شده است.



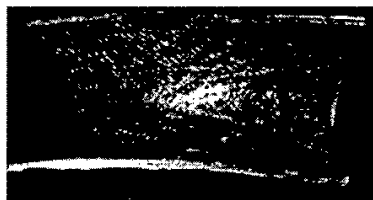
شکل ۳۰۱۷. نقشه بویلر بازیافت حرارتی نیروگاه سیکل ترکیبی و موقعیت لوله‌های اواپراتور تخریب‌شده



شکل ۳۱.۱۷. تصویر لوله تخریب شده



(ب) سطح خارج خم



(الف) سطح داخل خم

شکل ۳۲.۱۷. مورفولوژی حفره‌ها در سطح داخلی لوله تخریب شده

(به تفاوت تراکم حفره‌ها در قسمت داخل و خارج خم توجه شود).

## منابع

- [۱] فونتانا، مارس جی.، مهندسی خوردگی، ویرایش سوم، مترجم: احمد ساعتچی، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۷۴.
- [2] *Flow of Fluid through Valves, Fitting and Pipe*, New York, Crane Company, Technical Report, No. 4101982.
- [3] *ASHRAE Hand Book - Fundamentals*, Atlanta, GA. American Society of Heating and Air Conditioning Engineers, Inc., 1981.
- [4] Pritchard, P.J., *Fox and McDonalds Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley and Sons, 8 edition, 2011.
- [5] Bakirov, M., H. Cheng, V. Levchuk, L. Selesnev, A. Eremyn, "New Approaches for Flow-Accelerated Corrosion", *Second International Symposium on Nuclear Power Plant Life Management*, 15-18 October 2007, Shanghai, China.
- [6] EPRI, "Guidelines for Controlling Flow-Accelerated Corrosion in Fossil and Combined Cycle Plants", *Technical Final Report*, 21 March 2005.

- [۷] واتقی، مجید، سیدابراهیم موسوی ترشیزی و علی جهانگیری، بررسی و تحقیق علل خرابی لوله‌های HP اکونومایزرهای بویلرهای HRSG و ارائه راه‌حل، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۵.
- [8] Streeter, V. L., *Hand Book of Fluid Dynamics*, New York, McGraw Hill, 1961.
- [9] *Flow Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plant, Application of CHECWORKSTM at DARLINGTON, CANDU Maintenance Conference*, 1995.
- [۱۰] م. ثانی، تحلیل مسئله سایش در پیش گرمکن‌های فشارقوی آب تغذیه نیروگاه حرارتی سازند اراک و ارائه راه‌حل برای رفع آن، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.
- [11] Kastner, W., M. Erve N. Henzen, B. Stellwag, "Calculation Code for Erosion Corrosion Induced Wall Thinning in Piping Systems", *Nuclear Engineering and Design*, 119, 431-438, 1990.
- [12] *Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R3)*. EPRI, Palo Alto, CA:2006, 1011838.
- [13] "Failure Cause Analysis-Feedwater Heater", *EPRI research project 1265-7*, 1981.
- [14] Pritchard, P.J. *Fox and McDonalds Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley and Sons, 8<sup>th</sup> edition, 2011.
- [۱۵] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و مجید واتقی، گزارش مصور و علت‌یابی نازک‌شدگی لوله‌های اکونومایزر فشارقوی واحد ۱۲ نیروگاه دماوند و ارائه راهکار رفع مشکل، بهمین ۱۳۹۴.
- [۱۶] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، تعیین علت گسیختگی لوله اکونومایزر واحد ۳ نیروگاه منتظرانم، دی ۱۳۸۳.
- [۱۷] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و محمود سمیع‌زاده، بررسی علل شکست لوله‌های اکونومایزر بویلر بازیافت در نیروگاه دماوند، آذر ۱۳۹۳.
- [۱۸] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، محمود سمیع‌زاده و حامد رضانی، مشاوره و تهیه گزارش در مورد علل شکست زانوهای هارپ‌های اواپراتور دی‌اریتور بویلرهای بازیافت در نیروگاه شوباد، فروردین ۱۳۹۹.
- [19] *Corrosion-Related Failures in Feed Water Heaters*, EPRI Research Project. 1265-11, 1983.
- [۲۰] سلطانیلو، مصطفی، بررسی علل خرابی لوله‌های اواپراتور بویلر بازیافت نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی، آبان ۱۳۹۴.

## فصل ۱۸

### رسوب‌های ناشی از آب و بخار

#### ۱.۱۸. مکانیسم رسوب‌گذاری

واژه رسوب به موادی اطلاق می‌شود که در جای دیگری شکل گرفته و سپس به محل رسوب‌گذاری منتقل شده‌اند. به عبارتی، به محصولات خوردگی در محل شکل‌گیری‌شان رسوب گفته نمی‌شود، بلکه محصولات خوردگی که به محل رسوب‌گذاری منتقل شده و رسوب کرده‌اند، در تعریف رسوب جای می‌گیرند. رسوب‌های بویلر از چهار منبع وارد بویلر می‌شوند:

۱. آب آلوده به مواد معدنی<sup>۱</sup>

۲. مواد شیمیایی اضافه‌شده به منظور تصفیه آب

۳. محصولات خوردگی (تشکیل‌شده در بویلر و قبل از آن)

۴. آلودگی‌های آب<sup>۲</sup>

رسوب‌های ناشی از آب و بخار<sup>۳</sup> می‌توانند شامل اکسیدهای فلزی، مس، فسفات‌ها، کربنات‌ها، سیلیکات‌ها، سولفات‌ها، آلودگی‌های موجود در آب و گستره وسیعی از مواد آلی و غیرآلی باشند.

مکانیسم رسوب‌گذاری شامل تغلیظ مواد محلول و نامحلول موجود در آب در لایه نازکی است که حین تشکیل حباب بخار، سطح فلز را می‌پوشاند (شکل ۱.۱۸). مواد جامد در سطح جدایش حباب و آب حرکت کرده و با رشد حباب بخار، در ریشه حباب رسوب می‌کنند. پس از جداشدن حباب بخار از سطح، رسوب‌ها با جریان آب شسته می‌شوند.

یکی دیگر از مکانیسم‌های رسوب‌گذاری، جداشدن ذرات بزرگ از محلول و ته‌نشین شدن آن‌هاست.

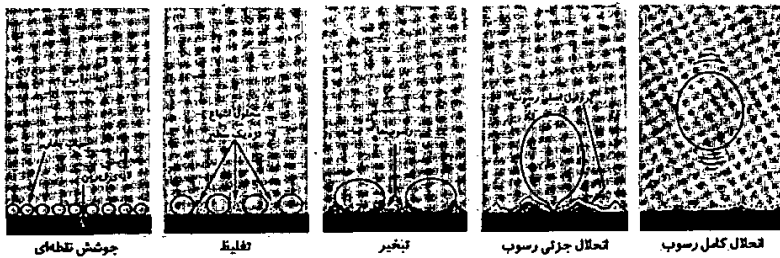
---

1. water borne mineral

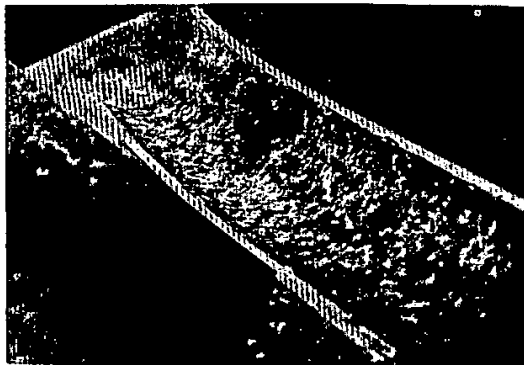
2. contaminants

3. water-formed and steam-formed deposits

همان‌طور که قبلاً گفته شد، معمولاً در اکونومایزرها بخار تولید نمی‌شود. رسوب‌های تشکیل شده در این قسمت، آهن فراوانی دارند. ممکن است اکسیدهای آهن در سیستم‌های قبل از بویلر و در خود اکونومایزر شکل گرفته باشند (شکل‌های ۲.۱۸ و ۳.۱۸) [۱].



شکل ۱.۱۸. پنج مرحله تشکیل حباب بخار

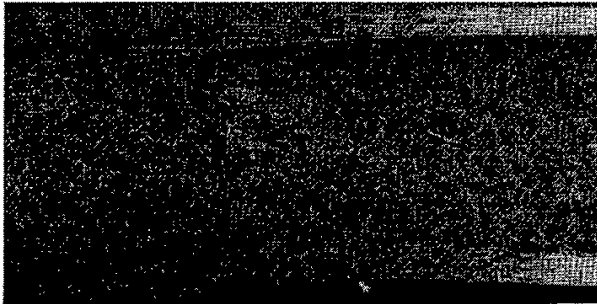


شکل ۲.۱۸. لایه ضخیم اکسید آهن در لوله اکونومایزر. مقدار عمده آهن از سیستم قبل از بویلر به اکونومایزر منتقل شده است.

### ۲.۱۸. محل تشکیل رسوب‌ها

رسوب‌ها می‌توانند در هر ناحیه‌ای از بویلر که آب یا بخار وجود دارد، تشکیل شوند. لوله‌های دیواره‌ای، لوله‌های شبکه‌ای، لوله‌های کف و سقف بویلر، معمولاً مقادیر بسیاری رسوب دارند. سوپرهیتورها و ری‌هیتورها اغلب رسوب‌هایی دارند که ممکن است در خارج از بویلر تشکیل شده و سپس با آب به داخل بویلر منتقل شوند. در اکونومایزرها معمولاً بخار تولید نمی‌شود.

رسوب‌های این لوله‌ها، معمولاً محصولات خوردگی اند که در دیگر نقاط تشکیل شده و سپس به اکونومایزر منتقل شده‌اند.



شکل ۳.۱۸. لایهٔ هماتیت خردشده در سطح داخلی یک اکونومایزر. اغلب اکسیدها در محل شکل گرفته‌اند. مقداری از اکسیدها به شکل ذرات ریز به محل‌های دیگری برده شده‌اند.

جهت قرارگرفتن لوله‌ها (افقی، عمودی و مورب) می‌تواند بر میزان رسوب‌ها و محل تشکیل آن‌ها تأثیرگذار باشد. معمولاً تجمع رسوب‌ها در سمت داغ لوله‌های مولد بخار بیشتر است. بر اثر پدیدهٔ کانالیزه شدن بخار، تجمع رسوب‌ها در قسمت‌های بالایی لوله‌های افقی و شیب‌دار بیشتر است. پشت‌بندهای حلقوی جوش<sup>۱</sup> باعث اغتشاش جریان می‌شوند و در نتیجه نقاط پایین دست آن‌ها، محل مناسبی برای ایجاد پوشش بخارند. بنابراین رسوب‌ها بلافاصله در این نقاط ایجاد می‌شوند. به‌طور کلی، رسوب‌ها در داغ‌ترین نقاط بویلر متمرکزند.

بیشتر اکونومایزرها به‌نحوی طراحی شده‌اند که بدون تولید بخار بهره‌برداری شوند. آب‌های حاوی ذراتی که امکان رسوب در اکونومایزر را دارند، معمولاً از منابعی مانند آب سیکل (در صورتی که به‌خوبی تصفیه نشده باشند)، وارد اکونومایزر می‌شوند. ممکن است اکسیدهای تشکیل شده بر اثر تغلیظ بیش از حد اکسیژن در اکونومایزر یا قسمت‌های قبل از آن، همراه آب در اکونومایزر جابه‌جا شوند و در آن رسوب کنند.

دراهم بخار و مخزن پایینی بویلرها که لجن نامحلول در آن جمع می‌شود<sup>۲</sup> اغلب حاوی رسوب‌اند. با توجه به دردسترس بودن این درام‌ها، با بازرسی چشمی آن‌ها می‌توان جزئیات بسیاری را در مورد کیفیت شیمیایی آب و فرایندهای رسوب‌گذاری به‌دست آورد. به‌طور مثال وقتی آهن اکسید می‌شود، ممکن است کریستال‌های مگنتیت سیاه و براق در درام بخار رسوب کنند.

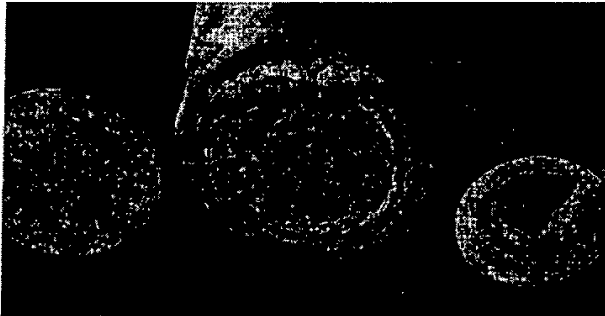
1. circumferential-weld backing rings

2. mud drum

رسوب‌های لوله‌های سوپرهیتر، بر اثر ورود آب از درام به سوپرهیترها وارد این قسمت‌ها می‌شوند. این پدیده ممکن است بر اثر کف‌کردن<sup>۱</sup> یا بالا بودن سطح آب درام رخ دهد. این رسوب‌ها معمولاً در ورودی سوپرهیتر و در خم‌های لاشکل تجمع می‌کنند. استفاده از آب اسپری با کیفیت پایین در دی‌سوپرهیترها می‌تواند باعث افزایش مقدار رسوب در پایین دست محل اسپری شود. ذرات ریز و ذرات اکسید پوسته‌پوسته‌شده نیز می‌توانند وارد سوپرهیتر شوند و در خم‌های لاشکل رسوب کنند و حتی در شرایط بحرانی، وارد توربین شوند[1].

### ۳.۱۸. عوامل رسوب‌گذاری

نرخ رسوب‌گذاری در سطوح انتقال حرارت، به حلالیت رسوب، چسبندگی فیزیکی رسوب و مقدار آب شوینده<sup>۲</sup> مواد جامد پس از تشکیل حباب<sup>۳</sup>، بستگی دارد. خود این عوامل به عوامل دیگری مانند غلظت مواد جامد حل‌شده در آب، دمای تشکیل رسوب<sup>۴</sup>، ترکیب رسوب<sup>۴</sup> و اغتشاش جریان بستگی دارند. اما معمولاً عامل اصلی ایجاد رسوب چشمگیر، تولید بخار است. اهمیت عامل گفته‌شده به اندازه‌ای است که حتی در شرایط کم‌بودن تولید بخار، ممکن است رسوب‌های توجه‌برانگیزی تشکیل شوند (شکل ۴.۱۸).



شکل ۴.۱۸. مقاطعی از لوله‌هایی که تقریباً با رسوب مسدود شده‌اند. لوله سمت راست مربوط به یک بویلر فشارپایین است که رسوب‌ها، کربنات کلسیم تقریباً خالص‌اند. رسوب لوله وسطی شامل سیلیکات‌ها، فسفات‌ها و اجزای دیگر است. رسوب‌گذاری در حالت رزرو (standby) رخ داده است. لوله سمت چپ بر اثر وجود تقریباً ۲۰٪ مس، قرمز رنگ شده است. چنین رسوب‌هایی فقط می‌توانند وقتی فشار داخل لوله‌ها پایین است، ایجاد شوند. در غیر این صورت، قبل از تشکیل چنین رسوب‌هایی، لوله دچار پارگی خواهد شد[1].

1. foaming
3. formation temperature

2. water washing
4. agglomeration morphology



وابستگی حلالیت ترکیبات محلول در آب به دما نیز در ایجاد رسوب مؤثر است. به‌طور مثال، حلالیت سولفات کلسیم و فسفات کلسیم با افزایش دما کاهش می‌یابد و در نتیجه این ترکیب‌ها می‌توانند در سطوح دما بالا، رسوب کنند.

یکی دیگر از عوامل رسوب‌گذاری، میزان گرمای ورودی موضعی است. در موارد خاصی که حرارت ورودی زیاد است، احتمال دارد پوشش پایداری از بخار ایجاد شود که باعث تغلیظ مواد محلول می‌شود. رسوب‌هایی که زیر پوشش بخار قرار می‌گیرند، نمی‌توانند دوباره در آب حل شوند (شکل ۱۵.۴). پوشش بخار می‌تواند بر اثر ناهمواری‌های سطح که باعث اغتشاش جریان می‌شوند نیز ایجاد شود. در نقاط پایین‌دست این ناهمواری‌ها، نواحی کم‌فشاری ایجاد می‌شود که محل مناسبی برای ایجاد حباب بخارند. ایجاد حباب بخار به رسوب‌گذاری منجر می‌شود. از دیگر عوامل مؤثر در ایجاد رسوب، کیفیت آب تغذیه است. محدوده مجاز مواد گوناگون بر حسب فشار بویلر، در جدول‌های ۱.۱۸ و ۲.۱۸ آمده است.

pH آب و ترکیب آب در نزدیکی دیواره نیز در رسوب‌گذاری مؤثرند [1].

جدول ۱.۱۸. کیفیت پیشنهادی آب تغذیه [۱]

Pressure (psi)	Silica range (ppm)	Total hardness	Maximum (ppm)		
			Oxygen	Iron*	Copper*
100	15-25	75.00	—	—	—
200	10-20	20.00	—	—	—
300	7.5-15	2.00	—	—	—
500	2.5-5.0	2.00	0.030	—	—
600	1.3-2.5	0.20	0.030	—	—
750	1.3-2.5	0.10	0.030	0.050	0.020
900	0.8-1.5	0.05	0.007	0.020	0.015
1000	0.2-0.3	0.05	0.007	0.020	0.015
1500	0.3 max	0.00	0.005	0.010	0.010
2000	0.1 max	0.00	0.005	0.010	0.010
2500	0.05 max	0.00	0.003	0.003	0.002
3200+	0.02 max	0.00	0.002	0.002	0.001

\* در بویلرهای مدرن صنعتی که نرخ انتقال حرارت در آنها بسیار بالاست، غلظت‌های یادشده باید حتماً صفر باشند. همچنین سختی کل، حتی در فشارهای پایین نباید از  $0.3 \text{ ppm}$  کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) بیشتر شود. مقدار مواد معلق موجود در آب نیز باید تا حد امکان صفر باشد.

source: Courtesy of Chemical Publishing Company, *The Chemical Treatment of Boiler Water*, James W. McCoy, New York, 1981.

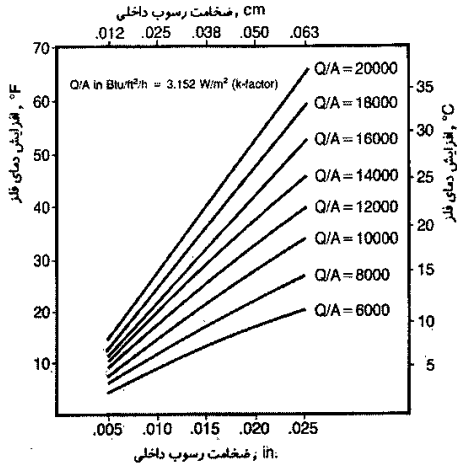
جدول ۲.۱۸. غلظت پیشنهادی نمک‌های آب بویلر [۱]

Pressure (psi)	Saturation temperature (*F)	Maximum (ppm)				Range (ppm)				
		Dissolved solids	Suspended solids*	Total alkalinity†	Silica	Sludge conditioners		Residual phosphate	Residual sulfite	Residual hydrazine
						Natural	Synthetic			
100	328	5000.00	500	900	250.00	150	15	NR‡	90-100	NR
200	382	4000.00	350	800	200.00	150	15	NR‡	40-50	80-90
300	417	3500.00	300	700	175.00	100	15	NR‡	30-40	60-70
500	487	3000.00	60	600	40.00	70	15	NR‡	25-30	45-60
600	486	2500.00	50	600	35.00	70	10	NR‡	20-25	30-45
750	510	2000.00	40	300	30.00	NR	10	NR‡	15-20	25-30
900	532	1000.00	20	200	20.00	NR	5	NR‡	10-15	15-20
1000	545	500.00	10	50	10.00	NR	3	NR‡	5-10	NR
1500	596	150.00	3	0	3.00	NR	NR	NR‡	3-6	NR
2000	636	50.00	1	0	1.00	NR	NR	NR‡	1-3	NR
2500	668	10.00	0	0	0.50	NR	NR	NR‡	NR	NR
3200‡	705	0.02	0	0	0.02	NR	NR	NR‡	NR	NR

\* غلظت‌های پیشنهادی برای فشار ۱۰۰ تا ۹۰۰ پوند بر اینچ مربع، در مورد بویلرهایی با نرخ انتقال حرارت متوسط (به‌طور مثال ۵۰,۰۰۰ Btu/(ft<sup>2</sup>·h))، در نرخ‌های حرارتی بالا، نمی‌توان با استفاده از مواد معلق‌ساز (dispersant) فعلی، مقدار مواد نامحلول را به‌نحو مؤثری کنترل کرد.  
 † ایجاد شرایط قلیابیت صفر به مقدار یون هیدروکسید بستگی دارد. همیشه بر اثر وجود آمونیاک، هیدرازین، مورفولین و بعضی مواد بازی دیگر، مقداری قلیابیت در آب وجود دارد.  
 ‡ NR: توصیه نمی‌شود.

#### ۴.۱۸. اثرات رسوب [1, 3]

۱. وجود رسوب، مسیر عبور سیال خنک‌کن را تنگ می‌کند و این مسئله باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت آب ( $h_o$ ) و در نتیجه کاهش انتقال حرارت از لوله می‌شود. با گذر زمان، این مشکل باعث بیش‌گرمایش لوله می‌شود. در لوله‌هایی با قطر کوچک، رسوب‌گرفتگی مشکلات بیشتری ایجاد می‌کند؛
۲. رسوب‌های متخلخل، سطح زیر و ضخامت چشمگیری دارند. این امر موجب افزایش مقاومت هیدرولیکی و در نتیجه کاهش فشار سیال می‌شود؛
۳. خلل و فرج رسوب‌های متخلخل، محل مناسبی برای تغلیظ مواد خورنده و در نتیجه خوردگی لوله‌هاست؛
۴. وجود رسوب‌ها باعث کاهش بازده حرارتی و در نتیجه افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود؛
۵. لایه رسوب داخلی مانند یک لایه عایق روی سطح، از انتقال حرارت لوله به سیال جلوگیری می‌کند و با گذر زمان، باعث بیش‌گرمایش لوله می‌شود. این مسئله به‌ویژه در لوله‌هایی با گرمای ورودی زیاد، توجه‌برانگیز است (شکل ۵.۱۸). ضریب انتقال حرارت رسوب‌ها نسبت به فلز کمتر بوده و این امر نیز در کاهش انتقال حرارت از فلز به سیال مؤثر است. در جدول ۳.۱۸، ضریب انتقال حرارت هدایت برخی آلیاژها با رسوب‌ها مقایسه شده‌اند؛
۶. ذرات اکسید خردشده در سوپرهیت‌ها و ری‌هیت‌ها می‌توانند در خم‌های لاشکل و لوله‌های طولیل جمع شوند. این اتفاق می‌تواند در مسیر چرخش سیال مشکلاتی ایجاد کند. تنش‌های حرارتی به خردشدن اکسیدها کمک می‌کنند (شکل‌های ۶.۱۸ و ۷.۱۸)؛
۷. تشکیل رسوب و اکسید می‌تواند باعث بروز برخی مشکلات در توربین شود:
  - الف) تشکیل رسوب روی پره‌های توربین باعث افزایش زبری پره‌ها و در نتیجه افزایش تلفات ناشی از اصطکاک می‌شود. این مسئله بازده توربین را پایین می‌آورد؛
  - ب) رسوب‌های سنگین در توربین می‌توانند باعث فشار محوری اضافی شوند. برای حل این مشکل، باید بار توربین را کاهش داد؛
  - ج) اثر رسوب در توربین‌های فشارقوی که حجم بخار کمتر و در نتیجه قسمت فشارقوی کوچک‌تر است، می‌تواند توجه‌برانگیز باشد؛
  - د) جداشدن تکه‌هایی از رسوب‌ها و اکسیدهای تشکیل‌شده در سوپرهیت می‌تواند باعث سایش در توربین شود؛



شکل ۵.۱۸. رابطه میان افزایش دمای فلز و ضخامت رسوب داخلی برای یک لوله بخار [۱]

جدول ۴.۱۸. ضریب هدایت حرارتی فلزها (E) و رسوبها [۱]

	Thermal conductivity	
	W/(m <sup>2</sup> · °C)	(Btu · ft.)/(h · ft <sup>2</sup> · °F)
<i>Alloys</i>		
304 Stainless	22(500°C), 16(1000°)	12.5(932°F), 9.4(212°F)
410 Stainless	28(400°C), 25(1000°C)	16.1(752°F), 14.4(212°F)
Alloy steel (0.34 C, 0.55 Mn, 0.78 Cr, 3.53 Ni, 0.39 Mo, 0.05 Cu)	38*	21*
Copper	420*	240*
Carbon steel (0.23 C, 0.64 Mn)	55*	32*
Aluminum	235*	136*
<i>Deposits</i>		
Aluminum oxide, fused (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.60	2.1
Analcite (Na <sub>2</sub> O · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 4SiO <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O)	0.19	0.76
Calcium carbonate (CaCO <sub>3</sub> )	0.14	0.56
Calcium phosphate [Ca <sub>9</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> ]	0.55	2.20
Calcium sulfate (CaSO <sub>4</sub> )	0.21	0.83
Ferric oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.09	0.35
Magnesium oxide (MgO)	0.17	0.69
Magnesium phosphate [Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]	0.33	1.30
Magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	0.45	1.8
Porous materials	0.01	0.06
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	0.24	0.97
Serpentine (3MgO · 2SiO <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O)	0.16	0.63

\* Room temperature.

NOTE: (Btu · ft.)/(h · ft<sup>2</sup> · °F) = 1.73 W/(m<sup>2</sup> · °C)

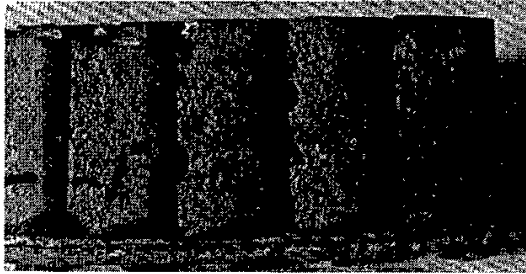
ه) آب دارای رسوب، می‌تواند بر اثر تولید کف و سطح آب بالای درام وارد سوپرهیتر و ری‌هیتر شود. مواد قابل حل در بخار می‌توانند در سوپرهیتر جابه‌جا شوند و سپس در توربین رسوب کنند. در صورت وجود کلریدها و سولفات‌ها، ترکیب آن‌ها با رطوبت احتمالی بخار، می‌تواند باعث خوردگی شدید شود (شکل‌های ۸.۱۸ و ۹.۱۸).



شکل ۶.۱۸. تکه‌های مگنتیت لایه‌لایه شده در سوپرهیتر اولیه. ممکن است تکه‌های مگنتیت به توربین منتقل شده و باعث خرابی‌های شدیدی شوند. (شکل ۷.۱۸ را ببینید) [1].



شکل ۷.۱۸. صافی ریز در ورودی توربین. تکه‌هایی از اکسیدهای ورقه‌ورقه شده لوله‌های سوپرهیتر، در منافذ صافی گیر کرده‌اند (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر) [1].



شکل ۸.۱۸. پره‌های قسمت فشاربالای توربین به شدت خورده شده‌اند. به‌منظور آشکار شدن خرابی، رسوب‌ها جدا شده‌اند [۱].



شکل ۹.۱۸. رسوب‌های روی پره‌های توربین؛ قبل از تمیزکاری پره‌های مربوط به شکل ۸.۱۸ (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر) [۱].

تذکر ۱: اثر مفید اکسیدهای آهن: رسوب‌های محصولات خوردگی آهن، از دو لایه تشکیل شده‌اند. لایه داخلی چگال بوده و به شدت به سطح فلز چسبیده است. این لایه از بقیه فلز در مقابل خوردگی محافظت می‌کند. (در بخش ۱.۵.۱۸ توضیحات کاملی درباره این دو لایه خواهد آمد).

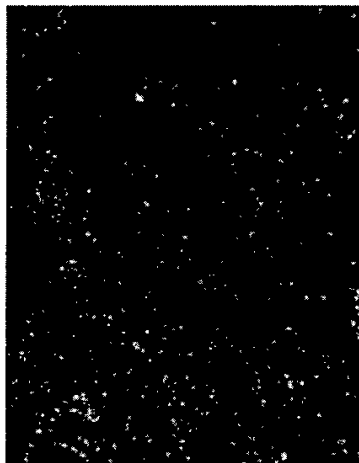
تذکر ۲: در دماهای خاصی، مقاومت آلیاژها در مقابل خوردگی حرارتی کاهش می‌یابد (یعنی سرعت اکسیدشدن افزایش می‌یابد). این دماها برای آلیاژهای گوناگون در جدول ۵.۳ آورده شده‌اند.

### ۵.۱۸. انواع رسوب تشکیل شده در بویلر

در فشار ۱۷/۲ مگاپاسکال (۲۵۰۰ پوند بر اینچ مربع) و بالاتر، معمولاً از هیدرازین برای اکسیژن زدایی استفاده می‌شود. حذف مواد معدنی و زلال‌سازی آب سیکل<sup>۱</sup> از دیگر کارهایی است که معمولاً روی

1. condensate polishing

آب انجام می‌شود<sup>۱</sup>. بنابراین احتمال دارد رسوب‌ها فقط حاوی اکسید آهن ناشی از خوردگی سطوح داخلی و احتمالاً مس، نیکل و دیگر عناصر فلزی و برخی مواد آلوده‌کننده باشند (شکل ۱۰۱۸).



شکل ۱۰۱۸. عنصر مس روی دیواره لوله یک بویلر فشار بالا

معمولاً مواد شیمیایی مورد استفاده برای تصفیه شیمیایی آب و محصولات حاصل از واکنش آن‌ها، در رسوب‌ها مشاهده نمی‌شوند. انواع رسوب معمول در بویلرها، محل تشکیل و ویژگی‌های آن‌ها، در جدول ۴.۱۸ نشان داده شده است [۱].

اسپکتروسکوپی نشری، اشعه X فلورسانسی<sup>۲</sup> و انکسار اشعه X<sup>۳</sup> روش‌هایی‌اند که به کمکشان می‌توان عناصر تشکیل‌دهنده رسوب را شناسایی کرد. اسپکتروسکوپی نشری، با بهره‌گیری از طول‌موج‌های الکترومغناطیسی ساطع‌شده از ذرات تحریک‌شده، عناصر تشکیل‌دهنده رسوب را تعیین می‌کند. ذرات می‌توانند با جرقه الکتریکی و اشعه X تحریک شوند. انتخاب یکی از روش‌های یادشده به ویژگی‌های عناصر بستگی دارد. برخی عناصر در دامنه‌های نور مرئی و برخی دیگر در محدوده اشعه X، طول‌موج‌های الکترومغناطیسی از خود ساطع می‌کنند. وقتی تعیین دقیق ساختمان کریستالی موردنظر است، از روش انکسار اشعه X استفاده می‌شود [۲].

در ادامه انواع رسوب موجود در لوله‌های بویلر بررسی می‌شود.

۱. در ضمیمه (ب)، برخی رژیم‌های شیمیایی آب بررسی شده است.

جدول ۴.۱۸. اجزای تشکیل دهنده رسوب‌های سمت آب [۱]

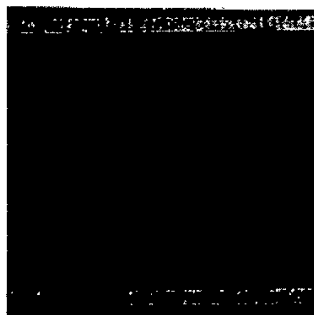
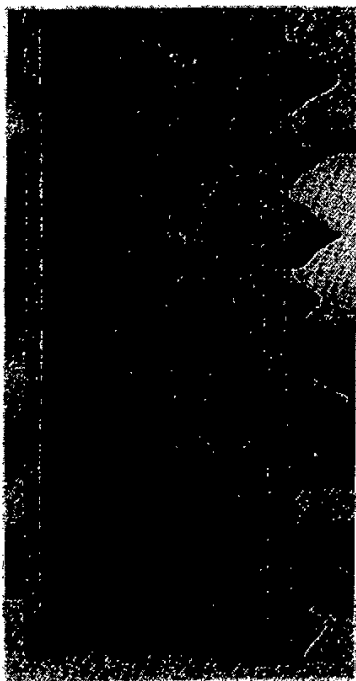
Mineral	Formula	Nature of deposit	Usual location and form
Acmite	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$	Hard, adherent	Tube scale under hydroxyapatite or serpentine
Alpha quartz	$\text{SiO}_2$	Hard, adherent	Turbine blades, mud drum, tube scale
Amphibole	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	Adherent binder	Tube scale and sludge
Analcite	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Hard, adherent	Tube scale under hydroxyapatite or serpentine
Anhydrite	$\text{CaSO}_4$	Hard, adherent	Tube scale, generating tubes
Aragonite	$\text{CaCO}_3$	Hard, adherent	Tube scale, feed lines, sludge
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Flocculant	Sludge in mud drum and waterwall headers
Copper	Cu	Electroplated layer	Boiler tubes and turbine blades
Cuprite	$\text{Cu}_2\text{O}$	Adherent layer	Turbine blades, boiler deposits
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Hard, adherent	Tube scale, generating tubes
Hematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Binder	Throughout boiler
Hydroxyapatite	$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$	Flocculant	Mud drum, waterwalls, sludge
Magnesium phosphate	$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	Adherent binder	Tubes, mud drum, waterwalls
Magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Protective film	All internal surfaces
Noselite	$3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$	Hard, adherent	Tube scale
Pectolite	$\text{Na}_4\text{O} \cdot 4\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Hard, adherent	Tube scale
Serpentine	$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Flocculant	Sludge
Sodalite	$3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{NaCl}$	Hard, adherent	Tube scale
Xonotlite	$5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Hard, adherent	Tube scale

source: Courtesy of Chemical Publishing Company, *The Chemical Treatment of Boiler Water*, James W. McCoy, New York, 1961.



### ۱.۵.۱۸. اکسیدهای آهن

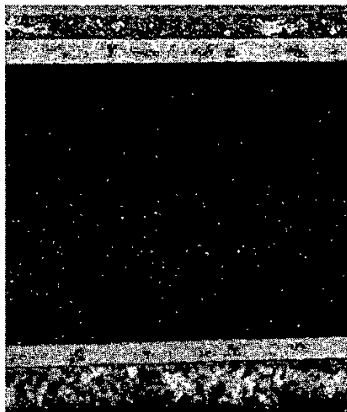
در شرایط کاهنده<sup>۱</sup> که معمولاً در آب بویلر یافت می‌شود، به‌طور طبیعی یک لایه صاف، سیاه، سخت و چگال از مگنتیت روی سطوح داخلی لوله‌ها رشد می‌کند (شکل ۱۱.۱۸). مگنتیت بر اثر واکنش مستقیم آب با فلز لوله تشکیل می‌شود. در بویلرهای فشاربالا، مگنتیت از دو لایه تشکیل می‌شود که معمولاً با آزمایش‌های میکروسکوپی مشاهده‌پذیر است. لایه زیرین، یک لایه صاف از مگنتیت‌های حرارتی است. در صورتی که نرخ رسوب‌گذاری بالا یا نرخ تولید بخار محسوس باشد، ذرات ریز اکسید آهن می‌توانند به‌شکل یک لایه متخلخل روی لایه زیرین رسوب کنند (شکل ۱۲.۱۸). در جدول شماره ۵.۳، دمایی که سرعت تشکیل مگنتیت‌های حرارتی ماکسیمم است، نشان داده شده است. در این دماها، مقاومت فلز در مقابل خوردگی حرارتی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱.۱۸. لایه یکنواخت، چسبنده و سیاه مگنتیت روی دیواره لوله بویلری که به‌خوبی محافظت می‌شده است.

شکل ۱۲.۱۸. لکه‌های اکسید آهن در محل فین‌ها در لوله دیواره آبی یک بویلر بازیاب. فین‌ها باعث تمرکز حرارت ورودی و در نتیجه افزایش نرخ تولید بخار و رسوب‌گذاری می‌شوند. به رسوب‌های سفیدرنگ هیدروکسید سدیم که لکه‌های مگنتیت را احاطه کرده‌اند، توجه کنید.

معمولاً ذرات زبر مگنتیت چسبندگی چندانی به سطوح ندارند، مگر اینکه با رسوب‌های دیگر مخلوط شده باشند. معمولاً در محل‌هایی که دچار خوردگی قلیایی شده‌اند، کریستال‌های سوزنی‌شکلی از مگنتیت‌های براق و سیاه مشاهده می‌شوند. گاهی کریستال‌های مگنتیت، می‌توانند سطح براقی را در درام‌های بخار و لوله‌ها ایجاد کنند (شکل‌های ۱۳.۱۸ و ۱۴.۱۸). جداکردن مقدار کمی از این مواد از سطوح و قراردادن آن‌ها در معرض آهن‌ریا، وجود احتمالی آهن در رسوب را نشان خواهد داد.



شکل ۱۳.۱۸. کریستال‌های براق و سیاه مگنتیت روی سطوح داخلی یک لوله دیواره آبی. کریستال‌ها بر اثر رسوب‌گذاری روی سطوح ایجاد شده‌اند، یا از قسمت‌های قبل از بویلر منتقل شده‌اند.



شکل ۱۴.۱۸. کریستال‌های براق مگنتیت در محل خوردگی قلیایی. چنین کریستال‌هایی اغلب در نزدیکی محل خوردگی اسیدی و قلیایی یافت می‌شوند.

هماتیت ( $Fe_2O_3$ ) در دماهای اندکی پایین‌تر و در محیط‌هایی با غلظت اکسیژن بیشتر تشکیل می‌شود. هماتیت جزء مواد چسبنده است که باعث جمع‌شدن مواد دیگر در رسوب می‌شود و در محیط‌هایی با غلظت اکسیژن بالا، می‌تواند قرمز رنگ باشد. هماتیت معمولاً در قسمت‌هایی از اکونومایزر وجود دارد که دچار خوردگی اکسیژنی شده‌اند (شکل ۳.۱۸) [1].

### ۳.۵.۱۸. فلزات دیگر و اکسید آن‌ها

مس به دو صورت می‌تواند روی سطح داخلی لوله‌ها رسوب کند: جانشین‌شدن مستقیم با آهن، یا کاهش مقدار اکسید مس با هیدروژن آزاد شده طی فرایند خوردگی. از آنجاکه بر اثر خوردگی قلیایی، هیدروژن آزاد می‌شود، دیدن لکه‌های بزرگ و قرمز رنگ مس مخلوط‌شده با محصولات خوردگی مانند مگنتیت و هماتیت در محل خوردگی قلیایی معمول است (شکل ۱۰.۱۸). به علت رنگ قرمز مس، ممکن است در تمییز آن از هماتیت اشتباه شود، اما نیترات نقره می‌تواند وجود مس را مشخص کند. در این روش شناسایی، تقریباً بلافاصله پس از انداختن یک قطره نیترات نقره، در صورت وجود مس، کریستال‌های سفید نقره رسوب خواهند کرد.

اکسیدهای مس تشکیل شده در شرایط بویلر، سیاه‌رنگ و غیرمغناطیسی هستند. خوردگی گالوانیک ناشی از مس (بر اثر وجود مس یا اکسید آن) در بویلرهایی که به خوبی خنثی‌سازی شده‌اند، به ندرت رخ می‌دهد.

برنج و آلیاژهای ترکیبی مس و نیکل<sup>۱</sup> اغلب در کندانسورها و هدرهای آب تغذیه استفاده می‌شوند. در نتیجه گاهی اکسیدهای روی و نیکل نیز همراه رسوب‌های مس در بویلرها دیده می‌شوند. معمولاً این عناصر کمتر از مس رسوب می‌کنند. اکسید نیکل می‌تواند محل مناسبی برای نشستن دیگر رسوب‌ها باشد و به تشکیل رسوب‌های سخت در بویلر بینجامد<sup>۲</sup>. نیکل معمولاً در غلظت‌های نسبتاً پایین‌تری وجود دارد و با آنالیزهای شیمیایی به روش‌های اشعه<sup>۳</sup> X فلوتورسانسی و انکسار اشعه<sup>۴</sup> X شناسایی می‌شود [1].

### ۳.۵.۱۸. نمک‌ها

پس از شروع جوشش در بویلر، ابتدا اجزایی که حلالیتشان در آب حداقل است، رسوب می‌کنند. از جمله، کربنات کلسیم به سرعت رسوب سفیدرنگ و تدریجاً ایجاد می‌کند که در

مجاورت اسید هیدروکلریدریک، کف می‌کند (شکل ۱۵.۱۸). سولفات کلسیم برای رسوب‌گذاری باید غلظت بیشتری نسبت به کربنات داشته باشد.



شکل ۱۵.۱۸، رسوب کربنات کلسیم، شکل ۴.۱۸ را نیز ببینید.

گاهی وجود فسفات‌ها باعث ایجاد رسوب‌های ترد می‌شود (تردی این رسوب‌ها نسبت به کربنات کلسیم کمتر است). فسفات منیزیم می‌تواند محل مناسبی برای رسوب دیگر ذرات باشد و رسوب‌هایی بسیار سخت و به هم چسبیده ایجاد کند. بیشتر رسوب‌های فسفات منیزیم بی‌رنگ‌اند، اما همراه با اکسیدهای آهن، قرمز، قهوه‌ای و سیاه می‌شوند.

سیلیکات‌های نامحلول در اغلب بویلرها وجود دارند. بسیاری از این سیلیکات‌ها بسیار سخت‌اند و در اغلب اسیدها به جز اسید هیدروفلوریک نامحلول‌اند. وجود ترکیبات سیلیکات‌دار مانند آنالسیت<sup>۱</sup>  $[Na_2O, Al_2O_3, 4SiO_2 \cdot 2H_2O]$ ، آسمیت<sup>۲</sup>  $[Na_2O, Fe_2O_3, 4SiO_2]$  و سودالیت<sup>۳</sup>  $[Na_2O, 3Al_2O_3, SiO_2, 2NaCl]$  می‌تواند دلیلی بر ایجاد پوشش بخار باشد، زیرا سدیم در آب حل می‌شود و حل‌نشدن و وجود آن در ساختار این ترکیبات می‌تواند دلیلی بر ایجاد پوشش بخار که مانع حل‌شدن آن در آب می‌شود، باشد. آنالسیت، اغلب در مواردی تشکیل می‌شود که آلوم<sup>۴</sup> از زلال‌ساز<sup>۵</sup> عبور کرده باشد (شکل ۱۶.۱۸). به‌طور کلی، در صورتی که مکانیسم‌های تغلیظ

1. analcite  
3. sodalite  
5. clarifier

2. acmite  
4. alum

موضعی به‌شدت فعال باشند، رسوب‌های محلول در آب می‌توانند باقی بمانند. بنابراین باید به وجود هیدروکسید سدیم، فسفات سدیم و سولفات سدیم به‌عنوان دلیلی بر تخییر کامل آب توجه داشت. نمک‌هایی مانند کلرید منیزیم ( $MgCl$ ) که قابلیت هیدرولیز شدن دارند، می‌توانند از طریق نشتی در کندانسورهایی که از آب دریا استفاده می‌کنند، وارد آب بویلر شوند. کلریدها در رسوب‌های متخلخل تغلیظ شده و به‌شکل اسید هیدروکلریدریک، هیدرولیز می‌شوند. شرایط اسیدی بر اثر تجزیه روغن، گریس و دیگر آلوده‌کننده‌های آلی نیز می‌تواند ایجاد شود [1].



شکل ۱۶.۱۸. آنالیت ایجادشده بر اثر انتقال آلوم از کلاریفایر. ببینید ورم چطور باعث کنده‌شدن رسوب‌ها شده است.

### ۶.۱۸. روش‌های پیشگیری از رسوب‌گذاری در بویلر [1]

همه رسوب‌ها نامطلوب‌اند و به‌طور کلی، تحت‌تأثیر پارامترهای بهره‌برداری از بویلر و خواص شیمیایی آب تولید می‌شوند. برای پیشگیری از رسوب‌گذاری، باید حین بهره‌برداری به برخی نکات توجه داشت:

۱. انجام عملیات‌های شیمیایی صحیح و لازم روی آب
۲. به‌حداقل رساندن نوسانات در کیفیت آب تغذیه
۳. به‌حداقل رساندن نوسانات در پارامترهای بهره‌برداری
۴. کنترل pH آب
۵. بهره‌برداری از بویلر در مقادیر کمتر از بار نامی
۶. اطمینان از صحت عملکرد تمامی اجزای بویلر

۷. کنترل احتراق در بویلر
۸. جلوگیری از ایجاد نقاط داغ در بویلر بر اثر عواملی مانند انسداد میان لوله‌ها با خاکستر، احتراق غیریکنواخت در بویلر، جداسدن موضعی مواد عایق، عملکرد غیریکنواخت فن‌های دمنده هوا، برخورد شعله‌ها با لوله، احتراق نامناسب و ...
۹. کنترل سطوح آب
۱۰. جلوگیری از نوسانات بار (در حد امکان)
۱۱. تخلیه دائمی کافی
۱۲. کنترل وضعیت صحیح مشعل‌ها
۱۳. دقت کافی در تنظیم سوخت
۱۴. جلوگیری از نشستی آب خنک‌کن در کندانسورها
۱۵. جلوگیری از تولید کف در درام و انتقال آن به سوپرهیترا (در این راستا باید از غلظت بسیار بالای ترکیبات قلیایی و مواد جامد محلول، آلودگی آب بویلر با روغن‌های دارای قابلیت صابونی‌شدن و حضور مواد جامد معلق ریز جلوگیری کرد).
۱۶. اطمینان از صحت عملکرد جداکننده‌های آب از بخار در درام
۱۷. کنترل کیفیت آب اسپری در دی‌سوپرهیترا

### ۷.۱۸. نکات توجه برانگیز درباره رسوب‌ها [1]

- رسوب‌ها به ندرت از یک جزء تشکیل شده‌اند و بنابراین برای تعیین مقدار و نوع ترکیب‌های موجود در آن‌ها، آنالیز شیمیایی لازم است. پس از سردشدن بویلر و توقف تولید بخار، مواد قابل حل با آب شسته خواهند شد. این امر از شناسایی ترکیب واقعی رسوب از طریق آنالیز شیمیایی در آزمایشگاه جلوگیری می‌کند. بنابراین می‌توان فرض کرد معمولاً غلظت مواد بسیار محلول، در نتایج آنالیزهای شیمیایی، کمتر از مقدار واقعی‌شان گزارش می‌شود.
- در اغلب موارد، وجود رسوب‌های سخت و چسبنده، نشان‌دهنده گذشت زمان زیاد از تشکیل رسوب در فلز با دمای بالاست. علت سخت‌شدن رسوب، قرارگرفتن ذرات جامد در خلل و فرج رسوب‌هاست.
- تشکیل لایه‌های گوناگون رسوب، نشان‌دهنده تغییرات در کیفیت شیمیایی آب، گرمای ورودی به لوله‌ها و ... است. بنابراین در اغلب موارد، با آزمایش لایه‌های رسوب می‌توان

رسوب‌هایی را که حین هر یک از رژیم‌های شیمیایی آب در زمان‌های گوناگون تشکیل شده‌اند تعیین کرد.

- معمولاً وجود بیش از حد ذره‌های محلول، برای اثبات وقوع انحراف از جوشش نقطه‌ای کافی است.
- در محل وقوع خرابی‌ها، امکان کنده‌شدن رسوب‌ها توسط سیال خروجی از لوله و ورود محصولات احتراق به داخل لوله‌ها وجود دارد. لذا اغلب در محل وقوع خرابی، ترکیب، لایه‌بندی و مقدار رسوب‌ها نسبت به مقادیر واقعی متفاوت‌اند.
- تعیین وزن رسوب‌ها در نزدیکی سطوحی که ورم کرده یا دچار شکست شده‌اند، به تخمین وزن رسوب‌ها کمتر از مقادیر واقعی منجر می‌شود.
- گاهی ممکن است محصولات خوردگی با رسوب‌ها اشتباه گرفته شوند. این مسئله به‌ویژه در مورد سوپرهیت‌هایی مطرح است که در مواقع بی‌باری دچار خوردگی اکسیژنی شده‌اند. در این قسمت‌ها، معمولاً برآمدگی‌های ناشی از محصولات خوردگی، با مواد جامد منتقل شده با آب بویلر اشتباه می‌شوند.
- ممکن است مگنتیت‌های سوزنی‌شکلی که بر اثر pH پایین ایجاد شده‌اند، با ذرات آهنی که قبلاً از بویلر منتقل شده‌اند، اشتباه شوند.
- مقدار مجاز مواد جامد محلول در آب، با افزایش فشار بویلر کاهش می‌یابد.
- می‌توان بویلرها را بر اساس مقدار رسوب موجود در آن‌ها، تقسیم‌بندی کرد (جدول ۵.۱۸).

### ۸.۱۸. جداکردن رسوب‌های سطوح داخلی لوله‌ها

یکی از مسائل مطرح در نگهداری از لوله‌ها، جداکردن رسوب‌های داخل آن‌هاست. هرچند می‌توان از روش‌های مکانیکی برای این کار استفاده کرد، اما استفاده از روش‌های شیمیایی مناسب، مزیت‌هایی دارد؛ مانند صرفه‌جویی در زمان و هزینه و امکان تمیزکردن سطوحی که دسترسی کمی دارند (خم‌های تیز، سطوح نامنظم، شکاف‌ها و لوله‌های باریک).

انتخاب اسید و ماده‌ی بازدارنده‌ی مناسب، به میزان چسبندگی رسوب‌ها، روش تمیزکاری (چرخشی یا خیساندن<sup>۱</sup>) و جنس فلزی که باید تمیز شود بستگی دارد (به‌ویژه در مورد آلیاژی با کروم بالا).

جدول ۵.۱۸. تقسیم‌بندی بویلرها بر اساس مقدار رسوب

رسوب‌ها (mg/cm <sup>2</sup> )			نوع بویلر
بسیار آلوده	نسبتاً آلوده	پاک	
>۲۵	۲۵-۱۵	<۱۵	واحد فوق‌بحرانی
>۴۰	۴۰-۱۵	<۱۵	واحد زیربحرانی

پس از شستشوی شیمیایی سطوح، باید برای ازبین‌رفتن آثار اسید باقی‌مانده، سطوح را با آب شست. سپس برای محافظت از سطوح در مقابل زنگ‌زدن، لوله‌ها از محلول غیرفعال و خنثی‌کننده پر می‌شوند. شستشوی شیمیایی سطوح باید با نظارت کارشناسان صلاحیت‌دار انجام شود. این ملاحظه برای اطمینان از حداکثر کارایی محلول شوینده، حداکثر ایمنی و جلوگیری از خوردگی فلز تحت‌تأثیر محلول است. شستشوی شیمیایی نمی‌تواند جان‌شین مناسبی برای رژیم‌های شیمیایی آب باشد. به‌رغم مزایای یادشده، شستشوی شیمیایی موجب ازبین‌رفتن مقداری از سطح فلز نیز می‌شود<sup>[3]</sup>.

### ۹.۱۸. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

#### اثر رسوب [1]

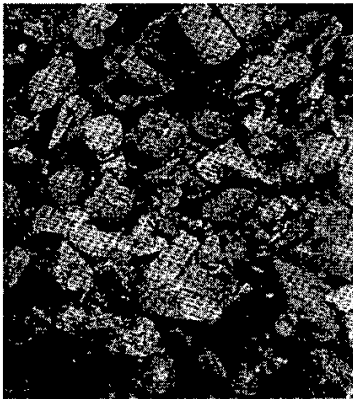
□ نمونه اول

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	لوله اکونومایزر مربوط به یک بویلر بازیاب، در نزدیکی هدر بالایی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	منحنی شکل (از حالت افقی به عمودی، ل شکل)
عمر نمونه:	۱۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	شلاتنت
فشار درام:	۴/۱۳ MPa (۶۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	فشار آب تغذیه: ۵/۶۵ MPa (۸۲۰ psi)
سوخت:	قطر خارجی: ۵/۱ cm (Yin) black liquor

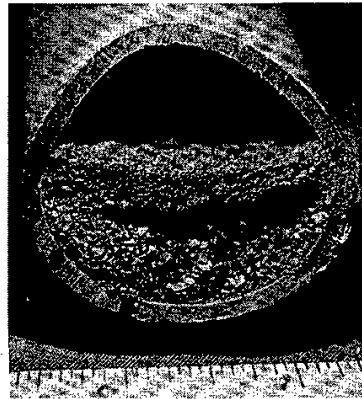
۱. در کتاب‌های بهسازی شیمیایی آب دیگ‌های بخار و شستشوی شیمیایی تجهیزات صنعتی، ترجمه مهندس محمدرضا نفری، مطالب کاملی در مورد شستشوی شیمیایی لوله‌های بویلر آمده است.



علائم خرابی ناشی از رسوب‌گذاری: هنگام تعویض لوله‌های یک اکونومایزر آسیب‌دیده، به‌طور نامنتظره رسوب‌های بسیاری داخل لوله مشاهده شده است. سطوح داخلی تعدادی از لوله‌ها با لایه ناهمواری از اکسید آهن نرم، ورقه‌ورقه‌شده و سیاه‌رنگ، پوشیده شده است. یک لایه ضخیم یک اینچی از موادی که در قسمت خمیده لوله جمع شده‌اند، در شکل ۱۷.۱۸ نشان داده شده است. آزمایش دقیق رسوب‌ها نشان می‌دهد مواد جمع‌شده شامل ذرات آنتراسیت<sup>۱</sup> و دانه‌های مربوط به یک رزین<sup>۲</sup> هستند (شکل ۱۸.۱۸).



شکل ۱۸.۱۸. آنتراسیت و دانه‌های مربوط به رزین (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر)



شکل ۱۷.۱۸. آنتراسیت و دانه‌های مربوط به رزین در زیر لایه اکسید آهن لایه‌لایه

علت رسوب‌گذاری: رسوب‌ها از یک رزین فرسوده به داخل لوله‌ها منتقل شده‌اند. اثرات رسوب: زیر رسوب‌ها، مقداری از سطح فلز خورده شده و در نتیجه از ضخامت دیواره کاسته شده است. تجمع رسوب‌ها، حرکت سیال را کند کرده، اما به دلیل پایین بودن دمای گازهای حاصل از احتراق (حدود ۲۸۸ درجه سانتی‌گراد یا ۵۵۰ درجه فارنهایت)، لوله دچار بیش‌گرمایش نشده است. زیر لایه رسوب، انحراف از جوشش هسته‌ای (DNB) رخ داده که به تغلیظ هیدروکسید سدیم و وقوع خوردگی مرتبط با آن منجر شده است (در فصل ۶: «خوردگی قلیایی» بررسی شده است).

نکات توجه برانگیز دربارهٔ این خرابی: با وجود این رسوب‌ها، لوله دچار خرابی نشده است. لوله‌های مجاور این لوله بر اثر سایش سطوح خارجی و خوردگی اکسیژنی تخریب شده‌اند. وجود رسوب در لوله‌ها پس از وقوع این نوع خرابی‌ها شناسایی شده است. تا قبل از مشاهدهٔ رسوب‌ها، تخریب بستر رزین مشاهده نشده بود.

## □ نمونهٔ دوم

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	خروجی سوپرهیتر
نحوهٔ قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۳/۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۶/۲ MPa (۹۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)،
جنس:	فولاد کم آلیاژ (۱/۵ درصد Cr)
ساخت:	زغال‌سنگ

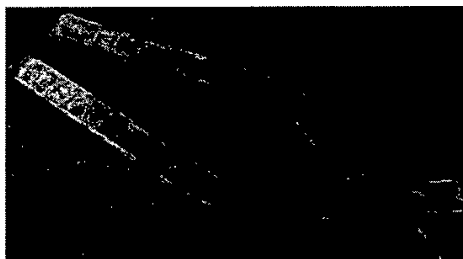
علائم خرابی ناشی از رسوب‌گذاری: قسمتی به طول ۲ فوت از انتهای سوپرهیتر<sup>۱</sup> با رسوب‌هایی که هنگام جدا کردن این قسمت هنوز خیس بودند، مسدود شده است. برای خشک کردن رسوب‌ها، قسمت‌های جدا شده به مدت سه روز با حرارت ملایم گرم شدند. پس از خشک شدن رسوب‌ها، مواد سفیدرنگی در قسمت انتهایی لوله مشاهده شد (شکل ۱۹.۱۸). در هر ۲ اینچ از لوله، حدود ۲ پوند رسوب وجود دارد. در نقاط دورتر از انتهای لوله، رسوب‌ها شامل ۸۰٪ وزنی مگنتیت و ۷٪ وزنی هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم‌اند. مقدار کمی گوگرد، کلر، فسفر، کروم و منگنز نیز مشاهده می‌شوند. در انتهای لوله، حدود نصف رسوب‌ها شامل هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم‌اند.

علت رسوب‌گذاری: رسوب‌ها بر اثر آلودگی درازمدت آب اسپری سوپرهیتر و ورود آب و کف به سوپرهیتر ایجاد شده‌اند. مواد جامد موجود در آب، پس از تبخیر آب به شکل رسوب به جا مانده‌اند.

1. superheater-tubing stub end

رسوب‌ها، در یک بازه زمانی نسبتاً طولانی، در نقاطی که سیال راکد بوده یا با دبی پایین جریان داشته است (مانند نقاط انتهایی لوله‌ها)، ایجاد شده‌اند.

نکته توجه‌برانگیز دربارهٔ این خرابی: اختلاف رنگ میان رسوب‌های موجود در قسمت انتهایی لوله و رسوب‌های موجود در طول لوله، نشان‌دهندهٔ جداشدن مواد بازی سفیدرنگ محلول در آب و قرارگرفتن آن‌ها در قسمت انتهایی لوله است. به‌رغم دشواری تمیزکاری و جداکردن رسوب‌ها، این کار برای جلوگیری از خوردگی قلبایی و بیش‌گرمایش قسمت‌های انتهایی لوله‌ها ضروری است.



شکل ۱۹.۱۸. برشی طولی از قسمت انتهایی در خروجی یک لولهٔ سوپرهیتر. رسوب لوله را مسدود کرده است. مواد سفیدرنگ، هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم، و عمدهٔ مواد سیاه‌رنگ، مگنتیت‌اند.

□ نمونهٔ سوم

کاغذسازی	صنعت:
لولهٔ متقاطع <sup>۱</sup>	محل نمونه:
افقی	نحوهٔ قرارگرفتن نمونه:
۲۰ سال	عمر نمونه:
فسفات	رژیم شیمیایی آب:
۵/۵۲ MPa (۸۰۰ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۶/۴ cm (۲/۵ in)	مشخصه‌های لوله:
black liquor و مازوت	سوخت:

علائم خرابی ناشی از رسوب‌گذاری: لوله ورم‌های کوچکی دارد و دچار شکست شده است. قسمت‌های داغ سطوح داخلی با رسوب‌های سفیدرنگ و تردی با چگالی ۱۷ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع (۱۶ گرم بر فوت‌مربع) و قسمت‌های سرد با رسوبی با چگالی ۱/۰۶۲۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع (۱ گرم بر فوت‌مربع) پوشیده شده است. کناره رسوب‌ها، گوشه‌های تیزی دارد که نشان‌دهنده ایجاد پوشش بخار در این نواحی است (شکل ۲۰۱۸). رسوب‌ها ترکیبی از هیدروکسی آپاتیت<sup>۱</sup>، هیدرات سیلیکات آلومینیم سدیم، مگنتیت، سیلیکات منیزیم و مقدار کمی مواد دیگرند. مقداری آلوم نیز از کلاریفایر به داخل لوله‌ها منتقل شده است.



شکل ۲۰۱۸. لایه رسوب در سطوح داخلی داغ یک لوله. مقداری از رسوب‌ها در محل ورم سطحی از محل خود کنده شده‌اند. به کناره‌های تیز که نشان‌دهنده محل‌های ایجاد پوشش بخارند توجه کنید.

علت رسوب‌گذاری: لوله برای زمان کوتاهی در معرض حرارت بیش از حد قرار گرفته است. رسوب‌گذاری در این دوره کوتاه رخ داده است. اثرات رسوب: رسوب‌ها موجب بیش‌گرمایش لوله و خرابی ناگهانی آن شده‌اند. کارهای انجام‌شده برای پیشگیری از رسوب‌گذاری: نحوه احتراق و عملکرد کلاریفایر بازدید شده و تغییرات لازم در آن‌ها ایجاد شده است.

□ نمونه چهارم

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	قسمت خمیده (لاشکل) سوپرهیتر اولیه
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۱ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۸/۶۲ MPa (۱۲۵۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۴/۴۵ cm (۱/۷۵ in)
جنس:	۲/۲۵ درصد Cr، ۱ درصد Mo
سوخت:	زغال‌سنگ و خرده‌چوب <sup>۱</sup>

علائم خرابی ناشی از رسوب‌گذاری: بر اثر نشستن خاکسترهای گداخته<sup>۲</sup>، مقداری از فلز سمت آتش لوله از بین رفته و این امر باعث تعویض قسمت لاشکل سوپرهیتر شده است. در بررسی سطوح داخلی، تاول‌های بسیاری در لایه مگنتیت مشاهده می‌شود (شکل ۲۱-۱۸). لایه مگنتیت پوسته‌پوسته شده است.

علت پوسته‌پوسته‌شدن لایه مگنتیت: علت، تنش‌های متناوب با منشأ (اغلب) حرارتی بوده است. این تنش‌ها هنگامی که مقداری خاکستر گداخته روی لوله جمع می‌شود، شدیدترند. نقاط داغ در لوله ممکن است بر اثر کانالیزه‌شدن دود<sup>۳</sup> ایجاد شوند. شکستن خاکسترهای گداخته که ممکن است حین دوده‌زدایی رخ دهد، می‌تواند باعث تغییرات سریع دما در سطح لوله شود. این تغییر دما به ایجاد تنش‌های تناوبی در لوله منجر می‌شود. در این لوله، احتمال اینکه دوده‌زدایی به‌تنهایی موجب پوسته‌پوسته‌شدن لایه مگنتیت شده است، ثابت نشد.

مگنتیت‌های حرارتی نسبت به فلزی که اکسید می‌شود، حجم بیشتری را اشغال می‌کنند و این امر به تشکیل تاول‌های مگنتیت می‌انجامد. اشغال حجم بیشتر توسط مگنتیت، به ایجاد تنش فشاری در لایه مگنتیت و درنهایت کماتش آن منجر می‌شود. در مواقعی که دما بالا باشد، ممکن است اکسید، به‌جای شکستن، به آرامی تغییر شکل دهد.

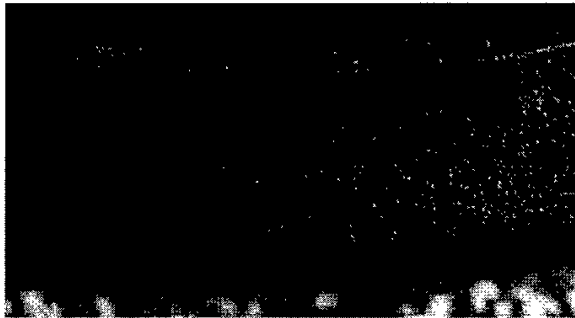
1. hog fuel

2. slagging

3. furnace-gas channeling or laning

اثرات رسوب: این نوع پوسته‌پوسته‌شدن می‌تواند به سایش در توربین منجر شود، اما هیچ‌گونه سایشی در توربین مشاهده نشده است.

نکته توجه برانگیز درباره سوپرهیتورها: پس از کهنه‌شدن تمامی سوپرهیتورها، مقداری از مگنتیت درون آن‌ها پوسته‌پوسته می‌شود. اما نشستن خاکستر گداخته روی سطح، نوسانات شدید بار، ارتعاشات مکانیکی و بهره‌برداری متناوب از بویلر، ایجاد تنش‌های نوسانی را که به پوسته‌پوسته‌شدن مگنتیت منجر می‌شوند تسریع می‌کنند.



شکل ۲۱.۱۸. تاول‌های مگنتیت در قسمت لاشکل سوپرهیتراولیه. در برخی قسمت‌ها، مگنتیت‌ها از جای خود کنده شده‌اند.

□ نمونه پنجم

بویلر مصارف جانبی <sup>۱</sup>	نوع بویلر:
صافی ریز توربین <sup>۲</sup>	محل نمونه:
عمودی	نحوه قرار گرفتن نمونه:
۸ سال	عمر نمونه:
فسفات هماهنگ	رژیم شیمیایی آب:
۱۵/۲ MPa (۲۲۰۰ psi)	فشار درام:
جنس سیم: فولاد نرم،	مشخصه‌های نمونه:
ضخامت سیم: ۰/۰۸۸ cm (۰/۰۳۵ in)،	
اندازه منافذ: ۰/۰۱۲ cm (۰/۰۴۰ in)	
زغال سنگ	سوخت:

علائم خرابی ناشی از رسوب‌گذاری: هنگام بازدیدهای دوره‌ای سوپرهیترها، مشاهده شد که لایهٔ مگنتیت سطوح داخلی خرد و لایه‌لایه شده است. از صافی‌های ریز و درشت، مقاطعی برای بازدید تهیه شد. پس از بررسی، مشخص شد حدود ۱۰٪ منافذ صافی ریز، با ذرات مگنتیت مسدود شده است.

ذرات ریز مگنتیت از سوپرهیتر عبور کرده و در صافی گیر کرده‌اند (شکل ۷.۱۸). صافی درشت، از عبور ذراتی با ضخامت ۰/۰۲۵ سانتی‌متر و عرض ۰/۰۳۸ سانتی‌متر جلوگیری می‌کرده است. قسمت روبه‌جریان صافی درشت، بر اثر برخورد ذرات معلق آسیب دیده است. اثرات مگنتیت‌های ورقه‌ورقه‌شده: پس از مشاهدهٔ اندکی کاهش در بازده توربین، احتمال وقوع خرابی در توربین بر اثر ساییدگی با ذرات سخت، داده می‌شد. اما پس از بازدید، فقط کمی خرابی مشاهده شده است.

نکات توجه‌برانگیز دربارهٔ این خرابی: برنامهٔ شیمیایی برای کاهش ایجاد خاکستر گداخته روی سطح پیشنهاد شده و عملکرد کلاریفایر نیز بررسی شده است. موقع وقوع این خرابی، نیازی به شستشوی شیمیایی سوپرهیتر دیده نشده است.

□ نمونهٔ ششم

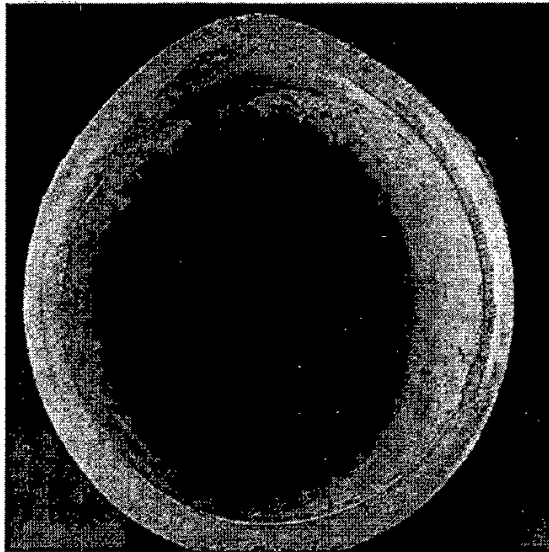
صنایع شیمیایی	صنعت:
لولهٔ دیواره‌ای، ۱/۸ متر بالای هدر پایینی	محل نمونه:
افقی	نحوهٔ قرارگرفتن نمونه:
۵ سال	عمر نمونه:
پلیمر	رژیم شیمیایی آب:
۲/۹۳ MPa (۴۲۵ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۸/۲۶ cm (۳/۲۵ in)	مشخصه‌های لوله:
گاز طبیعی و مازوت شمارهٔ ۶	سوخت:

نحوهٔ آگاهی از وجود رسوب: یکی از ۷۴ لولهٔ دیواره‌ای، دچار ورم و شکست شده است. یک لایهٔ ضخیم، ترد و خرمایی‌رنگ از رسوب، سطح داخلی را پوشانده است (شکل ۲۲.۱۸). قسمت داغ لوله با رسوبی به وزن ۱۰۰ گرم بر فوت‌مربع و قسمت سرد لوله با رسوبی به وزن ۸۲ گرم

بر فوت‌مربع پوشیده شده است. رسوب‌ها ترکیبی از کربنات کلسیم، سیلیکات کلسیم، فسفات کلسیم و هیدروکسید سیلیکات منیزیم‌اند.

علت رسوب‌گذاری: طی یک سال، به‌طور متناوب تا دبی ۴۰,۹۰۰ کیلوگرم بر ساعت از بویلر بهره‌برداری شده است، درحالی‌که این بویلر برای دبی ۳۴,۰۰۰ کیلوگرم بر ساعت طراحی شده است. طی یک ماه منتهی به خرابی، سوخت بین گاز طبیعی و مازوت شماره ۶، متغیر بوده است. مشعل‌های اصلی با مشعل‌های بزرگ‌تری تعویض شده‌اند. رسوب‌گذاری بر اثر حرارت ورودی بیش از حد بوده است.

اثرات رسوب: طراحی مشعل‌ها و تولید بخار بیش از حد، نقش بسزایی در رسوب‌گذاری و بیش‌گرمایش لوله داشته‌اند. وجود رسوب‌ها به‌همراه بیش‌گرمایش، موجب شکست لوله شده‌اند.



شکل ۲۲.۱۸. مقطعی از لولهٔ ورم‌کرده. رسوب‌ها در هر دو قسمت داغ و سرد لوله زیاد است. اکثر رسوب‌ها، فسفات‌ها، سیلیکات‌ها و کربنات‌ها هستند.



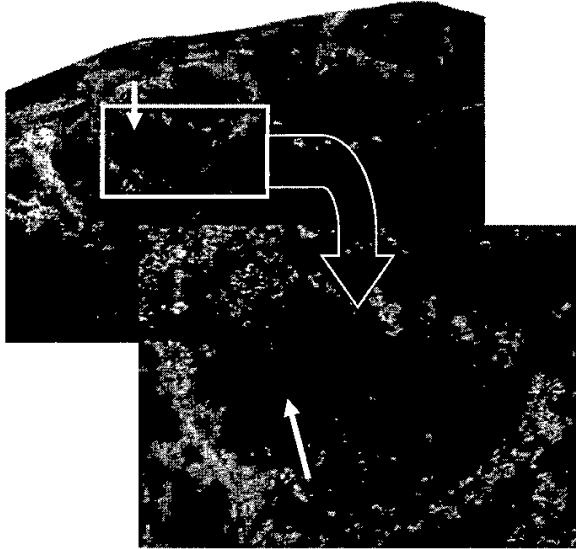
□ نمونه هفتم [۴]

صنعت:	نیروگاه بخار
محل نمونه:	محل خم پایینی لوله‌های دیواره آبی <sup>۱</sup> بویلر کمکی
عمر نمونه:	عمر طراحی این لوله‌ها بیش از ۲۰ سال است، درحالی‌که فقط ۱/۵ سال از نصب آن‌ها گذشته است.
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ با pH برابر با ۱۰/۵
فشار کاری:	۱۳/۸ bar
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵۱ mm
	دمای اسمی آب داخل لوله‌ها: ۲۴۹ °C
	جنس لوله‌ها: ASTM A210-Grade A-1

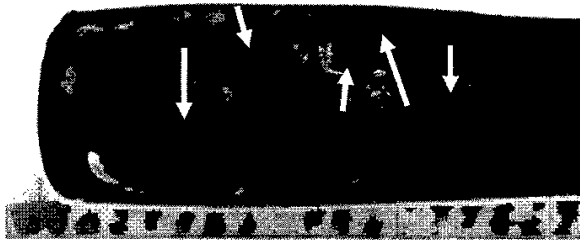
علائم ظاهری: چند نمونه لوله دیواره آبی تخریب‌شده مربوط به بویلر کمکی یک نیروگاه، برای بررسی علل تخریب، دریافت شده است. این نمونه‌ها مربوط به ردیف‌های آخر (سمت مقابل مشعل) در محل خم و نزدیک محل اتصال به درام پایین بوده است. عمر طراحی این لوله‌ها بیش از ۲۰ سال است، درحالی‌که فقط ۱/۵ سال از نصب‌شان گذشته است و در این مدت نیز به‌دلیل مشکلاتی در سیستم کنترل بویلر، حدود ۱۴ ماه خارج از مدار بوده‌اند. این لوله‌ها در محل خم پایینی دچار تعداد بسیاری سوراخ‌شدگی از سمت داخل شده‌اند. سوراخ‌ها و مناطق تخریب‌شده بیشتر در ناحیه بیرونی خم لوله (شعاع خارجی انحنا) و در سمتی که شعله مستقیم مشعل‌ها برخورد نمی‌کند، دیده می‌شود. تصاویری با بزرگ‌نمایی بیشتر از سطوح خارجی لوله‌های آسیب‌دیده، سوراخ‌های پُرشمار و آثار خوردگی و لایه‌های اکسیدی در مجاورت سوراخ‌ها را به‌وضوح نشان می‌دهد (شکل‌های ۲۳.۱۸ و ۲۴.۱۸).

برای بررسی بیشتر آثار تخریب، لوله‌ها از چند ناحیه در جهت‌های طولی و عرضی بریده شده‌اند. در تصاویر گرفته‌شده از سطوح داخلی نیز سوراخ‌ها، آثار خوردگی و رسوب‌های سطحی به‌وضوح دیده می‌شوند (شکل ۲۵.۱۸). همچنین شکل ۲۶.۱۸ مقطع لوله را در ناحیه‌ای نزدیک خم نشان می‌دهد که در آن، حجم وسیعی از رسوب‌های داخل لوله، مشاهده‌پذیر است. این رسوب‌ها یک توده بزرگ که بیش از ۴۰٪ از مساحت مقطع را اشغال کرده است، تشکیل داده‌اند.

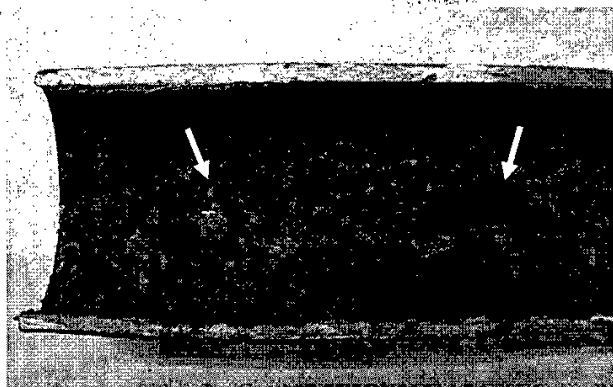
شایان ذکر است که مقدار چشمگیری از این رسوب‌ها هنگام برشکاری، بسته‌بندی و حمل‌ونقل ریخته است. یک نکتهٔ توجه‌برانگیز دیگر، شکل ظاهری رسوب‌هاست که نشان می‌دهد آن‌ها در جای دیگری تشکیل شده و حین عبور از لوله‌ها در خم‌ها گیر کرده‌اند (شکل ۲۴.۱۸)؛ به‌همین دلیل فاقد استحکام بالا و چسبندگی زیاد به لوله‌اند.



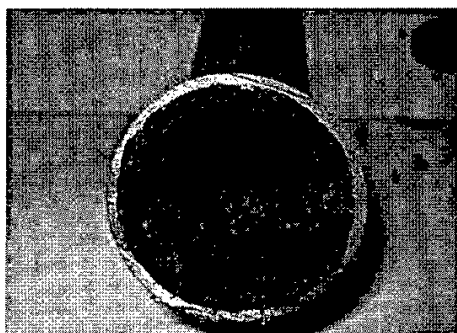
شکل ۲۳.۱۸. آثار خوردگی و سوراخ‌های روی سطح بیرونی لوله



شکل ۲۴.۱۸. سوراخ‌های ایجادشده (نوک فلش) و لایه‌های اکسیدی در سطح خارجی لوله‌های آسیب‌دیده



شکل ۲۵.۱۸. آثار خوردگی در سطح داخلی لوله‌ها



شکل ۲۶.۱۸. توده رسوب‌های درون لوله در مقطعی نزدیک خم

تشکیل این حجم گسترده از رسوب و محصولات خوردگی داخل لوله، طی زمان نسبتاً کوتاه سرویس‌دهی لوله‌ها، طبیعی نیست و می‌تواند ناشی از عوامل تشدیدکننده خوردگی مانند شرایط نگهداری نادرست هنگام خروج بویلر از مدار و شیمی نامناسب آب بویلر (تغییرات pH) باشد. بررسی‌های XRD و XRF: برای بررسی جنس و ماهیت رسوب‌های به‌جای‌مانده در لوله‌ها، از آنالیزهای XRD و XRF استفاده شده است (جدول ۶.۱۸). بر اساس نتایج این بررسی، قسمت عمده رسوب‌ها از اکسیدهای آهن ( $Fe_2O_3$  و  $Fe_3O_4$ ) تشکیل شده که ناشی از خوردگی و اکسیدشدن آهن به‌عنوان عنصر پایه در لوله‌های فولادی بویلر است. این آنالیز نشان می‌دهد آهن به‌سهولت در شرایط اکسیداسیون قرار گرفته و سطح داخلی لوله‌ها را لایه‌ای از اکسید

پوشانده است. بر اثر انقباض و انبساط لوله‌ها هنگام راه‌اندازی و خاموش کردن سیستم، لایه اکسیدی جدا شده و ریخته است.

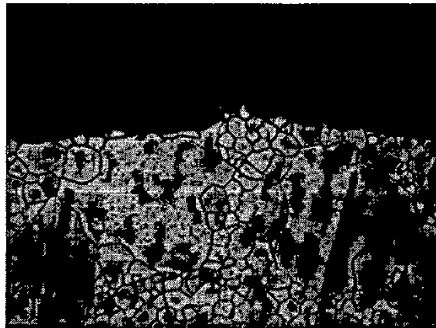
جزء نسبتاً توجه‌برانگیز دیگری که در آنالیز XRF شناسایی شده، اکسید مس با مقدار ۳/۶٪ وزنی است. اگرچه منشأ ورود اکسید مس به رسوب‌ها به‌درستی مشخص نیست، اما وجود یون مس در آب بویلر می‌تواند (طبق واکنش ۱.۱۸) فرایند خوردگی فولاد بویلر را تسریع کند [5].

$$3\text{Cu}^{2+} + 2\text{Fe} \rightarrow 3\text{Cu} + 2\text{Fe}^{3+} \quad (\text{واکنش } 1.18)$$

جدول ۶.۱۸. نتیجه آنالیز XRF روی رسوب‌ها

درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب
۰/۲۸	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۵۴	SiO <sub>2</sub>	۰/۲۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۲۶	MgO
۹۴/۰	اکسیدهای آهن	۰/۳۰	MnO	۰/۱۱	CaO	۰/۰۵۸	Cl
<۱	لانتان و لوتیم	۰/۰	L.O.I	۰/۶۶	ZnO	۳/۶	CuO

متالوگرافی: به‌طور کلی ریزساختار در نزدیکی سطح خارجی، درشت‌دانه‌تر از سطح داخلی است. شکل ۲۷.۱۸ حضور دانه‌های بسیار درشت فریت را در نواحی دیواره خارجی نشان می‌دهد که حکایت از رشد شدید دانه‌ها دارد. این رشد غیرطبیعی دانه‌ها می‌تواند بر اثر افزایش بیش از حد دمای موضعی لوله ایجاد شده باشد. تشکیل کاربید در مرزدانه‌ها و رشد غیرطبیعی برخی دانه‌ها، دلایل روشنی برای تقویت احتمال وقوع بیش‌گرمایش طولانی‌مدت (حتی به‌صورت موضعی) هستند.

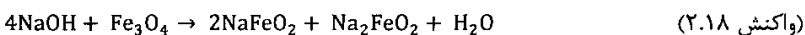


شکل ۲۷.۱۸. رشد غیرطبیعی برخی دانه‌ها در نزدیکی سطح خارجی لوله‌ها

ایجاد چنین تغییرات وسیع ریزساختاری در لوله‌ها و نیز تشکیل حجم گسترده‌ای از رسوب‌ها و محصولات خوردگی در مدت سرویس‌دهی چندماهه لوله‌ها، حکایت از رخداد شرایط غیرعادی حین بهره‌برداری از آن‌ها دارد. بر اساس اطلاعات رسیده از نیروگاه، لوله‌های بویلر بررسی شده، چند ماه قبل از حادثه به‌طور کامل تعویض شده‌اند و برای تست هیدرواستاتیک آن از آب استفاده شده است. آب درون لوله‌ها بعد از انجام تست، تخلیه نشده و تقریباً ۳ ماه در سیستم باقی مانده است.

در صورت خروج بویلر از مدار، باید کیفیت آب آن را پیوسته کنترل کرد تا لوله‌ها دچار خوردگی نشوند. روش نگهداری، به مدت زمان خروج بویلر از مدار بستگی دارد. اگر زمان خاموشی بیش از ۶ هفته باشد، از روش نگهداری خشک، و در غیر این صورت، از روش نگهداری تر استفاده می‌شود. در روش خشک، بویلر باید کاملاً تخلیه، تمیز و خشک شود و گرم کردن آن به‌منظور حذف رطوبت ضروری است [۶]. برای لوله‌های بررسی شده، ظاهراً هیچ‌گونه عملیات نگهداری طی زمان نسبتاً طولانی خروج بویلر از مدار، انجام نشده است. در مواقع راه‌اندازی مجدد یا خاموش کردن بویلر، به دلیل وجود اختلاف ضریب انبساط حرارتی رسوب‌ها و فولاد لوله، احتمال شکستن، خرد و جدا شدن از دیواره‌ها برای این رسوب‌های نامنصف، زیاد است. در صورت بروز چنین شرایطی، رسوب‌ها در محل خم لوله‌های پایین بویلر تجمع می‌کنند و به‌مرور به تشکیل لایه‌های ضخیم و در مواردی کلوخه‌های بزرگ از رسوب، منجر می‌شوند.

علاوه بر آنچه گفته شد، عوامل دیگری نیز می‌توانند در تشدید خوردگی و تسریع شکل‌گیری رسوب‌ها دخیل باشند؛ از جمله شیمی نامناسب آب و افزایش pH آن حتی به صورت موضعی که می‌تواند به خوردگی قلیایی منجر شود. این پدیده واکنشی خورنده میان هیدروکسید سدیم تغلیظ‌شده و فلز است که طی آن، لایه مگنتیت سطح فولاد در هیدروکسید سدیم دارای pH بالا (طی واکنش ۲.۱۸) حل می‌شود.



پس از حل شدن مگنتیت، هیدروکسید سدیم مستقیماً با آهن وارد واکنش شده و باعث خوردگی آن می‌شود (واکنش ۳.۱۸).



از آنجاکه هیدروکسید سدیم (یا نمک‌های مولد قلیا<sup>۱</sup>) به‌ندرت در مقادیر خورنده در آب بویلر وجود دارند، برای ایجاد خوردگی قلیایی وجود مکانیسم‌های تغلیظ ضروری است. یکی از دلایل عمده تغلیظ مواد خورنده و افزایش موضعی pH، مکانیسم رسوب<sup>۲</sup> است. رسوب‌های گسترده تشکیل شده در سطح داخلی لوله، باعث ایجاد یک عایق حرارتی می‌شود که دمای سطح فلز زیر رسوب را به‌صورت موضعی افزایش می‌دهد و آب آن ناحیه را تبخیر می‌کند. بخار آب از زیر لایه رسوب خارج می‌شود و مواد خورنده خود را به‌جای می‌گذارد. تداوم این فرایند، سبب افزایش غلظت مواد خورنده در زیر رسوب‌ها و خوردگی شدید سطح فلز می‌شود. همچنین، همان‌طور که گفته شد، این رسوب‌ها مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کنند و تا حد مهمی مانع انتقال دمای لوله به آب داخل آن می‌شوند. در نتیجه با ادامه عملکرد مشعل‌ها روی لوله، به تدریج دمای فولاد افزایش می‌یابد و بیش‌گرمایش رخ می‌دهد. این پدیده در مورد دیواره خارجی، حادث‌تر خواهد بود.

### منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [۲] این کروپرا، فرانک. پی، دیوید. پی. دویت: مقدمه‌ای بر انتقال گرما (جلد دوم)، مترجمان: علی‌اصغر رستمی و شهرام حمایت، چاپ دوم، ۱۳۷۴.
- [3] *ASM Handbook, Vol. 11, "Failure Analysis and Prevention"*, 1992.
- [۴] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، محمود سمیع‌زاده، بررسی علل تخریب لوله‌های دیواره آبی بویلر کمکی، نیروگاه بندرعباس، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تیر ۱۳۹۲.
- [5] French, D., *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, Wiley Pub., 1983.
- [۶] رحمانی، خسرو، متالورژی شیمی و خوردگی در بویلر، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق، تهران، ۱۳۸۸.

## فصل ۱۹

### سایش

#### ۱.۱۹. محل‌های کلی وقوع سایش

سایش<sup>۱</sup> بویلر در چهار محل اصلی رخ می‌دهد:

۱. سمت آتش: علت عمده خرابی‌های ناشی از سایش، مکانیسم‌های سایش سمت آتش است. این مکانیسم‌ها را می‌توان به جزءهای بیشتری مانند سایش ناشی از دوده‌زدایی، سایش با سیال خروجی از محل شکست لوله‌ها<sup>۲</sup>، سایش بر اثر برخورد خاکستر معلق، سایش بر اثر برخورد ذرات زغال‌سنگ و سایش بر اثر سقوط خاکسترهای گداخته<sup>۳</sup> تقسیم‌بندی کرد. گاهی بویلرهای زغال‌سوز از نوع بستر سیال<sup>۴</sup> و دیگر بویلرها با مصارف خاص، دچار سایش شدید می‌شوند. بویلرهایی که از چوب و سرباره<sup>۵</sup> نیشکر به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند، بیشتر بر اثر ورود آلودگی‌هایی مانند ماسه و دیگر مواد خارجی به کوره، دچار سایش می‌شوند. کوره‌های زیاله‌سوز<sup>۶</sup> نیز دچار مشکلات مشابهی می‌شوند. از آنجاکه مکانیسم‌های سایش سمت آتش دلیل اکثر خرابی‌های ناشی از سایش‌اند، از هر مکانیسم با جزئیات بیشتری بحث خواهد شد؛
  ۲. تجهیزات قبل از بویلر<sup>۷</sup>: سایش تجهیزات قبل از بویلر، معمولاً در سیستم‌های آب تغذیه رخ می‌دهد؛
  ۳. تجهیزات پس از بویلر<sup>۸</sup>: در نواحی پس از بویلر، سایش در توربین معمول است؛
  ۴. سمت آب و بخار<sup>۹</sup>: سایش فلز سمت آب به‌ندرت رخ می‌دهد. ناپیوستگی‌های سطح داخلی و اشیای جامد خارجی جاگرفته درون لوله‌ها می‌توانند اغتشاش را افزایش دهند و موجب از بین رفتن فلز شوند.
- تذکر: نازل مشعل‌ها، لوله‌های تخلیه دائمی، مسیرهای آب سیکل و بسیاری دیگر از اجزای بویلر نیز دچار سایش می‌شوند.

---

1. erosion

2. steam cutting

3. falling slag

4. fluidized-bed

5. bagasse

6. incinerator

7. preboiler

8. afterboiler

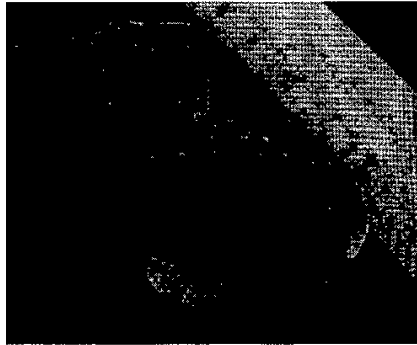
9. water side and steam side

## ۲.۱۹. بررسی مکانیسم‌های سایش

## ۱.۲.۱۹. سایش ناشی از دوده‌زدا

## ۱.۱.۲.۱۹. مکانیسم سایش

می‌توان گفت دوده‌زداها رایج‌ترین عامل سایش در بویلرند. معمولاً دوده‌زدایی که در مسیر صحیح تنظیم نشده است، به‌جای هدایت سیال به فضای میان لوله‌ها، باعث برخورد جت بخار (یا هوایی که قطرات آب تقطیر شده را حمل می‌کند) به سطوح لوله می‌شود. وجود خاکسترهای معلق، وقوع خرابی را تسریع می‌کند. نازک‌شدگی بر اثر سایش، غالباً به شکست لوله منجر می‌شود (شکل‌های ۱.۱۹ و ۲.۱۹). سایش فیزیکی و اکسیداسیون سریع نیز باعث از بین رفتن فلز می‌شوند.



شکل ۱.۱۹. قسمتی از سوپرهیتر که بر اثر سایش ناشی از دوده‌زدا نازک شده است. به سطح پهن ایجادشده بر اثر سایش توجه کنید. لوله در سمت نازک شدگی، باد کرده و دچار شکست شده است. همچنین توجه کنید که رنگ سطح ساییده‌شده با ناحیه ساییده‌نشده تفاوتی ندارد. این امر نشان‌دهنده تناوب سایش است.



شکل ۲.۱۹. شکست لوله بر اثر تنظیم نبودن دوده‌زدا. لبه‌های شکست به دلیل پارگی در ناحیه ساییده‌شده، نازک و ناصاف‌اند. سطح لوله به دلیل ساییده شدن اکسیدهای آهن و رسوب‌های سطح، دارای رنگ خاکستری روشن و براق است.



## ۲.۱.۲.۱۹. محل وقوع سایش

چنان‌که از عنوان «سایش ناشی از دوده‌زدا»<sup>۱</sup> برمی‌آید، این خرابی در نزدیکی خروجی دوده‌زدا یا در مسیر سیال خروجی از دوده‌زدا رخ می‌دهد. محل‌های معمول این خرابی، لوله‌های واقع در مسیر دوده‌زداهای جمع‌شونده<sup>۲</sup>، به‌ویژه لوله‌هایی با کمترین فاصله تا دیواره ورودی دوده‌زداهای جمع‌شونده‌اند. از دیگر محل‌های وقوع سایش، گوشه‌های کوره در دیواره روبه‌روی دوده‌زداها هستند. غالباً سوپرهیترهای صفحه‌ای<sup>۳</sup> واقع در قسمت‌هایی از کوره که انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی<sup>۴</sup> انجام می‌شود و لوله‌های واقع در نزدیکی دوده‌زداهایی که درست کار نمی‌کنند، در معرض این نوع سایش قرار دارند. لوله‌های سوپرهیتر نیز معمولاً دچار این نوع سایش می‌شوند.

## ۳.۱.۲.۱۹. عوامل سایش

تنظیم نادرست مسیر دوده‌زدا و بهره‌برداری نادرست از آن، معمول‌ترین عوامل ایجاد خرابی‌اند. ممکن است ثابت‌بودن دوده‌زدا نیز در ایجاد سایش مؤثر باشد. در مورد عوامل این نوع سایش، باید به برخی نکات توجه کرد:

- ورود قطرات آب و خاکستر معلق به سیال به‌کاررفته در دوده‌زدایی<sup>۵</sup>، باعث شدت‌یافتن سایش می‌شود.
- افزایش فشار سیال به‌کاررفته در دوده‌زدایی، سرعت سیال را افزایش می‌دهد و به وقوع خرابی‌هایی که خاکستر معلق در وقوعشان مؤثر است، سرعت می‌بخشد.

## ۴.۱.۲.۱۹. علائم سایش

برای تشخیص این نوع سایش، نکات زیر را باید در نظر گرفت:

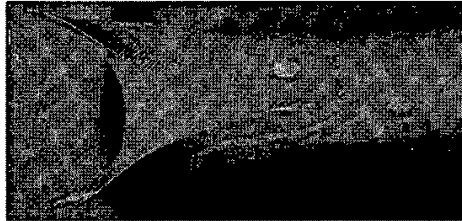
۱. بر اثر این نوع سایش، سطح لوله در امتداد طول آن پهن و تخت به‌نظر می‌رسد (شکل‌های ۱.۱۹ و ۲.۱۹)؛
۲. در صورت وجود گرداب یا کانالیزه‌شدن دود، سطح ساییده‌شده ناصاف و شیاردار است؛
۳. سطوح فلزی دچار سایش، هموار و دارای خطوط سطحی‌اند (شکل‌های ۳.۱۹ و ۴.۱۹). این خطوط، بر جریان بخاری که روی سطح دمیده می‌شود عمودند؛

---

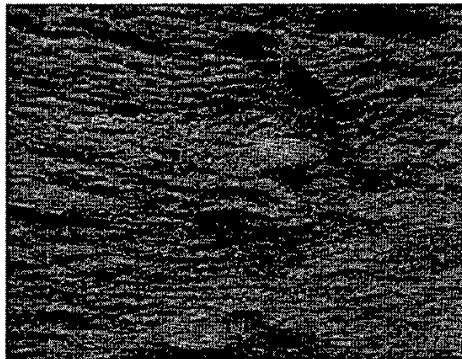
1. soot-blower erosion  
3. platen  
5. blower gas

2. retractable soot-blower  
4. convection section

۴. در صورت کهنه‌بودن سایش یا تناوب آن (غالباً سایش ناشی از دوده‌زدا این‌طور است)، اکسیدها و رسوب‌هایی روی سطوح نازک‌شده را خواهند پوشاند، اما لایه‌های اکسید و رسوب در سطوح ساییده‌شده نسبت به دیگر سطوح نازک‌ترند؛
۵. در صورت تازه‌بودن سایش، فقط لایه نازک و سیاه‌رنگ اکسید آهن روی سطح وجود خواهد داشت، یا هیچ لایه اکسیدی مشاهده نخواهد شد؛
۶. سطوح ساییده‌شده به‌طور موضعی نازک می‌شوند و می‌توان در اطرافشان فلز ساییده‌نشده را مشاهده کرد؛
۷. کناره‌های شکست نازک و ناصاف خواهند بود؛
۸. شکست معمولاً طولی است، اما می‌تواند در امتداد شیارها نیز ایجاد شود؛
۹. معمولاً در لوله‌های تحت فشار که دچار سایش شده‌اند، ورم وجود نخواهد داشت.



شکل ۳.۱۹. خطوط موج‌مانند سطحی و موازی در لبه‌های خارجی شکست در یک لوله سوپرهیتر. دایره‌های روشن ناحیه‌هایی‌اند که قطرات اسید، لایه نازک اکسید را حین بررسی آزمایشگاهی از بین برده‌اند.



شکل ۴.۱۹. خطوط موج‌مانند موازی، با فاصله کم، در سمت آتش یک لوله سوپرهیتر. خطوط روی سطح، شبیه امواج دریا هستند، وقتی از بالا به آن‌ها نگاه کنیم. این موج‌ها عمود بر مسیر برخورد بخار قرار گرفته‌اند (با شکل ۳.۱۹ مقایسه کنید).

تذکر ۱: معمولاً سایش از دهانه شیر خروجی سیال دوده‌زدا شروع می‌شود و در مسیر حرکت سیال دوده‌زدا ادامه می‌یابد. با افزایش فاصله از دوده‌زدا، شدت سایش کاهش می‌یابد.

تذکر ۲: سایش ناشی از دوده‌زدا می‌تواند شبیه خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی، خوردگی ناشی از خاکستر زغال‌سنگ و سایش ناشی از خاکستر معلق باشد. اگر رسوب سنگین روی دیواره‌های لوله نازک شده باشد، ممکن است خرابی بر اثر خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی یا خاکستر زغال‌سنگ باشد؛ حتی اگر این لوله‌ها حاوی دیگر مشخصات سایش باشند.

تذکر ۳: بویلرهایی که از چوب، تفاله نیشکر و دیگر مواد پس‌مانده به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند، به‌طور خاص در معرض خرابی ناشی از سایش قرار دارند، زیرا ممکن است ماسه، آشغال و گردو خاک وارد گازهای حاصل از احتراق شوند. سایش ناشی از این ذرات ریز ورودی شبیه سایش ناشی از دوده‌زداست، اما باید توجه داشت که اگر دوده‌زدا عامل خرابی باشد، خرابی باید در مسیر حرکت سیال دوده‌زدا واقع شده باشد.

#### ۵.۱.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از سایش

برای پیشگیری از این نوع سایش، توجه به نکات زیر توصیه می‌شود:

۱. بهره‌برداری، عملکرد و تنظیم درست دوده‌زدا (در فضای میان لوله‌ها)؛
۲. بازدید متناوب موقعیت نازل و اطمینان از صحیح بودن راستای آن؛
۳. گرم کردن بخار به‌اندازه کافی و فراهم کردن شرایط لازم برای تخلیه خطوطی که بخار لازم برای دوده‌زدایی در آن‌ها جریان دارد. با این اعمال، می‌توان رطوبت موجود در بخار دمیده‌شده را حذف کرد.

تذکر: به‌کمک جوشکاری، فلزاندود کردن سطح لوله<sup>۱</sup> و پاشش پلاسما<sup>۲</sup>، می‌توان ضخامت و عمر دیواره را در ناحیه ساییده‌شده افزایش داد. باید توجه داشت که قراردادن پوشش، مشکل اصلی را برطرف نمی‌کند. این پوشش‌ها به‌طور موضعی باعث کاهش انتقال حرارت نیز می‌شوند.

#### ۲.۲.۱۹. سایش بر اثر بخار خروجی از لوله‌های تخریب‌شده مجاور

##### ۱.۲.۲.۱۹. مکانیسم سایش

در محل شکست‌های ایجادشده، سیال می‌تواند از مسیر خود خارج شود. در صورتی که سرعت

1. metallizing

2. plasma spray

سیال زیاد باشد، می‌تواند باعث سایش در تجهیزات مجاور به خرابی شود. سایش ایجادشده در مقایسه با سایش بر اثر دوده‌زداها متمرکزتر است و به‌سرعت، فلز لوله مجاور را از بین می‌برد.

#### ۲.۲.۲.۱۹. محل وقوع سایش

سایش لوله‌ها به این شکل، در هر جایی از بویلر می‌تواند رخ دهد. وقتی فشار و دمای بخار بالا باشد، سایش بسیار شدید خواهد بود. از این رو غالباً سوپرهیترها و ری‌هیترها به‌شدت دچار این نوع سایش می‌شوند. همیشه در نزدیکی محل این نوع سایش، یک لوله تخریب‌شده وجود دارد. معمولاً خرابی‌های ایجادشده بسیار متمرکزند و در نقاطی که در مقابل لوله تخریب‌شده قرار دارند حادث‌ترند. گاهی اگر خرابی اصلی در لحظات ابتدایی رخداد شناسایی نشود، زنجیره‌ای از خرابی‌ها به‌دنبال خواهد آمد؛ یعنی هر خرابی، خود منشأ خرابی‌های دیگر خواهد شد.

#### ۳.۲.۲.۱۹. عوامل سایش

فشار سیال خروجی از محل شکست و فاصله لوله‌های مجاور تا محل خرابی، بر شدت خرابی مؤثرند. نرخ از بین‌رفتن فلز، با افزایش فشار و دما و کاهش فاصله، افزایش می‌یابد.

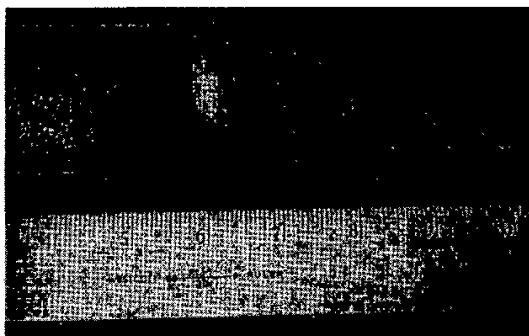
#### ۴.۲.۲.۱۹. علائم سایش

برای اطمینان از صحت تشخیص اینکه سیال خروجی از محل خرابی باعث سایش شده است، باید به برخی نکات توجه کرد:

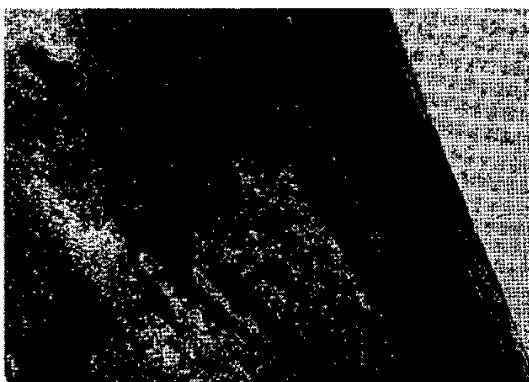
۱. در صورتی که این مکانیسم عامل خرابی باشد، حتماً یک لوله تخریب‌شده در مجاورت قطعه ساییده‌شده وجود خواهد داشت؛
۲. ممکن است شکل سطوح ساییده‌شده شبیه سطوح ساییده‌شده بر اثر دوده‌زداها باشد (علائم مربوط به سایش بر اثر دوده‌زداها را مطالعه کنید)؛
۳. سطوح دچار سایش معمولاً حالت ریگ‌زار یا خطوط سطحی دارند (ظاهر موج‌مانند)؛
۴. سطوحی که به‌تازگی دچار سایش شده‌اند، اغلب فاقد اکسید یا رسوب‌اند؛
۵. سطوح نزدیک به لوله‌های نشستی‌دار، ممکن است موج و شیارهای یکنواخت داشته باشند (شکل‌های ۵.۱۹ و ۶.۱۹)؛
۶. با کاهش فاصله از منبع خرابی، ناهمواری‌ها در محل سایش افزایش می‌یابد.

تذکر ۱: گاهی سایش ناشی از نشستی بخار ممکن است با خرابی ناشی از شکل‌های دیگر سایش سمت آتش، یعنی سایش ناشی از خاکستر معلق، ذرات زغال‌سنگ و سقوط خاکسترهای گداخته، اشتباه شود.

تذکر ۲: وقتی لوله‌ای بر اثر بخار دچار سایش می‌شود، شروع به نشستی می‌کند. سیال خروجی از این لوله می‌تواند تغییراتی در خرابی مجاور به خود (که عامل اصلی خرابی بوده است)، ایجاد کند.



شکل ۵.۱۹. لوله سوپرهمتری که بر اثر نشت بخار از لوله مجاورش، دچار سایش شده است. لوله مجاور بر اثر عیوب ناشی از تولید، دچار خرابی شده است. به سطح موج‌دار و جدایی اکسیدهای قرمز و سیاه‌رنگ در محل سایش توجه کنید.



شکل ۶.۱۹. ایجاد شیار در سوپرهمتر آویزان لاشکل، بر اثر نشستی از یک ترک ناشی از خستگی - خوردگی. شیارها پس از جداشدن نمونه از بویلر، رنگ زده‌اند.

## ۵.۲.۲.۱۹. روش پیشگیری از سایش

از آنجاکه عامل این نوع سایش، بخار خروجی از محل خرابی‌هایی است که رخ دادن آن‌ها پیش‌بینی‌ناپذیر و وقوع آن‌ها در هر جایی از بویلر محتمل است، بنابراین پیش‌بینی یا برنامه‌ریزی برای پیشگیری از این نوع خرابی، عملاً میسر نیست. تنها راه منطقی برای کاهش این نوع خرابی، کاهش احتمال وقوع دیگر خرابی‌هاست.

## ۳.۲.۲.۱۹. سایش ناشی از خاکستر معلق

## ۱.۳.۲.۱۹. مکانیسم سایش

سایش ناشی از خاکستر معلق<sup>۱</sup>، بر اثر برخورد ذرات ریز موجود در گازهای احتراق — که دارای سرعت بالا هستند — به سطوح فلزی ایجاد می‌شود.

## ۲.۳.۲.۱۹. محل وقوع سایش

این نوع سایش معمولاً در اکونومایزر، سوپرهیتر، ری‌هیتر و لوله‌های سقف بویلر رخ می‌دهد؛ هرچند ممکن است لوله‌های دیگر نیز دچارش شوند. از آنجاکه هرچه دما پایین‌تر باشد، خاکستر معلق خورندگی بیشتری دارد، اکونومایزرها به دفعات دچار این نوع سایش می‌شوند. در نواحی ورودی ری‌هیترها، این نوع سایش معمول است، زیرا در این نقاط سرعت محصولات احتراق بالاتر است و گرداب‌هایی نیز ایجاد می‌شوند. از دیگر نواحی محتمل برای وقوع این نوع سایش، نقاطی از سوپرهیترهاست که خاکسترهای گداخته روی لوله‌ها قرار می‌گیرند<sup>۲</sup>. بر اثر قرار گرفتن خاکستر روی لوله، سطح مقطع عبور جریان کاهش یافته و سرعت دود افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، هر موقعیتی که در آن پدیده کانالیزه شدن دود رخ دهد یا گرداب‌هایی از محصولات احتراق ایجاد شود، برای سایش مناسب است. این نوع سایش معمولاً به شکل متمرکز و غالباً در ناحیه‌هایی مثل فضای میان ردیف‌های لوله‌ها رخ می‌دهد.

## ۲.۳.۲.۱۹. عوامل سایش

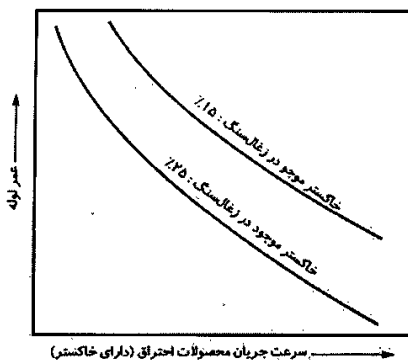
در بررسی عوامل این نوع سایش، باید به نکات زیر توجه داشت:

۱. میزان سایش فلز، بسته به افزایش سختی ذرات، سرعت محصولات احتراق و غلظت خاکستر افزایش می‌یابد. از میان این سه، سرعت محصولات احتراق و غلظت خاکستر، اهمیت بیشتری دارند (شکل ۷.۱۹). این دو عامل، به ترتیب با افزایش انرژی جنبشی در هر ضربه و افزایش

1. fly ash erosion

2. slagging

- تعداد ضربه‌ها در واحد زمان در یک ناحیه مشخص، شدت سایش را افزایش می‌دهند. جدول ۱.۱۹ حداکثر سرعت گاز را برای طراحی‌های گوناگون احتراق یا سوخت نشان می‌دهد؛
۲. با افزایش زاویه برخورد جریان محصولات احتراق به سطح فلز، سایش افزایش می‌یابد؛
۳. با افزایش دما، سایش کاهش می‌یابد، زیرا ذرات نرم‌تر می‌شوند؛
۴. اندازه، سختی و ترکیب ذرات نیز بر سایش مؤثرند. ذرات بزرگ‌تر از  $0/0025$  سانتی‌متر ( $0/001$  اینچ) و ذرات دارای مقادیر بیشتر ترکیبات آلومینیم و سیلیکات، ساینده‌ترند، زیرا سختی ذرات بالاتر و انرژی جنبشی آن‌ها بیشتر است؛
۵. در بویلرهایی که بیش از حد سوخت مصرف می‌کنند، سایش ناشی از خاکستر معلق رایج است، زیرا مقادیر چشمگیری خاکستر وارد دود می‌شود؛
۶. در بویلرهایی که از سیستم هوای اضافی استفاده می‌کنند، معمولاً مقدار ذرات کاهش می‌یابد؛
۷. توقف جزئی احتراق باعث ورود مقادیر بیشتری ذرات ریز به داخل محصولات احتراق می‌شود؛ از این رو از جمع‌کننده‌ها<sup>۲</sup> استفاده می‌کنند. هرگاه جمع‌کننده‌ها به‌درستی عمل نکنند، خرابی افزایش می‌یابد.
- تذکر: وضعیت بافل‌های منحرف‌کننده<sup>۴</sup> نیز در وقوع سایش مؤثر است.



شکل ۷.۱۹. اثرات سرعت و حجم خاکستر بر عمر لوله. افزایش تعداد و سرعت ذرات خاکستر، به کاهش عمر بهره‌برداری از لوله منجر می‌شود.

1. overfeed stokers
3. collector

2. overfire air system

۴. از بافل‌ها برای توزیع یکنواخت‌تر گازهای احتراق و در نتیجه خاکستر معلق استفاده می‌شود. در جاهایی که جریان بین مجموعه لوله‌ها افقی است، به‌طور کلی از بافل استفاده نمی‌شود.

جدول ۱.۱۹. سرعت دود در مجموعه لوله‌ها (FPS)، برای جلوگیری از سایش ناشی از غبار موجود در دود.

Type of firing or fuel	Baffle arrangement	
	Multipass	Single pass
Pulverized coal	75	75*
Spreader stoker	50	60
Chain-grate stoker, anthracite	60	75
Chain-grate stoker, coke breeze	60	75
Chain-grate stoker, bituminous	100	100
Underfeed stoker	75	100
Blast-furnace gas	75	100
Cyclone furnace	—	100
Wood or other waste fuels containing:		
Sand	50	60
Cement dust	—	45
Bagasse	60	75

\*در بویلرهایی که از زغال‌سنگ پودر شده‌ای استفاده می‌کنند که در حالت خشک، بیش از ۳۰٪ خاکستر دارد، حداکثر سرعت به ۶۵ fps محدود می‌شود. در بویلرهایی که زغال‌سنگ مصرفی آن‌ها، خاکستر بسیار ساینده تولید می‌کند، اعم از زغال‌سنگ‌های کره‌ای و هند مرکزی، حداکثر سرعت به ۴۵ fps محدود می‌شود.

$$۱ \text{ ft/s} = ۱ \text{ fps} = ۰.۳۰۴۸ \text{ m/s}$$

### ۴.۳.۲.۱۹. علائم سایش

در تشخیص سایش ناشی از خاکستر معلق، باید به نکات زیر توجه داشت:

۱. سایش ناشی از خاکستر معلق، غالباً باعث ایجاد سطوح صیقلی می‌شود. در برخی موارد، ناصافی‌های ایجاد شده بر اثر جریان سیال و حفره‌های ایجاد شده بر اثر گرداب‌ها، در اطراف خاکسترهایی که پوسته‌پوسته شده‌اند<sup>۱</sup>، نگهدارنده‌ها<sup>۲</sup> و تجهیزات نصب شده روی دیواره<sup>۳</sup> و... مشاهده می‌شوند (شکل ۸.۱۹):

۲. معمولاً ضخامت لایه اکسید سمت آتش و ضخامت رسوب‌ها روی سطوح ساییده شده کمتر است. این نکته در تشخیص این مکانیسم خرابی از خوردگی ناشی از خاکستر زغال‌سنگ و خاکستر مواد نفتی که تجمع رسوب‌ها و محصولات خوردگی زیاد است، راه‌گشا خواهد بود؛

1. slag encrustation
3. bracket

2. hanger





شکل ۸.۱۹. شیارهای عمیق ایجادشده در سمت داغ لوله دیواره آبی. شیارها بر اثر کانالیزه شدن گازهای کوره که دارای خاکستر معلق بوده‌اند، ایجاد شده‌اند.

۳. ممکن است تشخیص سایش ناشی از خاکستر معلق، از خوردگی قسمت‌های سرد ساده نباشد، اما در مقایسه با آنچه که در مورد خوردگی قسمت‌های سرد انتظار می‌رود، در اینجا هیچ نوع خوردگی شیمیایی وجود ندارد؛

۴. شکست رخ داده معمولاً لبه‌نازک است. بازدید دقیق محل شکست، اغلب نازک شدن سطح خارجی و فقدان بیش‌گرمایش و خوردگی را نشان می‌دهد. شاید از طریق آزمایش متالوگرافی، تغییر شکل پلاستیک میکروسکوپی روی سطح نازک‌شده مشخص شود. این تغییر شکل بر اثر برخورد ذرات با سرعت بالا ایجاد می‌شود.

تذکره ۱: تفکیک سایش ناشی از خاکستر معلق از دیگر انواع سایش سمت آتش، نیازمند اطلاعات بیشتری است.

تذکره ۲: محلی از بویلر که دچار سایش می‌شود، وضعیت بافل‌های منحرف‌کننده، مقدار خاکستر معلق و سرعت محلی محصولات احتراق، بر شدت خرابی ظاهر شده مؤثرند.

تذکره ۳: سایش می‌تواند به‌صورت موضعی یا کلی باشد.

تذکره ۴: سایش ناشی از خاکستر معلق، بسیار شبیه دیگر انواع سایش است (سایش ناشی از دوده‌زدا، سایش ناشی از برخورد سیال خروجی از لوله‌های دارای نشستی، سایش ناشی از برخورد ذرات زغال‌سنگ، سایش ناشی از سقوط خاکستر، سایش ناشی از خاکستر زغال‌سنگ و سایش ناشی از خاکستر مواد نفتی). ممکن است خوردگی قسمت‌های سرد نیز با سایش ناشی از

خاکستر معلق اشتباه گرفته شود. محل خرابی‌ها و اطلاعات بهره‌برداری از بویلر، در تشخیص صحیح اهمیت دارند.

### ۵.۳.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از سایش

برای کاهش و حذف خرابی، باید به نکات زیر توجه داشت:

۱. کاهش سایش ناشی از خاکستر معلق، نیازمند بررسی نحوه بهره‌برداری از سیستم است. این بررسی شامل اطمینان از صحت عملکرد تمام بافل‌ها، جمع‌کننده‌ها، عایق‌ها و موارد مشابه است. در موارد حاد، ممکن است طراحی مجدد اجزای بویلر ضروری باشد؛
۲. کاهش مقدار و سرعت خاکستر معلق، خرابی را محدود خواهد کرد. استفاده از سوخت‌هایی که توانایی ایجاد خاکستر با خورندگی کمتر دارند، در کاهش سایش مؤثر خواهد بود. بار زیاد و هوای بیش از حد، سرعت محصولات احتراق و در نتیجه میزان سایش بر اثر خاکسترهای معلق را افزایش می‌دهد؛
۳. چسبیدن خاکسترها به سطح، باعث کانالیزه شدن محصولات احتراق و افزایش گرداب‌ها می‌شود و سایش ناشی از خاکستر معلق را افزایش می‌دهد. افزودن مواد مناسب به سوخت و انجام دوده‌زدایی، می‌تواند از ایجاد خاکسترها و چسبیدن آن‌ها به سطح جلوگیری کند. برای جلوگیری از ورود تکه‌های خاکستر بزرگ‌تر<sup>۱</sup> به مجموعه لوله‌های افقی، از توری استفاده می‌شود؛
۴. استفاده از سپر حفاظتی و قراردادن پوشش فلزی<sup>۲</sup> در محل‌های خاصی که امکان سایش وجود دارد، سودمند است.

### ۴.۲.۱۹. سایش ناشی از ذرات زغال‌سنگ

#### ۱.۴.۲.۱۹. مکانیسم سایش

سایش در لوله‌ها هنگامی رخ می‌دهد که عایق لوله‌ها و پوشش نصب‌شده برای محافظت لوله‌ها در مقابل فرسایش، خراب یا فرسوده شود و لوله‌های بدون حفاظ، در معرض ذرات زغال‌سنگ قرار گیرند. این ذرات که با سرعت بالا حرکت می‌کنند [تا ۹ متر بر ثانیه (۳۰ فوت بر ثانیه)]، به دیواره لوله برخورد می‌کنند و باعث فرسایش سریع آن می‌شوند. این سایش از نظر ظاهری شبیه سایش ناشی از خاکستر معلق است.

#### ۲.۴.۲.۱۹. محل وقوع سایش

لوله‌های حاوی آب واقع در محفظه احتراق استوانه‌ای شکل کوره‌های زغال‌سوز گردابی<sup>۱</sup>، محل معمول این نوع سایش‌اند. ذرات زغال‌سنگی که ناقص سوخته‌اند، می‌توانند سرعت سایش در سوپرهیترا و لوله‌های دیواره‌ای را افزایش دهند. این نوع سایش در بویلرهای صنعتی<sup>۲</sup> شایع است.

#### ۳.۴.۲.۱۹. عوامل سایش

نابودی تدریجی عایق و پوشش محافظ لوله‌ها، به سایش لوله‌ها کمک می‌کند. زغال‌سنگ‌هایی که سیلیکات کمی دارند، خرابی کمتری ایجاد می‌کنند.

#### ۴.۴.۲.۱۹. علائم سایش

در بسیاری از موارد، تشخیص سایش ناشی از ذرات زغال‌سنگ ساده است، اما به دلیل شباهت زیاد با سایش ناشی از خاکستر معلق، برای تمییز این دو مکانیسم سایش، باید به دو نکته توجه شود:

۱. سایش ناشی از ذرات زغال‌سنگ در مشعل‌های گردابی و نقاط نزدیک به آن‌ها رخ می‌دهد؛
۲. بر اثر سایش ناشی از ذرات زغال‌سنگ، عایق یا پوشش لوله‌ها تخریب می‌شود. معمولاً با بازدید چشمی محل‌های دچار سایش می‌توان عایق‌های ورقه‌ورقه‌شده را مشاهده کرد.

#### ۵.۴.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از سایش

بازدید متناوب عایق‌ها و پوشش محافظ لوله‌ها و نگهداری از آن‌ها، از وقوع اکثر خرابی‌ها پیشگیری خواهد کرد.

تذکر: تمامی لوله‌های ساییده‌شده، نیاز به تعویض ندارند. پس از مشاهده شروع سایش، باید به‌طور مداوم لوله‌ها را برای تعیین ضخامت دیواره بازدید کرد.

#### ۵.۲.۱۹. سایش ناشی از سقوط تکه‌های خاکستر گداخته

#### ۱.۵.۲.۱۹. مکانیسم سایش

این نوع سایش بر اثر تکه‌های خاکستری ایجاد می‌شود که از بالا سقوط می‌کنند. این تکه‌ها به دیواره‌های شیب‌دار برخورد می‌کنند و باعث ایجاد خساراتی در آن‌ها می‌شوند. در صورت سقوط تکه‌های خاکستر بزرگ، ممکن است در لوله‌ها فرورفتگی یا خم‌شدگی ایجاد شود.

## ۲.۵.۲.۱۹. محل وقوع ساییش

این نوع ساییش به ندرت و معمولاً در لوله‌های دیواره‌ای شیب‌دار رخ می‌دهد که در نزدیکی کف بویلرهای بزرگ قرار دارند (در این قسمت‌ها، خاکستر به سمت قیف جمع‌کننده خاکستر<sup>۱</sup> هدایت می‌شود). بیشتر خرابی‌ها در نزدیکی دیواره‌های کناری رخ می‌دهد که روی آن‌ها مقادیر خاکستر بیشتری جمع می‌شود.

## ۳.۵.۲.۱۹. عوامل ساییش

مقدار خاکستر در واحد سطح و تمایل به سقوط این خاکسترها، نرخ خرابی را کنترل می‌کنند. شرایط ایجاد خاکستر گداخته در کوره‌های زیر مساعد است:

- کوره‌هایی که دیواره‌های بزرگ دارند.
- کوره‌هایی که در آن‌ها محصولات احتراق با سرعت‌های بالا یا پایین جریان دارند.
- کوره‌هایی که از زغال‌سنگ با قابلیت تولید خاکستر بالا استفاده می‌کنند. این زغال‌سنگ‌ها حاوی مقادیر بالای سدیم و کلرند.
- کوره‌هایی که دمای گازهای احتراقشان پایین است.
- کوره‌هایی که تحت سیکل‌های حرارتی قرار دارند و (یا) دمای فلز آن‌ها بالاست.

## ۴.۵.۲.۱۹. علائم ساییش

بر اثر سقوط تکه‌های خاکستر گداخته، نواحی مسطحی روی لوله‌های شیب‌دار ایجاد می‌شود. اگر تکه‌های خاکستر بزرگ از ارتفاع زیاد سقوط کرده و به سطح برخورد کنند، ممکن است در لوله‌ها فرورفتگی یا تغییر شکل ایجاد شود. غالباً آزمایش‌های ریزساختاری، تغییر شکل پلاستیک را در محل ساییش نشان می‌دهند.

تذکره: ممکن است ساییش ناشی از سقوط تکه‌های خاکستر گداخته، شبیه ساییش ناشی از خاکستر معلق، غبار زغال‌سنگ، دوده‌زداها و بخار خروجی از لوله‌های دارای نشی باشد، اما متداول بودن این نوع ساییش در لوله‌های شیب‌دار نزدیک قیف جمع‌کننده خاکستر معمولاً علامت مشخصه این نوع ساییش است.

#### ۵.۵.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از سایش

با کاهش امکان ایجاد خاکستر گداخته، می‌توان احتمال وقوع خرابی بر اثر این نوع سایش را کاهش داد. در این راستا، باید به برخی نکات توجه داشت:

۱. برای کاهش امکان ایجاد خاکستر گداخته، ممکن است تغییر نوع زغال‌سنگ ضروری باشد؛
۲. با افزایش دمای ذوب خاکستر زغال‌سنگ، نرخ ایجاد خاکستر گداخته کاهش می‌یابد؛
۳. مواد شیمیایی خاصی که به سوخت افزوده می‌شوند، ممکن است امکان ایجاد خاکستر گداخته را کاهش دهند؛
۴. ایجاد تغییراتی در ساختار تجهیزات بویلر، مانند افزایش ضخامت دیواره لوله، انجام جوشکاری روی سطح<sup>۱</sup> و استفاده از موانع سایشی<sup>۲</sup>، برای افزایش عمر لوله مناسب‌اند.

#### ۶.۲.۱۹. سایش تجهیزات قبل و بعد از بویلر

##### ۱.۶.۲.۱۹. مکانیسم سایش

بر اثر برخورد ذرات جامد و مایع، فلز دچار سایش شده و از بین می‌رود. از بین رفتن فلز غالباً با تغییر شکل فیزیکی سطح همراه است. وقتی نواحی تغییر شکل دهند و در معرض برخورد مواد ساییده قرار گیرند، ممکن است شکست نیز رخ دهد.

##### ۲.۶.۲.۱۹. محل وقوع سایش

اجزای پمپ آب تغذیه، شامل پروانه‌ها، تجهیزات نصب‌شده روی پمپ‌ها<sup>۲</sup>، شیرها و پوسته‌ها، اغلب ساییده می‌شوند. به‌ندرت مسیرهای انتقال آب، زانویی‌ها و تجهیزات تخلیه دائمی آب بویلر نیز دچار سایش می‌شوند.

از میان تجهیزات پس از بویلر، اصولاً اجزای توربین‌ها به‌دلیل سرعت‌های بالایی که در توربین وجود دارد، بارها دچار سایش می‌شوند. پره‌های توربین بر اثر برخورد ذرات سخت و قطرات ریز آب، دچار سایش می‌شوند (پره‌های ردیف‌های آخر غالباً بر اثر برخورد قطرات آب دچار سایش می‌شوند). امکان خوردگی و سایش لوله‌های ساخته‌شده از فولاد کربنی در صورت وجود بخار مرطوب و با سرعت بالا وجود دارد. ساقه شیرها، نازل‌ها، دیافراگم‌ها و پره‌های متحرک مرحله اول، معمولاً دچار سایش ناشی از برخورد ذرات سخت می‌شوند. این ذرات

1. weld overlays

2. wear bar

3. fitting

سخت بر اثر پوسته‌پوسته‌شدن لایهٔ اکسیدی در سوپرهیترها، ری‌هیترها، هدایت‌کننده‌های بخار اصلی و لوله‌های ری‌هیت داغ ایجاد می‌شوند.

### ۳.۶.۲.۱۹. عوامل سایش

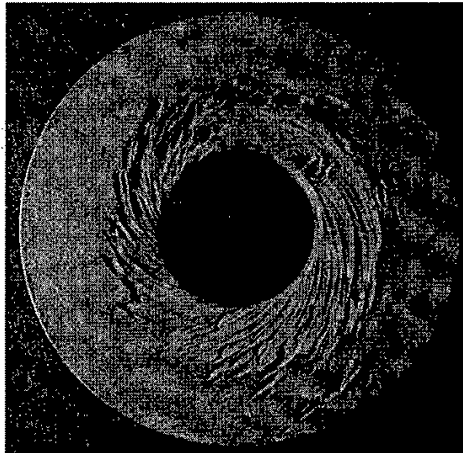
به‌طور کلی عوامل سایش تجهیزات قبل و بعد از بویلر عبارت‌اند از:

۱. اغتشاش و وجود سیال با سرعت بالا: سایش بر اثر اغتشاش و سرعت بالای سیال تسریع می‌شود. سرعت مواد ساینده اثر مهمی در ازبین‌رفتن فلز دارد. ممکن است با دوبرابرشدن سرعت، ازبین‌رفتن فلز با ضریب چهار یا بیشتر افزایش یابد؛
  ۲. تغییرات ناگهانی فشار: این تغییرات به امکان فوران آب<sup>۱</sup> و ایجاد اغتشاش سرعت می‌بخشد؛
  ۳. تغییرات ناگهانی مسیر سیال و ورود مواد ریز سخت به داخل سیال: این عوامل نیز در تلفات فلز سهیم‌اند. در صورت ورود ذرات ریز، جرم، اندازه و نحوهٔ توزیع آن‌ها بر سایش تأثیر می‌گذارند؛
  ۴. دبی، زاویهٔ برخورد، سرعت و غلظت مواد ساینده: این عوامل بر نرخ ازبین‌رفتن فلز مؤثرند؛
  ۵. انرژی جنبشی مواد ساینده: ازبین‌رفتن فلز، به‌شدت تابع انرژی جنبشی مواد ساینده است؛
  ۶. سختی آلیاژ: سایش رابطهٔ تقریباً معکوس با سختی آلیاژ دارد. معمولاً در صورت فقدان خوردگی توجه‌برانگیز، آلیاژهای سخت‌تر در مقابل سایش مقاوم‌تر خواهند بود.
- عوامل سایش سیستم آب تغذیه و توربین را می‌توان به‌صورت جداگانه نیز دسته‌بندی کرد:
- الف) سیستم آب تغذیه: برخورد آب مغشوش با سرعت بالا، علت بیشتر سایش‌هاست. ورود ذرات ریز، ازبین‌رفتن فلز را تسریع می‌کند. در صورتی که گاز با سیال مخلوط شده باشد، احتمال کاویتاسیون نسبت به سایش بیشتر خواهد بود.
- ب) توربین: توربین‌ها ممکن است بر اثر برخورد ذرات جامد و قطرات ریز آب دچار سایش شوند. سایش ناشی از ذرات جامد، بر اثر برخورد اکسیدهای پوسته‌پوسته‌شده‌ای است که اصولاً از سوپرهیترها، ری‌هیترها و لوله‌های بخار اصلی کنده شده‌اند. اکسیدها، غالباً بر اثر تنش‌های ناشی از ناپایداری‌های حرارتی از محل خود کنده می‌شوند. برخورد قطرات ریز بخار تقطیرشده، خساراتی را در پره‌های متحرک مراحل آخر، مسیرهای آب تقطیرشده<sup>۲</sup> و لوله‌ها ایجاد می‌کند. در صورتی که سیال‌ها دارای pH پایینی باشند، مکانیسم خرابی خوردگی-سایش اهمیت می‌یابد.

۴.۶.۲.۱۹. علائم سایش

الف) تجهیزات قبل از بویلر

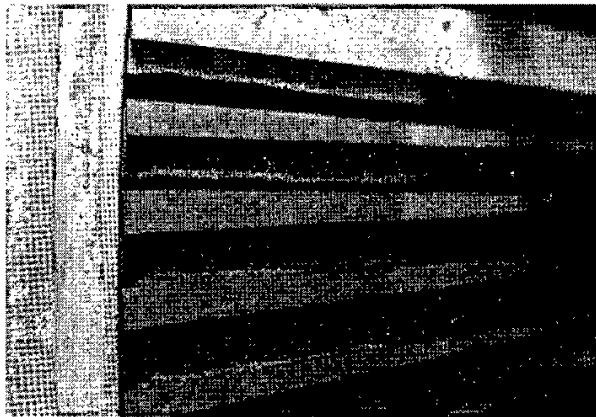
۱. سایش ناشی از جریان آب مغشوش در پمپ‌ها، معمولاً باعث ایجاد شیارها و حفره‌هایی با سطوح صاف در قطعه می‌شود و همچنین ضخامت عمومی قطعه را کاهش می‌دهد (شکل ۹.۱۹):
۲. لایه اکسید در نواحی ساییده شده نازک‌تر است، یا اصلاً وجود ندارد. معمولاً رنگ این لایه در نواحی ساییده شده متفاوت بوده و بافت آن نسبت به نواحی مجاوری که دچار سایش نشده‌اند، یکنواخت‌تر است؛
۳. با انداختن یک قطره اسید روی فولادهای کربنی که به‌تازگی دچار سایش شده‌اند، فلز لوله در عرض چند ثانیه آشکار خواهد شد. سطوحی که دچار سایش نشده‌اند، معمولاً باید زمان چشمگیری در معرض اسید قرار گیرند تا فلز عاری از اکسید، نمایان شود؛
۴. در صورتی که ذرات ریز وارد آب نشده باشند، با بازدیدهای چشمی دقیق، هیچ نشانه‌ای از خراش‌ها و فرورفتگی‌های توجه‌برانگیز مشاهده نخواهد شد. معمولاً چنین خرابی‌هایی فقط وقتی ظاهر می‌شوند که مقادیر فراوانی ذرات ریز سخت، وارد سیال شده باشند.



شکل ۹.۱۹. صفحه جداکننده پمپ آب تغذیه که توسط آب مغشوش دارای سرعت بالا ساییده شده است. با توجه به شیارهای ایجادشده، نحوه حرکت جریان قابل شناسایی است.

(ب) تجهیزات پس از بویلر

برخورد قطرات آب در مراحل آخر توربین، باعث سایش پره‌های متحرک می‌شود و غالباً خرابی‌های ایجادشده در لبه‌های حمله پره‌های متحرک<sup>۱</sup>، توجه برانگیز است (شکل ۱۰.۱۹). لبه‌های پره‌ها، دندانه‌های ریز و تودرتو دارند (شکل ۱۱.۱۹) و ممکن است برآمدگی‌های مخروطی‌شکلی در سطح ایجاد شوند (شکل ۱۲.۱۹). اغلب، این مخروط‌ها به‌نحوی کج خواهند شد که محور مخروط موازی جهت برخورد باشد. از این‌رو، مخروط‌ها معمولاً روی وجوه هدایت‌کننده پره‌های متحرک ایجاد می‌شوند و روی وجوه پشتی پره کمتر وجود دارند یا اصلاً وجود ندارند. ممکن است در تجهیزات ساخته‌شده از فولادهای نرم، مانند لوله‌های مورد استفاده برای تخلیه تقطیرات توربین، مخروط‌های مشابهی ایجاد شوند (شکل ۱۳.۱۹). سایش بر اثر ذرات سخت، باعث ایجاد پارگی و فرورفتگی‌های ریز در لبه‌های حمله پره‌های متحرک خواهد شد. در چنین سایشی معمولاً خطوط و مخروط‌های کج‌شده وجود ندارند. به‌طور معمول پره‌های متحرک سطحی زبر و ناصاف شبیه «پر»<sup>۲</sup> خواهند داشت.



شکل ۱۰.۱۹. سطح خشن و زبر لبه‌های هدایت‌کننده پره‌های مرحله‌نهایی توربین که بر اثر برخورد قطرات ریز آب ایجاد شده‌اند.





شکل ۱۱.۱۹. شیارهای کوچک روی سطح جلویی پره ردیف آخر توربین که بر اثر برخورد قطرات آب ایجاد شده‌اند (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر).



شکل ۱۲.۱۹. فرورفتگی‌های لبه پستی سطح پره متحرک نشان داده شده در شکل ۱۰.۱۹



شکل ۱۳.۱۹. سایش روی لوله ساخته شده از فولاد نرم که در مسیر تخلیه توربین استفاده شده است. سطح دارای برآمدگی‌های مخروطی شکلی است که در مسیر برخورد قرار گرفته‌اند.

تذکر ۱: ظاهر خرابی ناشی از کاویتاسیون ممکن است شبیه سایش ناشی از ذرات سخت باشد، اما کاویتاسیون در مسیرهای بخار رخ نمی‌دهد و احتمال ایجاد سطوح هموار، موج‌دار و شیاردار وجود ندارد. کاویتاسیون در جاهایی رخ می‌دهد که سیال مغشوش با سرعت بالا وجود داشته باشد.

تذکر ۲: خوردگی ناشی از شلانت تغلیظ‌شده، اساساً با افزایش سرعت سیال افزایش می‌یابد. شیارهای ایجادشده و کاهش ضخامت ناشی از خوردگی شلانت، بسیار شبیه سایش است. غالباً خوردگی شلانت در مسیرهای آب تغذیه، درام‌های بخار و لوله‌های دیواره‌ای<sup>۱</sup>، با سایش اشتباه می‌شود.

#### ۵.۶.۲.۱۹. روش‌های پیشگیری از سایش

کاهش سایش نیازمند حذف عامل ساینده، کاهش انرژی جنبشی عامل ساینده، استفاده از سطوح دارای سپر محافظ<sup>۲</sup> و جانشین کردن آلیاژهای مقاوم‌تر به سایش است. اگر پمپ‌ها، شیرها و لوله‌ها دارای اندازه مناسب و طراحی و بهره‌برداری صحیح باشند، سایش به‌ندرت رخ خواهد داد.

سایش توربین می‌تواند مشکلات بیشتری ایجاد کند. پوسته‌پوسته‌شدن مگنتیت در سوپرهیترها، ری‌هیترها و خطوط انتقال بخار، عامل اصلی سایش ناشی از ذرات جامد در توربین‌هاست. وقتی تنش‌های حرارتی و دمای لوله کاهش می‌یابند، فرایند پوسته‌پوسته‌شدن مگنتیت‌ها کمتر رخ می‌دهد. اگر عمر بهره‌برداری لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر زیاد باشد، احتمال وجود لایه ضخیم اکسید حرارتی بیشتر است و ممکن است تعویض لوله‌ها یا شستشوی شیمیایی آن‌ها برای جداکردن لایه‌های ضخیم اکسید، لازم باشد. صافی‌های توربین باید به‌خوبی مرمت و نگهداری شوند.

تذکر ۱: آلیاژهای قابل‌استفاده در ساخت پره‌های متحرک توربین، در تمام جهان کاملاً مشابه‌اند. این آلیاژها اغلب فولادهای زنگ‌نزن کروم‌دار هستند، اما آلیاژهایی با پایه کبالت، تیتانیوم و برخی فلزات خاص دیگر، کاربرد وسیع‌تری یافته‌اند. از آلیاژهای بر پایه کبالت که در برابر سایش مقاوم‌اند، در مراحل آخر توربین استفاده می‌شود<sup>۳</sup>.

تذکر ۲: خوردگی، از بین رفتن فلز را تسریع می‌کند. اغلب فلزاتی که با آب یا بخار در

1. generating tube  
3. erosion-shielded

2. shielding surface

تماس‌اند، دچار چند نوع خوردگی می‌شوند. بنابراین همهٔ سایش‌های موجود در سیستم‌های دارای آب یا بخار، درحقیقت یک فرایند خوردگی... سایشی‌اند. فقط وقتی می‌توان فرایند را سایش نامید که خوردگی، اثر نسبتاً کوچکی روی از بین رفتن فلز داشته باشد. اگر سایش غالب باشد، معمولاً ممانعت شیمیایی اثر کمی در کاهش خرابی دارد، اما اگر خوردگی چشمگیر باشد، ممکن است استفادهٔ مناسب از بازدارنده‌ها<sup>۱</sup> و (یا) اصلاح pH مفید باشد.

### ۷.۲.۱۹. سایش سمت آب و سمت بخار

سایش در لوله‌های دارای آب و بخار به‌ندرت رخ می‌دهد، اما در صورت وقوع، تلفات در محل‌هایی ایجاد می‌شود که اشیای خارجی، تجمع رسوب و موارد مشابه موانعی را در مسیر حرکت سیال ایجاد کرده‌اند. معمولاً دیگر مشکلات مانند بیش‌گرمایش، پیش از سایش، باعث خرابی خواهند شد (نمونهٔ سوم).

### ۳.۱۹. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلرهای صنایع گوناگون

#### بر اثر سایش

#### □ نمونهٔ اول

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	سوپر‌هیتز
نحوهٔ قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۶/۵ MPa (۲۴۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۶/۴ cm (۲/۵ in)
ساخت:	جنس نمونه: SA-213 زغال‌سنگ پودر شده

علائم ناشی از سایش: تقریباً دو سال پس از تعویض لوله گسترده‌ای که انجام شده بود، خرابی‌هایی در لوله‌های سوپرهیتر رخ داده است. در لوله‌های نزدیک به لوله تخریب‌شده، عیوب ناشی از فرایند تولید<sup>۱</sup> به شکل درزهای عمیقی وجود دارد.

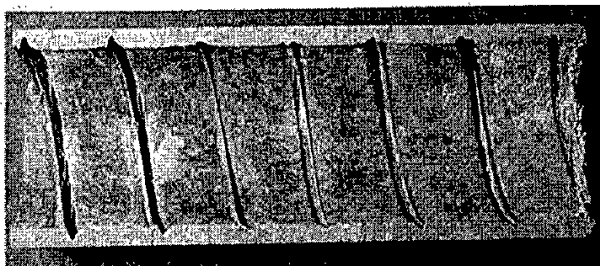
علت سایش: درزهای ذکرشده حین بهره‌برداری ایجاد شده و بخار خروجی از آن‌ها باعث سایش لوله‌های مجاور شده است (شکل ۵.۱۹). نکته توجه‌برانگیز این است که خرابی‌هایی مشابه این مورد، تقریباً دو سال قبل و به‌همین دلیل رخ داده‌اند. با وجود تعویض لوله وسیعی که انجام شده است، تعدادی از لوله‌های معیوب سهواً تعویض نشده‌اند. بنابراین لوله‌هایی که درزهای عمیق دارند، دست‌کم در دو سال منتهی به خرابی، در سرویس بوده‌اند. وقتی این لوله‌های معیوب دچار خرابی شده‌اند، بخار خروجی از آن‌ها به‌طور وسیع باعث سایش لوله‌های مجاور شده است.

#### □ نمونه دوم

صنعت:	پالایشگاه
محل نمونه:	پیش‌گرم‌کن آب تغذیه بویلر که در آن، آب حرارت را از دود جذب می‌کرده است.
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۴ سال
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۱ MPa (۱۵۰ psi) در لوله‌های خنک‌کن
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)

علائم سایش: در طول پیش‌گرم‌کن آب، شیارهای ماریچی ایجاد شده است (شکل ۱۴.۱۹). تعدادی از شیارها در دیواره لوله نفوذ کرده و ترک‌های ماریچی ایجاد کرده‌اند، درحالی‌که دیگر شیارها فقط تا  $\frac{1}{3}$  دیواره نفوذ کرده‌اند. این شیارها در جهت حرکت دود ایجاد شده‌اند.

علت سایش: سایش در امتداد یک سیم‌پیچ رخ داده است که درون لوله نصب شده بود. این سیم‌پیچ، برای افزایش اغتشاش و جلوگیری از رسوب‌گذاری استفاده شده است. دود با سرعت بالا، در ماریچ مغشوش و باعث سایش شده است.



شکل ۱۴.۱۹. شیارهای ماریچ ایجاد شده در سطوح داخلی پیش گرم کن آب توسط دود ساینده. سیم پیچ ماریچ و زنگ نزن موجود درون لوله، باعث افزایش موضعی اغتشاش شده است.

□ نمونه سوم

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	سوپر هیتر U شکل
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۰ ماه
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۳/۹ MPa (۵۷۰ psi)
مشخصه های لوله:	قطر خارجی: ۳/۱۹ cm (۱/۵ in)
سوخت:	black liquor

علائم ناشی از سایش: ۱۰ ماه پس از نصب لوله، فرسایش موضعی و شدید سطوح داخلی لوله، باعث ایجاد سوراخ در خم U شکل شده است (تنها لوله ای که این طور دچار خرابی شده است). دقیقاً در مجاورت سوراخ، ناحیه بیضوی شکلی از فلز، از بین رفته است (شکل ۱۵.۱۹). در قسمت هایی که فلز از بین رفته، ناحیه هایی از دیواره دست نخورده باقی مانده اند. علت سایش: خرابی بر اثر برخورد سیال با سرعت بالا روی سطوح لوله ایجاد شده است. احتمالاً یک شیء که در قسمت های بالادست خم جای گرفته، باعث محدود شدن جریان آب در یک مسیر باریک شده است. افزایش سرعت و اغتشاش در نزدیکی شیء خارجی، باعث سایش موضعی شده است.

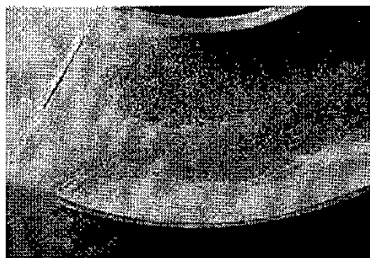


شکل ۱۵.۱۹. نابودی بیضوی شکل فلز و سوراخ شدن لوله در خم لاشکل یک لوله سوپر هیتز. نواحی دست نخورده در شکل مشاهده پذیرند. سایش بر اثر یک شیء خارجی که از ۱۰ ماه قبل در لوله جا مانده، ایجاد شده است.

□ نمونه چهارم

صنعت:	پالایشگاه
محل نمونه:	هدر
نحوه قرار گرفتن نمونه:	زانویی شکل (افقی به عمودی)
عمر نمونه:	نامعلوم (بیش از ۵ سال)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۱۶/۵ cm (۶/۵ in).
	جنس: فولاد نرم

علائم ناشی از سایش: برخی نواحی سطوح داخلی با لایه هموار و سیاه مگنتیت پوشیده شده است. سایش شدید سطح فلز در نواحی جداگانه‌ای رخ داده است (شکل ۱۶.۱۹). از بین رفتن فلز، سطحی هموار با محیطی دایره‌ای و عاری از رسوب و محصولات خوردگی ایجاد کرده است. در اطراف ناحیه‌های دچار سایش، خطوطی در جهت جریان مشاهده می‌شود (شکل ۱۷.۱۹). علت سایش: مسیرهای آب سیکل، غالباً دچار خوردگی ناشی از اسید کربنیک می‌شوند، اما در این لوله فقط علائم سایش مشاهده می‌شود. از بین رفتن فلز به صورت موضعی و در جهت جریان، از ویژگی‌های سایش است. شواهد حاکی از آن‌اند که ذرات مگنتیت ورودی به آب سیکل در سایش فلز سهیم بوده‌اند.



شکل ۱۶.۱۹. نابودی موضعی فلز در قسمت خمیده هدر آب سیکل

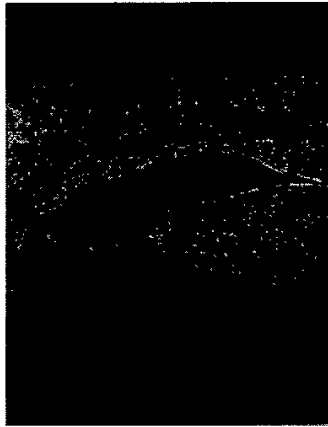


شکل ۱۷.۱۹. الگوی سایش در لبه ناحیه ساییده شده نشان داده شده در شکل ۱۶.۱۹. به الگوی جریان سیال توجه کنید (بزرگ‌نمایی: ۷/۵ برابر).

□ نمونه پنجم

کاغذسازی	صنعت:
اکونومایزر	محل نمونه:
منحنی و بیشتر عمودی	نحوه قرار گرفتن نمونه:
۸ سال	عمر نمونه:
فسفات	رژیم شیمیایی آب:
۸/۳ MPa (۱۲۰۰ psi)	فشار درام:
قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)	مشخصه‌های لوله:
جنس: فولاد نرم	
black liquor	سوخت:

علامت ناشی از ساییش: سطح خارجی قسمت خمیده لوله اکونومایزر به شدت نازک شده است. بر اثر این مشکل، شکست با سطوح ناصاف ایجاد شده است (شکل ۱۸.۱۹). در نواحی دور از شکست، سطوح نسبتاً دست‌نخورده باقی مانده‌اند. علت ساییش: شکست به دلیل نازک شدن دیواره بر اثر برخورد مواد ساینده رخ داده است. در این نواحی، فشار داخلی باعث شکست لوله، و برخورد ذرات سخت ورودی به دود باعث ساییش شده است. روی تمام سطوح خارجی، علائمی از خوردگی نیز مشاهده می‌شود.



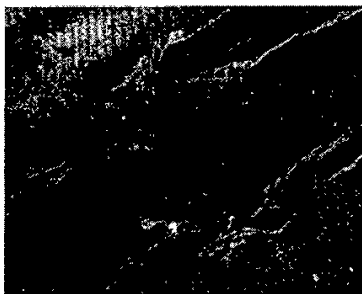
شکل ۱۸.۱۹. شکست در یک لوله اکونومایزر بر اثر ساییش موضعی و شدید سطح خارجی توسط ذرات ریزی که به دود وارد شده‌اند.

□ نمونه ششم

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	دیواره مقابل مشعل، در قسمتی که حرارت به صورت جابه‌جایی منتقل می‌شود.
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۸ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۱۷/۲ MPa (۲۵۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷ cm (۲/۷۵ in).
ساخت:	جنس: SA201-A1 زغال سنگ



علائم ناشی از سایش: یک لوله در قسمت نگهدارنده جوش<sup>۱</sup> دچار شکست شده است. آب خروجی از این ناحیه، لوله مجاور را سوراخ کرده است (شکل ۱۹.۱۹). علت سایش: سؤالی که به طور طبیعی هنگام وقوع چند خرابی پیش می آید، این است که کدام خرابی ابتدا رخ داده است. بازدید چشمی دقیق، ترک‌های خستگی- خوردگی کوچکی را در جوش‌هایی که به طور ناقص ذوب شده‌اند، نشان می‌دهد. پس از نمونه‌برداری و آزمایش میکروسکوپی، ترک‌های کوچکی در نزدیکی خرابی اصلی مشاهده شده است. این ترک‌ها غالباً همانند ترک‌هایی‌اند که در نگهدارنده مجاور نیز مشاهده می‌شود، اما کم‌عمق‌ترند. از این‌رو، خرابی اصلی احتمالاً بر اثر خستگی- خوردگی در محل جوش بوده است. تذکر: اگر سایش شدید باشد، می‌توان خرابی اصلی را کاملاً از محل خارج کرد. خوشبختانه در دیگر جوش‌های نزدیک نیز مقاطع تعویض‌پذیر وجود دارد.

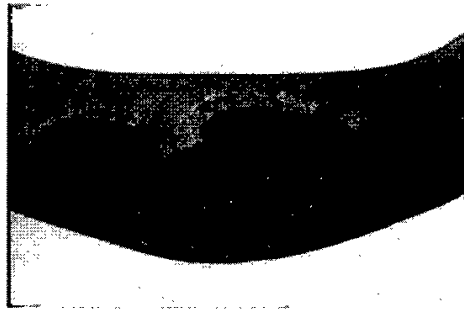


شکل ۱۹.۱۹. سایش در لوله بر اثر خروج سیال از لوله مجاور. خرابی اصلی، در نگهدارنده جوش و بر اثر خستگی- خوردگی بوده است.

□ نمونه هفتم (ارزیابی عمر باقی‌مانده) [۲]

نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی	صنعت:
سوپر هیتر نهایی	محل نمونه:
محل خم (R/D = ۲/۸۳)	نحوه قرارگرفتن نمونه:
بیش از ۲۰ سال	عمر نمونه:
فشار: ۱۷۰ bar	شرایط کاری:
دما: ۵۴۰ °C	
ASTM A213-Grade TP321H	مشخصه‌های لوله:

گسیختگی در محل آخرین خم لوله سوپرهیتر نهایی<sup>۱</sup> (محل خروج بخار سوپرهیت به سمت هدر خروجی) اتفاق افتاده است. شکل ۲۰.۱۹ نمای ترک طولی به طول تقریبی ۱۵ سانتی‌متر در انحنای بیرونی خم لوله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، بخشی از لوله کاملاً جدا شده است. این پدیده می‌تواند ناشی از کاهش شدید چقرمگی لوله، رشد سریع و ناگهانی ترک و نیز تردشدگی شدید لوله باشد.



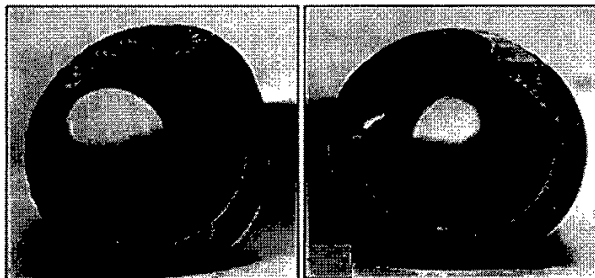
شکل ۲۰.۱۹. نمای ترک باز شده در محل خم لوله سوپرهیتر

شکل ۲۱.۱۹ مقطع عرضی لوله را در دو طرف محل گسیختگی نشان می‌دهد. در قسمت ۲۱.۱۹.الف، مقطع لوله تقریباً دایره‌ای است و در نواحی گوناگون ضخامت یکسان دارد. در قسمت ۲۱.۱۹.ب، سمت دیگر گسیختگی نشان داده شده است. به‌رغم دایره‌ای ماندن محیط داخلی لوله، ضخامت لوله در قسمتی از آن تغییر کرده است (محیط خارجی لوله از یک طرف ساییده شده و ضخامت به حدود ۳ میلی‌متر رسیده است). این تغییر ضخامت لوله از سمت بیرون، ناشی از عبور حجم زیاد گاز و محصولات احتراق و با سرعت بالا از روی سطح بیرونی لوله است که به تدریج، باعث سایش دیواره بیرونی شده است.

نازک شدن یک طرف لوله از سطح بیرونی، به فرضیه رخداد کانالیزه شدن دود و محصولات احتراق در میان لوله‌ها قوت می‌بخشد. این فرایند به دلیل کیفیت پایین سوخت مصرفی (که در این نیروگاه معمولاً مازوت است)، حجم فراوان محصولات احتراق با ترکیبات نامناسب، تمیز نکردن سطوح حرارتی بویلر به روش‌های گوناگون (ماسه‌شویی<sup>۲</sup> و...) به‌مرور باعث

1. final superheater tube  
2. sandblast

بسته شدن برخی مسیرهای عبور دود از میان لوله‌ها شده و به هدایت اجباری محصولات احتراق با سرعت و شدت بیشتر در مسیرهای باقی‌مانده و افزایش نرخ سایش در برخی جهات خاص منجر می‌شود.

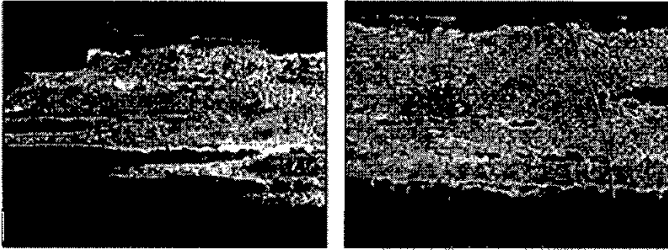


شکل ۲۱.۱۹. تصویر مقطع عرضی لوله در دو طرف ناحیه گسیختگی

شکل‌های ۲۲.۱۹ و ۲۳.۱۹ نمایی از لوله‌های مجاور را نشان می‌دهند که فاصله میان آن‌ها و رسوب محصولات احتراق روی آن‌ها کاملاً از بین رفته است. شایان ذکر است که وجود رسوب روی لوله‌ها، علاوه بر ایجاد مشکل گفته شده، موجب عایق شدن لوله و کاهش جذب حرارت سطوح حرارتی و به تبع آن، کاهش شدید بازده می‌شود.



شکل ۲۲.۱۹. نمایی از لوله‌های سوپرهیتر پس از برش از محل نصب به همراه حجم وسیعی از رسوب



شکل ۲۳.۱۹. نمونه‌هایی از انسداد کامل فضای میان لوله‌ها در سوپرهیتر

### منابع

[1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

[۲] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و محمود سمیع‌زاده، بررسی علل گسیختگی لوله‌های سوپرهیتر نهایی واحد ۴ نیروگاه بندرعباس، دی ۱۳۹۴.

## فصل ۲۰

### کاویتاسیون [1]

#### ۱.۲۰. مکانیسم کاویتاسیون

کاویتاسیون<sup>۱</sup> فرایندی است که طی آن، به دلیل اختلاف فشار موجود در مایع، حباب‌های بخار کوچکی به سرعت شکل می‌گیرند و سپس در سیال از بین می‌روند. درحقیقت، مایع در فشار کم می‌جوشد. حباب‌های بخار به سرعت متلاشی شده و باعث ایجاد جت آب کوچکی می‌شوند که به سطوح فلزی برخورد می‌کند. ممکن است خرابی فقط لایه اکسید محافظ را تحت تأثیر قرار دهد و در موارد حاد، مستقیماً به فلز زیر لایه اکسید حمله کرده و فازهای کم‌مقاومت آلیاژ را از محل خود جدا کند.

تشکیل حباب و ترکیدن آن، می‌تواند در کسری از ثانیه رخ دهد. ترکیدن هر حباب، خرابی نسبتاً کمی ایجاد می‌کند. خرابی کلی بر اثر برخورد هزاران حباب ایجاد می‌شود. گاهی بر اثر کاویتاسیون، زبری سطحی ایجاد می‌شود. کاویتاسیون در محل زبری، متمرکز شده و به شکل شدید و موضعی رخ می‌دهد.

#### ۲.۲۰. محل وقوع کاویتاسیون

کاویتاسیون فقط می‌تواند در محل‌هایی رخ دهد که آب در تماس با سطح باشد و نواحی کم‌فشار ایجاد شود. پروانه‌ها و دیگر اجزای پمپ، محل‌هایی‌اند که بیشتر دچار کاویتاسیون می‌شوند. مسیرهای تخلیه دائمی آب بویلر و شیرها نیز به‌دفعات دچار کاویتاسیون می‌شوند (پروانه‌های پمپ، معمولاً در سمت مکش و شیرها در سمت خروجی). لوله‌های آب سیکل و اجزای توربین، به‌ندرت دچار کاویتاسیون می‌شوند.

---

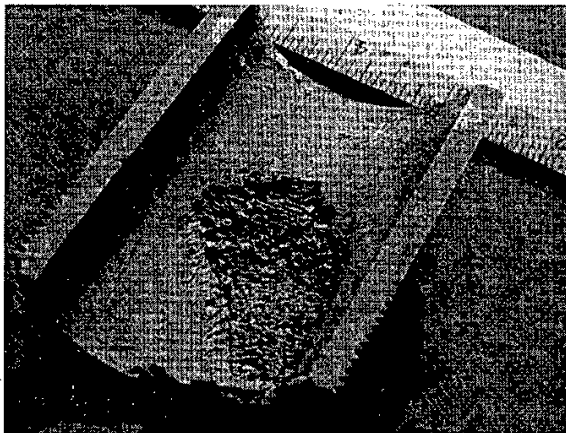
1. cavitation

### ۳.۲۰. عوامل کاویتاسیون

عوامل وقوع کاویتاسیون در پمپ‌ها عبارت‌اند از:

۱. اختلاف فشار زیاد میان مکش و تخلیه؛
  ۲. مغشوش شدن جریان: لبه‌ها، گوشه‌ها و برآمدگی‌ها، اغتشاش را تشدید کرده و محل‌های مناسب را برای ایجاد حباب بخار فراهم می‌کنند. به‌همین دلیل، ابتدا این قسمت‌ها دچار کاویتاسیون می‌شوند؛
  ۳. هد مکش ناکافی: این عامل معمولاً وقوع کاویتاسیون را تسریع می‌کند؛
  ۴. تغییر دبی (خفگی)<sup>۱</sup> در سمت مکش پمپ: این عامل، امکان ایجاد اختلاف فشار را تسریع می‌کند؛
  ۵. ارتعاش: ارتعاش تجهیزات، معمولاً به‌صورت نوسان یک صفحه است. در این مواقع، خرابی ناشی از کاویتاسیون در سطوح روبه‌روی صفحات مرتعش رخ می‌دهد؛
  ۶. ورود هوا بر اثر نشتی در پکینگ‌ها؛
  ۷. تجزیه مواد شیمیایی موجود در آب؛
  ۸. ایجاد کف (جوشش گاز)<sup>۲</sup>؛
- توجه: موارد ۶، ۷ و ۸، امکان تشکیل سریع‌تر حباب را فراهم می‌آورند.
۹. اندازه نامناسب پروانه‌ها و دیگر اجزای پمپ: در بسیاری از کاویتاسیون‌ها، اندازه نادرست پروانه‌ها و دیگر اجزای پمپ باعث خرابی می‌شوند.
- در بررسی عوامل کاویتاسیون مسیرهای تخلیه دائمی آب بویلر، باید به چند نکته توجه داشت:
۱. در صورتی که دبی زیاد باشد و تغییر جهت‌های ناگهانی در مسیر سیال ایجاد شود، مسیرهای تخلیه دائمی آب بویلر مستعد خرابی‌اند؛
  ۲. در تخلیه دستی متناوب آب بویلر، معمولاً در مواقعی که مسیر جریان در سراهی‌ها و زانوبی‌های لوله تغییر شدید دارد، کاویتاسیون رخ می‌دهد؛
  ۳. وقتی نرخ تخلیه دائمی آب بویلر زیاد و قطر لوله‌های مسیرهای انتقال کمتر از حد لازم باشد، ممکن است کاویتاسیون شدید رخ دهد (شکل ۱.۲۰).
- تذکر ۱: ناصافی‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در مسیر، محل‌های مناسبی برای تشکیل حباب بخارند. بنابراین کاویتاسیون در این محل‌ها به‌آسانی رخ می‌دهد.

تذکر ۲: به‌طور کلی، ترکیب آلیاژ نیز در ایجاد خرابی مؤثر است. فلزات نرم و آلیاژهای ترد با استحکام پایین، مانند چدن‌های خاکستری، به‌آسانی دچار خرابی می‌شوند (شکل ۲۰.۲۰). آلیاژهایی مانند فولادهای زنگ‌نزن کروم‌دار در بسیاری از محیط‌ها، در مقابل کائوتاسیون مقاوم‌اند.



شکل ۱۰.۲۰. مقطعی طولی از مسیر تخلیه دائمی آب بویلر به‌همراه کندگی موضعی و شدید فلز بر اثر کائوتاسیون



شکل ۲۰.۲۰. بخشی از پوسته پیمی که به‌شدت دچار کائوتاسیون شده است. جنس پوسته پمپ، چدن خاکستری است.

تذکر ۳: در صورت مفشوش شدن جریان و تغییرات ناگهانی فشار، کائوتاسیون سریع‌تر رخ می‌دهد.  
تذکر ۴: در نزدیکی سطوح در حال حرکت، ممکن است فشار کمترین و اغتشاش بیشترین مقدار را داشته باشند. بنابراین در سطوح در حال حرکت، احتمال کائوتاسیون زیاد است.

تذکر ۵: در موارد بسیاری، وقتی اغتشاش سیال از مقادیر بحرانی خاصی کمتر می‌شود، کاویتاسیون کاملاً متوقف می‌شود. بنابراین کاویتاسیون مکانیسمی نیست که شدت آن به تدریج کاهش یابد، بلکه وقوع و توقف آن به صورت لحظه‌ای است.

#### ۴.۲۰. علائم خرابی ناشی از کاویتاسیون

به‌طور کلی می‌توان موارد زیر را از علائم کاویتاسیون در تجهیزات گوناگون دانست:

۱. کاویتاسیون به‌صورت موضعی رخ می‌دهد و نواحی ناصافی ایجاد می‌کند. موضعی بودن آسیب، نشانه برجسته کاویتاسیون است؛

۲. معمولاً بر اثر کاویتاسیون، محل‌هایی از سطح گود می‌شود؛

۳. در بازدید چشمی، می‌توان سطحی اسفنجی و متخلخل (دارای سوراخ) را مشاهده کرد؛

۴. ممکن است نواحی دچار کاویتاسیون، با محصولات خوردگی پوشیده شده باشند، اما اگر کاویتاسیون کمی قبل از بازدید فعال بوده باشد، محصولات خوردگی اندکی وجود خواهند داشت. هرچند خوردگی معمولاً از بین رفتن فلز را تسریع می‌کند، اما کاویتاسیون می‌تواند در غیاب خوردگی نیز رخ دهد؛

۵. گاهی پمپ‌های دچار کاویتاسیون، با صداهایی که ایجاد می‌کنند قابل شناسایی‌اند. کاویتاسیون فعال، صدایی شبیه برخورد سنگ به سطوح فلزی ایجاد می‌کند. البته سروصداها و ارتعاش‌های پمپ، معمولاً این صداها را پنهان می‌کنند. از آنجاکه آگاهی نسبت به محل وقوع هر مکانیسم خرابی، در تشخیص عامل خرابی مفید است، باید به برخی نکات درباره محل وقوع کاویتاسیون توجه داشت:

۱. خرابی ناشی از کاویتاسیون در نزدیکی لبه بیرونی پره‌های پمپ<sup>۲</sup> شدیدتر است. در این نواحی، سرعت و در نتیجه اغتشاش جریان، بیشترین مقدار را دارد (شکل ۳.۲۰)؛

۲. با توجه به نحوه چرخش پره، نواحی کم‌فشاری در سطوح پشتی پره‌ها<sup>۳</sup> شکل می‌گیرند. بنابراین خرابی ناشی از کاویتاسیون، در این قسمت‌ها شدیدتر است (شکل ۴.۲۰)؛

۳. محور پمپ، در محل‌هایی که جریان مغشوش وجود دارد، می‌تواند به‌طور موضعی دچار کاویتاسیون شود (شکل ۵.۲۰). سطوح مجاور به قسمت‌هایی که دچار کاویتاسیون شده‌اند، معمولاً فقط کمی صیقلی شده یا به‌طور کلی، عاری از خرابی به‌نظر می‌رسند؛

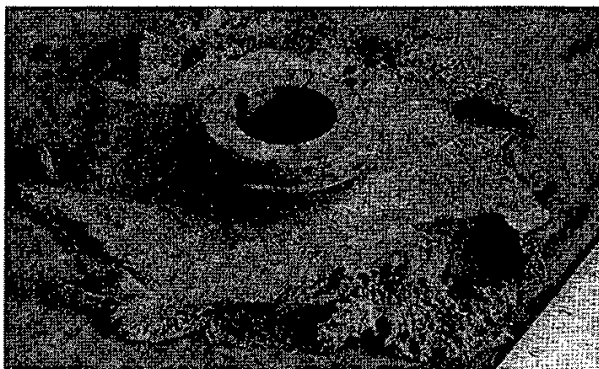
1. undercut

2. vane

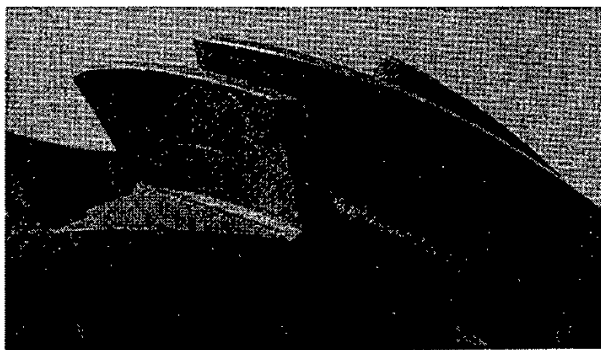
3. trailing vane edges



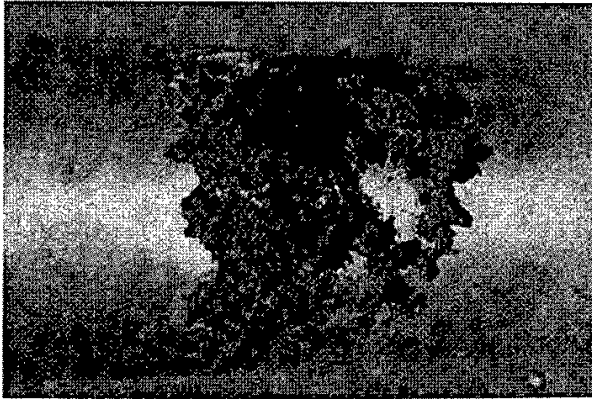
۴. لبه‌ها، گوشه‌ها و برآمدگی‌ها، اغتشاش را شدیدتر کرده و محل‌های مناسب برای تشکیل حباب بخار را فراهم می‌کنند. در نتیجه، این قسمت‌ها زودتر دچار کاویتاسیون می‌شوند؛
۵. در تجهیزات دارای ارتعاش، امکان وقوع خرابی در تمام سطوحی که با آب در تماس‌اند، وجود دارد. اما ارتعاش معمولاً به صورت لرزش در یک صفحه است. در این موارد، خرابی در سطوح روبه‌روی سطوح مرتعش رخ می‌دهد؛
۶. شیشه نیز می‌تواند دچار کاویتاسیون شود.



شکل ۳.۲۰. پروانه پمپ آب تغذیه (از جنس فولاد ریخته‌گری شده) که بر اثر کاویتاسیون به شدت خراب شده است. به محدود شدن کاویتاسیون در لبه‌های بیرونی پروانه که در آنجا سرعت پره‌ها حداکثر است، توجه کنید.



شکل ۴.۲۰. خسارت ناشی از کاویتاسیون در پره‌های برنزی یک پمپ آب تغذیه کوچک. خرابی در سمت کم‌فشار رخ داده است. تعدادی از پره‌ها سوراخ شده‌اند.



شکل ۵.۲۰. کائوتاسیون بسیار موضعی در محور فولادی پمپ آب تغذیه در نواحی مجاور خرابی، خسارتی به محور وارد نشده است.

### ۵.۲۰. روش‌های پیشگیری از کائوتاسیون

برای پیشگیری از کائوتاسیون، لازم است حین ساخت و بهره‌برداری به برخی نکات توجه داشت:

الف) نکات مطرح حین ساخت

۱. طراحی مناسب تجهیزات: طراحی تجهیزات باید به نحوی باشد که اغتشاش و ارتعاش را کاهش

دهد و از تغییرات سریع فشار جلوگیری شود؛

۲. استفاده از آلیاژهای مناسب در تجهیزات: استفاده از آلیاژهای سخت و مقاوم مانند فولاد

زنگ‌نزن ۸-۱۸ توصیه می‌شود؛

۳. صیقلی کردن سطح پره‌ها؛

۴. استفاده از پوشش‌های الاستومریک<sup>۱</sup>: استفاده از پوشش‌های الاستومریک، به کاهش شمار

محل‌های مستعد برای تولید بخار، و همچنین جذب انرژی ناشی از متلاشی شدن حباب بخار

منجر می‌شود.

تذکر: استفاده از روش‌های پوشش پلاسما و سخت کردن سطوح<sup>۲</sup>، اثر محدودی در کاهش

کائوتاسیون داشته‌اند.

1. elastomeric coating

2. surface-hardening

- ب) نکات مطرح حین بهره‌برداری
۱. تأمین هد کافی در ورودی پمپ؛
  ۲. جلوگیری از نشت هوا در پکینگ‌ها؛
  ۳. تغییر دبی به‌وسیله شیر خروجی پمپ (انجام عملیات خفگی در خروجی پمپ).
- توجه: برای اطلاع از مسائل مرتبط، فصل ۸: «خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری» و فصل ۱۹: «سایش» مطالعه شوند.

## ۶.۲۰. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

### اثر کاویتاسیون

#### □ نمونه اول

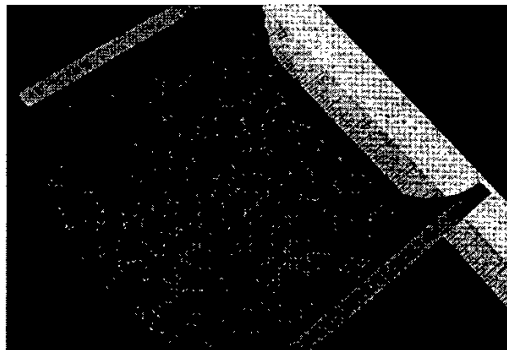
صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	پروانه پمپ آب تغذیه بویلر
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۸/۳ MPa (۱۲۰۰ psi)
مشخصه‌های پره:	دارای ۷ تینه، قطر: ۲۷ cm (۱۰/۵ in).
	جنس: فولاد ریخته‌گری شده

علائم ناشی از خرابی: پروانه پمپ آب تغذیه به‌شدت دچار خسارت شده و پره‌های پروانه تقریباً از بین رفته‌اند. کاویتاسیون فقط در محیط پروانه رخ داده است (شکل ۳.۲۰). علت خرابی: سیستم آب تغذیه توانایی تأمین آب لازم برای بویلر را نداشته است. خرابی ظاهراً بر اثر کاویتاسیون ناشی از فقدان فشار کافی در ورودی پمپ ایجاد شده است.

□ نمونه دوم

صنعت:	فولاد
محل نمونه:	مسیر آب تقطیر شده <sup>۱</sup>
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۳ سال
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۶/۲ MPa (۲۰۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۱۱/۴ cm (۴/۵ in)
سوخت:	گاز طبیعی

علائم ناشی از خرابی: سوراخ‌های کوچک پُر شماری در یکی از لوله‌های مسیر آب تقطیر شده ایجاد شده‌اند (شکل ۶.۲۰). پس از بازکردن مسیر، مشاهده می‌شود که مسیر بر اثر حفره‌های نامنظم پُر شمار، سوراخ‌سوراخ شده است و تعدادی از حفره‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند. با بازدید دقیق حفره‌ها، مشاهده شد که سطوح داخلی آن‌ها ناهموار و زبرند.



شکل ۶.۲۰. لوله آبی که به شدت حفره‌دار شده است. خرابی شبیه خوردگی اکسیژنی است، اما (دست‌کم بخشی از) آن، بر اثر کائوبتاسیون ایجاد شده است.

علت خرابی: حفره‌ها شیب‌ه حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی‌اند، اما آزمایش میکروسکوپی، نشانه‌هایی از تغییر شکل پلاستیک و شوک مکانیکی را فقط در حفره‌ها نشان می‌دهد. همچنین، بررسی‌ها پدیده ضربه بخار<sup>۱</sup> و دیگر ارتعاشات مکانیکی در مسیر را نشان می‌دهند. محتمل است قبل از تشدید کاویتاسیون، حفره‌های اکسیژنی وجود داشته‌اند، اما واضح است که کاویتاسیون در عمیق‌شدن این حفره‌ها و سوراخ‌شدن نهایی لوله مؤثر بوده است.

### منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.



## فصل ۲۱

### عیوب ناشی از تولید

#### ۱.۲۱. نحوه ایجاد عیوب حین تولید [1]

خرابی‌های ناشی از عیوب ایجاد شده در فرایند تولید نسبتاً نادرند، به طوری که عیوب ناشی از تولید، علت کمتر از ۱٪ کل خرابی‌ها محسوب می‌شوند. از بین عیوبی که بیشتر اتفاق می‌افتند، دو مورد متداول‌ترند: وجود درز یا زوائد<sup>۲</sup> در لوله‌هایی که به روش «لوله‌سازی بدون درز» تهیه می‌شوند، و جوش ناقص در لوله‌هایی که به روش «جوشکاری» تهیه می‌شوند. درزها، ترک‌هایی در فولادند که با چشم دیده نمی‌شوند. در واقع در این درزها، پیوستگی متالورژیکی برقرار نیست. این عیوب ممکن است بر اثر وجود حفره‌ها و ترک‌ها در شمش‌ها که لوله از آن ساخته شده است، ایجاد شوند. همچنین ممکن است بر اثر روش‌های نادرست نورد فولاد در کارخانه فولاد ایجاد شده باشند. عیوب موجود در لوله‌های جوشکاری شده، غالباً حین فرایند ساخت و بر اثر ذوب ناقص حین جوشکاری، ایجاد می‌شوند.

#### ۲.۲۱. محل وقوع عیوب

عیوب ناشی از تولید که بر قابلیت بهره‌برداری از تجهیزات تأثیر می‌گذارند، به‌طور کلی در لوله‌ها دیده می‌شوند، اما نمی‌توان در مورد محل وقوع این خرابی‌ها اظهار نظر کرد، زیرا ممکن است از مواد معیوب در لوله‌های هر بخشی از بویلر استفاده شده باشد.

#### ۳.۲۱. عوامل مؤثر

عواملی که به استفاده از مواد معیوب در سازه بویلر منجر می‌شوند، عبارت‌اند از:

---

1. forming defects

2. seam or lap defect

۱. عدم تبعیت کامل سازندگان قطعات از دستورالعمل‌های ساخت و کنترل کیفیت؛
۲. عدم تبعیت کافی سازندگان بویلر از دستورالعمل‌های کنترل کیفیت.

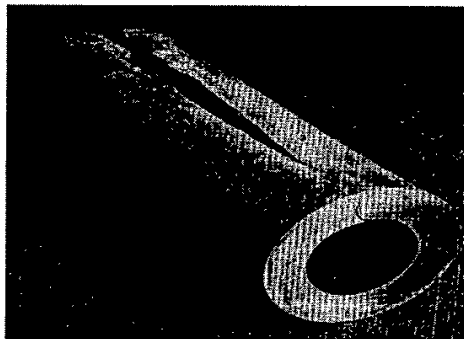
#### ۴.۲۱. علائم خرابی‌های ایجادشده [1]

لوله‌های بدون درز: درزها یا زوائد به شکل ترک‌های خطی و کم‌انحنا در سطح مقاطع عرضی لوله ظاهر می‌شوند که ممکن است مسافتی را در دیواره لوله طی کنند (شکل ۱.۲۱). هرچند عیوب معمولاً از سطح شروع می‌شوند، اما از آنجا که سطحشان معمولاً با لایه اکسید آهن و آخال‌های نافلزی<sup>۱</sup> پوشیده می‌شوند، ممکن است دیدن آن‌ها مشکل باشد.

لوله‌های جوشکاری شده: جوش‌های ناقص را اغلب زمانی می‌توان مشاهده کرد که محصولات خوردگی و رسوب‌ها از سطح جدا شده باشند. این عیوب به شکل بازشدگی<sup>۲</sup> و درزهایی مشاهده می‌شوند که به صورت یک خط راست در دیواره لوله منتشر می‌شوند.

تذکر ۱: عیوب یادشده معمولاً باعث گسیختگی تنشی یا خستگی می‌شوند. در دماهای پایین‌تر نیز ممکن است باعث خوردگی حفره‌ای در امتداد عیب شوند.

تذکر ۲: گاهی شکست‌های لبه‌کلفت ناشی از بیش‌گرمایش، به‌اشتباه شکست ناشی از استفاده از ماده معیوب تلقی می‌شوند. در این حالت، تعیین علت دقیق خرابی با آزمایش متالوگرافی ممکن است.



شکل ۱.۲۱. عیب منحنی‌شکلی که از سطح داخلی یک لوله بدون درز شروع شده و به اندازه ۴۵/۷ سانتی‌متر (۱۸ اینچ) در طول لوله منتشر شده است.



### ۵.۲۱. روش‌های پیشگیری از خرابی‌های ناشی از عیوب ایجادشده حین تولید [1]

به‌طور کلی، پس از اتمام مونتاژ سازه، هیچ راه‌حل اقتصادی برای تشخیص وجود عیوب ناشی از تولید وجود ندارد. در صورت وجود این عیب‌ها، با وقوع خرابی می‌توان از وجودشان مطلع شد. اگر خرابی یک قطعه ناشی از عیب ایجادشده حین تولید باشد، ممکن است بررسی قطعات مشابه برای شناسایی وجود احتمالی عیب مفید باشد. این کار معمولاً به تکنیک‌های غیرمخرب، به‌ویژه تست‌های آلتراسونیک، نیاز دارد.

### ۶.۲۱. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلرهای صنایع گوناگون

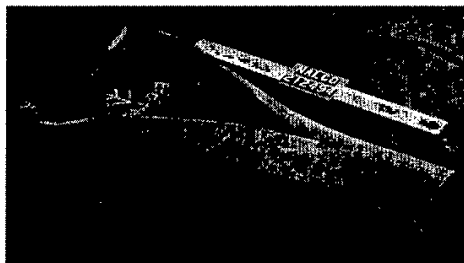
#### بر اثر عیوب ناشی از تولید

□ نمونه اول [1]

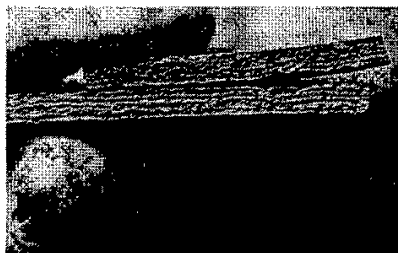
صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	لوله سرد (در معرض حرارت قرار ندارد)
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۲۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۶/۲ MPa (۹۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۱۰/۲ cm (۴ in)

شرایط بهره‌برداری از بویلر: خرابی بزرگی که در شکل ۲.۲۱ نشان داده شده، موقع راه‌اندازی بویلر ایجاد شده است. فشار درام در زمان خرابی، ۵/۵ مگاپاسکال (۸۰۰ پوند بر اینچ‌مربع) بوده است. خرابی مشابهی یک سال قبل و در همین شرایط رخ داده است. از بویلر به‌صورت متناوب بهره‌برداری شده است. این بویلر قبل از خرابی، ۵ ماه از مدار خارج بوده است. علائم ناشی از خرابی: این لوله هدر پایین لوله‌های دیواره آبی را تغذیه می‌کرده است. در شکل ۳.۲۱ ظاهر شکست ترد نشان داده شده است. به خطوط موازی پرشماری که در سطح شکست منتشر شده‌اند، توجه کنید. با بررسی‌های چشمی سطح داخلی می‌توان درزهایی را که

در امتداد درز جوشکاری و در راستای شکست واقع شده‌اند مشاهده کرد. آزمایش‌های ریزساختاری نشان می‌دهد شکست در امتداد درز جوش رخ داده است. این آزمایش‌ها درزهای عمیق و حفره‌هایی را در امتداد درز جوش نشان می‌دهد.



شکل ۲.۲۱. شکست بزرگ لوله در امتداد عیب موجود در درز جوش

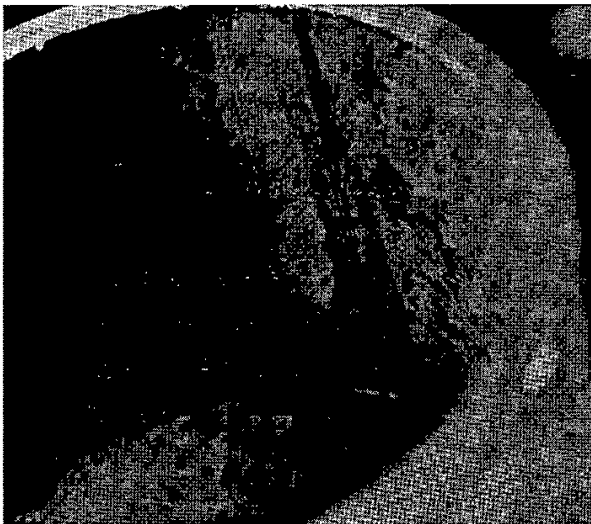


شکل ۳.۲۱. لبه‌های شکست ترد

علت خرابی: ظاهراً درز جوش حین ساخت به‌طور کامل ذوب نشده و اسید جمع شده در این درزها، خنثی نشده است. در نتیجه وقتی بویلر پس از اسیدشویی در مدار قرار گرفته، خوردگی شدیدی در امتداد درز رخ داده و باعث عمیق شدن درز شده است. فعال شدن مکانیسم خستگی-خوردگی به دلیل اعمال تنش‌های نوسانی بر اثر بهره‌برداری چرخه‌ای بویلر، باعث رشد درز شده است. هنگامی که درز به عمق بحرانی رسیده، لوله توانایی تحمل تنش‌های ناشی از فشار داخلی را نداشته و شکست رخ داده است. در این لوله بیش‌گرمایشی رخ نداده است.

صنعت:	خودروسازی
محل نمونه:	مسیر بخار
نحوه قرارگرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۲۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	پلیمر
فشار درام:	۱/۴ MPa (۲۲۱ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۱۱/۴ cm (۴/۵ in)

علائم ناشی از خرابی: بر اثر وجود عیوبی به شکل درز، تعویض بخشی از لوله مسیر بخار به طول ۷/۶ متر (۲۵ فوت) ضروری است (شکل ۴-۲۱). یک سال قبل نیز شکستی در یک لوله که دچار نقص مشابه بوده، رخ داده است. ترکی که از درز شروع شده، به بیش از ۱۰/۲ سانتی‌متر (۴ اینچ) از لوله نفوذ کرده است.



شکل ۴-۲۱. درز ناشی از فرایند تولید، در مسیر بخار

علت خرابی: ارزیابی‌های ریزساختاری، دی‌کربوره‌شدن فلز و وجود نیتريد آهن<sup>۱</sup> و آخال‌های نافلزی را در ناحیه درز جوش نشان می‌دهد. ترک در امتداد سوزن‌های نیتريد در دیواره منتشر شده است.

درزی که به‌طور کامل ذوب نشده، به‌عنوان محل تمرکز تنش عمل کرده است. تحت‌تأثیر نوسانات فشار، ترک‌های خستگی- خوردگی از نوک محل تمرکز تنش شروع شده‌اند. پیشرفت این ترک‌ها بر اثر خاصیت تردکنندگی نیتريد‌های موجود در ناحیه درز جوش، سرعت گرفته است. کاهش سطح مقطع بر اثر ذوب ناقص درز، انتشار ترک‌های خستگی- خوردگی آغاز شده از ریشه درز و وجود سوزن‌های نیتريد آهن، باعث ایجاد خرابی طولی در مسیر بخار شده‌اند.

□ نمونه سوم [1]

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	سوپرهیتر ثانویه
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۷/۲ MPa (۲۵۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۴/۴ cm (۱/۷۵ in).
	جنس: SA-213 T22.
	نوع لوله: بدون درز
سوخت:	زغال سنگ

علائم ناشی از خرابی: خرابی نشان‌داده‌شده در شکل ۵.۲۱، از نوع لبه‌کلفت است که از سطح داخلی شروع شده و ۲۰/۳ سانتی‌متر (۸ اینچ) طول دارد. در بررسی سطح شکست مشاهده می‌شود که یک ترک منحنی‌شکل با سطح بسیار صاف از داخل به‌سمت سطح خارجی لوله وجود داشته است (شکل ۶.۲۱). این ترک تقریباً در ۶۰٪ تا ۸۰٪ ضخامت لوله گسترش یافته و طول آن ۴۵/۷ سانتی‌متر (۱۸ اینچ) بوده است. ناحیه شکست با یک لایه بسیار یکنواخت

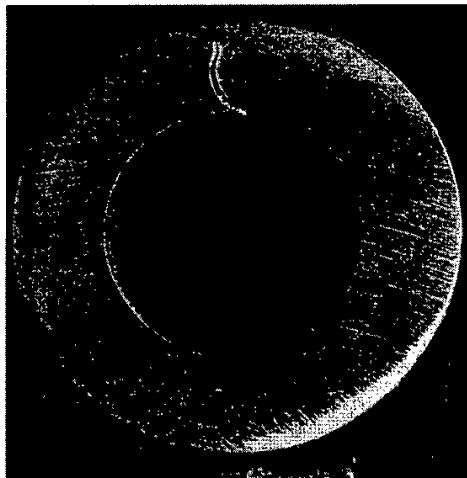
اکسید آهن سیاه‌رنگ پوشیده شده است. ۲۰٪ تا ۴۰٪ باقی‌مانده از سطح شکست که در سطح خارجی لوله واقع شده، فاقد اکسید آهن چشمگیر است و سطحی ناصاف دارد.

بررسی‌های ریزساختاری، نشانه‌هایی از بیش‌گرمایش ملایم<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. آخال‌های نافذی و خود دانه‌های فلز، در امتداد لبه‌های ناحیه صاف شکست قرار گرفته‌اند.

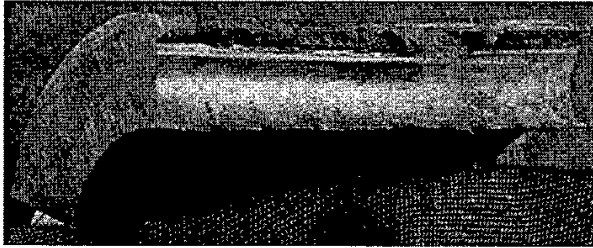
علت خرابی: خرابی بر اثر عیبی که هنگام تولید لوله، در ۶۰٪ تا ۸۰٪ ضخامت آن انتشار یافته، رخ داده است. عیب مزبور باعث کاهش سطح مقطع لوله و در نتیجه افزایش تنش در قسمت سالم لوله شده است. افزایش تنش به همراه بیش‌گرمایش باعث شکست نهایی شده‌اند. ظاهراً عیب رخ‌داده در لوله، یک زائده یا درز داخلی است که بر اثر حفره‌های داخلی موجود در شمش‌ی که لوله از آن ساخته شده، ایجاد شده است.

تذکره ۱: خروج بخار و آب از محل شکست، باعث سایش و در نتیجه کاهش ضخامت سریع، شدید و موضعی لوله‌های مجاور شده است (نمونه اول فصل سایش را مطالعه کنید).

تذکره ۲: چهار سال قبل نیز خرابی مشابهی در مجموعه سوپرهیت‌رها رخ داده است. نکته توجه برانگیز اینکه لوله با وجود عیب گفته‌شده و تحمل فشار بویلر، ۵ سال عمر کرده است.



شکل ۵.۲۱. خرابی در امتداد ترک بزرگ موجود در دیواره لوله که حین تولید لوله ایجاد شده است.



شکل ۶.۲۱. سطح صاف و منحنی شکل ترک

□ نمونه چهارم [۲]

صنعت:	نیروگاه
محل نمونه:	سوپرهیت‌رهای نهایی بویلر ۳۲۰ مگاواتی
مشخصه‌های لوله:	لوله‌های آستنیتی 321H

علامت ناشی از خرابی: نکته توجه برانگیزی که هنگام برش نمونه‌ها برای متالوگرافی مشاهده شده، مقطع غیردایره‌ای لوله‌ها بوده که بر اثر نقص در نیمی از قالب تنظیم نهایی (اطوکردن نمونه‌ها پس از خمکاری سرد) ایجاد شده است. در استانداردها به این مورد اشاره‌ای نشده است و ظاهراً نمونه‌ها تست عبور گوی<sup>۱</sup> را نیز با موفقیت سپری کرده‌اند. اما این عیب در قالب، موجب عدم تقارن مقطع لوله می‌شود. شکل ۷.۲۱ این مقاطع را نشان می‌دهد.



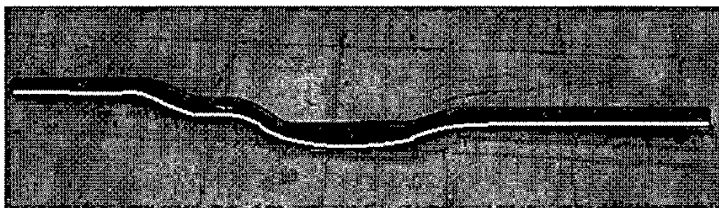
شکل ۷.۲۱. مقاطع غیردایره‌ای لوله‌ها پس از خمکاری

## □ نمونه پنجم [۳]

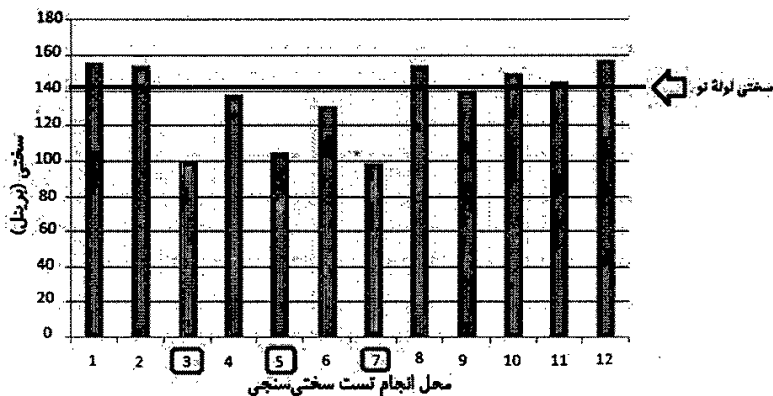
صنعت:	نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی
محل نمونه:	گوشه‌های بویلر، کنار مشعل‌ها
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	کمتر از ۱ سال
مشخصه‌های لوله:	جنس: SA213 T22

علائم ناشی از خرابی: لوله‌های دیواره آبی<sup>۱</sup> اطراف مشعل، در گوشه‌های بویلر، پس از مدت بسیار کمی از تعویض، دچار گسیختگی از محل خم‌ها شده‌اند. به‌منظور بررسی علل گسیختگی، لوله‌های خمکاری‌شده<sup>۲</sup> (قبل از نصب و بهره‌برداری) بررسی شدند. ابتدا روی لوله خمکاری‌شده و لوله<sup>۳</sup> (بدون خمکاری) در نقاط گوناگون آزمایش سختی‌سنجی انجام شد. برای بررسی اثرات خمکاری بر استحکام کششی، نمونه‌هایی از لوله<sup>۴</sup> نو و خمکاری‌شده تهیه و آزمایش شدند. در نهایت ساختار متالورژیکی هر دو لوله در نقاط گوناگون بررسی دقیق شدند.

بررسی سختی لوله خمکاری‌شده و لوله<sup>۵</sup> نو: ابتدا روی لوله خمکاری‌شده، آزمایش سختی‌سنجی در نقاط نشان‌داده‌شده در شکل ۸.۲۱ (در راستای خط) انجام شده است (نتایج در نمودار شکل ۹.۲۱). سپس به‌منظور مقایسه سختی بین نتایج قبل و بعد از عملیات خمکاری، روی ۳ نقطه گوناگون لوله<sup>۶</sup> (بدون خمکاری)، آزمایش سختی‌سنجی انجام شد. نتایج این مقایسه در شکل ۹.۲۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که سختی در محل خم‌های ۳، ۵ و ۷ به‌میزان تقریبی ۴۰ برینل از ۱۴۰ برینل کاهش یافته است. مقدار سختی در محل خم‌ها، در نقاط گوناگون روی محیط بیرونی لوله، متفاوت است. البته همچنان میانگین سختی در نقاط ۳، ۵ و ۷ کمترین مقدار را دارد. دلیل تغییر مقدار سختی در موقعیت‌های محیطی گوناگون در محل خم‌ها، تفاوت تغییر فرم پلاستیک و کارسختی ناشی از آن در عملیات خمکاری است.



شکل ۸.۲۱. لوله خمکاری شده و محل انجام آزمایش‌های سختی‌سنجی



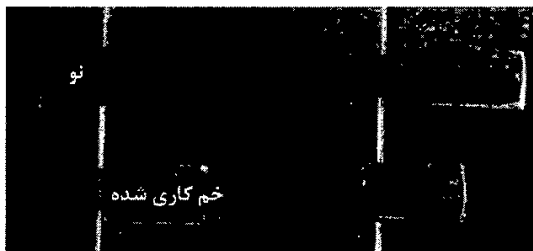
شکل ۹.۲۱. نمودار مقایسه سختی لوله‌های نو و خمکاری شده

دلیل تفاوت زیاد مقادیر سختی سطحی در خم‌ها، وجود اختلاف در فرایند خمکاری خم‌های گوناگون است.

بررسی سختی در سطح داخلی و خارجی لوله نو و خمکاری شده: سختی سطح داخلی و خارجی لوله نو در ۳ نقطه اندازه‌گیری شده است. مقادیر میانگین به ترتیب ۱۲۴ و ۱۴۲ برینل‌اند. نکته مهم، بیشتر بودن سختی سطح خارجی لوله نو از سختی سطح داخلی آن است. در ادامه، سختی سطح داخلی و خارجی لوله خمکاری شده (در محل خم) بررسی شده است. مقادیر میانگین به ترتیب ۱۳۲ و ۹۹ برینل‌اند. دلیل کاهش شدید سختی در سطح خارجی لوله خمکاری شده، حرارت‌دهی این خم‌ها از سمت بیرون است که به واسطه آن، سختی سطح بیرونی نسبت به حالت اولیه تغییر کرده است.



بررسی استحکام کششی: از هر یک از لوله‌های نو و خمکاری شده، دو نمونه برای تست کشش تهیه شده است (شکل ۱۰.۲۱).

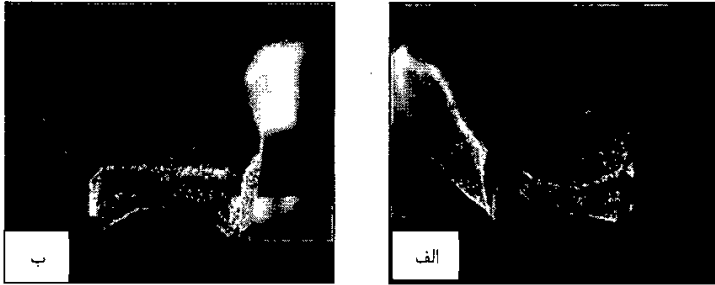


شکل ۱۰.۲۱. نمونه‌های تهیه شده برای انجام تست کشش

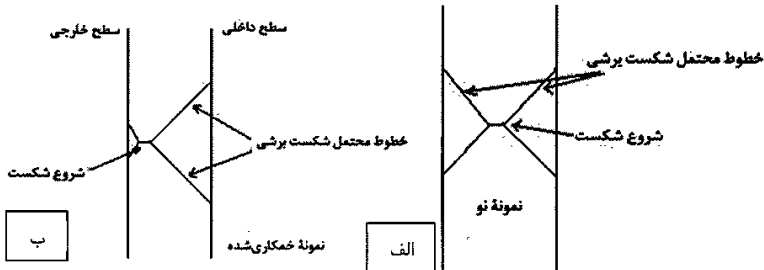
استحکام کششی نمونه لوله نو ۴۹۴ مگاپاسکال و نمونه خمکاری شده ۴۷۶ مگاپاسکال گزارش شده است. مشاهده می‌شود که استحکام کششی به اندازه ۲۰ مگاپاسکال کاهش یافته است. ازدیاد طول برای نمونه نو ۴۷٪ و برای نمونه خمکاری شده ۳۰٪ است. کم بودن درصد ازدیاد طول برای نمونه خمکاری شده، نشان‌دهنده شکننده تر شدن لوله پس از عملیات خمکاری است.

بررسی سطح مقطع شکست در تست کشش: ابتدا نمونه‌های کشش از لوله نو و لوله خمکاری شده تهیه شده است. نمونه تست کشش از لوله خمکاری شده از محل خم انتخاب شده است تا با بررسی سطح شکست (جدایش) قسمت نرم تر لوله شناسایی شود. در شکل ۱۱.۲۱ مقطع شکست هر دو نمونه مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نقطه شروع شکست در لوله نو تقریباً در وسط ضخامت لوله است (با توجه به انحنا در مقطع شکست). این به معنای برابری استحکام داخلی و خارجی لوله است. در لوله خمکاری شده، شروع شکست نزدیک به سطح بیرون لوله است. در شکل ۱۲.۲۱، تفاوت نوع شکست‌ها با رسم شماتیک سطوح برشی هنگام تست کشش نشان داده شده است.

از آنجاکه در دو طرف نمونه کشش، حالت تنش صفحه‌ای وجود دارد، هنگام کشش، مکانیسم لغزش در زاویه  $45^\circ$  فعال می‌شود. عرض منطقه‌ای که با این زاویه گسیخته می‌شود، به جنس نمونه (نرمی، تردی و استحکام) بستگی دارد. انتظار می‌رود با توجه به ضخامت لوله، منطقه شروع شکست تقریباً در وسط نمونه (متقارن) باشد (شکل ۱۲.۲۱ الف). مقطع گسیخته شده نمونه نو (شکل ۱۱.۲۱) این موضوع را اثبات می‌کند.



شکل ۱۱.۲۱. سطح مقطع شکست نمونه‌های تهیه‌شده از لوله نو (الف) و خمکاری‌شده (ب)، پس از آزمون کشش.

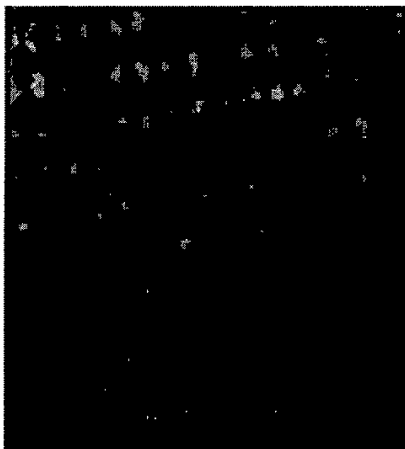


شکل ۱۲.۲۱. نحوه ایجاد خطوط برشی در نمونه لوله‌های نو و خمکاری‌شده

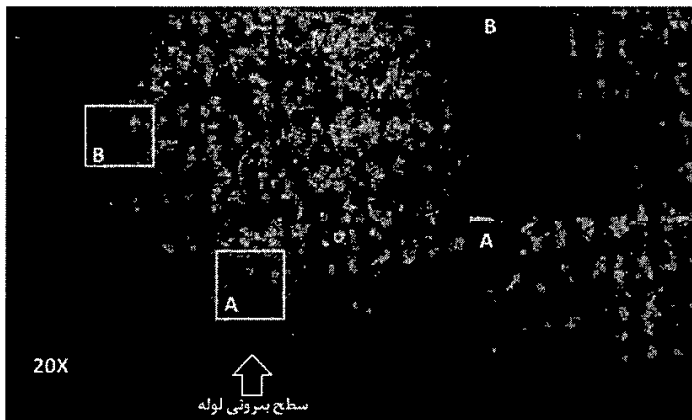
در صورتی که در نمونه خمکاری‌شده، به دلیل تغییر ساختار و کاهش استحکام سطح بیرونی، شروع شکست به صورت نامتقارن (مانند تصویر شماتیک شکل ۱۲.۲۱ ب) اتفاق افتاده است. سطح نمونه خمکاری‌شده (شکل ۱۱.۲۱) این موضوع را اثبات می‌کند.

بررسی ریزساختار لوله نو و لوله خمکاری‌شده: ساختار متالورژیکی لوله نو که توزیع یکنواخت فاز پرلیت در زمینه فریت است در شکل ۱۳.۲۱ مشخص است. در شکل ۱۴.۲۱، ساختار متالورژیکی لوله خمکاری‌شده نشان داده شده است. به وضوح مشاهده می‌شود که سطح خارجی لوله خمکاری‌شده دی‌کربوره شده است. از طرف داخل به بیرون لوله، میزان تجزیه پرلیت شدت یافته است. به طوری که در ناحیه سطحی که در شکل A.۲۱.۱۴ مشاهده می‌شود، پرلیتی باقی‌نمانده و ساختار تماماً فریتی است. همین امر باعث افت شدید سختی شده است. دلیل این تفاوت ساختار، وجود گرادیان شدید حرارتی است. به عبارتی، در عملیات خمکاری، بر اثر

حرارت‌دهی بیش از حد مجاز به سطح لوله و بالا رفتن دما، تجزیه پرلیت‌ها آغاز شده و کاربید و فریت حاصل می‌شود. در شکل B.۱۴.۲۱ پرلیت‌های باقی‌مانده در عمق مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳.۲۱. ساختار متالورژیکی لوله نو. به کیفیت توزیع پرلیت در فریت توجه کنید (محلول اچ: نایتال ۲٪، بزرگ‌نمایی: ۵۰ برابر).



شکل ۱۴.۲۱. ساختار متالورژیکی لوله خمکاری شده. (A) ساختار در نزدیکی سطح که دی کربوره شده است؛ (B) پرلیت‌ها در حال تجزیه و کاربید در حال تشکیل (محلول اچ: نایتال ۲٪).

نتیجه‌گیری: بررسی‌ها نشان می‌دهد به‌دلیل نزدیکی محل خم‌ها به یکدیگر، انجام همهٔ خمکاری‌ها به‌صورت سرد با دستگاه ممکن نبوده است، لذا برخی نقاط با مشعل گرم شده و با دست خم شده‌اند. گرم کردن کنترل‌نشده و بیش از حد مجاز لوله، موجب غیریکنواخت شدن خصوصیات مکانیکی، ساختاری و به‌ویژه سختی در نقاط گوناگون شده است. این تغییرات ساختاری و کاهش استحکام، به گسیختگی بسیار زودرس لوله‌ها منجر شده است.

### منابع

[1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

- [۲] موسوی‌ترشیزی، سیدابراهیم، گزارش آزمون‌های کنترل کیفیت لوله‌های سوپرهمتر نهایی نیروگاه بندرعباس، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، بهمن ۱۳۹۲.
- [۳] موسوی‌ترشیزی، سیدابراهیم و رضا عابدینی، بررسی علل خرابی زودرس لوله‌های دیوارهٔ آبی واحد ۲ نیروگاه بندرعباس، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، آبان ۱۳۹۱.

## فصل ۲۲

### عیوب جوشکاری

#### ۱.۲۲. محل وقوع خرابی‌ها[1]

یک بویلر بزرگ صنعتی ممکن است بیش از ۵۰,۰۰۰ جوش داشته باشد. هر جوش می‌تواند یک موقعیت مشکل‌زا باشد، اما مشکلات ناشی از عیوب جوشکاری<sup>۱</sup> فقط ۲/۵٪ خرابی‌های بویلرند. دلیل این امر، سخت‌گیری‌ها و ضوابط دقیق استاندارد ASME برای مخازن تحت فشار است. با توجه به شرایط محیطی نسبتاً سخت سوپرهیترها و ری‌هیترها، بسیاری از خرابی‌های ناشی از جوش در این نواحی اتفاق می‌افتند.

#### ۲.۲۲. شرایط جوش مناسب

هدف از یک جوش، اتصال دو فلز از طریق ذوب‌کردن آن‌ها در سطح جدایش است. بر اثر جوش، پیوند متالورژیکی یکنواخت و فاقد ناپیوستگی در سراسر جوش ایجاد می‌شود. جوش باید عاری از خلل و فرج چشمگیر و آخال‌های نافلزی باشد، سطحی هموار با مقاطعی متصل‌شده به یکدیگر ایجاد کند و تنش پسماند توجه‌برانگیزی نداشته باشد.

عیوب زمانی ایجاد می‌شوند که جوش دست‌کم یکی از شرایط لازم برای جوش سالم — که در سطرهای بالا گفته شد — را نداشته باشد، اما باید به این نکته توجه شود که هیچ جوش عاری از عیبی وجود ندارد. با توجه به این حقیقت، تمام کدهای جوشکاری، وجود عیب در جوش را مجاز می‌دانند، اما محدودیت‌هایی برای شدت عیب قائل می‌شوند. یک جوش قابل قبول، عاری از عیب نیست، بلکه طوری است که عیوب موجود در آن مانع بهره‌برداری مطلوب از قطعه نشود. ارائه فهرست کاملی از عیوب جوش، خارج از محدوده مطالب این قسمت است. بنابراین در ادامه فقط رایج‌ترین عیوب جوش بررسی می‌شوند.

---

1. welding defects

### ۳.۲۲. عیوب گوناگون ایجادشده در جوش

در این قسمت به بررسی متداول‌ترین عیوبی می‌پردازیم که ممکن است در جوش‌ها ظاهر شوند.

#### ۱.۳.۲۲. خلل و فرج

علت ایجاد

خلل و فرج در اثر گرفتارشدن حباب‌های گاز در جوش ایجاد می‌شوند (شکل ۱.۲۲). عوامل زیر می‌توانند باعث حبس حباب‌های گاز در جوش شوند:

۱. کاهش حلالیت گاز در فلز، هنگامی که جوش گداخته سرد می‌شود؛
۲. واکنش‌های شیمیایی که در جوش رخ می‌دهد.

شکل ظاهری

به‌طور کلی، خلل و فرج از سطح جوش مشاهده‌پذیر نیستند. حفره‌ها در جوش می‌توانند به شکل‌های یکنواخت<sup>۱</sup>، خوشه‌ای<sup>۲</sup> و خطی توزیع شوند. خلل و فرج نزدیک سطح، اثر بیشتری در کاهش خواص مکانیکی جوش دارند.

روش‌های پیشگیری از ایجاد خلل و فرج

برای پیشگیری از ایجاد خلل و فرج، موارد زیر توصیه می‌شود:

۱. استفاده از مواد پرکننده (الکتروود) تمیز و خشک
۲. کنترل جریان جوشکاری و طول قوس



شکل ۱.۲۲. مقطعی در جوش که وجود خلل و فرج زیاد را نشان می‌دهد. از این جوش برای مدت ۴۰ سال در فشار کم، بدون رخ‌دادن خرابی، بهره‌برداری می‌شده است.

1. uniformly scattered porosity

2. cluster porosity

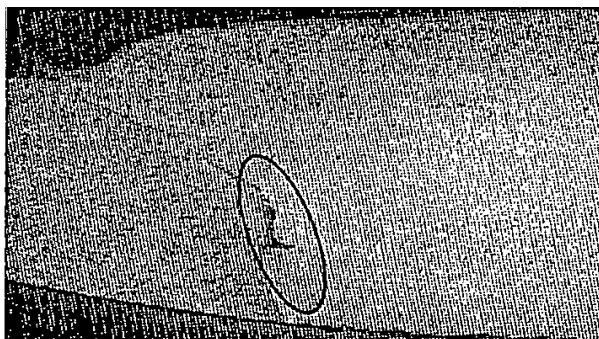
### ۲.۳.۲۲. سرباره‌های جوش

علت ایجاد

سرباره‌های جوش<sup>۱</sup> مواد جامد نافلزند که در رسوب جوش<sup>۲</sup> یا بین فلز جوش و فلز پایه<sup>۳</sup> گرفتار شده‌اند. آن‌ها بر اثر واکنش‌های شیمیایی انجام‌شده در دمای بالا (ممکن است حین جوشکاری رخ دهند)، تشکیل می‌شوند.

شکل ظاهری

این سرباره‌ها ممکن است به شکل ذرات جدا از هم و نوارهای پیوسته یا منفصل وجود داشته باشند. در شکل ۲.۲۲ یک سرباره خطی که در سطح جدایش فلز جوش و فلز پایه قرار گرفته، نشان داده شده است. سرباره‌های داخل جوش مشاهده‌پذیر نیستند؛ مگر اینکه روی سطح قرار گرفته باشند.



شکل ۲.۲۲. مقطعی از سرباره خطی. این جوش ۲۵ سال در شرایط ۴/۵ مگاپاسکال (۶۵۰ پوند بر اینچ مربع) کار کرده است (بزرگ‌نمایی: ۵ برابر).

اثرات

سرباره‌هایی که می‌توانند به بروز خرابی منجر شوند، روی سطح قرار دارند یا به اندازه‌ای بزرگ‌اند که ضخامت باقیمانده بین سرباره و سطح بیرونی قطعه را به‌طور چشمگیر کاهش می‌دهند.

1. slag inclusions
3. base metal

2. weld deposit

روش‌های پیشگیری از سرپاره جوش

با روش‌های زیر می‌توان تعداد و اندازه سرپاره‌ها را کاهش داد:

۱. پایین نگه‌داشتن ویسکوزیته جوش
۲. جلوگیری از منجمدشدن سریع جوش
۳. بالا نگه‌داشتن دمای فلز جوش

### ۳.۳.۲۲. نفوذ بیش‌ازحد

علت ایجاد

علت این مشکل، نفوذ بیش‌ازحد<sup>۱</sup> فلز جوش در درز جوش است؛ به‌طوری‌که فلز جوش در سمت دیگر اتصال، بیش‌ازحد از شیار خارج می‌شود.

شکل ظاهری

نفوذ بیش‌ازحد ممکن است به دو شکل ظاهر شود:

۱. به شکل فلز اضافی در پشت جوش که ممکن است مانند «قندیل یخ» به‌نظر برسد (شکل ۳.۲۲)؛
۲. به شکل تقعر فلز جوش در سمت پشتی جوش که گاهی به آن چاهک<sup>۲</sup> نیز گفته می‌شود (شکل ۴.۲۲).

اثرات

اثرات ناشی از نفوذ بیش‌ازحد به‌ترتیب گفته‌شده در قبل، موارد زیرند:

۱. فلز اضافی می‌تواند باعث ناپیوستگی و اغتشاش در مسیر سیال خنک‌کن شود. این مسئله ممکن است باعث بروز مشکلاتی در پایین‌دست عیب شود: خوردگی موضعی در لوله‌های حاوی آب و بیش‌گرمایش موضعی در لوله‌های حاوی بخار؛
۲. اگر این مشکل شدید باشد، می‌تواند باعث ایجاد ترک در ریشه جوش شود. ترک‌ها را می‌توان با آزمایش رادیوگرافی شناسایی کرد. همچنین تقعر می‌تواند باعث کاهش شدید عمر خستگی شود. در تقعرهای بیش‌ازحد، خستگی حرارتی می‌تواند خرابی ایجاد کند.

روش‌های پیشگیری از نفوذ بیش‌ازحد

از آنجاکه قطعات دچار این نوع مشکل، غالباً برای تعمیر در دسترس نیستند، بنابراین باید ابتدا

1. excess penetration (burnthrough)

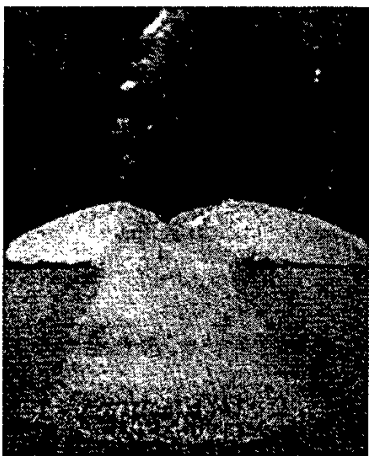
2. sink



از تشکیل آن‌ها جلوگیری کرد. نفوذ بیش از حد، غالباً به خاطر روش‌های غلط جوشکاری، آماده‌سازی ناقص اتصال<sup>۱</sup> و هم‌محور نبودن دقیق اتصال رخ می‌دهد.



شکل ۳.۲۲. نفوذ بیش از حد که به ایجاد قندیل‌مانندهایی در زیر جوش لب‌به‌لب منجر شده است.



شکل ۴.۲۲. تقعر ایجادشده در پشت‌بند یک جوش بر اثر نفوذ بیش از حد

## ۴.۳.۲۲. ذوب ناقص

## علت ایجاد

همان‌طور که از نام این عیب برمی‌آید، مشکلات ناشی از آن بر اثر ذوب ناقص<sup>۱</sup> قسمت‌هایی ایجاد می‌شود که باید به یکدیگر جوش داده شوند. ذوب ناقص می‌تواند بین پاس‌های متوالی جوش، بین فلز پایه و فلز جوش و در هر نقطه‌ای از شیار جوش رخ دهد.

## اثرات

خرابی‌هایی که عامل آن‌ها ذوب ناقص سطوح داخلی جوش است، به‌ندرت رخ می‌دهند؛ مگر اینکه ذوب ناقص، شدید باشد (در حالتی که ۱۰٪ یا بیشتر از ضخامت دیواره ذوب نشده باشد). اما ذوب ناقص در سطوح حساس‌تر است. در این نقاط، مکانیسم‌های خستگی مکانیکی، خستگی-حرارتی و خوردگی تحت تنش (SCC) می‌توانند باعث خرابی شوند.

## روش‌های پیشگیری از ذوب ناقص

مشکلات ناشی از ذوب ناقص می‌تواند بر اثر ذوب ناقص فلز اصلی و ذوب ناقص پاس قبلی جوش رخ دهد. برای پیشگیری، انجام کارهای زیر مفید است:

۱. جریان جوشکاری را افزایش داد؛
۲. سرعت جوشکاری را کاهش داد؛
۳. ذوب ناقص می‌تواند بر اثر خرابی فلاکس‌های نافلزی نیز ایجاد شود. این مواد به سطوحی که باید به یکدیگر جوش داده شوند، می‌چسبند. این مشکل را می‌توان با جداکردن مواد آلوده‌کننده این سطوح، حل کرد.

## ۵.۳.۲۲. بریدگی کناره جوش

## علت ایجاد

منظور از «بریدگی کناره جوش»<sup>۲</sup> ایجاد شیار پیوسته یا منقطع در فلز پایه است. این شیارها در سطح جوش (شکل ۵.۲۲) و در محل ریشه جوش ایجاد می‌شوند. به‌طور کلی، بریدگی کناره جوش بر اثر استفاده از جریان بیش‌ازحد برای یک الکتروود خاص و نگاه‌داشتن طولانی‌مدت قوس ایجاد می‌شود.

1. incomplete fusion

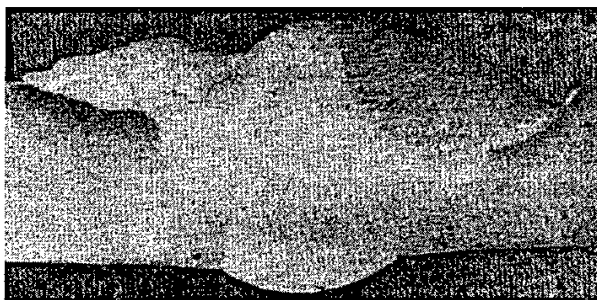
2. undercut

### اثرات

بسته به عمق و تیزی شیارها، ممکن است خستگی مکانیکی و حرارتی باعث خرابی در محل بریدگی کناره جوش شوند.

روش‌های پیشگیری از بریدگی کناره جوش

بریدگی کناره جوش را می‌توان با ساییدن و جوشکاری مجدد در محل شیارها تعمیر کرد.



شکل ۵.۲۲. مقطعی از جوش با بریدگی شدید کناره جوش

### ۶.۳.۲۲. نفوذ ناقص در محل اتصال

#### علت ایجاد

مشکلات نفوذ ناقص در محل اتصال<sup>۱</sup>، از نفوذ ناکافی جوش در ضخامت اتصال ناشی می‌شوند (شکل ۶.۲۲). این مشکل معمولاً در اولین پاس جوشکاری<sup>۲</sup> و در پاس‌های جوشی که یک طرف اتصال یا هر دو طرف اتصال را ذوب می‌کنند، رخ می‌دهد. در مواردی که جوشکاری از هر دو طرف اتصال انجام شود<sup>۳</sup> (شکل ۷.۲۲)، ممکن است نفوذ ناقص در دیواره رخ دهد.

### اثرات

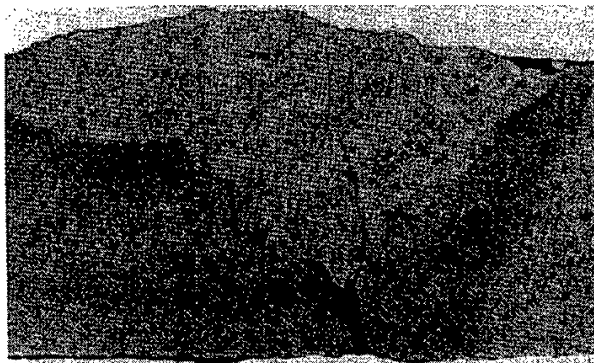
نفوذ نامناسب یکی از جدی‌ترین عیوب جوشکاری است که باعث خرابی‌هایی در مخازن تحت فشار می‌شود. گاهی مکانیسم‌های خستگی مکانیکی، خستگی حرارتی، خوردگی تحت تنش و خوردگی ساده بر اثر وجود این عیب فعال می‌شوند.

1. inadequate joint penetration  
3. double-welded joints

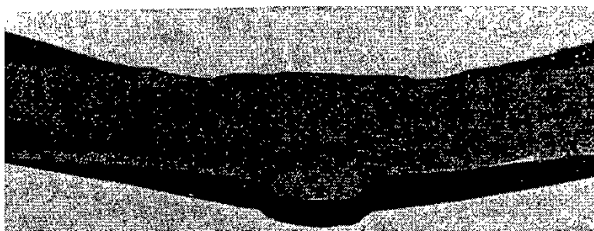
2. initial weld pass

روش‌های پیشگیری از نفوذ ناقص در اتصال  
به‌طور کلی نفوذ ناقص جوش در اتصال، بر اثر عوامل زیر ایجاد می‌شود:

۱. آماده‌سازی نامناسب لبه‌ها
۲. استفاده از الکتروود بسیار بزرگ
۳. سرعت جوشکاری بیش از حد
۴. جریان جوشکاری ناکافی



شکل ۶.۲۲. نفوذ ناقص در ریشه یک جوش لب‌به‌لب مربوط به مسیر آب تغذیه. تغلیظ هیدروکسید سدیم در شکاف ایجاد شده، به خوردگی قلیایی تحت تنش منجر شده است. به ترک‌های ریزی که از شکاف شروع شده‌اند، توجه کنید.



شکل ۷.۲۲. مقطعی از یک جوش لب‌به‌لب محیطی

#### ۷.۳.۲۲. ترک

ترک‌ها غالباً باریک‌اند، اما گاهی ترک‌های باز نیز ایجاد می‌شوند که معمولاً لبه‌کلفت‌اند.  
ترک‌زایی در اتصالات جوشکاری شده می‌تواند به چند شکل رخ دهد:

- ترک داغ در فلز جوش؛ این ترک‌ها بلافاصله پس از جامدشدن فلز جوش ایجاد می‌شوند.
- ترک سرد در فلز جوش؛ این ترک‌ها پس از سردشدن جوش ایجاد می‌شوند. چنین ترک‌هایی ممکن است مدت‌ها پس از جوشکاری نیز ایجاد شوند.
- ترک داغ در فلز اصلی؛ این ترک‌ها پس از جامدشدن فلز جوش، در فلز اصلی ایجاد می‌شوند.
- ترک سرد در فلز اصلی؛ این ترک‌ها پس از سردشدن فلز جوش، در فلز اصلی ایجاد می‌شوند.

#### اثرات ایجاد ترک

ایجاد ترک در جوش خطرناک است و به بروز خرابی‌های مکرر حین بهره‌برداری منجر می‌شود. ایجاد ترک در فلز اصلی (ترک گوشه‌ای)<sup>۵</sup> و ترک در زیر خط جوش<sup>۶</sup> نیز خطرناک است و باعث خرابی‌هایی حین بهره‌برداری می‌شود. ترک‌ها ممکن است عرضی یا طولی باشند (شکل ۸.۲۲).

#### روش‌های پیشگیری از ترک

به‌طور کلی ترک‌زایی بر اثر جوشکاری ناقص، آماده‌سازی نامناسب لبه‌ها، استفاده از الکترودهای نامناسب، پیش‌گرمایش نامناسب و نرخ سردشدن بیش‌ازحد رخ می‌دهد. اگر ترک‌زایی در فلز جوش باشد، ممکن است توجه به نکات زیر از ایجاد مجدد ترک‌ها پیشگیری کند:

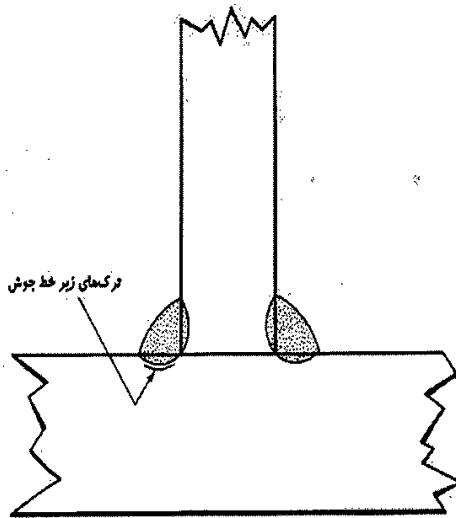
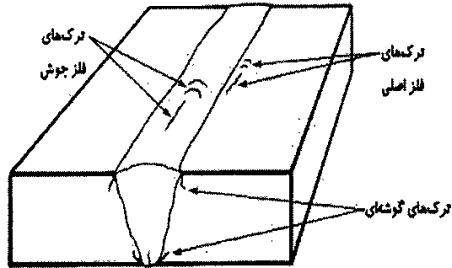
۱. کاهش سرعت جوشکاری
  ۲. پیش‌گرمایش ناحیه‌ای که باید جوشکاری شود؛ به‌ویژه در مقاطع ضخیم
  ۳. استفاده از الکترودهای کم‌هیدروژن
  ۴. استفاده از الکترودهای خشک
  ۵. انجام جوشکاری به‌صورت گسسته برای پیشگیری از بروز تنش‌های پسماند در قطعه
  ۶. پیشگیری از شرایط منجر به سردشدن سریع
- اگر ترک‌زایی در فلز اصلی باشد، توجه به نکات زیر ممکن است از بروز مجدد ترک پیشگیری کند:

۱. پیش‌گرمایش ناحیه‌ای که باید جوشکاری شود؛ به‌ویژه در مقاطع ضخیم
۲. کنترل گرمای ورودی
۳. استفاده از الکترودهای مناسب
۴. استفاده از الکترودهای خشک

---

1. hot cracking in weld deposit  
3. base-metal hot cracking  
5. toe cracking

2. cold cracking in weld deposit  
4. base-metal cold cracking  
6. underbead cracking



شکل ۸.۲۲. محل‌های معمول ایجاد ترک در اتصالات جوشکاری شده

تذکر: تعیین نهایی شدت عیب جوش و تأثیر آن بر قابلیت استفاده از جوش، نیاز به قضاوت یک بازرس جوش باتجربه دارد. عیوب مجاز و غیرمجاز جوش‌ها، در استانداردهای معتبر قید شده‌اند.

### ۸.۳.۲۲. گرافیت‌شدن

محل وقوع گرافیت‌شدن

فولادهای غیرآلیاژی و فولادهای دارای ۰/۵٪ مولیبدن، برای گرافیت‌شدن<sup>۱</sup> مناسب‌اند. از چنین

فولادهایی ممکن است در محل‌های دماییین سوپر هیتر و ری هیتر استفاده شود. این نوع خرابی‌ها، در لوله‌های بخار نسبت به لوله‌های دیواره آبی رایج‌ترند.

#### مکانیسم گرافیت‌شدن

گرافیت‌شدن بر اثر تبدیل حرارتی کاربیدهای آهن موجود در فولاد، به کربن آزاد (گرافیت) و آهن خالص اتفاق می‌افتد و به زمان و دما بستگی دارد؛ غالباً در محدوده دمایی ۴۲۷ تا ۶۴۹ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه فارنهایت) رخ می‌دهد. با افزایش دمای فلز، زمان لازم برای گرافیت‌شدن کاهش می‌یابد.

علت خرابی‌های ناشی از گرافیت‌شدن فولادهای جوشکاری شده، تشکیل زنجیره‌های پیوسته گرافیت (که اغلب در امتداد لبه دماییین ناحیه HAZ فلز اصلی ایجاد می‌شوند) است. این زنجیره‌ها، صفحه تردی را تشکیل می‌دهند که ترک‌ها به آسانی می‌توانند در آن منتشر شوند. خرابی‌های ناشی از گرافیت‌شدن باعث خسارت‌های اساسی می‌شوند.

#### عوامل ایجاد

عوامل گرافیت‌شدن عبارت‌اند از:

۱. استفاده از مواد نامناسب. مواد مستعد گرافیت‌شدن، فولادهای غیرآلیاژی و فولادهای آلیاژی دارای ۰/۵٪ مولیبدن‌اند که در فرایند ساخت با بیش از  $0.226 \text{ kg/T}$  ( $0.5 \text{ lb/ton}$ ) آلومینیوم، اکسیژن‌زدایی شده‌اند؛
۲. جوشکاری مواد مستعد به گرافیت‌شدن؛
۳. قراردادن طولانی‌مدت اتصالات جوشکاری شده در معرض دمای ۴۲۷ تا ۶۴۹ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه فارنهایت).

#### علائم خرابی ناشی از گرافیت‌شدن

خرابی‌های ناشی از گرافیت‌شدن ممکن است در فولادهای کربنی و کربن-مولیبدنی که جوشکاری شده‌اند و سپس فلز به مدت طولانی در معرض دمای ۴۲۷ تا ۶۴۹ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه فارنهایت) قرار گرفته است، ایجاد شود. شکست در ناحیه حرارت‌دیده فلز پایه که تقریباً ۱/۶ میلی‌متر از سطح جدایش جوش و فلز پایه فاصله دارد، رخ می‌دهد. تذکر: روش غیرمخرب برای تأیید گرافیت‌شدن وجود ندارد.

روش‌های پیشگیری از گرافیت‌شدن

برای پیشگیری از گرافیت‌شدن کارهای زیر را می‌توان انجام داد:

۱. جلوگیری از قرارگرفتن فلز جوشکاری‌شده در محدوده دمایی که گرافیت‌شدن رخ می‌دهد.
- این کار بهترین روش جلوگیری از گرافیت‌شدن در مواد مضمون است؛
۲. در مرحله طراحی تجهیزات، موادی انتخاب شوند که مستعد گرافیت‌شدن نباشند.

#### ۴.۲۲. نکات توجه‌برانگیز

مشاهده شده که مواد زائدی مانند ترشحات جوش<sup>۱</sup>، خراش‌ها<sup>۲</sup>، براده‌ها<sup>۳</sup>، ذرات ناشی از سنگ‌زنی انتهای لوله و حتی ادوات جوشکاری هنگام تعمیر لوله در آن به‌جا مانده‌اند. اگر این مواد زائد از لوله‌ها خارج نشوند، می‌توانند به گرفتگی جزئی مسیر سیال خنک‌کن منجر شوند و در نتیجه خرابی‌های بیش‌گرمایشی مانند گسیختگی تنش‌ی رخ دهد. چنین خرابی‌هایی می‌توانند ماه‌ها پس از خاتمه تعمیرات رخ دهند.

#### ۵.۲۲. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

اثر عیوب موجود در جوش

□ نمونه اول [۱]

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	لوله‌های شبکه‌ای
نحوه قرارگرفتن نمونه:	با شیب ۴۵°
عمر نمونه:	۲۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۰/۳ MPa (۱۵۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷/۶ cm (۳ in)
سوخت:	زغال سنگ

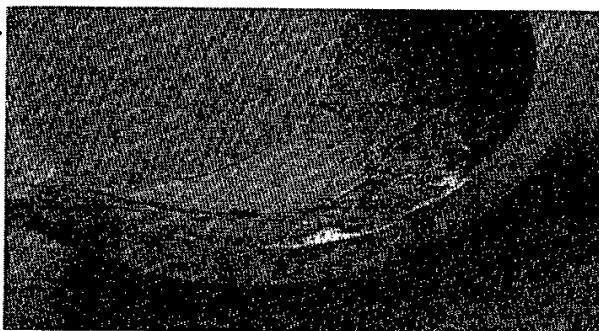
1. weld spatter
3. filing

2. shaving



علائم ناشی از خرابی: از سمت داغ لوله‌ای که در شکل ۹.۲۲ نشان داده شده، قسمت «پنجره» ماتندگی بریده شده و به جای آن قسمت جدیدی از سطح خارجی جوش داده شده است. در مقطعی که از قسمت پنجره مانند تهیه شده است، درزهای عمیقی مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰.۲۲).

علت خرابی: ظاهر این عیب حاکی از آن است که سرباره‌های گرفتار شده، آلودگی‌ها و فلاکس، از برقراری اتصال متالورژیکی سالم در جوش جلوگیری کرده‌اند. اثرات عیوب موجود در جوش: درزهای موجود در جوش می‌توانند به عنوان محل تمرکز تنش عمل کرده و به خستگی و خستگی- خوردگی در دیواره منجر شوند.



شکل ۹.۲۲. سطح داخلی لوله که قسمت بیضوی شکلی را که جایگزین شده است، نشان می‌دهد.

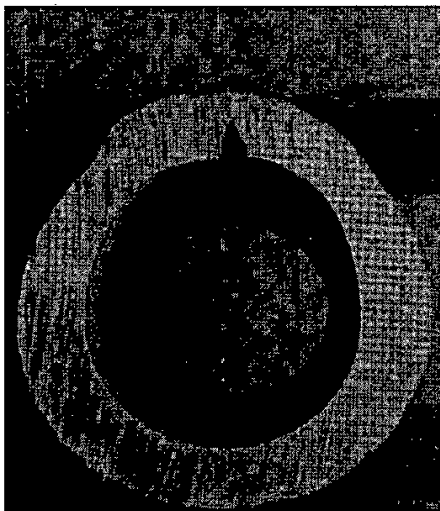


شکل ۱۰.۲۲. مقطعی در جوش که درزهای عمیق موجود در جوش را نشان می‌دهد (بزرگ‌نمایی: ۶ برابر).

□ نمونه دوم

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	فضای مشعل‌های گردابی
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۲۲ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۰/۳ MPa (۱۵۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۳/۸ cm (۱/۵ in)

شرایط بهره‌برداری از بویلر طی ۶ سال گذشته، از بویلر در شرایط نامی بهره‌برداری شده است. علائم ناشی از خرابی: بویلری که لوله نشان‌داده شده در شکل ۱۱.۲۲ از آن تهیه شده است، در اطراف مشعل‌های گردابی و کف کوره، دچار بیش‌گرمایش مکرر می‌شده است. خرابی‌های ناشی از بیش‌گرمایش، با استفاده از جوش وصله‌ای<sup>۱</sup> تعمیر شده‌اند.



شکل ۱۱.۲۲. پروفیلی از دیواره لوله که درز ذوب‌نشده را پس از جوشکاری نشان می‌دهد.

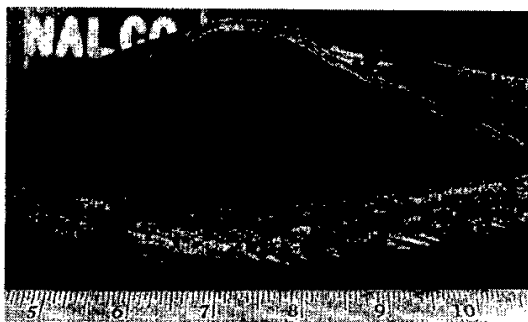
علت خرابی: شکل‌ها نشان می‌دهند که فلز جوش در دیواره لوله نفوذ نکرده است و درز لبه کلفتی که بر اثر بیش‌گرمایش ایجاد شده بود، با عملیات جوشکاری به‌طور کامل بسته نشده است. این درزها به عنوان محل‌های تمرکز تنش عمل کرده و در نتیجه تنش‌های عادی اعمالی حین بهره‌برداری و دماهای بالا، باعث ترک‌های خزشی در نوک درز شده‌اند. بر اثر وجود این عیب، وقوع خرابی نزدیک به‌نظر می‌رسد.

□ نمونه سوم

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	لوله‌های شبکه‌ای
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۹ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هم‌انگ
فشار درام:	۶/۲ MPa (۹۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)
سوخت:	زغال سنگ

علامت ناشی از خرابی: شکل ۱۲.۲۲ شکست بزرگی را در جوشی که لوله را به دیواره متصل می‌کرده است، نشان می‌دهد. فلز این قسمت از لوله، برای مدت طولانی در معرض دماهای بالاتر از ۴۵۴ درجه سانتی‌گراد (۸۵۰ درجه فارنهایت) قرار داشته است.

علت خرابی: آزمایش‌های ریزساختاری وجود یک زنجیره از گرافیت را در ناحیه HAZ جوش نشان می‌دهد. شکست در امتداد این زنجیره رخ داده است. نزدیکی گره‌های گرافیت و در یک راستا قرارگرفتن آن‌ها، صفحه ضعیفی ایجاد کرده و بر اثر تنش‌های ناشی از فشار داخلی، شکست به‌آسانی منتشر شده است.



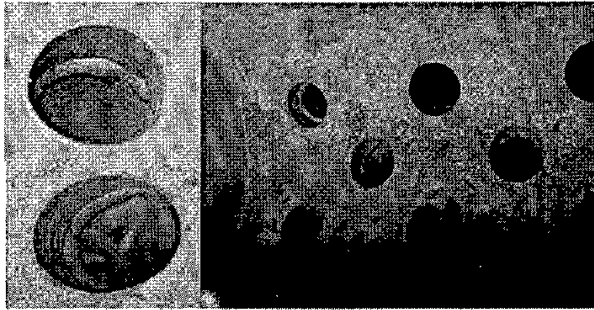
شکل ۱۲.۲۲. شکست بزرگ در امتداد جوش؛ شکست بر اثر گرافیت‌شدن جوش رخ داده است.

□ نمونه چهارم [۲]

نوع بویلر:	بویلر بازیافت نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله‌های اکونومایزر
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	حدود ۲/۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	AVT (All Volatile Treatment)
شرایط کاری:	دمای آب: ۲۰۰°C
	فشار داخلی: ۱۲۵-۱۵ bar
مشخصه‌های لوله:	فولاد ASTM A178 Grade C

علائم ظاهری: لوله در مجاورت ناحیه اتصال و پس از خط جوش، سوراخ شده است. شکل ۱۳.۲۲ وضعیت ناحیه جوشکاری شده را در سطح داخلی لوله نشان می‌دهد (برای گرفتن این عکس بخشی از دیواره هدر بریده شده و از داخل آن عکس گرفته شده است). بر اساس این تصویر، نحوه جوشکاری لوله طوری بوده است که فلز جوش به سطح داخلی لوله نفوذ کرده و یک ناهمواری داخل آن ایجاد کرده است. این ناهمواری غیرعادی ناشی از نفوذ بیش از حد جوش<sup>۱</sup>، سبب اغتشاش جریان سیال عبوری و به دنبال آن، وقوع خوردگی سایشی در ناحیه پایین دست منطقه جوش شده است.

1. excess penetration



شکل ۱۴.۲۲. وضعیت ناحیه جوشکاری شده در سطح داخلی لوله

□ نمونه پنجم [۳]

صنعت:	نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله اوپراتور فشاربالای بویلر بازیافت
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	حدود ۲/۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	AWT (Alkalinity Water Treatment)
شرایط کاری:	دمای آب: ۲۰۰°C
	فشار داخلی: ۱۳۵-۱۵۰ bar
مشخصه‌های لوله:	فولاد SA210-A1

علامت ظاهری: لوله اوپراتور فشاربالای یک واحد نیروگاه سیکل ترکیبی دچار گسیختگی و موجب خروج از مدار واحد شد. لوله آسیب‌دیده بریده و با لوله‌ای از همان جنس تعویض شده است. لوله جایگزین نیز پس از مدت کوتاهی بهره‌برداری (کمتر از چهار هفته)، مجدداً گسیخته شده است.

الف) بررسی جنس: با توجه به احتمال اینکه علت گسیختگی زودرس این لوله، استفاده از جنس نامناسب بوده باشد، آنالیز تعیین جنس به روش اسپکترومتری نشری برای لوله اولیه و لوله جایگزین انجام شده است. ترکیب شیمیایی لوله‌ها نشان می‌دهد هر دو لوله از جنس SA210-A1 هستند.

ب) شکل ظاهری آسیب: چنان‌که در شکل ۱۴.۲۲ نشان داده شده، گسیختگی در حدود فاصله ۲ سانتی‌متری محل جوش اتفاق افتاده است. گسیختگی با نشستی کوچکی آغاز شده و بر

اثر خروج آب و بخار، ساییش در خارج لوله ایجاد شده است. با کاهش ضخامت و رسیدن به مقدار حدی حدود ۰/۸ میلی‌متر، لوله گسیخته شده است.

کیفیت جوشکاری: شکل ۱۵.۲۲ سطح بیرونی لوله جوشکاری شده را نشان می‌دهد. با وجود ساییش زیاد سطح لوله بر اثر جریان آب و بخار، حفره‌های فراوان و ترک روی گرده جوش به‌وضوح دیده می‌شود.

شکل ۱۶.۲۲ سطح داخلی نیمی از لوله جوشکاری شده را نشان می‌دهد؛ هیچ‌گونه عملیات پخ‌زنی و آماده‌سازی روی لوله انجام نشده و حتی پلیسه‌گیری هم نشده است. انحراف مختصری نیز بین دو لوله دیده می‌شود.



شکل ۱۴.۲۲. شکل ظاهری گسیختگی و فاصله آن تا خط جوش

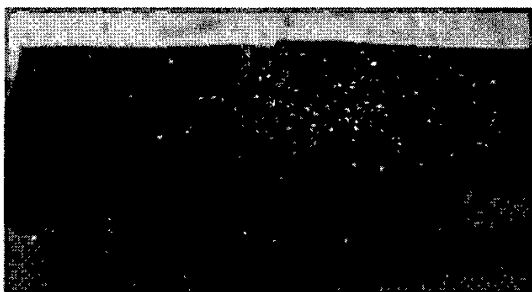


شکل ۱۵.۲۲. کیفیت جوش و وجود ترک روی گرده جوش



شکل ۱۶.۲۲. کیفیت جوشکاری و آماده‌سازی سطوح از داخل لوله و نفوذ جوش (سمت چپ)

شکل ۱۷.۲۲ جوشکاری نیمه دیگر لوله را از نمای داخل نشان می‌دهد. به درز جوش توجه شود که ظاهراً با لایه کوچکی مسدود شده یا بر اثر برشکاری نامطلوب ایجاد شده است. تغییر رنگ داخل لوله نشان از دمای بسیار زیاد جوشکاری دارد.

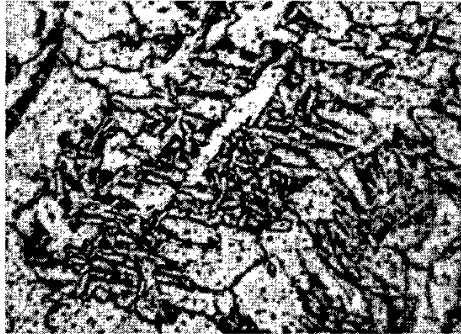


شکل ۱۷.۲۲. سطح داخل و مقطع جوش

بررسی متالورژیکی لوله: در این بخش ابتدا ساختار متالورژیکی لوله نو بررسی می‌شود. سپس ریزساختار لوله در امتداد طولی از محل گسیختگی تا محل جوش بررسی می‌شود و پس از آن، تغییرات ریزساختاری در محل گسیختگی و در جهت محیطی مطالعه خواهند شد.

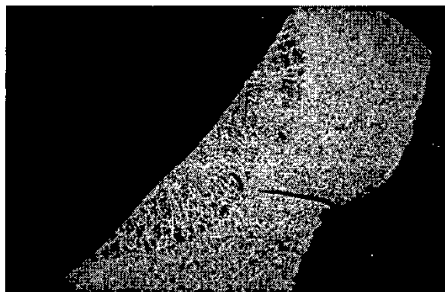
شکل ۱۸.۲۲ ساختار محل جوش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این ساختارها شباهتی به ساختار لوله نو ندارند. وجود ساختار فریتی-بینیتی نشان می‌دهد منطقه جوش

به سرعت سرد شده و عملیات حرارتی پس از جوشکاری انجام نشده است. این ساختار در مقایسه با ساختار اولیه، سخت‌تر و تردتر است.



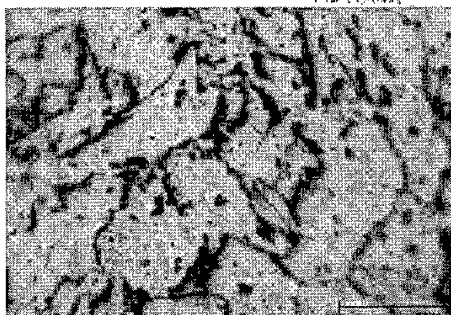
شکل ۱۸.۲۲. ساختار فریتی- بینیتی در منطقه جوش

شکل ۱۹.۲۲ وجود یک ترک در منطقه متأثر از جوش را نشان می‌دهد که در ساختار ترد پیشرفت کرده است. در نقاط دیگر نیز ترک‌های مشابه دیده می‌شود. با دور شدن از محل جوش به ساختار اولیه لوله نزدیک می‌شویم که تحت تأثیر دمای بسیار زیاد جوش تغییر ساختار داده است (شکل ۲۰.۲۲). این شکل، ساختار محل ترکیدگی لوله را نشان می‌دهد که بر اثر دمای جوشکاری استحاله فازی اتفاق افتاده و فاز پرلیت به کاربید در مرز دانه‌ها و داخل دانه‌ها تبدیل شده است. این پدیده معمولاً در لوله‌های کارکرده و با عمر زیاد یا در لوله‌هایی دیده می‌شود که دمایشان برای مدتی به بیش از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده باشد.



شکل ۱۹.۲۲. وجود ترک در منطقه جوش





شکل ۲۰.۲۲. تغییر ساختار لوله نزدیک جوش تحت تأثیر دمای بسیار زیاد جوش

□ نمونه ششم [۴]

صنعت:	بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	محل اتصال لوله‌های آب تغذیه به هدر
عمر نمونه:	حدود ۲ سال
فشار کاری:	۱۲ kg/cm <sup>2</sup>
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵۰/۸ mm
	ضخامت: ۲/۲ mm
	جنس: AISI 304H
مشخصه‌های هدر:	قطر خارجی: ۱۱۴/۳ mm
	ضخامت ۱۷ mm
	جنس: AISI 304

علائم ظاهری: این خانواده از بویلرهای بازیاب که ۲۲ عدد از آن‌ها در فاصله سال‌های ۱۳۷۸ تا ۸۲ در ایران نصب شده و به بهره‌برداری رسیده‌اند، پس از گذشت مدت زمان کوتاهی از آغاز بهره‌برداری، دچار مشکل نشستی در محل اتصال لوله‌های هارپ‌های گرم‌کن آب تغذیه<sup>۱</sup> به هدر از محل جوش شده‌اند.

این هارپ‌ها در بخش انتهایی بویلر (آخرین مرحله قبل از اگزوز) واقع شده‌اند و پایین‌ترین دمای محصولات احتراق و گاز خروجی از توربین گازی با این مجموعه تبادل حرارت دارد.

1. feed water heater harp

سیال داخل این هارپ‌ها آب دمین تغذیه بویلر است که قبل از ورود به بویلر فید پمپ‌ها در این هارپ‌ها پیش‌گرم می‌شود.

همه اجزای این نوع بویلرها، از جمله سوپرهیتر و اواپراتورهای فشاربالا که در شرایط فشار بیشتر و دمای بالاتر بهره‌برداری می‌شوند، از فولاد ساده کربنی و کم‌آلیاژ ساخته شده‌اند. تنها بخش ساخته‌شده از فولاد زنگ‌نزن در این بویلر، هارپ‌های آب تغذیه‌اند که به دلیل دمای پایین محصولات احتراق و بهره‌برداری در دمایی پایین‌تر از نقطه شبنم اسیدسولفوریک، از فولاد آستنیتی AISI 304H انتخاب شده‌اند.

با توجه به دسترسی بسیار دشوار به ردیف‌های میانی این لوله‌ها، تعمیرات و رفع نشتی به‌شرطی میسر خواهد بود که همه لوله‌های جلوتر از لوله آسیب‌دیده بریده شده و پس از ترمیم لوله معیوب، دوباره مونتاژ و جوشکاری شوند. معمولاً در بازه‌های زمانی کوتاه خروج واحد به‌منظور تعمیرات، امکان انجام تعمیرات و رفع نشتی با کیفیت بالا و رعایت دقیق دستورالعمل‌های جوشکاری، امکان‌پذیر نیست.

شرکت‌های سازنده برای دستیابی به استحکام دما بالا در این آلیاژ، از درصد بالاتری کربن در مقایسه با دیگر درجه‌های همین آلیاژ استفاده می‌کنند. البته وجود مقادیر بالاتر کربن در آلیاژها می‌تواند مشکلاتی را ایجاد کند که مهم‌ترین‌شان، کاهش میزان جوش‌پذیری با تشکیل کاربیدهای کروم است.

فولاد ۳۰۴ از نوع آستنیتی است که با وجود جوش‌پذیری مناسب، احتمال بروز مشکلاتی نظیر ترک‌های انجمادی، خوردگی‌های جوش، حساسیت به تنش‌های پسماند، تردی فاز سیگما و بروز LOP<sup>۱</sup> به دلیل سیالیت کم به‌همراه دارد.

در فولادهای آستنیتی زنگ‌نزن که حاوی دست‌کم ۰/۰۵٪ کربن‌اند، در ناحیه HAZ نوعی خوردگی بین‌دانه‌ای با نام «پوسیدگی جوش» رخ می‌دهد. این پدیده به دلیل رسوب کاربید کروم در مرز دانه‌های فولاد اتفاق می‌افتد که به حساس‌شدن<sup>۲</sup> و تخلیه کروم<sup>۳</sup> موسوم است. معمول‌ترین نوع کاربید کروم در این مورد، Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> است؛ یعنی به‌ازای هر ۶ اتم کربن، ۲۳ اتم کروم در تشکیل این کاربید سهیم خواهند بود. این امر به فقیرشدن این ناحیه از کروم — که عامل اصلی مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن است — منجر می‌شود. این پدیده نیازمند فراهم‌شدن چند عامل هم‌زمان است که در شکل ۲۱.۲۲ نشان داده شده است.

1. lack of penetration
3. Cr-depletion

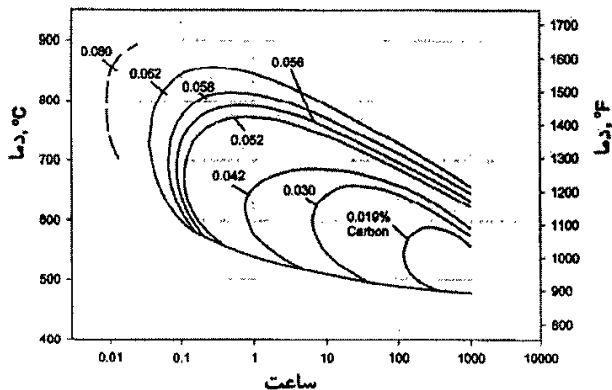
2. sensitizing

نمودار شکل ۲۱.۲۲ دو محور دما و زمان دارد و منحنی‌های گوناگون، نشانگر میزان کربن موجودند. هنگام سرمایش جوش (در ناحیه HAZ)، در صورت عبور از دماغه‌ها احتمال تشکیل کاربیدها بسیار زیاد خواهد بود. با توجه به این نمودار، دو عامل در کاربیدزایی این آلیاژ مؤثرند:

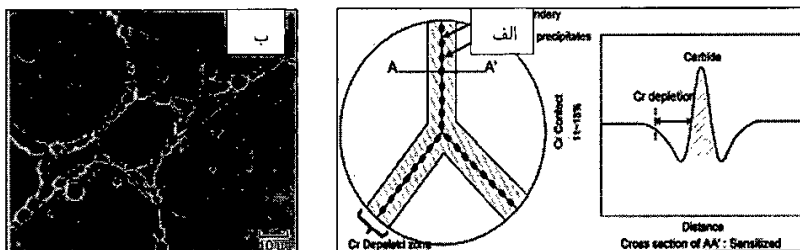
۱. زمان باقی‌ماندن در دمای بحرانی تشکیل کاربید (سرعت سرمایش)

۲. درصد کربن

شکل ۲۲.۲۲ نمایانگر خوردگی و فرایند ایجاد کاربید کروم و پوسیدگی جوش در مرزدهانه‌ها به‌واسطه حضور عنصر کربن اضافی در ساختار است.



شکل ۲۱.۲۲. حساس شدن فولادهای خانواده‌ی AISI 300 با تغییر سرعت سرمایش [5]



شکل ۲۲.۲۲. نحوه تشکیل کاربید کروم در مرزدهانه‌ها؛ الف) طرحواره تشکیل کاربیدها؛ ب) تصویر کاربیدهای مرزدهانه‌ای که با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شده است [6].

این پدیده باعث ایجاد ترک‌های ناشی از خوردگی بین‌دانه‌ای می‌شود که در مدت زمانی کوتاه، شکست را به دنبال دارد. راهکارهای غلبه بر این مشکل به شرح زیر است:

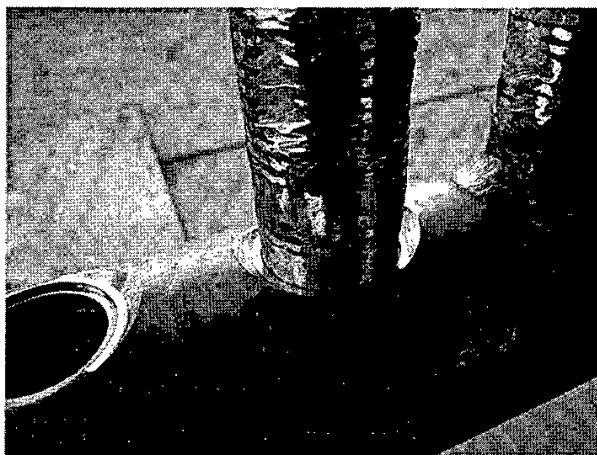
۱. عملیات حرارتی انحلال: یکی از راه‌حل‌های رفع این مشکل، عملیات حرارتی انحلال است که موجب حل شدن کاربیدهای کروم و بازگشت کروم به زمینه می‌شود. عملیات حرارتی انحلال برای این آلیاژ در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود و فلز باید با سرعت سرمایش زیاد از محدوده بحرانی عبور کند تا از تشکیل مجدد کاربیدها جلوگیری شود. با توجه به ابعاد این تجهیز، موقعیت مکانی و دمای بالای لازم، عملاً امکان انجام عملیات حرارتی انحلال وجود ندارد؛

۲. کاهش حرارت ورودی: این عمل باعث کاهش دمای قطعه می‌شود که در نتیجه، سرعت سرد شدن جوش زیاد می‌شود و احتمال بروز مشکل کاهش می‌یابد. روش‌های جوشکاری خاصی برای کنترل حرارت ورودی وجود دارد که می‌توانند به کار گرفته شوند. توضیح این نکته لازم است که با توجه به دستی بودن فرایند جوشکاری و احتمال خطای انسانی، این راه‌حل ممکن است موفقیت‌آمیز نباشد. همچنین کاهش بیش از حد حرارت ورودی امکان بروز عیوبی مانند LOF<sup>۲</sup> و LOP را فراهم می‌کند و وابستگی نتیجه مطلوب به مهارت جوشکار، بیشتر می‌شود؛

۳. کوتاه کردن زمان سرد شدن: اساس این روش، استفاده از سیال خنک‌کننده و همچنین پایین نگه داشتن دمای قطعه کار با خنک‌کاری است که با توجه به شکل و نحوه قرار گرفتن تجهیز، انجام این عملیات ناممکن است؛

۴. تغییر جنس و استفاده از فولاد با درصد کربن کمتر: مؤثرترین روش رفع این مشکل را می‌توان تغییر جنس لوله و استفاده از لوله L۳۰۴ دانست؛

۵. تجربه عملیاتی: یکی از نیروگاه‌ها که به دلیل بروز این مشکل، با نشتی‌های پُر شمار در بخش هارپ آب تغذیه مواجه بود، با انجام هم‌زمان تمامی راهکارهای ارائه شده، رفع عیب شد. در این نیروگاه علاوه بر تغییر جنس لوله‌ها به AISI 304 LC، با تغییر روش جوشکاری، زمان باقی ماندن در دمای بحرانی برای این آلیاژ کاهش پیدا کرد. همچنین با انجام محاسبات دقیق برای برآورد کاهش استحکام ناشی از تغییر جنس، ضخامت لوله‌ها اضافه شد. طرح اتصال طوری طراحی شد که به کمترین مقدار مجاز رسوب فلز جوش نیاز باشد و فرایند جوشکاری به نحوی تدوین شد که موجب کاهش حرارت ورودی شود (شکل ۲۳.۲۲).



شکل ۲۲.۲۳. نمونه جوش انجام شده در مراحل گوناگون

## منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [۲] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم و محمود سمیع زاده، بررسی علل شکست لوله های اکونومایزر بویلر بازیافت در نیروگاه دماوند، آذر ۱۳۹۳.
- [۳] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، بررسی علت گسیختگی لوله نو اواپراتور فشار بالا (HP Evaporator) بویلر شماره ۲ نیروگاه قم پس از کمتر از یک ماه از تعویض آن، اسفند ۱۳۹۱.
- [۴] نیک خوی منفرد، محسن، بررسی علل خرابی لوله های هارپ های فیدواتر بویلرهای فاسترویلر نیروگاه خوی، شرکت پویش گستر صنعت، اسفند ۱۳۹۷.
- [5] *American Iron And Steel Institute*, 1977 (mentioned in API 579).
- [6] Bruemmer, S.M., L.A. Charlot, and D.G. Atteridge, *NUREG/CR-3918, US Nuclear Regulatory Commission*, October 1984.



## فصل ۲۳

### خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب [1]

#### ۱.۲۳. مواد مورد استفاده در بویلر

به‌استثنای چدن‌ها، فلزی که غالباً در صنعت از آن استفاده می‌شود، فولاد کربنی ساده است. فولادهای آلیاژی به‌دلیل گرانی، کاربرد کمی دارند. در اغلب بویلرهای صنعتی، برای لوله‌هایی که آب یا مخلوط آب و بخار را حمل می‌کنند، از فولاد کربنی ساده استفاده می‌شود. فولادهای کم‌آلیاژ که دارای مقادیر کمی کروم و مولیبدن‌اند، معمولاً برای لوله‌های حامل بخار مانند ری‌هیترها و سوپرهیترها استفاده می‌شوند، زیرا این لوله‌ها در دماهای بالا بهره‌برداری می‌شوند. برای کندکردن زوال حرارتی فولاد غیرآلیاژی که در دماهای بالا رخ می‌دهد، کروم و مولیبدن به آن افزوده می‌شود. برای کاهش اکسیداسیون سریعی که در دمای بالا رخ می‌دهد و همچنین افزایش مقاومت خزشی فلز، کروم در حد ۰/۲۵٪ تا ۲/۲۵٪ به فولاد افزوده می‌شود. از مولیبدن نیز برای افزایش مقاومت خزشی فلز، در حد ۰/۲۵٪ تا ۱٪ استفاده می‌شود.

#### ۲.۲۳. عوامل مؤثر

دمای پوسته‌پوسته‌شدن و خزش، عوامل خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب<sup>۱</sup> هستند. دمای پوسته‌پوسته‌شدن، دمایی است که فلز به‌شدت شروع به اکسیدشدن حرارتی می‌کند (شکل ۱.۲۳). در جدول ۵.۳ فهرست فولادهایی که معمولاً در لوله‌های بویلر استفاده می‌شوند، به‌همراه دمای پوسته‌پوسته‌شدن آن‌ها آمده است.

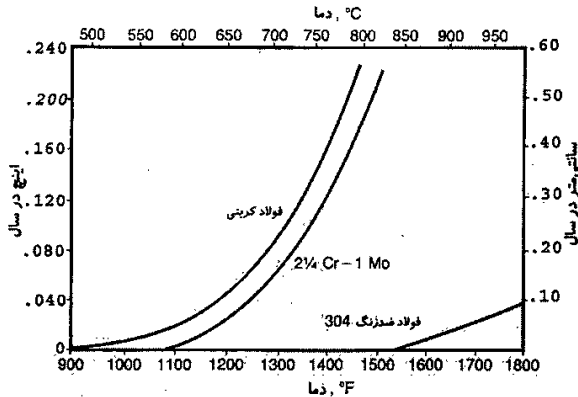
مقاومت خزشی تابعی از ترکیب آلیاژ است. افزودن کروم و مولیبدن، مقاومت خزشی را افزایش می‌دهد.

وقتی دمای محیط از حد پایداری حرارتی فلز بالاتر باشد، خرابی‌های ناشی از انتخاب نامناسب مواد ایجاد می‌شوند. حالت شاخصی که انتخاب ماده نامناسب می‌تواند به خرابی منجر

---

1. material deficiency

شود، استفاده از فولادهای کربنی غیرآلیاژی در سوپرهیترها و ری‌هیترهاست. در این محیط، با توجه به شرایط بهره‌برداری دمای بالا، لازم است از فولادهای کم‌آلیاژ استفاده شود.



شکل ۱.۲۳. نرخ تقریبی اکسیداسیون حرارتی فولاد کربنی، کم‌آلیاژ و زنگ‌نزن در هوا

تذکر: امکان وقوع خرابی‌های ناشی از زوال حرارتی (پوسته‌پوسته‌شدن بیش‌ازحد و شکست خزشی) لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر، در مواردی که ماده به‌کاررفته در این قسمت‌ها، درست انتخاب و نصب شده، یا سهواً از فولادهای کربنی ساده استفاده شده است نیز وجود دارد. پس خرابی ناشی از فساد حرارتی نمی‌تواند دلیلی بر استفاده از ماده نامناسب باشد. اگر با وجود مناسب بودن شرایط بهره‌برداری از سوپرهیتر و ری‌هیتر، این نوع خرابی‌ها رخ دهد، می‌توان به استفاده از مواد نامناسب مشکوک شد.

### ۳.۲۳. محل وقوع خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب

محدوده بحث انتخاب ماده نامناسب که در اینجا توضیح داده شده است، استفاده نامناسب از فولادهای غیرآلیاژی در محل‌هایی است که باید از فولادهای آلیاژی استفاده شود. تجهیزات حامل بخار، مانند لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر، محل‌هایی از سیستم بویلرند که معمولاً دچار این مشکل می‌شوند.

از آنجاکه در لوله‌های سوپرهیتر و ری‌هیتر، پوسته‌پوسته‌شدن بیش‌ازحد و (یا) شکست‌های لبه‌کلفت رخ می‌دهد (شکست خزشی)، احتمال اینکه انتخاب ماده نامناسب مشکل‌ساز شود،



وجود دارد. در صورت وقوع بیش گرمایش شدید، چنین شرایطی (پوسته‌پوسته‌شدن بیش از حد و شکست‌های لبه کلفت) در فولادهای کم‌آلیاژ نیز ایجاد می‌شود. این شرایط در فولادهای کربنی ساده، در دماهای پایین‌تری رخ می‌دهد. بنابراین با توجه به شرایط محیطی معمول در سوپرهیترها و ری‌هیترها، احتمال بروز این نوع خرابی در فولادهای کربنی بیشتر است. تذکر: تشخیص قطعی جنس لوله در محل، دشوار است؛ بنابراین باید مقطعی از لوله موردنظر برای آزمایش تشخیص آلیاژ، از آن جدا شود.

### ۴.۲۳. روش‌های پیشگیری از خرابی‌های ناشی از انتخاب ماده نامناسب

مسئولیت اصلی ممانعت از به‌کارگیری مواد نامناسب، متوجه سازندگان، بناکنندگان و خریداران بویلر است. پیشگیری از ایجاد این مشکل، نیازمند تبعیت دقیق از دستورالعمل‌های کنترل کیفی مناسبی است که از طراحی تجهیزات شروع می‌شود و تا نصب تجهیزات ادامه می‌یابد.

### ۵.۲۳. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر اثر

#### انتخاب ماده نامناسب

□ نمونه اول

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	سوپرهیتر ثانویه، گذر اول
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱/۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۹/۷ MPa (۱۴۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۷ cm (۲/۷۵ in)
سوخت:	جنس: فولاد کربنی
	پوست درخت

شرایط بهره‌برداری از بویلر: سوخت بویلر پوست درخت بوده است. علائم ناشی از خرابی: حین بهره‌برداری، لوله‌نشان داده‌شده در شکل ۲.۲۳ دچار شکست شده است. طی یک سال گذشته، سه خرابی مشابه در این بخش از سوپرهیتر رخ داده است. از بویلر به‌طور پیوسته به‌جز زمان تعمیرات دوره‌ای (شش‌ماهه)، بهره‌برداری می‌شده است. لبه‌های شکست، کلفت و دارای گوشه‌های تیز است. سطح خارجی، از لایه‌ای شبیه پوست درخت از جنس اکسید فلزی پوشیده شده و سطح داخلی، هموار و عاری از رسوب‌ها و محصولات خوردگی است.



شکل ۲.۲۳. بخشی از شکست لبه‌کلفت در یک لوله سوپرهیتر

آزمایش‌های ریزساختاری فلز، وجود گرافیت و کاربیدهای آهن کروی شده را در تمامی نقاط دیواره لوله نشان می‌دهند. اکسیداسیون درون‌دانه‌ای و لایه‌های ضخیم اکسید آهن نیز در تمام سطوح مشاهده می‌شود.

علت خرابی: برای مدت طولانی، از لوله در دمای بالاتر از دمای پوسته‌پوسته‌شدن فلز آن — برای فولاد کربنی، تقریباً ۵۳۸ تا ۵۶۶ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه فارنهایت) — بهره‌برداری شده است. خرابی‌های گذشته که نخستین بار یک سال پس از راه‌اندازی بویلر رخ داده است، نامناسب بودن نرخ فلاکس حرارتی و نرخ سیال خنک‌کن را در این سوپرهیتر نشان می‌دهد.

روش پیشگیری از خرابی: به‌نظر می‌رسد در صورتی که لوله‌ها از فولاد کم‌آلیاژ (SA 213-T22) ساخته می‌شدند، احتمال وقوع خرابی بسیار کم بود [1].

□ نمونه دوم

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	ری هیتر
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۲۰ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۱۹/۸ MPa (۲۸۷۵ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۷ cm (۲/۲۵ in).
سوخت:	جنس: فولاد کربنی زغال سنگ

شرایط بهره‌برداری از بویلر: این بویلر قبل از آخرین خرابی در بار پایه کار می‌کرده است، اما پیش از آن، در شرایط کاری حداکثر<sup>۱</sup> بهره‌برداری می‌شده است.

علائم ناشی از خرابی: شکست لبه کلفتی که در شکل ۳.۲۳ نشان داده شده، یکی از خرابی‌هایی است که به‌طور پراکنده در این بخش از بویلر رخ داده است. سطوح خارجی با لایه‌های اکسید آهن سیاه‌رنگی (فلز اکسید شده بر اثر حرارت) پوشیده شده‌اند که روی آن‌ها رسوب‌های روشن قرار گرفته‌اند. سطح داخلی نیز پوشیده از لایه‌های ضخیم اکسید آهن است.



شکل ۳.۲۳. شکست لبه کلفت در یک لوله ری هیتر. به درزهایی که در سطح خارجی و در امتداد شکست قرار گرفته‌اند، توجه کنید.

آزمایش‌های ریزساختاری فلز، وجود ذرات گرافیت متمرکز و کاربیدهای پراکنده را در دیواره لوله نشان می‌دهند. اکسیداسیون مرزخانه‌ای در تمام سطوح مشخص است. علت خرابی: خرابی این لوله، نتیجه مستقیم بهره‌برداری در دمای فراتر از حد پایداری حرارتی فلز است. لوله فولادی کم‌آلیازی (SA 213 T22) که لب‌به‌لب به لوله دچار شکست جوش داده شده بود، دچار خرابی نشده، بلکه فقط دچار تخریب حرارتی ملایم شده است [1].

□ نمونه سوم

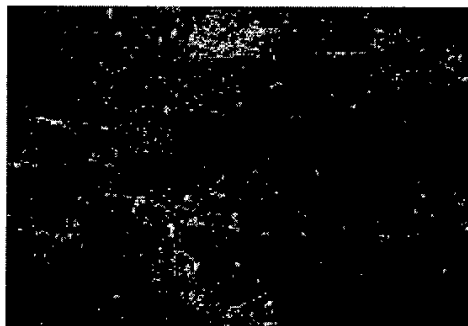
صنعت:	نیروگاه ۲۲۰ مگاواتی
محل نمونه:	سوپرهیتر میانی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۱۸ سال
فشار درام:	۱۶/۸ MPa (۲۴۳۹ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۴۴/۵ mm
	ضخامت: ۵/۶ mm
سوخت:	گاز و مازوت

علامت ناشی از خرابی: خرابی در نزدیکی محل جوش (با فاصله تقریباً ۱۰ سانتی‌متر) اتفاق افتاده و شکست از نوع لبه‌کلفت است. سطح خارجی نمونه به شدت دچار اکسیداسیون شده است (شکل‌های ۴.۲۳ و ۵.۲۳). شکل ۶.۲۳ سطح داخلی لوله را در منطقه خرابی نشان می‌دهد. خطوط موازی، نشان‌دهنده ترک‌های ایجادشده در لایه اکسیدی است. این امر ناشی از انبساط لوله بر اثر تنش و ترذیب‌دهن لایه اکسیدی است. بررسی ریزساختار لوله نشان می‌دهد فازهای فریت و پرلیت اولیه، کاملاً از بین رفته و کاربیدهای درشت کروی به‌وجود آمده‌اند (شکل ۷.۲۳). علت خرابی: آزمایش‌های کوانتومتری روی لوله گسیخته‌شده نشان می‌دهند لوله از جنس 10 CD5-05 معادل SA213 T11 است؛ در صورتی که در نقشه، جنس این سوپرهیترها فولاد 10CD9-10 معادل SA213 T22 گفته شده است. خرابی این لوله نتیجه خطا در استفاده از جنس مناسب هنگام نصب سوپرهیترهاست. درجه حرارت بهره‌برداری، فراتر از درجه حرارت پایداری حرارتی فولاد 10 CD5-05 بوده و در نتیجه لوله دچار بیش‌گرمایش بلندمدت شده است.

تذکره: دقت در ترک ایجادشده و خطوط اطراف آن نشان می‌دهد این خرابی بر اثر بیش‌گرمایش بلندمدت رخ داده است [۲].



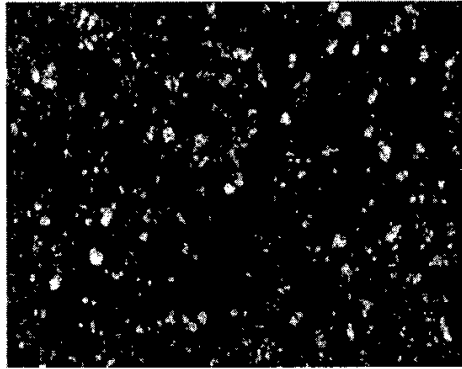
شکل ۴.۲۳. منطقه خرابی و وجود ترک‌هایی در امتداد لوله و شیارهایی عمود بر امتداد ترک



شکل ۵.۲۳. اکسیداسیون در سطح خارجی لوله؛ در محل گسیختگی.



شکل ۶.۲۳. سطح داخلی لوله در منطقه خرابی



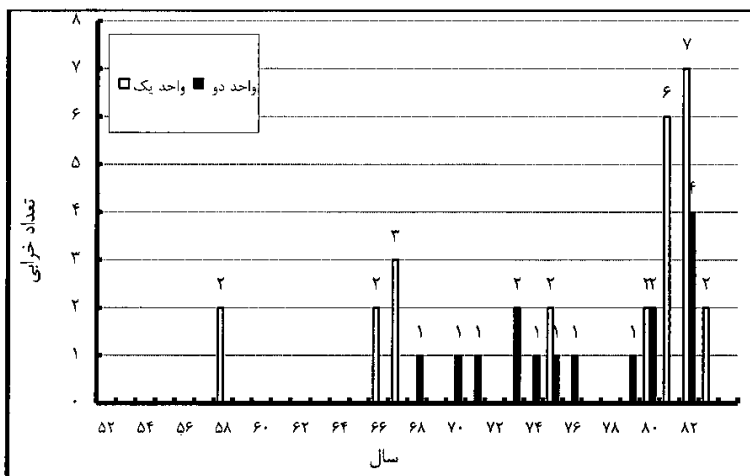
شکل ۷.۲۳. ساختار لوله در لبه شکست (بزرگ‌نمایی: ۱۰۰۰ برابر، حکاکی با محلول نایتال ۰.۳٪)

□ نمونه چهارم

نیروگاه ۶۰ مگاواتی	صنعت:
سوپرهیتر میانی	محل نمونه:
قطر خارجی: ۳۲ mm	مشخصه‌های لوله:
ضخامت اولیه: ۴ mm	
گاز و مازوت	سوخت:

از دو بویلر مشابه ۶۰ مگاواتی با عمر تقریباً مساوی (۳۰ سال) در نیروگاه تولید برق بهره‌برداری می‌شود (واحد I تقریباً ۶ ماه زودتر از واحد II راه‌اندازی شده است). آمار خرابی سوپرهیترهای این دو واحد در شکل ۸.۲۳ نشان داده شده است. بویلر واحد I تا کنون (اول تیرماه ۱۳۸۳) ۲۶ بار به دلیل خرابی سوپرهیترها از مدار خارج شده است؛ در صورتی که بویلر واحد II، ۱۵ بار به همین دلیل از مدار خارج شده است. بررسی دقیق سوپرهیترها نشان می‌دهد با وجود قیدشدن جنس لوله‌ها در نقشه‌های موجود (14MoV63)، در بویلر واحد I از فولاد 15Mo3 استفاده شده است. درصد عناصر آلیاژی فولادهای به‌کاررفته در واحدهای I و II و مقایسه آن‌ها با فولاد گفته‌شده در نقشه‌ها، در جدول ۱۲.۲۳ ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، فولاد 15Mo3 فاقد کروم است؛ در حالی که فولاد 14MoV63، ۰/۳٪ تا ۰/۱۶٪ کروم دارد. بررسی‌های متالوگرافی روی این دو بویلر نشان می‌دهد در لوله‌های واحد I، گرافیت‌شدن رخ داده

است؛ درحالی‌که در لوله‌های گسیخته‌شده واحد II، حفره‌های خزشی مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که افزودن ۰/۰۵٪ کروم به فولاد، کاربیدها را پایدار می‌کند و مانع گرافیت‌شدن می‌شود [۳].



شکل ۸.۲۳. مقایسه آمار خرابی سوپرهایترها در دو واحد I و II پس از ۳۰ سال بهره‌برداری

جدول ۱.۲۳. مقایسه فولادهای به‌کاررفته در واحدهای I و II با فولاد گفته‌شده در نقشه‌ها

	سوپرهایتر واحد I	15Mo3	سوپرهایتر واحد II	14MoV63
C	۰/۱۶	۰/۱۲ - ۰/۲۰	۰/۱۱	۰/۱۰ - ۰/۱۸
Si	۰/۲۰	۰/۱۰ - ۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۱۰ - ۰/۳۵
Mn	۰/۶۴	۰/۴۰ - ۰/۹۰	۰/۵۳	۰/۴۰ - ۰/۷۰
P	۰/۰۱۴	≤ ۰/۰۳۵	۰/۰۰۸	≤ ۰/۰۳۰
S	۰/۰۲۲	≤ ۰/۰۳۰	۰/۰۱۴	≤ ۰/۰۳۵
Cr	۰/۰۳	≤ ۰/۲۵	۰/۵۴	۰/۳۰ - ۰/۶۰
Mo	۰/۲۷	۰/۲۵ - ۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۵۰ - ۰/۷۰
V	-	-	۰/۳۲	۰/۲۲ - ۰/۳۲
Ni	-	-	۰/۲۱	-

## منابع

[1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

[۲] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، ارزیابی عمر باقیمانده لوله‌های سوپرهیت‌های واحد ۳ نیروگاه بندرعباس، شرکت مشانیر، بهمن ۱۳۸۲.

[۳] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، ارزیابی لوله‌های سوپرهیت‌های واحدهای ۱ و ۲ نیروگاه مشهد، تیر ۱۳۸۳.



## فصل ۲۴

### خوردگی گرافیتی [1]

#### ۱.۲۴. مکانسیم خوردگی

وقتی آب با قدرت خوردگی کم، با سطح قطعه چدنی در تماس باشد، یک پیل گالوانیک میان ذرات گرافیت موجود در چدن و فلز اطراف آن ایجاد می‌شود. ذرات گرافیت نسبت به فلز مجاور کاتد شده و بخش‌های فلزی چدن خورده می‌شوند. در نهایت، چدن به یک فلز زنگ‌زده حاوی ذرات گرافیت تبدیل می‌شود.

تذکر: ممکن است لوله‌ها و دیگر تجهیزات به شدت خورده شوند، اما از کار افتاده و خراب نشوند. محصولات خوردگی تا حدی استحکام مکانیکی دارند، اما ترد و شکننده‌اند. در صورتی که تجهیزات خورده شده تحت تنش قرار گیرند، ممکن است در نهایت خرابی رخ دهد.

#### ۲.۲۴. محل وقوع خوردگی

امکان خوردگی گرافیتی<sup>۱</sup> فقط در سازه‌های چدنی که چدن‌شان ذرات گرافیت داشته باشد وجود دارد؛ اعم از چدن‌های دارای گرافیت کروی<sup>۲</sup>، چدن‌های چکش‌خوار و چدن‌های خاکستری. هر چند چدن‌های دارای گرافیت کروی و چدن‌های چکش‌خوار اغلب مصون از خوردگی گرافیتی در نظر گرفته می‌شوند، اما این چدن‌ها نیز دچار خوردگی می‌شوند. در مقایسه با دیگر چدن‌ها، چدن‌های خاکستری به دلیل سهولت ریخته‌گری و ارزان بودن، کاربرد وسیع‌تری دارند، اما مقاومت آن‌ها در مقابل خوردگی کمتر است.

پمپ‌های آب تغذیه، مسیرهای تأمین آب، شیرها و دیگر تجهیزاتی که از چدن (که دارای گرافیت است) ساخته شده‌اند دچار این نوع خوردگی می‌شوند. از آنجاکه چدن اساساً در تجهیزات قبل از بویلر استفاده می‌شود، این نوع خوردگی در تجهیزات تصفیه آب و تجهیزات انتقال آب مشاهده می‌شود.

---

1. graphitic corrosion

2. nodular cast

تذکر: همان‌طور که گفته شد، فقط چدن‌های دارای گرافیت بر اثر خوردگی گرافیتی دچار آسیب می‌شوند. معمولاً بدترین حالت خوردگی گرافیتی، در چدن‌های خاکستری رخ می‌دهد. این امر به دلیل تفاوت‌های ریزساختاری در اندازه و توزیع ذرات گرافیت و دیگر تفاوت‌های موجود در ترکیب آلیاژی این چدن‌هاست.

### ۳.۲۴. عوامل خوردگی

خوردگی گرافیتی معمولاً به آرامی پیش می‌رود، به طوری که ممکن است وقوع خوردگی توجه‌برانگیز، ماه‌ها و حتی سال‌ها به طول انجامد. در این خوردگی، عوامل مؤثر عبارت‌اند از:

۱. pH: با کاهش pH، خوردگی تسریع می‌شود؛  
 ۲. شرایط راکد؛ این شرایط خوردگی را تسریع می‌کند؛ به ویژه وقتی آب سولفات زیادی داشته باشد؛

۳. اغتشاش: در صورت وجود اغتشاش، ممکن است محصولات خوردگی از محل خود کنده شوند و نابودی فلز سریع‌تر رخ دهد؛

۴. شرایط اسیدی، ضریب هدایت، نرمی آب و مقادیر یون‌های خورنده: در صورتی که آب کمی اسیدی باشد، ضریب هدایت بالا داشته باشد، نرم باشد و (یا) مقادیر بالای یون‌های خورنده مثل سولفات داشته باشد، خوردگی سریع‌تر رخ می‌دهد.

تذکر: در دوره‌های خارج از مدار بودن، خوردگی بیشتری رخ می‌دهد.

### ۴.۲۴. علائم خوردگی

می‌توان موارد زیر را از علائم خوردگی گرافیتی دانست:

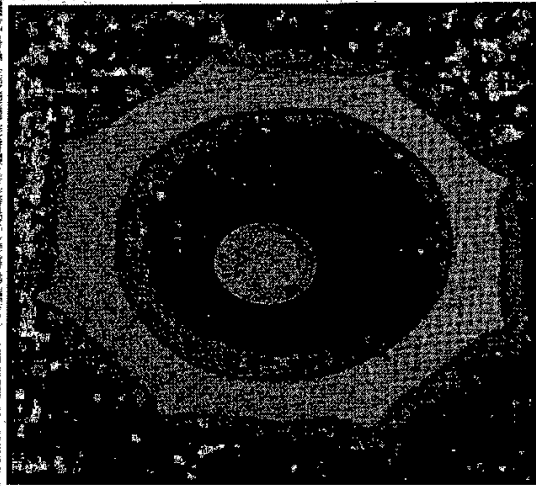
۱. بر اثر خوردگی گرافیتی، چدن به مخلوط نرمی از اکسیدهای آهن و گرافیت تبدیل می‌شود (شکل‌های ۱.۲۴ و ۲.۲۴)؛

۲. تماس با محصولات خوردگی، اثر سیاه‌رنگی روی دست باقی می‌گذارد و در صورتی که محصولات خوردگی به شکل مداد درآمده باشند، برای علامت‌گذاری روی صفحه قابل استفاده‌اند (شکل ۳.۲۴)؛

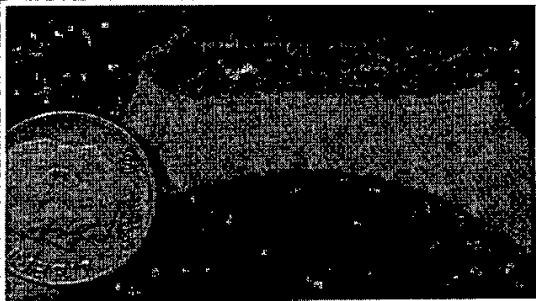
۳. خوردگی، غالباً به صورت یکنواخت رخ می‌دهد و تمام سطوحی که در معرض خوردگی قرار

## شکل ۲۴ خوردگی گرافیتی ۴۶۵

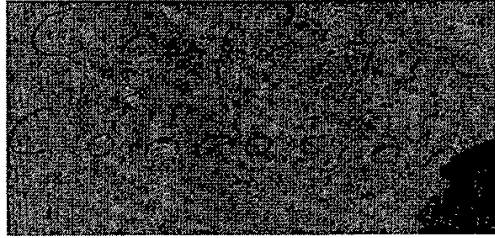
گرفته‌اند، تقریباً با عمق یکسانی خورده می‌شوند (شکل‌های ۴.۲۴ و ۵.۲۴). در صورت وجود رسوب‌های موضعی، به ویژه رسوب‌های دارای سولفات، کلرید و دیگر مواد اسیدی، ممکن است خوردگی پراکنده رخ دهد:



شکل ۱.۲۴ پروانه بومی که به شدت دچار خوردگی گرافیتی شده است. جنس پروانه چدن خاکستری است. به قسمت‌هایی از سطوح داخلی و خارجی که چدن خاکستری به زنگ و گرافیت تبدیل شده است، توجه کنید.



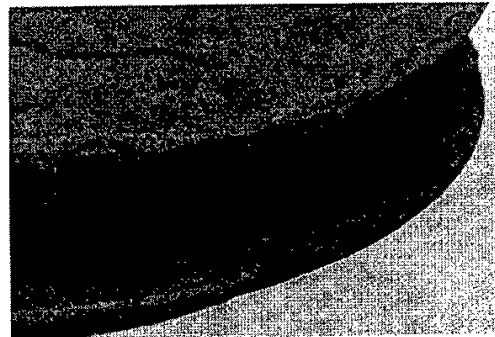
شکل ۲.۲۴ توجه کنید که چگونه فلز به‌طور یکنواخت به محصولات خوردگی تبدیل شده است. بره‌های پروانه حین بهره‌برداری از بین رفته‌اند، زیرا فلزی که دچار خوردگی گرافیتی شده، ترد است.



شکل ۳.۲۴. قطعه‌ای از یک لوله با جنس چدن خاکستری که بر اثر خوردگی گرافیتی خورده شده و برای نوشتن روی کاغذ استفاده می‌شود. محصولات خوردگی، ذره‌های گرافیت همراه با فلز زنگ‌زده‌اند.



شکل ۴.۲۴. پروانه شیری که بر اثر خوردگی گرافیتی، خورده شده است. شکل کلی قطعه تغییر نکرده است. لبه‌های پروانه کاملاً به محصولات ترد خوردگی تبدیل شده و در نتیجه شکسته‌اند.



شکل ۵.۲۴. خوردگی گرافیتی شدید پروانه یک پمپ آب تغذیه که از چدن خاکستری ساخته شده است. تکه‌هایی از محصولات خوردگی ترک خورده و از جایشان کنده شده‌اند. این امر باعث خوردگی یکنواخت شده است. به شکست در پره پروانه توجه کنید.

۴. نواحی خورده‌شده، با دست خالی و با ضربات ملایم یک وسیله سخت، شکسته می‌شوند. در محصولات خوردگی نرم و سیاه، می‌توان حفره ایجاد کرد. با نوک چاقو، می‌توان عمق نفوذ خوردگی را مشخص کرد؛

۵. وقتی خوردگی شدید یا طولانی مدت باشد، ممکن است کل قطعه به محصولات خوردگی تبدیل شود. در این صورت، سطح و ظاهر قطعه بدون تغییر باقی می ماند، به طوری که معمولاً برای آشکار کردن خوردگی، باید سطوح به دقت بازدید شوند یا تحت تنش قرار گیرند.

### ۵.۲۴ روش های پیشگیری از خوردگی

برای کاهش خوردگی گرافیتی، کارهای زیر مفیدند:

۱. انتخاب آلیاژ مناسب: در صورتی که چند خورده شده با آلیاژهای بدون گرافیت تعویض شود، خوردگی گرافیتی کاملاً حذف می شود. انتخاب آلیاژ مناسب برای جایگزینی، به شرایط خاص هر محیط بستگی دارد؛
۲. انجام عملیات شیمیایی مناسب: بالا بردن pH آب تا مقادیر خنثی یا کمی قلیایی، خوردگی را کاهش می دهد؛ به ویژه در مواقعی که مقادیر بالای یون های خورنده مانند کلرید و سولفات وجود داشته باشند. ممکن است استفاده صحیح از بازدارنده های شیمیایی، میزان رسوب ها را کاهش دهد؛
۳. تغییر شرایط بهره برداری: وقتی جریان آب کم باشد — مثلاً موقع خاموش بودن یا دوره های طولانی خارج از مدار بودن — خوردگی افزایش می یابد. شرایط رکود، خوردگی گرافیتی را تسریع می کند. باید از ایجاد این شرایط اجتناب شود.

### ۶.۲۴ بررسی یک نمونه از مشکلات به وجود آمده در بویلر صنایع گوناگون بر

#### اثر خوردگی گرافیتی

نوع بویلر:	صنایع غذایی
محل نمونه:	پمپ آب تغذیه
نحوه قرار گرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۴/۱ MPa (۶۰۰ psi)
مشخصه های لوله:	قطر: ۲۰/۳ cm (۸ in)
سوخت:	گاز طبیعی
	مشخصه های پمپ: دارای ۵ پره از جنس چدن خاکستری

پروانه یک پمپ کوچک آب تغذیه، زمانی که طبق برنامه بویلر برای تعمیر از مدار خارج شده بود، از محل خود بیرون آورده شده است. همه سطح پروانه به محصولات خوردگی نرم و سیاه‌رنگ تبدیل شده است. در برخی نقاط، هیچ اثری از آلیاژ اصلی پروانه باقی نمانده است. پره‌های پروانه کلاً خورده شده و ترک خورده‌اند. تکه‌هایی از محصولات خوردگی از جایشان کنده شده و ظاهری ناصاف ایجاد کرده‌اند (شکل ۵.۲۴). از پروانه به‌طور متناوب استفاده شده است، به‌طوری‌که طی دو سال گذشته، بیش از ۵۰٪ مواقع، از مدار خارج بوده است.

### منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

## فصل ۲۵

### جدایش عناصر آلیاژی [1]

#### ۱.۲۵. مکانیسم جدایش

جدایش عناصر آلیاژی<sup>۱</sup> نوعی خوردگی است که بر اثر آن، یک یا چند عنصر از آلیاژ خورده می‌شود. واضح است که این نوع خوردگی فقط در آلیاژهایی رخ می‌دهد که دو عنصر یا بیشتر داشته باشند. آلیاژهای مس-نیکل<sup>۲</sup> که نیکلشان خورده می‌شود و برنج که روی و آلومینیوم آن‌ها خورده می‌شوند، مستعد این نوع خوردگی‌اند. در این نوع خوردگی، عناصری از آلیاژ که مقاومتشان در محیط کمتر است، خورده می‌شوند. با توجه به عنصری که بر اثر این مکانیسم خرابی خورده می‌شود، نام خاصی به جدایش داده می‌شود. به‌طور مثال، در برنج‌های معمولی، روی از برنج جدا می‌شود و لذا به این نوع جدایش، جدایش روی<sup>۳</sup> گفته می‌شود. به جدایشی که نیکل از آلیاژهای مس-نیکل جدا شود، جدایش نیکل<sup>۴</sup> می‌گویند.

معمولاً جدایش روی به دو شکل موضعی و لایه‌ای رخ می‌دهد. بر اثر خوردگی موضعی دیواره لوله در لوله‌های تحت فشار، قسمت‌هایی از لوله از محل خود جدا می‌شوند (شکل ۱.۲۵). خوردگی‌های کلی‌تر، جدایش لایه‌ای روی نامیده می‌شوند (شکل ۲.۲۵).

آلیاژهای مس-نیکل بیشتر مستعد جدایش لایه‌ای‌اند، اما میزان خوردگی در آلیاژهای مس-نیکل نسبت به برنج‌ها ناچیز است. گرچه احتمال دارد مکانیسم جدایش موضعی و لایه‌ای شبیه یکدیگر باشند، اما نرخ خوردگی در جدایش موضعی ممکن است تا صدها میلی‌اینچ در سال برسد؛ در صورتی که در جدایش لایه‌ای، خوردگی‌های خفیف‌تر متداول است.

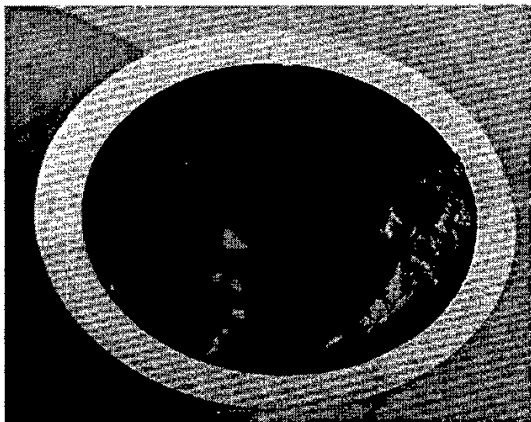
---

۱. dealloying. به این نوع خرابی، selective leaching و parting نیز گفته می‌شود.

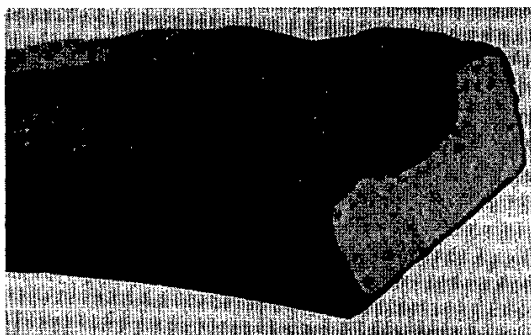
2. cupronickels

3. dezincification

4. denickelification



شکل ۱.۲۵. جدایش موضعی روی، زیر رسوب در یک لوله از جنس برنج آدمیرالتی (ADMIRALTY BRASS).



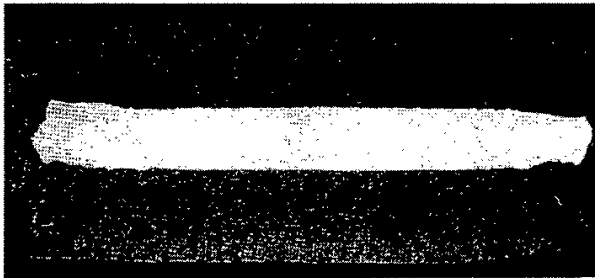
شکل ۲.۲۵. جدایش لایه‌ای روی، در اجزای برنجی پمپ.

جدایش قلع<sup>۱</sup> می‌تواند در مفرغ<sup>۲</sup> و برخی برنزهای فاسفوری رخ دهد؛ به‌ویژه در محیط‌های دارای بخار و آب‌های تغذیه<sup>۳</sup> داغ. صافی‌های بخار مونلی<sup>۳</sup>، در صورتی که در دماهای بالا در معرض بخار گوگردداز قرار گیرند، دچار جدایش می‌شوند (شکل ۳.۲۵).  
جدایش آلومینیم در برنزهای آلومینیم<sup>۴</sup> در آب‌های دارای pH بالا یا پایین، گزارش شده است.

1. destannification  
3. monel steam strainer

2. gunmetal  
4. duplex aluminium bronzes





شکل ۲۵.۳. مقطعی در صافی بخار موملی خورده شده. قسمت تیره ترکیبی از اکسیدها، سولفیدها و مس است (بزرگ‌نمایی: ۱۵ برابر).

### ۲.۲۵. محل وقوع جدایش

جدایش عناصر آلیازی، علاوه بر چدن‌ها که در فصل ۲۴ بررسی شدند، معمولاً در آلیاژهای حاوی مس رخ می‌دهد. وقوع این نوع خوردگی، در سیستم‌های آب تغذیه و نواحی بعد از بویلر شایع است. قسمت‌های دچار این نوع خوردگی، عبارت‌اند از هیترهای آب تغذیه فشار بالا، پروانه‌های برنزی پمپ‌ها، صافی‌های بخار موملی و تجهیزات جانبی بویلر مانند فشارسنج‌های برنجی. کندانسورها و مبدل‌های حرارتی نیز بارها دچار این نوع خوردگی می‌شوند.

### ۳.۲۵. عوامل جدایش

رسوب‌ها، آب‌های نرم (به‌ویژه آب‌های حاوی دی‌اکسید کربن)، انتقال حرارت، شرایط سکون، آب‌های دارای pH بالا یا پایین و آب‌های حاوی کلرید زیاد، باعث تسریع جدایش در آلیاژهای حاوی مس می‌شوند. افزودن مقادیر کمی آرسنیک، آنتیموان یا فسفر به برنج آدمیرالیتی، شدت جدایش روی را کاهش می‌دهد؛ هرچند در شرایط حاد، باز هم امکان جدایش وجود دارد.

### ۴.۲۵. علائم خرابی‌های ناشی از جدایش

آلیاژهای حاوی مس<sup>۱</sup>

در آلیاژهای حاوی مس، تقریباً هیچ‌گاه مس جدا نمی‌شود. دیگر عناصری که جدا می‌شوند، توده نسبتاً نرم و متخلخلی از مس را باقی می‌گذارند. فلزی که دچار این نوع خوردگی شده، نسبتاً ترد است و به‌آسانی با ضربه‌زدن یا خم کردن شکسته می‌شود. سطوح، اغلب سوراخ‌سوراخ

---

1. cupriferos

و ترک‌دار هستند، اما قطعه ابعاد اصلی خود را حفظ می‌کند. معمولاً رنگ نواحی دچار خوردگی، به قرمز تیره یا قرمز متمایل به نارنجی تغییر خواهد کرد (شکل‌های ۱.۲۵ و ۲.۲۵).

#### آلیاژهای مس-نیکل

لوله‌های مس-نیکل که در لوله‌های آب تغذیه فشاربالا استفاده می‌شوند، ممکن است دچار شکل خاصی از جدایش شوند. در زمان‌های خارج از مدار بودن، ممکن است هوا به داخل پوسته راه یابد و اکسیداسیون چشمگیری رخ دهد. حین بهره‌برداری عادی بعدی، اکسیدهای سطوح به مس احیا می‌شوند. در نهایت ممکن است ورقه‌های اکسید و (یا) فلز نازک‌شده از سطوح جدا شوند و ظاهری ناصاف و آفتاب‌سوخته به لوله بدهند (شکل ۴.۲۵). آلیاژهایی مانند آلیاژ مس-نیکل ۳۰:۷۰، مستعد این شکل از پوسته‌پوسته‌شدن هستند. آلیاژهایی مانند آلیاژ مس-نیکل ۲۰:۸۰ دچار خرابی‌های خفیف‌تری می‌شوند. چنین تلفاتی در آلیاژهای مس-نیکل ۱۰:۹۰ به ندرت رخ می‌دهد.

تذکره: معمولاً ساختار ناحیه خورده‌شده تفاوت چشمگیری با آلیاژ اصلی دارد، اما ابعاد ماکروسکوپیک ناحیه خورده‌شده، اغلب بدون تغییر باقی می‌ماند.



شکل ۴.۲۵. سطوح کنده‌شده در یک لوله مس-نیکلی مربوط به هیتر آب تغذیه فشاربالا

## ۵.۲۵. روش‌های پیشگیری از جدایش عناصر آلیاژی

موارد زیر توصیه می‌شوند:

۱. سطوح باید عاری از رسوب باشند؛
۲. زمان‌های خارج از مدار بودن باید تا حد امکان کوتاه باشد؛
۳. با استفاده از پوشش بخار یا نیتروژن، از تماس هوا با سطح جلوگیری شود؛
۴. کیفیت آب و بخار باید طوری کنترل شود که مقدار ترکیبات کلریدی و گوگردی حداقل شود؛
۵. در صورت نیاز، از آلیاژهای مناسب دیگر استفاده شود؛
۶. در مواردی که شرایط ایجاب می‌کند، باید از انواع محافظت‌شده<sup>۱</sup> برنج‌های آدمیرالتی<sup>۱</sup> استفاده شود.

## ۶.۲۵. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

### اثر جدایش عناصر آلیاژی

□ نمونه اول

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	صافی بخار توربین
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۶ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۱۰/۳ MPa (۱۵۰۰ psi)
مشخصه‌های نمونه:	جنس سیم: مومل،
	قطر سیم: ۰/۴ cm (۰/۱۵ in)
سوخت:	زغال‌سنگ

علائم ناشی از جدایش: بسیاری از بخش‌های صافی بخار توربین شکسته‌اند و فلز صافی به اکسید، سولفید و مس تبدیل شده است. فلز خورده‌شده ذرات مس بسیاری دارد که در محیطی از اکسید و سولفید قرار گرفته‌اند (شکل ۳.۲۵). ترک‌ها در امتداد عناصر مس واقع شده‌اند.

1. admiralty alloy (inhibited grade)

علت جدایش: علت این جدایش، به ورود ترکیبات گوگرددار به بخار نسبت داده می‌شود. این بویلر سابقه آلودگی بخار و ورود کف به لوله‌های سوپرهیتر داشته است.

□ نمونه دوم

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	ورودی اولین گذر هیتر آب تغذیه فشاربلا
نحوه قرارگرفتن نمونه:	افقی
عمر نمونه:	۷ سال
رژیم شیمیایی آب:	All Volatile
فشار درام:	۲/۶ MPa (۴۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۱/۶ cm (۰/۶۲۵ in)
ساخت:	جنس: آلیاژ مس-نیکل ۳۰: ۷۰ زغال سنگ

علائم ناشی از جدایش: ضخامت لوله‌های هیتر آب تغذیه تا ۱۵٪ کاهش یافته است (شکل ۴.۲۵).

علت جدایش: طی دو سال گذشته، بویلر بارها از مدار خارج شده است. در این حین، هوا به پوسته هیتر نشت کرده و باعث اکسیدشدن سطح شده است. تبدیل اکسید به مس حین بهره‌برداری عادی، باعث نازک‌شدن لوله‌ها شده است.

منابع

[1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

## فصل ۲۶

### خستگی

#### ۱.۲۶. مقدمه

بر اثر اعمال بارهای نوسانی و تنش‌هایی که کمتر از استحکام سیلان ماده‌اند، ترک‌هایی در قطعات ایجاد و سپس منتشر می‌شوند. این مکانیسم خرابی، خستگی<sup>۱</sup> نام دارد. ترک‌های خستگی، از نقاط با حداکثر تنش و حداقل استحکام شروع می‌شوند. در صورت اعمال تعداد کافی سیکل‌های تنش (کرنش)، شکست رخ خواهد داد (برای ایجاد شکست، تنش‌ها باید از نوع کششی باشند). در خستگی کم‌چرخه<sup>۲</sup> و در مواردی که نرخ کارسختی چشمگیر است، تنش‌های وارده از استحکام سیلان ماده بیشترند. تعداد سیکل‌های لازم تا شکست، تابع متغیرهای بسیاری است؛ اعم از مقدار تنش اعمالی، شکل موج تنش (کرنش)، شرایط محیطی و مشخصات متالورژیکی ماده [1].

#### ۲.۲۶. خستگی در بویلر

خستگی در تجهیزات بویلر، هنگامی باعث خرابی می‌شود که حین بهره‌برداری، تنش‌های مکانیکی نوسانی به قطعه اعمال شده، یا سیکل‌های حرارتی و گرادیان‌های حرارتی باعث اعمال تنش‌های بالا شوند. اعمال بارهای نوسانی در تجهیزات بویلر، امری رایج است. به‌طور مثال، نامیزان‌بودن جزئی تجهیزات دوار، نوسانات سریع فشار سیال (ضربه قوچ)، ارتعاشات ناشی از برخورد محصولات احتراق، و جریان‌داشتن سیال مغشوش در تجهیزات (به‌ویژه در دی‌های بالا) می‌توانند از جمله عوامل ایجاد بارهای نوسانی در بویلر باشند. از مهم‌ترین تنش‌های حرارتی

---

#### 1. fatigue

۲. به‌طور معمول، خستگی‌هایی را که در کمتر از ۱۰<sup>۴</sup> سیکل باعث شکست می‌شوند، خستگی کم‌چرخه (low cycle fatigue) می‌نامند.

متغیر که به تجهیزات بویلر اعمال می‌شود، تنش‌های هنگام راه‌اندازی و خواباندن است. گرادیان‌های حرارتی گذرا و تنش‌های ناشی از آن، ممکن است حین بهره‌برداری و به‌ویژه حین تغییر توان خروجی نیز ایجاد شوند. البته شدت این گرادیان‌های حرارتی نسبت به مواقع راه‌اندازی و خواباندن کمتر است.

با توجه به مطالب گفته‌شده، خستگی در بویلر ممکن است بر اثر دو عامل ارتعاش و سیکل‌های حرارتی رخ دهد [1].

#### ۱.۲.۲۶. خستگی ارتعاشی

در این نوع خستگی، ترک‌ها بر اثر ارتعاش لوله‌ها ایجاد و به‌صورت محیطی منتشر می‌شوند. معمولاً ترک‌ها در محل اتصال لوله‌ها به درام، دیواره و نگهدارنده‌ها ایجاد می‌شوند.

#### ۱.۱.۲.۲۶. روش‌های پیشگیری

برای پیشگیری از این نوع خستگی در بویلر، باید منابع تولید ارتعاش در بویلر را حذف کرد. برای جلوگیری از ارتعاشات ناشی از اغتشاش محصولات احتراق، ضربه‌گیرها و دمپرها ارتعاشی در بویلر تعبیه می‌شود. این دمپرها در میان و اطراف لوله‌ها نصب می‌شوند [2].

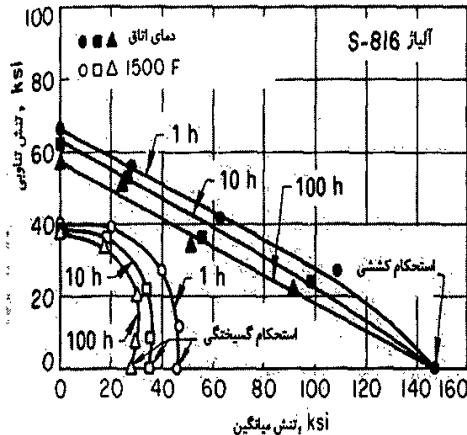
#### ۲.۲.۲۶. خستگی حرارتی

##### ۱.۲.۲.۲۶. اثر دما بر خستگی

به‌طور کلی خستگی می‌تواند در محدوده دمایی پایین‌تر از دمای ذوب فلز رخ دهد. در این محدوده، شکست خستگی ویژگی‌های ظاهری خود را داراست؛ فقط ممکن است در برخی مواقع، کمی تغییر شکل در قطعه ایجاد شود. در مجموع، رابطه دقیق میان استحکام خستگی و دما، به آلیاژ و دمایی که قطعه در معرض آن قرار دارد بستگی دارد، اما در دماهای بالا، استحکام خستگی و استحکام کششی کاهش می‌یابند. در شکل ۱.۲۶ اثر دما بر عمر خستگی یک آلیاژ نشان داده شده است.

با بهره‌برداری درازمدت از قطعه در دماهای بالا، ممکن است ریزساختار قطعه تغییر کند و استحکام خستگی آن کاهش یابد. یکی از عوامل کاهش استحکام خستگی، هم‌زمانی آن با خزش است (اثر هم‌زمانی خزش و خستگی بر یکدیگر در بخش ۳.۲۶ توضیح داده خواهد شد). از دیگر عوامل کاهش استحکام خستگی در دماهای بالا، فعال‌شدن مکانیسم‌های مخرب

اکسیداسیون و خوردگی دامبالا هستند. یکی از انواع خوردگی که در دماهای بالا فعال می‌شود، خوردگی  $V_2O_5$  است که از ترکیب اکسیژن و وانادیم سوخت تولید می‌شود و در صورت مایع شدن در سطح لوله، لایهٔ مگنتیت سطح را از بین می‌برد. در فصل ۱۱: «خوردگی ناشی از خاکستر مواد نفتی» توضیحات کامل‌تری در مورد این نوع خوردگی آمده است [1].



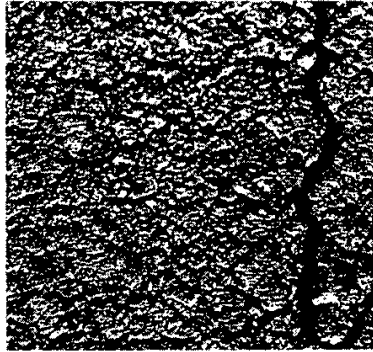
شکل ۱.۲۶. اثر دما بر عمر خستگی آلیاژ S-816 که با اعمال یک بار محوری نوسانی با بسامد ۲۱۶۰۰۰ سیکل در ساعت، تست شده است [1].

### ۲.۲.۲.۲۶. مکانیسم خستگی حرارتی

خستگی حرارتی ممکن است به خرابی‌های کم‌چرخه یا پرچرخه<sup>۱</sup> منجر شود. نوع کم‌چرخه معمولاً با کرنش‌های پلاستیک چشم‌گیر همراه است. این کرنش‌ها غالباً بر اثر تغییرات دمایی زیاد و اختلاف ضریب انبساط زیاد میان دو عضو سازه ایجاد می‌شوند. در صورتی که تغییرات دمایی شدید باشد یا به سرعت رخ دهد، شوک حرارتی وارد می‌شود. به‌طور کلی، ترک‌های ناشی از شوک حرارتی، در ده سیکل حرارتی یا کمتر ایجاد می‌شوند. وقتی ماده به‌اندازهٔ کافی ترد باشد، ممکن است این ترک‌ها حتی در یک سیکل ایجاد شوند.

خستگی حرارتی پرچرخه، غالباً بر اثر مرطوب‌شدن متناوب یک سطح داغ با مایعی که دمایش به‌طور چشمگیری پایین‌تر است، ایجاد می‌شود. در چنین مواقعی، سطح مرطوب

به سرعت منقبض می‌شود؛ درحالی‌که فلز زیرش نمی‌تواند با همان سرعت منقبض شود. این مسئله باعث ایجاد تنش‌های کششی دومحورهٔ بزرگ در سطح خیس شده می‌شود. پس از تبخیر رطوبت بر اثر جذب حرارت، دمای سطح به مقدار قبلی خود بازمی‌گردد و تنش‌های سطحی حذف می‌شوند. پس از تعداد سیکل‌های حرارتی کافی، ترک‌هایی روی سطح ظاهر می‌شوند (شکل ۲.۲۶).



شکل ۲.۲۶. ترک ناشی از خستگی حرارتی در سطح خارجی یک لولهٔ فولادی زنگ‌نزن (بزرگ‌نمایی: ۴ برابر)

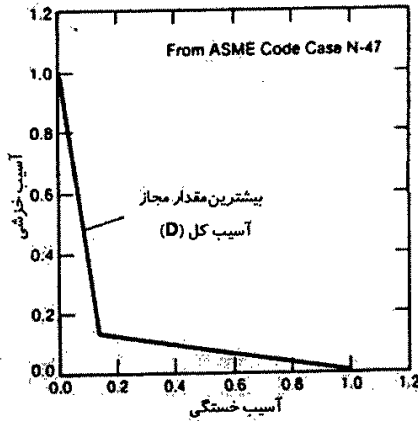
فولادهای فریتی در مقایسه با فولادهای آستنیتی به خستگی حرارتی مقاوم‌ترند. علت مقاوم‌تر بودن فولادهای فریتی، بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت هدایت و کمتر بودن ضریب انبساط حرارتی آن‌ها نسبت به فولادهای آستنیتی است. در مواقعی که به سطح یک قطعهٔ سرد حرارت داده می‌شود یا سطح یک قطعهٔ داغ، سرد می‌شود؛ ضریب انتقال حرارت هدایت بالاتر فولادهای فریتی، باعث ایجاد گرادیان حرارتی کمتری میان سطح فلز و داخل آن می‌شود. گرادیان حرارتی کمتر منجر به تنش‌های حرارتی کمتری در سطح می‌شود. ضریب انبساط حرارتی پایین‌تر فولادهای فریتی، باعث ایجاد انبساط کمتر و در نتیجه تنش حرارتی کمتر به‌ازای یک گرادیان حرارتی معین می‌شود. این دو عامل باعث ایجاد تنش‌های حرارتی کمتر و در نتیجه عمر کاری بیشتر فولادهای فریتی نسبت به فولادهای آستنیتی می‌شوند [1].

#### ۲.۲.۲.۲۶. روش‌های پیشگیری

با وجود اینکه می‌توان خستگی- خوردگی و خوردگی تحت تنش را با استفاده از مواد بازدارنده، پوشش و محافظ‌های گالوانیک به تأخیر انداخت، اما خستگی حرارتی، فارغ از پوشش فلز و کارهایی که برای مساعدتر کردن محیط انجام شده است، رخ می‌دهد و کنترل آن فقط با جلوگیری از کرنش‌های بیش‌ازحد بر اثر سیکل‌های حرارتی، ممکن است [1].







شکل ۴.۲۶. خسارت خزش - خستگی برای فولاد 2.25Cr-1Mo

#### ۴.۲۶. علائم خرابی‌های ناشی از خستگی

علائم موجود در سطوح شکست‌های ناشی از خستگی عبارت‌اند از:

۱. خطوط خستگی<sup>۱</sup> (شکل ۵.۲۶)

۲. علائم ساحلی<sup>۲</sup> (شکل ۶.۲۶)

۳. علائم قلابی‌شکل<sup>۳</sup> (شکل ۷.۲۶)

۴. شروع ترک‌ها از چند قسمت

۵. شکل‌گیری نواحی هموار

از میان این علائم، خطوط خستگی قابل اعتمادترین نشانه خستگی است. ترک‌های خستگی حرارتی ممکن است به صورت درون‌دانه‌ای<sup>۴</sup> یا مرزدانه‌ای<sup>۵</sup> منتشر شوند، اما انتشار درون‌دانه‌ای رایج‌تر است.

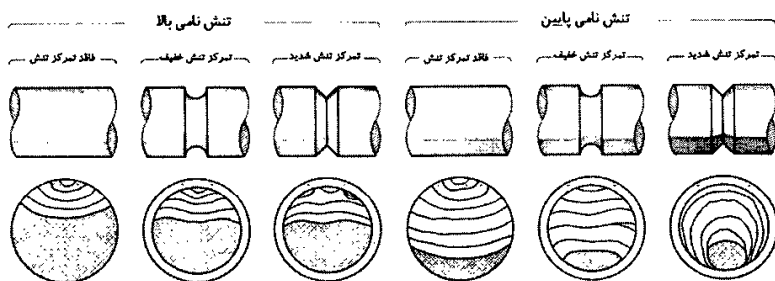
تذکره ۱: ترک‌های ناشی از خستگی حرارتی، گاهی شبیه ترک‌های ناشی از خستگی - خوردگی یا خوردگی تحت تنش هستند.

تذکره ۲: ویژگی ترک‌های ایجادشده بر اثر خستگی، متفاوت با ترک‌های خزشی است. ترک‌های خزشی در زیر سطح ایجاد می‌شوند، درحالی‌که ترک‌های خستگی از سطح قطعه

1. fatigue striations
3. ratchet marks
5. intergranular

2. beach marks
4. transgranular

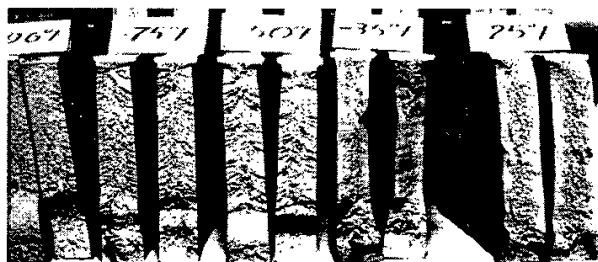
شروع می‌شوند. همچنین، در شکست ناشی از خستگی، مقطع به‌طور کامل جدا می‌شود و حالت صفحه‌مانند ایجاد می‌کند [1].



شکل ۵.۲۶. خطوط خستگی در مقاطع شکست ناشی از خستگی [1]



شکل ۶.۲۶. علائم ساحلی در مقطع شکست ناشی از خستگی [1]



شکل ۷.۲۶. علائم قلابی شکل در مقطع شکست ناشی از خستگی [1]

## ۵.۲۶. بررسی یک نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در صنایع نیروگاهی بر اثر

## خستگی

نوع بویلر:	نیروگاهی
محل نمونه:	مبدل حرارتی؛ سهراهی اتصال آب سرد برگشتی از مبدل حرارتی به آب داغ مسیر کنارگذر
مشخصه‌های لوله:	قطر لوله: ۶۴ mm (۲/۵ in).
جنس:	SA213-TP304 SA

موقعیت خرابی و شرایط بهره‌برداری: در یک مبدل حرارتی نیروگاهی، خرابی‌های پُرشماری در نزدیکی سهراهی که آب سرد برگشتی از مبدل حرارتی با آب داغ مسیر کنارگذر مخلوط می‌شده، رخ داده است. بازدیدهای چشمی و متالوگرافیکی نشان می‌دهد در هر یک از این خرابی‌ها، ترک‌هایی در جوش لب‌به‌لبی که سهراهی را به لوله متصل می‌کرده، ایجاد شده است. این ترک‌ها در مجاورت جوش نیز مشاهده می‌شوند. در این قسمت‌ها، آب داغ مسیر کنارگذر با آب سرد برگشتی از مبدل مخلوط می‌شده است. حین بهره‌برداری، نقاط گوناگون لوله در معرض دماهای ۲۹ تا ۲۸۸ درجه سانتی‌گراد (۸۵ تا ۵۵۰ درجه فارنهایت) قرار داشته‌اند.

علائم خرابی: ترک‌های ایجادشده از نوع درون‌دانه‌ای بوده و در جوش، نواحی مجاور به جوش و در لوله یا سهراهی ایجاد شده‌اند. این ترک‌ها باعث نشستی شده‌اند. آزمایش‌های متالوگرافیکی یکی از نمونه‌ها قبل از ایجاد نشستی، ترک طولی را در جوش نشان می‌دهد. نتیجه بررسی‌ها حاکی از آن است که ترک، حین بهره‌برداری گسترش یافته و از ابتدا وجود نداشته است.

بررسی‌ها روی یک نمونه دیگر از خرابی‌ها نشان می‌دهد ترکی در فاصله ۱۰۰ میلی‌متر (۴ اینچ) از نزدیک‌ترین جوش ایجاد شده است. این ترک خارج از ناحیه HAZ جوش است، اما ترک‌های دیگری نیز در سهراهی و جوش‌ها مشاهده می‌شوند.

علت خرابی: با توجه به انتشار تمامی ترک‌ها به‌صورت درون‌دانه‌ای، احتمال اینکه خستگی حرارتی عامل خرابی باشد، بیشتر است. در صورتی که عامل اصلی خرابی، خوردگی تحت تنش

باشد، انتظار مشاهده ترک‌های مرزدانه‌ای می‌رود. برای تعیین عامل ایجاد تنش‌های حرارتی، ترموکوپل‌هایی در دو سهراهی نصب شده‌اند (شکل ۸.۲۶). دمای نقاط گوناگون در طول و محیط لوله برای یک نمونه در شکل نشان داده شده است. دما برای سهراهی دیگری نیز مشابه این مقادیر است. نتیجه بررسی‌ها نشان می‌دهد گرادیان دمای محیطی و انعطاف‌پذیری<sup>۱</sup> نامناسب لوله‌ها، دلیل همه خرابی‌ها بوده‌اند.

عملیات تصحیحی برای پیشگیری از خرابی مجدد: برای کاهش تنش‌های حرارتی، سهراهی دوباره طراحی شده است. به انتهای آن، لوله‌ای با انعطاف‌پذیری بالا اضافه شده است. برای جلوگیری از تنش‌های حرارتی محیطی مخرب، دو بافل لوله‌ای شکل داخل لوله تعبیه شده است. در بافل داخلی، سیال داغ مسیر کنارگذر جریان دارد. بافل خارجی برای ایزوله کردن بافل درونی در برابر سیال سرد و همچنین فراهم کردن فضایی تعبیه شده است که سیال سرد بتواند سیال داغ را به صورت حلقوی در بر گیرد. دو سیال بعد از بافل‌ها مخلوط می‌شوند (شکل ۹.۲۶). مشخصات تجهیزات جدید به کاررفته، در جدول ۱.۲۶ آمده است [2].

جدول ۱.۲۶. مشخصات تجهیزات سهراهی پس از اعمال تغییرات لازم

محل قطعه	طول mm (in)	قطر mm (in)	ضخامت mm (in)	جنس	توضیحات
سهراهی	-	۱۰۰ (۴)	-	SA 213-TP 316H	-
لوله متصل به سهراهی	۴۵۵ (۱۸)	۱۰۰ (۴)	-	Schedule 80, Type 316H	انعطاف‌پذیری بالا
بافل داخلی	۴۵۵ (۱۸)	۳۸ (۱/۵)	۲/۱ (۰/۰۸۵)	فولاد زنگ‌نزن 316H	در دو انتها سوراخ
بافل خارجی	۴۰۰ (۱۶)	۵۰ (۲)	۲/۱ (۰/۰۸۵)	فولاد زنگ‌نزن 316H	در دو انتها باز



## فصل ۲۷

### خستگی - خوردگی

#### ۱.۲۷. مکانیسم خستگی - خوردگی [1]

خستگی - خوردگی<sup>۱</sup>، یک نوع خوردگی است که می‌تواند بدون تغلیظ ماده خوردنده رخ دهد. این نام‌گذاری به دلیل انتشار ترک در یک محیط خوردنده و تحت تأثیر تنش‌های کششی نوسانی است. تعریف فوق درباره بویلرها تا اندازه‌ای نادقیق است، زیرا در صورت وجود تنش‌های نوسانی کافی، اکسیدشدن طبیعی فلز به شکل مگنتیت، برای ایجاد ترک کافی است.

ترک‌ها به ترتیب زیر ایجاد می‌شوند:

۱. طی اولین مرحله از تنش نوسانی، دیواره لوله منبسط می‌شود. از آنجا که لایه اکسید نسبت به دیواره لوله تردتر است، لایه اکسید شکسته شده و در سطح آن، ترک‌های میکروسکوپی ایجاد می‌شود؛

۲. سطح فلز در ریشه ترک، اکسید می‌شود و شکافی میکروسکوپی در سطح فلز ایجاد می‌کند (شکل ۱.۲۷)؛

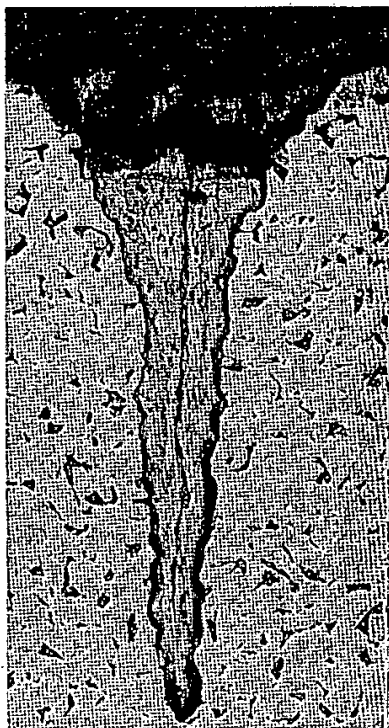
۳. طی چرخه انبساط بعدی، اکسید در امتداد این شکاف شکسته شده و در نتیجه شکاف عمیق‌تر می‌شود؛

۴. با اعمال مجدد تنش‌های نوسانی، ترک‌های گوه‌ای شکل در دیواره لوله منتشر می‌شوند (شکل ۲.۲۷). انتشار این ترک‌ها، در نهایت به شکست لوله یا ایجاد سوراخ در دیواره لوله منجر خواهد شد.

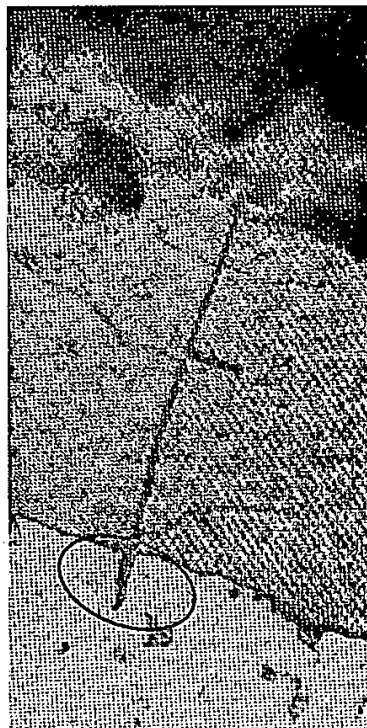
ترک‌ها همیشه در جهت عمود بر تنش اصلی منتشر می‌شوند. از این‌رو، اگر تنش نوسانی اصلی بر اثر نوسانات فشار داخلی ایجاد شده باشد، ترک‌هایی طولی شکل خواهند گرفت (شکل ۳.۲۷). اما اگر تنش نوسانی اصلی، یک تنش خمشی بر اثر انبساط و انقباض حرارتی لوله باشد، ترک‌های عرضی تشکیل می‌شوند (شکل ۴.۲۷).

---

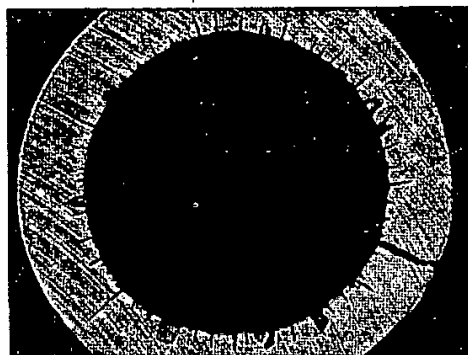
1. corrosion-fatigue cracking



شکل ۲.۲۷. ترک خستگی-خوردگی گسترش یافته  
(بزرگ‌نمایی: ۲۰۰ برابر)

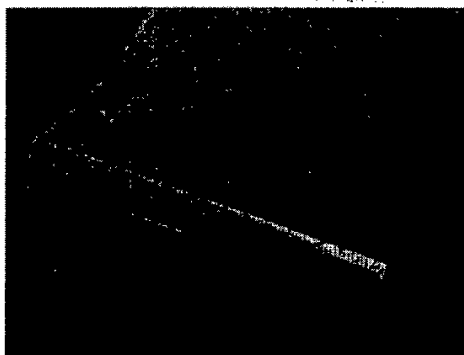


شکل ۱.۲۷. ترک خستگی-خوردگی که به‌نازگی در  
ریشه لایه اکسید ترک‌خورده ایجاد شده است  
(بزرگ‌نمایی: ۴۰۰ برابر)



شکل ۳.۲۷. مجموعه‌ای از ترک‌های طولی ناشی از نوسانات فشار داخلی





شکل ۴.۲۷. ترک‌های عرضی که از سطح داخلی شروع شده‌اند.

ترک‌های خستگی- خوردگی، معمولاً در مجاورت تکیه‌گاه‌ها و نقاط ثابت ایجاد می‌شوند. ترک‌ها می‌توانند از سطح خارجی، سطح داخلی یا هم‌زمان از هر دو سطح شروع شوند. آن‌ها غالباً در محل‌هایی ایجاد می‌شوند که حفره‌های سطحی وجود دارند. حفره‌های سطوح داخلی به‌عنوان محل تمرکز تنش عمل می‌کنند؛ لذا ترک‌ها اغلب از محل این حفره‌ها شروع می‌شوند.

### ۲.۲۷. محل وقوع خستگی- خوردگی [1]

خستگی- خوردگی در جایی می‌تواند رخ دهد که تنش‌های نوسانی نسبتاً بزرگ وجود داشته باشد. معمولاً در بویلرهایی که در بار حداکثر، به‌طور ناپیوسته (یا به‌عبارتی، به‌طور چرخه‌ای) بهره‌برداری می‌شوند، این نوع خستگی رخ می‌دهد. راه‌اندازی یا خواباندن سریع، به‌شدت احتمال خستگی- خوردگی را افزایش می‌دهد.

محل‌های معمول ایجاد ترک‌های خستگی- خوردگی عبارت‌اند از لوله‌های دیواره‌ای، لوله‌های ری‌هیتر، لوله‌های سوپرهیتر، لوله‌های اکونومایزر، هوازداها و محل اتصال فین‌ها به لوله‌های دیواره‌ای. همچنین، اتصالات یا موانع صلب مانند محل اتصال لوله‌ها به ورودی و خروجی هدرها، میله‌های نگهدارنده<sup>۱</sup> و تیرآهن‌های محافظ بویلر در مقابل انبساط<sup>۲</sup> از محل‌های معمول رخ‌دادن خستگی- خوردگی‌اند.

ترک‌های ناشی از خستگی- خوردگی در محل‌های زیر مشاهده می‌شوند:

۱. شیارهای موجود در سطوح داخلی لوله‌هایی که کاملاً از آب پر نشده‌اند (ترک‌ها، معمولاً در امتداد شیارها پیشرفت می‌کنند)؛

1. tie bars

2. buckstays

۲. نقاط ایجاد پوشش ناپایدار بخار در لوله‌های دیواره‌ای؛
۳. محل حفره‌های ناشی از خوردگی اکسیژنی که ممکن است در امتداد سطح آب یا در خطوط انتقال آب تغذیه قرار داشته باشند؛
۴. قسمت‌هایی از جوش که سرباره‌ها جمع شده‌اند یا ذوب به‌صورت ناقص انجام شده است؛
۵. محل‌هایی از مسیر دوده‌زداها که تنش‌های ارتعاشی ایجاد می‌شود؛
۶. مسیرهای تخلیه دائمی آب بویلر.

### ۳.۲۷. عوامل مؤثر [1]

دو عامل در ایجاد ترک بر اثر خستگی- خوردگی مؤثرند:

۱. تنش‌های کششی نوسانی: دو منبع معمول ایجاد تنش‌های کششی نوسانی، نوسانات فشار داخلی و جلوگیری از انقباض و انقباض آزاد قطعات توسط تکیه‌گاه‌های صلب‌اند؛
۲. محیطی که باعث اکسیداسیون خودبه‌خود سطح فلز شود: علاوه بر چنین محیطی، عوامل دیگری مانند pH و حجم اکسیژن محلول نیز ممکن است در خستگی- خوردگی سهم داشته باشند. بهره‌برداری در شرایط pH پایین و مقادیر بسیار بالای اکسیژن محلول می‌تواند باعث ایجاد حفره شود. حفره‌ها نیز به‌عنوان محل تمرکز تنش، برای شروع ترک‌های خستگی- خوردگی مناسب‌اند.

### ۴.۲۷. علائم خستگی- خوردگی [1]

۱. ترک‌ها معمولاً مستقیم و فاقد شاخه و انشعاب‌اند؛
  ۲. ترک‌ها معمولاً سوزنی یا گوه‌ای‌شکل هستند و به‌طور عمود بر سطح فلز منتشر می‌شوند؛
  ۳. ترک‌ها معمولاً به‌صورت مجموعه‌ای موازی ایجاد می‌شوند (شکل‌های ۳.۲۷ و ۴.۲۷) و اغلب بسیار ریزند، به‌طوری‌که بدون انجام آزمایش‌های بسیار دقیق، اطلاع از وجود آن‌ها دشوار است؛
  ۴. ترک‌ها گاهی فقط به‌شکل شیارهای سطحی در پوشش مگنتیت ظاهر می‌شوند؛
  ۵. ترک‌ها معمولاً طولیل نیستند.
- تذکره ۱: شکست‌های کامل ناشی از خستگی- خوردگی، اغلب لبه‌کلفت‌اند و شکل‌پذیری بسیار کمی دارند. ممکن است این ترک‌ها با دیگر خرابی‌های منتهی به شکست‌های لبه‌کلفت — مانند گسیختگی تنشی، حمله هیدروژنی، خوردگی تنشی و برخی بیش‌گرمایش‌های شدید — اشتباه گرفته شوند.

تذکر ۲: غالباً مشاهده ترک‌های خستگی- خوردگی دشوار است، زیرا با اکسیدهای آهن متراکم پوشیده می‌شوند.

تذکر ۳: ممکن است ترک‌های خستگی- خوردگی، هم‌زمان در دو یا چند قطعه واقع شده در یک موقعیت مشابه، ایجاد شوند.

تذکر ۴: برای تشخیص ترک‌ها می‌توان از تست‌های غیرمخرب اعم از تست‌های آلتراسونیک، رادیوگرافیک، مایع نافذ و ذرات مغناطیسی استفاده کرد.

### ۵.۲۷. روش‌های پیشگیری [1]

برای حذف یا کاهش ترک‌زایی بر اثر خستگی- خوردگی، می‌توان کارهای زیر را انجام داد:

۱. کنترل تنش‌های کششی نوسانی: کاهش یا حذف بهره‌برداری نوسانی از بویلر و طولانی کردن زمان‌های راه‌اندازی و خواباندن، ممکن است مؤثر باشد؛

۲. کنترل عوامل محیطی: حذف اکسیداسیون در نوک ترک عملی نیست، زیرا اکسیداسیون حتی در مقادیر بسیار کم اکسیژن محلول نیز خودبه‌خود رخ خواهد داد. کنترل pH و مقدار اکسیژن محلول، می‌تواند در حذف خوردگی حفره‌ای منجر به حذف نقاط معمول شروع ترک خستگی- خوردگی، مؤثر باشد؛

۳. طراحی مجدد تجهیزات مؤثر: در مواردی که ترک‌های خستگی- خوردگی به‌طور متناوب ایجاد می‌شوند، ممکن است بهینه‌کردن مواردی مانند شکل جوش و طراحی مجدد نحوه اتصال لوله برای حذف یا کاهش موانع موجود بر سر راه انبساط و انقباض حرارتی ضروری باشد.

### ۶.۲۷. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

#### اثر خستگی- خوردگی

□ نمونه اول [1]

نوع بویلر:	صنعتی
محل نمونه:	مسیر تخلیه هدر ری‌هیتر
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۴/۸ cm (۱/۸۷۵ in)
	جنس: فولاد کم‌آلیاژ

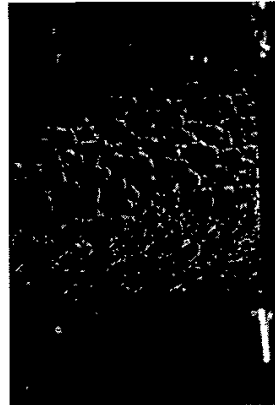
علائم ناشی از خرابی: ترک‌ها و درزهای متقاطع در سطح داخلی لوله تخلیه و در یک انتهای آن واقع شده‌اند (شکل‌های ۵.۲۷ و ۶.۲۷). در نواحی دورتر از انتهای لوله، ترک و درز وجود ندارد.

علت خرابی: آزمایش‌های ریزساختاری نشان می‌دهد ترک‌های خستگی-خوردگی در دیواره منتشر شده‌اند. خستگی حرارتی زمانی رخ می‌دهد که سطح به‌سرعت و پی‌درپی گرم و سرد شود. سردکردن سریع سطح فلز، باعث تنش‌های سهمجوره شدیدی می‌شود که می‌توانند ترک‌های متقاطعمانند آنچه در شکل‌ها نشان داده شده است، ایجاد کنند. ممکن است بر اثر قرارگرفتن بخشی از مسیر لوله‌کشی در معرض آب سرد، لوله سریع سرد شده باشد. علائم بیش‌گرمایش ملایمی نیز مشاهده می‌شود.

روش پیشگیری از خرابی: جلوگیری از سردشدن تناوبی و سریع فلز، برای حذف این مشکل ضروری است.



شکل ۶.۲۷. مقطعی از لوله که ترک‌ها در آن مشاهده می‌شود.



شکل ۵.۲۷. ترک‌های خستگی حرارتی روی سطح داخلی

□ نمونه دوم [1]

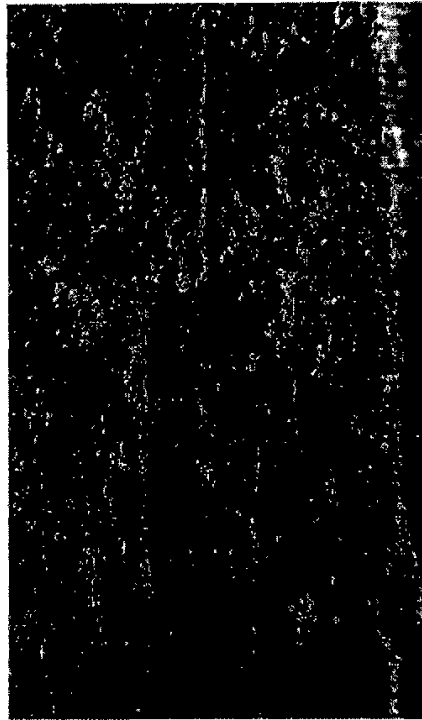
نوع بویلر:	کاغذسازی
محل نمونه:	سوپرهیتر بویلر نیروگاهی، در نزدیکی هدر خروجی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۸/۶ MPa (۱۲۵۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۴/۴ cm (۱/۷۵ in)،
	جنس: فولاد کم‌آلیاز

علائم ناشی از خرابی: شکست محیطی لبه کلفتی که در شکل ۷.۲۷ نشان داده شده، اولین خرابی سوپرهیتر در این بویلر است. بازدیدهای چشمی دقیق سطوح داخلی و خارجی مجاور به شکست، وجود ترک‌های ثانویه را نیز نشان می‌دهد (شکل ۸.۲۷). بررسی‌های ریزساختاری سطوح داخلی و خارجی دیواره لوله، وجود ترک‌های درون‌دانه‌ای بدون انشعاب را در نزدیکی محل شکست تأیید می‌کنند.

علت خرابی: انتشار محیطی ترک نشان می‌دهد تنش‌های خمشی چرخه‌ای متناوبی که ممکن است بر اثر انقباض و انقباض حرارتی لوله ایجاد شده باشد، عامل خرابی است.



شکل ۷.۲۷. ظاهر شکست ترد ناشی از خستگی- خوردگی



شکل ۸.۲۷. ترک‌های خستگی- خوردگی ثانویه روی سطح خارجی (بزرگ‌نمایی: ۶/۵ برابر)

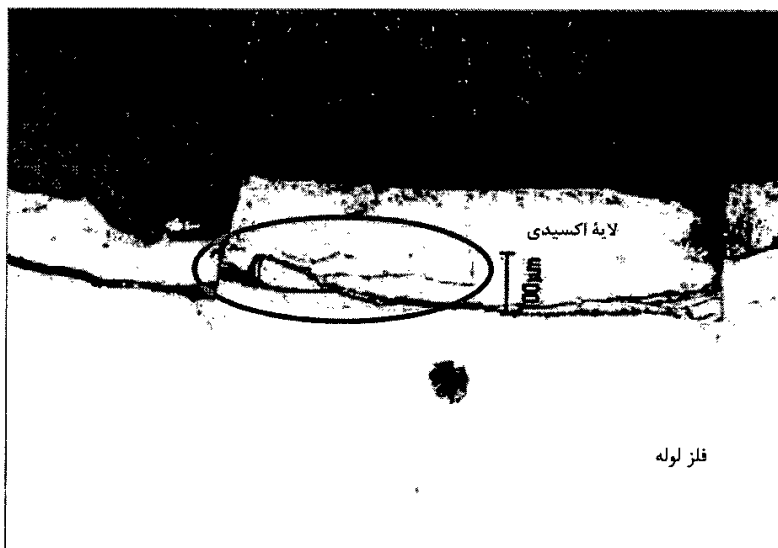
□ نمونه سوم [۲]

نوع بویلر:	نیروگاه ۶۰ مگاواتی
محل نمونه:	سوپرهیتر نهایی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	زانبویی ۸۰° (عمودی به مایل)
فشار درام:	۹/۹ MPa (۱۴۳۶ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۳/۲ cm (۱/۲۶ in).
	ضخامت اولیه: ۰/۴ cm (۰/۱۶ in)
سوخت:	جنس: فولاد 15Mo <sub>3</sub> (استاندارد آلمان - DIN) مازوت و گاز

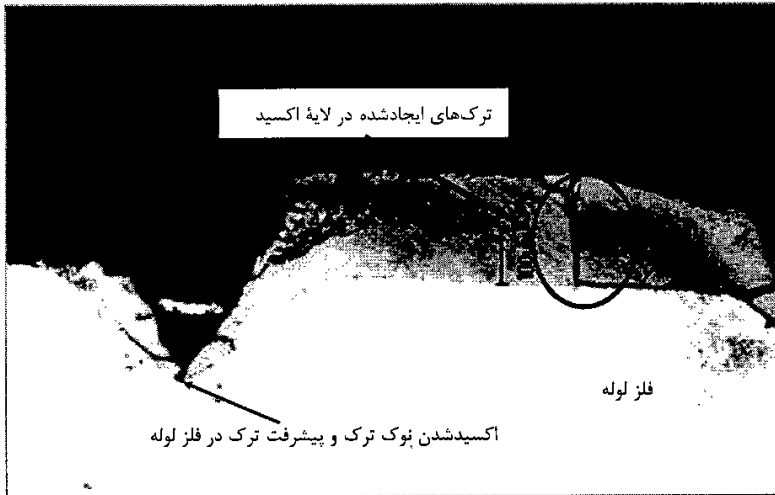
شرایط بهره‌برداری از بویلر: از بویلر در بار نامی و به‌طور ناپیوسته بهره‌برداری می‌شده است. علائم ناشی از خرابی: در شکل ۳۹.۴ ترک‌های ایجادشده داخل لوله نشان داده شده است. در شکل ۹.۲۷، ضخامت لایه اکسید در نمونه متالوگرافی اچ‌نشده مشاهده می‌شود.

علت خرابی: خرابی لوله در اثر دو مکانیسم خرابی خزش و خستگی- خوردگی رخ داده است. ترک‌های نشان‌داده‌شده در شکل ۳۹.۴، ابتدا بر اثر خزش ایجاد شده‌اند. فلز لوله در انتهای ترک، اکسید شده و لایه محافظ  $Fe_3O_4$  در انتهای ترک ایجاد می‌شده است. در مواقع راه‌اندازی و خواباندن بویلر و تغییرات بار، از آنجا که لایه ترد اکسید نمی‌تواند هم‌زمان با فلز لوله منبسط و منقبض شود، ترک‌هایی در لایه اکسید تشکیل و فلز لوله مجدداً در انتهای ترک، اکسید می‌شده است. تکرار این شرایط، باعث پوسته‌پوسته‌شدن لایه اکسیدی (شکل ۹.۲۷) و پیشرفت ترک در لوله شده است (شکل ۱۰.۲۷).

تذکر: ممکن است ذراتی از اکسید ایجادشده داخل لوله، از محل خود کنده شده و باعث سایش در توربین شوند.



شکل ۹.۲۷. ترک‌های ایجادشده در لایه اکسید



شکل ۱۰.۲۷. پیشرفت ترک در فلز لوله

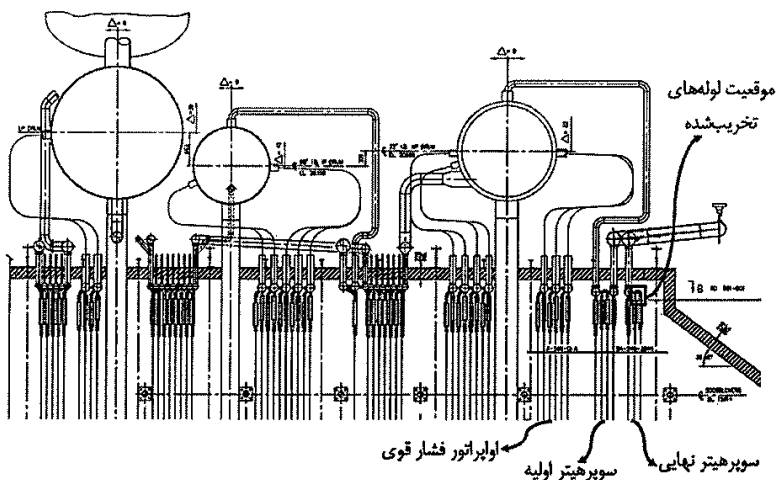
□ نمونه چهارم [۳]

نوع بویلر:	نیروگاه سیکل ترکیبی
محل نمونه:	لوله‌های سوپرهیتر نهایی
نحوه قرارگرفتن نمونه:	زانویی $180^\circ$ (U-type) در سوپرهیتر نهایی
عمر نمونه:	۲۷ سال
رژیم شیمیایی آب:	CWT
فشار درام:	۹/۹ MPa (۱۴۳۶ psi)
شوايط کاری:	دمای خارجی لوله حین کارکرد بویلر: $535-560^\circ\text{C}$
مشخصه‌های اسمی لوله:	تعداد کل خاموش و روشن شدن بویلر: حدود ۱۵۰۰ بار ASME SA213-T22

علائم ظاهری: تعدادی از لوله‌های سوپرهیتر نهایی در ناحیه زانویی دچار شکست محیطی لبه کلفت شده است. شکل ۱۱.۲۷ موقعیت قرارگیری لوله‌های تخریب‌شده روی نقشه بویلر، و شکل ۱۲.۲۷ تصویر ظاهری نمونه لوله‌های تخریب‌شده را نشان می‌دهند. مشاهدات



ماکروسکوپی حاکی از آن است که در همه نمونه‌ها ترک‌های محیطی در راستای شعاع لوله منتشر شده و در نهایت به شکست محیطی (عرضی) لبه کلفت منجر شده است.



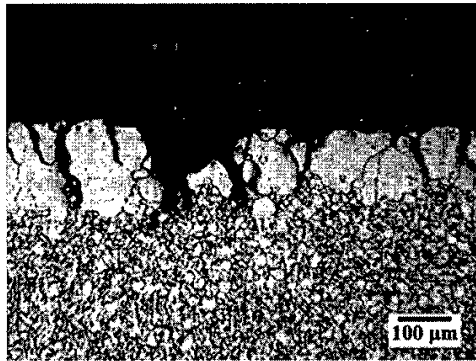
شکل ۱۱.۲۷. بخشی از نقشه بویلر بازیافت حرارتی نیروگاه سیکل ترکیبی و موقعیت لوله‌های سوپر هیتر نهایی تخریب شده



شکل ۱۲.۲۷. تصویر ظاهری از موقعیت لوله‌های تخریب شده

با توجه به بررسی‌های انجام شده روی لوله‌های تحت آزمایش، ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با جنس گزارش شده از سوی نیروگاه (ASTM A213-T2) مغایرت دارد. ارزیابی‌های میکروسکوپی و خواص مکانیکی حاکی از آن است که تغییرات ریزساختاری ناشی از پدیده بیش گرمایش در نمونه لوله رخ نداده و مکانیسم اصلی وقوع شکست، خستگی- خوردگی است.

این مکانیسم بر اثر وجود تنش‌های نوسانی در حضور یک محیط خورنده نظیر اکسیداسیون طبیعی فلز در شرایط کاری بویلر حادث می‌شود. تنش‌های نوسانی بر اثر گرم و سرد شدن ناگهانی و سریع لوله‌ها هنگام روشن و خاموش شدن پرتکرار بویلر ایجاد می‌شود. مشاهده ترک‌های مرزخانه‌ای حاوی ترکیبات اکسید آهن از سطح خارجی و ترک خوردن لایه‌های اکسیدی موجود در سطوح داخلی، گواهی بر اعمال تنش‌های حرارتی ناگهانی به لوله‌هاست (شکل ۱۳.۲۷). این موضوع باعث افزایش میزان تنش طولی وارد شده بر لوله در مقایسه با تنش محیطی (تنش هوپ) و در نتیجه وقوع شکست عرضی در امتداد شعاع لوله شده است. به‌طور کلی، مکانیسم اصلی خرابی، خستگی- خوردگی بوده است که از مهم‌ترین علل وقوع آن می‌توان به بهره‌برداری نامناسب، انتخاب ماده نادرست و احتمالاً آثار فرایند خمکاری اشاره کرد.



شکل ۱۳.۲۷. تصویر میکروسکوپ نوری از سطح خارجی مقطع طولی نمونه لبه ترک

## منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [۲] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم، ارزیابی لوله‌های سوپرهیتر واحدهای ۱ و ۲ نیروگاه مشهد، تیر ۱۳۸۳.
- [۳] سلطانلو، مصطفی، محمدحسین بابایی، بررسی علل شکست لوله‌های سوپرهیتر بویلر باز یافت در نیروگاه خوی، پژوهشگاه نیرو، خرداد ۱۳۹۹.

## فصل ۲۸

### خوردگی تحت تنش [1]

#### ۱.۲۸. مکانیسم خوردگی تحت تنش

خوردگی تحت تنش<sup>۱</sup> به خرابی‌هایی گفته می‌شود که بر اثر اندرکنش تنش کششی و ماده خوردنده خاصی که فلز به آن حساس است، ایجاد می‌شوند. تنش‌های کششی می‌توانند از خارج اعمال شوند یا به صورت پسماند در قطعه وجود داشته باشند. تنش‌های خارجی حین بهره‌برداری ایجاد می‌شوند و شامل تنش‌های محیطی ناشی از فشار داخلی<sup>۲</sup> و تنش‌های خمشی ناشی از انبساط و انقباض حرارتی (در مواقعی که امکان انبساط و انقباض آزاد قطعات وجود ندارد) هستند. تنش‌های پسماند به تنش‌هایی گفته می‌شود که در فلز وجود دارند. این تنش‌ها حین فرایندهای ساخت، مانند جوشکاری و خمکاری لوله‌ها ایجاد می‌شوند. تنش‌های حلقوی پسماند نیز ممکن است از فرایند ساخت باقی مانده باشند.

فولادهای کربنی در بویلر، به هیدروکسید سدیم تغلیظ‌شده حساس‌اند. فولادهای زنگ‌نزن به کاررفته در بویلر، علاوه بر هیدروکسید سدیم، به کلریدهای تغلیظ‌شده نیز حساس‌اند. وجود هم‌زمان دو عامل تنش کششی و ماده خوردنده، باعث ایجاد ترک‌هایی در فولاد خواهد شد.

#### ۲.۲۸. محل وقوع خوردگی تحت تنش

اصولاً ترک‌های ناشی از خوردگی تحت تنش، می‌توانند در محلی ایجاد شوند که ماده خوردنده خاصی که فلز به آن حساس است و همچنین تنش‌های کششی کافی، هم‌زمان وجود داشته باشند. با توجه به بهبود فرایندهای شیمیایی تصفیه آب و طراحی بویلر، در حال حاضر ایجاد ترک بر اثر خوردگی قلیایی تحت تنش<sup>۳</sup> کمتر از گذشته است. اما به‌طور کلی، ترک‌های ناشی از خوردگی تحت تنش ممکن است در لوله‌های حاوی آب، لوله‌های سوپر‌هیت و لوله‌های

---

1. stress-corrosion cracking

2. hoop stress

3. caustic stress-corrosion cracking

ری‌هیتر ظاهر شوند. این ترک‌ها می‌توانند در اجزای تحت تنش درام بخار، مانند پیچ‌ها نیز ایجاد شوند (شکل ۱.۲۸).



شکل ۱.۲۸. پیچ مربوط به درام بخار که بر اثر خوردگی قلیایی تحت تنش، دچار خرابی شده است. به تردبودن ظاهر شکست توجه کنید.

### ۳.۲۸. عوامل خوردگی تحت تنش

دو عامل در ایجاد ترک با مکانیسم خوردگی تحت تنش اثرگذارند:

۱. قرارگیری فلز در معرض تنش‌های کششی به‌اندازه‌ی کافی بالا؛ عامل این تنش‌ها، شرایط بهره‌برداری و روش تولید (تنش‌های پسماند) است؛

۲. تغلیظ ماده‌ی خورنده‌ای که فلز به آن حساس است در محل فلز تحت تنش؛ این ماده‌ی خورنده، برای فولاد کربنی مورد استفاده در سیستم بویلر، هیدروکسید سدیم و برای فولادهای زنگ‌نزن می‌تواند هیدروکسید سدیم و کلریدها باشد (تغلیظ مواد خورنده ممکن است به یکی از شکل‌هایی که در فصل ۶: «خوردگی قلیایی» شرح داده شد، رخ دهد). نشستی‌های بسیار کم نیز ممکن است به تغلیظ مواد خورنده منجر شود.

تذکره ۱: ترک خوردگی در خوردگی قلیایی تحت تنش، به‌ندرت در قطعاتی از بویلر اتفاق می‌افتد که در دماهای کمتر از ۱۴۹ درجه‌ی سانتی‌گراد (۳۰۰ درجه‌ی فارنهایت) بهره‌برداری می‌شوند.

تذکره ۲: تغلیظ هیدروکسید سدیم در حدود ۵٪ نیز باعث ایجاد ترک می‌شود، اما تغلیظ به‌اندازه‌ی ۲۰٪ تا ۴۰٪، به‌شدت احتمال ایجاد ترک را افزایش می‌دهد.

### ۴.۲۸. علائم خوردگی تحت تنش

- موارد زیر را می‌توان از علائم ایجاد ترک در خوردگی تحت تنش دانست:
۱. این مکانیسم خوردگی، همواره و فارغ از شکل‌پذیری فلز، شکست‌های لبه‌کلفت ایجاد می‌کند؛
  ۲. ترک‌ها، اغلب شاخه‌شاخه‌اند و در امتداد مرزدانه‌ها پیش می‌روند؛
  ۳. ممکن است علائمی مبنی بر وجود هیدروکسید سدیم تغلیظ‌شده مثل رسوب‌های نسبتاً سفید و بسیار قلیایی و مگنتیت‌های کریستالی، در محل ترک مشاهده شوند.
- تذکر ۱: بر اثر این نوع خرابی، ممکن است خوردگی چشمگیری در قطعه به‌وجود نیاید. به‌طور مثال، ترکیب هیدروکسید سدیم تغلیظ‌شده، مقداری سیلیکات محلول و تنش‌های کششی، باعث ایجاد ترک‌های مرزدانه‌ای پیوسته در فولاد کربنی خواهد شد (شکل ۲.۲۸). با انتشار ترک‌ها، استحکام فلز از حد مجاز کمتر می‌شود و شکست ترد و لبه‌کلفت رخ می‌دهد.



شکل ۲.۲۸. ترک‌های ناشی از خوردگی قلیایی تحت تنش، بر اثر این مکانیسم خرابی، ترک‌های مرزدانه‌ای پیوسته، در دیواره لوله منتشر شده‌اند.

تذکر ۲: در صورتی که خرابی رخ نداده باشد، ممکن است مشاهده ترک‌های ناشی از خوردگی تحت تنش با چشم غیرمسلح دشوار باشد، زیرا ترک‌ها بسیار ریز و باریک‌اند. در این موارد، استفاده از تست‌های مایع نافذ، ذرات مغناطیسی و آلتراسونیک در نواحی مظنون، وجود

احتمالی ترک‌ها را مشخص می‌کند. برای نفوذ مایع در ترک‌های ریز، باید زمان باقی‌ماندن مایع نافذ روی سطح در حال بررسی افزایش یابد.

تذکر ۳: با توجه به اینکه مکانیسم‌های خرابی دیگری مانند حمله هیدروژنی، خستگی-خوردگی، شکست خزشی و برخی بیش‌گرمایش‌های شدید نیز شکست‌های لبه‌کلفت ایجاد می‌کنند، ممکن است تشخیص عامل خرابی آسان نباشد. برای اطمینان از اینکه ترک‌ها بر اثر خوردگی تحت تنش ایجاد شده‌اند، آزمایش‌های متالوگرافی ضروری است.

### ۵.۲۸. روش‌های پیشگیری از خوردگی تحت تنش

برای پیشگیری از مشکلات ناشی از خوردگی تحت تنش، کنترل تنش‌های کششی و پیشگیری از تغلیظ مواد خورنده ضروری است. تنش‌های کششی می‌توانند به‌صورت خارجی یا پسماند باشند. برای حذف تنش‌های حلقوی، خمشی و پسماند، باید به نکات زیر توجه داشت:

۱. به‌طور کلی، تنش‌های حلقوی کمترین کنترل‌پذیری را دارند، زیرا در لوله‌های بویلر و دیگر اجزای تحت فشار، تنش حلقوی خودبه‌خود ایجاد می‌شود؛
  ۲. شاید بتوان تنش‌های خمشی را با تغییر پارامترهای بهره‌برداری و طراحی مجدد نواحی آسیب‌پذیر دچار مشکل، کاهش داد یا حذف کرد؛
  ۳. تنش‌های پسماند به تنش‌هایی گفته می‌شود که در فلز وجود دارند. این تنش‌ها حین فرایندهای ساخت مانند جوشکاری و خمش لوله‌ها ایجاد می‌شوند. تنش‌های حلقوی پسماند نیز ممکن است از فرایند ساخت باقی مانده باشند.
- به‌طور کلی، حذف مواد خورنده تغلیظ‌شده، موفقیت‌آمیزترین روش کاهش و حذف خوردگی تحت تنش است. برای جلوگیری از تغلیظ مواد خورنده، ابتدا می‌توان کارهای زیر را انجام داد:

۱. جلوگیری از آغاز جوشش لایه‌ای ناپایدار (DNB)؛
  ۲. حذف رسوب‌ها از سطوح داخلی؛
  ۳. جلوگیری از ایجاد سطح آب و سطح بخار در تجهیزاتی که فلاکس حرارتی بالایی به آن‌ها وارد می‌شود.
- در مراحل بعدی، می‌توان کارهای زیر را انجام داد:
۱. جلوگیری از نشئی نمک‌های مولد قلیا در کندانسورها، مبدل‌های حرارتی، مسیر سیکل و

سیستم‌های حذف‌کننده مواد معدنی<sup>۱</sup>

۲. جلوگیری از آلودگی آب دی‌سوپرهیترها به مواد قلبیایی یا کلریدها

۳. جلوگیری از ورود کف به سوپرهیترها

تذکره ۱: استفاده از مواد بازدارنده مانند نیترات سدیم و ترکیبات آن و یکی از انواع مواد آلی انتخاب شده<sup>۲</sup>، برای کاهش ترک‌های ناشی از خوردگی تحت تنش قلبیایی، موفقیت‌آمیز بوده است.

تذکره ۲: ممکن است استفاده از عملیات شیمیایی فسفات هماهنگ که برای جلوگیری از تشکیل هیدروکسید سدیم آزاد استفاده می‌شود نیز مؤثر باشد.

## ۶.۲۸. بررسی چند نمونه از مشکلات به‌وجودآمده در بویلر صنایع گوناگون بر

### اثر خوردگی تحت تنش

□ نمونه اول

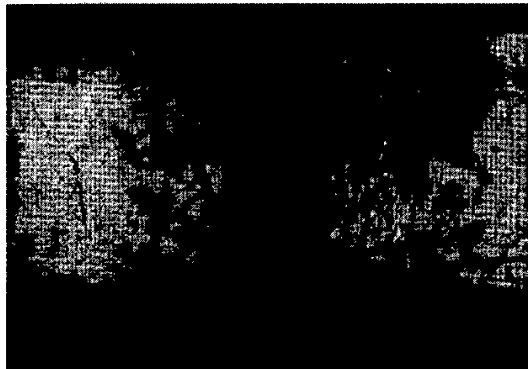
صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	سوپرهیتر یک بویلر بازیاب
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۱۱ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات هماهنگ
فشار درام:	۸/۳ MPa (۱۲۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)
جنس:	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴
سوخت:	black liquor

علائم ناشی از خرابی: خرابی‌هایی مشابه آنچه که در شکل‌های ۳.۲۸ و ۴.۲۸ نشان داده شده، به‌دفعات در قسمت سوپرهیتر بویلر موردنظر رخ می‌داده است. به ترک‌های ریز در مجاورت جوش که به‌طور موازی با آن قرار گرفته‌اند، توجه کنید. شاخه‌شاخه‌شدن ترک در سطح، در

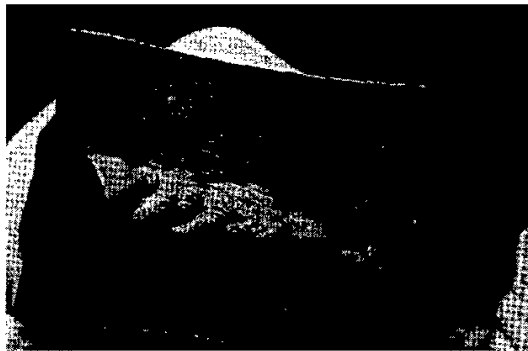
شکل ۴.۲۸ مشاهده‌پذیر است. آزمایش‌های ریزساختاری نشان می‌دهد ترک‌های شاخه‌شاخه‌شده، از سطح داخلی شروع شده و به صورت درون‌دانه‌ای منتشر شده‌اند. ترک‌ها در ناحیه HAZ جوش واقع شده‌اند.

علت خرابی: علت این خرابی، ایجاد ترک بر اثر خوردگی قلیایی تحت تنش تشخیص داده شده است. منبع هیدروکسید سدیم، احتمالاً ورود کف به سوپرهیترهاست. تنش‌ها، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری‌اند که این امر با انتشار محیطی ترک و مجاورت ترک‌ها به جوش مشخص می‌شود.

تذکر: ترک‌های ناشی از فشار داخلی، به صورت طولی منتشر می‌شوند.



شکل ۴.۲۸. ترک ناشی از خوردگی تحت تنش روی سطح خارجی. ترک در داخل بیضی نشان داده شده است.



شکل ۴.۲۸. ظاهر ترک در سطح داخلی؛ به شاخه‌شاخه‌بودن ترک و مجاورت آن به جوش توجه کنید.



□ نمونه دوم

صنعت:	پتروشیمی
محل نمونه:	سوپرهیتتر، مرحله اول
نحوه قرار گرفتن نمونه:	عمودی
عمر نمونه:	۳ هفته
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۴/۱ MPa (۶۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۳/۸ cm (۱/۵ in).
جنس:	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴
سوخت:	گاز پسماند <sup>۱</sup>

علائم ناشی از خرابی: لوله‌ای که در شکل ۵.۲۸ نشان داده شده، یکی از لوله‌هایی است که در این بویلر دچار خرابی شده‌اند. این لوله‌ها هنگام نصب، خمکاری سرد شده‌اند. پس از خمکاری، عملیات «آیل» به منظور آزاد کردن تنش‌های پسماند انجام نشده است. درام بخار، فاقد تجهیزات مناسب برای جدا کردن بخار و آب است و احتمالاً نوسانات بار باعث سرریز آب به سوپرهیترها شده است.

بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد دانه‌ها بر اثر خمکاری سرد، دچار تغییر شکل پلاستیک شده‌اند. ترک‌ها که از سطح داخلی شروع شده‌اند، شاخه‌های بسیاری داشته و به صورت درون‌دانه‌ای در لوله منتشر شده‌اند.

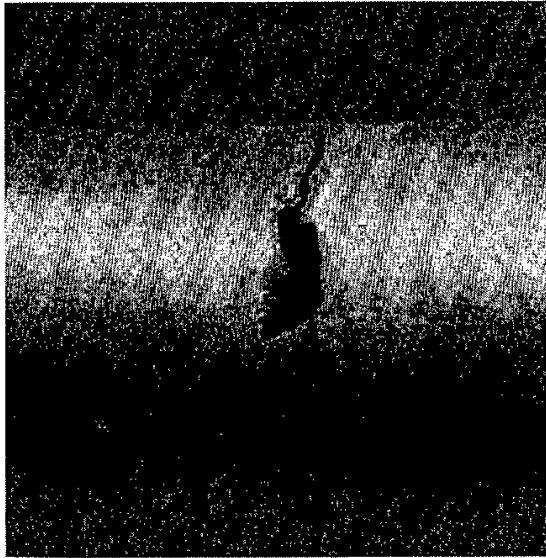
علت خرابی: عامل ایجاد تنش، تنش‌های پسماند ناشی از عملیات خمکاری است. انتشار ترک‌ها در محیط لوله، منتشر شدن جداگانه آن‌ها و نزدیکی‌شان به نواحی خم لوله، پسماند بودن تنش‌ها را مشخص می‌کند. ماده خورنده، هیدروکسید سدیم بوده که بر اثر سرریز آب به سوپرهیترها منتقل شده است.

اهمیت استفاده از جنس مناسب: این نمونه خرابی، مثالی عالی برای اثبات اهمیت آشنایی با مکانیسم‌های خرابی و خواص کاربردی مواد است. استفاده از لوله‌های فولادی زنگ‌نزن، در لوله‌های سوپرهیتتر بویلری با این فشار رایج نیست. لوله‌های اولیه از فولادهای کربنی بوده‌اند که

1. waste gas

2. cold-bent

پس از ۹ ماه، دچار ترک شده‌اند. دو کار برای بهبود عمر بهره‌برداری انجام شده است. اولاً، لوله‌های فولادی زنگ‌نزن، جانشین لوله‌های فولادی کربنی شده است. ثانیاً، خم‌های متوسط<sup>۱</sup> در لوله‌ها به کار رفته است. این کار ظاهراً به‌منظور آزاد کردن تنش‌های ناشی از انبساط و انقباض حرارتی منجر به تشکیل ترک در لوله‌های فولادی کربنی، انجام شده است. با وجود مقاومت به خوردگی اغلب فولادهای زنگ‌نزن، این فولادها مستعد خوردگی قلیایی تحت تنش‌اند. همچنین، خم‌هایی که به‌منظور آزاد کردن تنش‌های حرارتی جاگذاری شده‌اند، تنش‌های پسماند بسیاری ایجاد کرده‌اند. لوله‌های فولادی زنگ‌نزن، پس از سه هفته دچار خرابی شده‌اند.



**شکل ۵.۲۸.** ترک عرضی ناشی از خوردگی قلیایی تحت تنش در لوله خمیده سوپرهیتر که از فولاد ضدزنگ ساخته شده است. به قسمت «پنجره» مانند کوچکی که به خارج پرت شده است، توجه کنید.

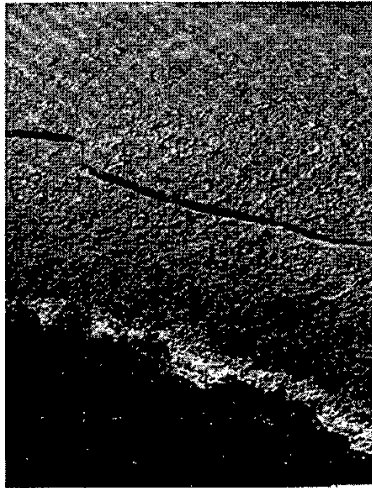
## □ نمونه سوم

صنعت:	کاغذسازی
محل نمونه:	اکونومایزر
نحوه قرار گرفتن نمونه:	دارای خم
عمر نمونه:	۱۵ سال
رژیم شیمیایی آب:	فسفات
فشار درام:	۵/۵ MPa (۸۰۰ psi)
مشخصه‌های لوله:	قطر خارجی: ۵/۱ cm (۲ in)

علائم ناشی از خرابی: در بخشی از یک لوله اکونومایزر که در قسمت میانی خود، دارای یک خم  $90^\circ$  است، دو ترک لبه کلفت روبه‌روی هم ایجاد شده‌اند (شکل ۶.۲۸). سطح مقطع لوله در قسمت خمیده آن، به‌جای دایره، بیضی است. ترک‌ها در دو انتهای قطر بزرگ بیضی ایجاد شده‌اند. تمام سطح داخلی دچار خوردگی سطحی شده است. کریستال‌های براق و سیاه موجود در سطح داخلی، بر اثر خوردگی ایجاد شده‌اند.

آزمایش‌های ریزساختاری نشان می‌دهند ترک‌ها از حفره‌های سطحی موجود در سطح شروع می‌شوند. با انتشار ترک‌ها در دیواره لوله، ترک‌ها شاخه‌شاخه می‌شوند. ترک‌های ایجاد شده اصولاً درون دانه‌ای هستند.

علت خرابی: علت ایجاد ترک‌ها، خوردگی تحت تنش است. هیدروکسید سدیم، ظاهراً در زیر رسوب‌های متخلخل اکسید آهن موجود در سطح داخلی تغلیظ شده است. وجود کریستال‌های مگنتیت نشان می‌دهد سطح در معرض هیدروکسید سدیم تغلیظ‌شده قرار داشته است. حفره‌های کم‌عمق موجود در سطح داخلی، به‌عنوان محل تمرکز تنش عمل کرده و باعث تنش بیش‌ازحد شده است. همچنین، تنش‌های ناشی از فشار داخلی، در دو انتهای قطر بزرگ سطح مقطع بیضوی لوله، یعنی در محل‌های ایجاد ترک بیشترند. جهت‌گیری طولی ترک‌ها نشان می‌دهد فشار داخلی، تنش لازم را برای ایجاد ترک بر اثر مکانیسم خوردگی تحت تنش فراهم کرده است.



شکل ۶.۲۸: ترک طولی در خم ۹۰° یک لوله اکونومایزر. ترک مشابهی نیز در روبه‌روی این ترک ایجاد شده است.

#### منابع

- [1] Port, Robert D., and Harvey M. Herro, *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, Inc. 1991.

## ضمیمه (الف)

### دیاگرام تعادلی آهن-کربن (Fe-C)

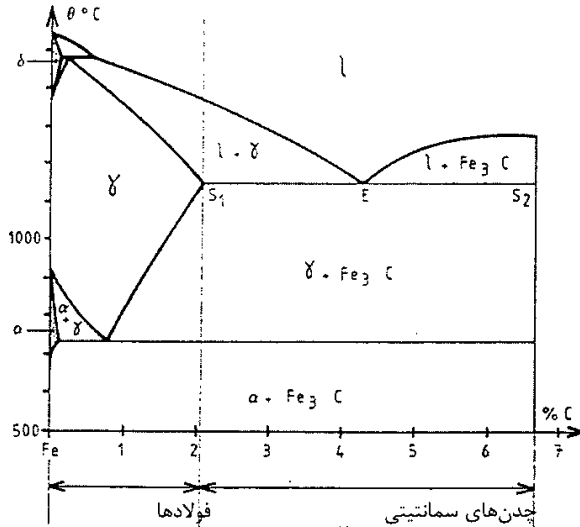
دیاگرام تعادلی آهن-کربن (Fe-C)، یک راهنماست که به کمک آن می‌توان روش‌های گوناگون عملیات حرارتی و تغییر ساختار فولادها بر اثر تغییر درجه حرارت را بررسی و مطالعه کرد. لیکن از آنجاکه بیشتر فولادها دارای عناصر آلیاژی دیگری جز آهن و کربن‌اند و این عناصر، موقعیت مرزی بین نواحی فازی را نسبت به فولادهای کربنی ساده تغییر می‌دهند، از دیاگرام تعادلی آهن-کربن باید فقط به‌عنوان یک راهنما استفاده کرد. ساختارهای ناتعادلی حاصل از برخی روش‌های عملیات حرارتی (مثل سردکردن فولادها در آب) باعث می‌شود کاربرد دیاگرام تعادلی آهن-کربن در عملیات حرارتی محدودتر شود. اما اطلاعات موجود مرتبط با تغییرات تعادلی ساختار فولادها در یک ناحیه فازی یا بر اثر عبور از یک ناحیه فازی به ناحیه فازی دیگر، اساس عملیات حرارتی فولادهاست. شکل الف. ۱، دیاگرام تعادلی آهن-کربن را برای درصدهای گوناگون کربن (از ۰ تا ۷) نشان می‌دهد. فولادها، آلیاژهای آهن-کربن و عناصر دیگرند که کمتر از ۲٪ (معمولاً ۱٪ یا کمتر) کربن دارند. آلیاژهایی که بیش از ۲٪ کربن دارند، به چدن موسوم‌اند. گرافیت، حالتی از کربن، پایدارتر از سمنتیت است. چنانچه به سمنتیت فرصت داده شود، به آهن و گرافیت تجزیه می‌شود، لیکن در فولادها، گرافیت‌شدن به‌ندرت رخ می‌دهد و به‌همین دلیل دیاگرام آهن-سمنتیت برای مطالعه و بررسی عملیات حرارتی فولادها مناسب‌تر است. در چدن‌ها، وجود مقادیر کربن و سیلیسیم نسبتاً بالاتر، تجزیه سمنتیت و تشکیل گرافیت را ترغیب می‌کند. بنابراین فناوری چدن‌ها بیشتر بر اساس دیاگرام آهن-گرافیت استوار است [۱].

آهن یک عنصر چندشکلی<sup>۱</sup> است؛ یعنی در فشار یک اتمسفر با افزایش دما، شبکه بلوری آن تغییر می‌کند. گستره‌های حرارتی مربوط به پایداری شبکه‌های بلوری گوناگون آهن روی محور عمودی، در سمت چپ دیاگرام تعادلی آهن-کربن نشان داده شده است (شکل الف. ۱). ملاحظه می‌شود که آهن  $\alpha$  یا فریت، از صفر مطلق تا  $912^{\circ}\text{C}$ ، آهن  $\gamma$  یا آستنیت در دمای

---

1. polymorphism

۱۳۹۴°C-۹۱۲ و آهن δ از ۱۳۹۴°C تا نقطه ذوب آهن خالص (۱۵۳۸°C) پایدار است. در مجموعه آلیاژهای آهن-کربن، یک یا چند نوع از فازهای زیر وجود دارد:



شکل الف.۱. دیاگرام تعادلی آهن-کربن برای درصدهای گوناگون کربن [2]

۱. فریت (α)

این فاز، محلول جامد بین‌نشینی<sup>۱</sup> کربن در آهن α است (ماکسیمم حلالیت آهن α در ۷۲۷°C، مقدار ۰.۰۲٪ است). شبکه فریت α، مکعب مرکزدار<sup>۲</sup> است.

۲. آستنیت (γ)

این فاز، محلول جامد بین‌نشینی کربن در آهن γ است. شبکه کریستالی این فاز، مکعبی با سطوح مرکزدار<sup>۳</sup> است.

۳. فریت (δ)

این فاز، محلول جامد بین‌نشینی کربن در آهن δ است و به دلیل بالا بودن درجه حرارت و نزدیکی آن به نقطه ذوب، از اهمیت کمی در عملیات حرارتی برخوردار است.

1. interstitielle  
3. Face Centered Cubic-FCC

2. Body Centered Cubic-BCC

#### ۴. سمانتیت (Fe<sub>3</sub>C)

این فاز، ۶/۶۷٪ وزنی کربن دارد. شبکه کریستالی سمانتیت، مکعب‌مستطیلی<sup>۱</sup> است. سمانتیت یک کربور آهن ناپایدار است که در شرایط مناسب، تمایل دارد به فریت (یا آستنیت) و گرافیت تجزیه شود (واکنش الف.۱).



این تحول در درجه حرارت نسبتاً بالا و در شرایط خاص اتفاق می‌افتد.

#### ۵. کربن خالص (گرافیت)

حلالیت آهن در کربن صفر است. چنان‌که گفته شد، گرافیت ساختار پایدار فاز غنی از کربن در دیاگرام آهن-کربن است.

### دماهای بحرانی

فصل مشترک فازهای گوناگون در دیاگرام تعادلی آهن-کربن، مشخص‌کننده دماهای تعادلی دگرگونی‌های گوناگونی‌اند که ممکن است در آلیاژهای آهن-کربن ایجاد شوند. به‌طور مثال، اگر قطعه‌ای از آلیاژ Fe-۵۰/۵۰٪ (که ساختار تعادلی آن فریت و سمانتیت است) از دمای اتاق، آهسته حرارت داده شود، بخشی از فریت و تمامی سمانتیت آن در ۷۲۷ °C به آستنیت تبدیل می‌شود و در حوالی ۷۶۰ °C، آخرین قسمت فریت به‌طور کامل به آستنیت تبدیل می‌شود.

دماهای بحرانی که در دیاگرام تعادلی آهن-کربن وجود دارند و به‌لحاظ عملیات حرارتی اهمیت دارند، عبارت‌اند از:

A<sub>1</sub>: مرز ناحیه دوفازی فریت-سمانتیت و یکی از نواحی دوفازی فریت-آستنیت یا سمانتیت-آستنیت

A<sub>3</sub>: فصل مشترک ناحیه دوفازی فریت-آستنیت و ناحیه تک‌فازی آستنیت

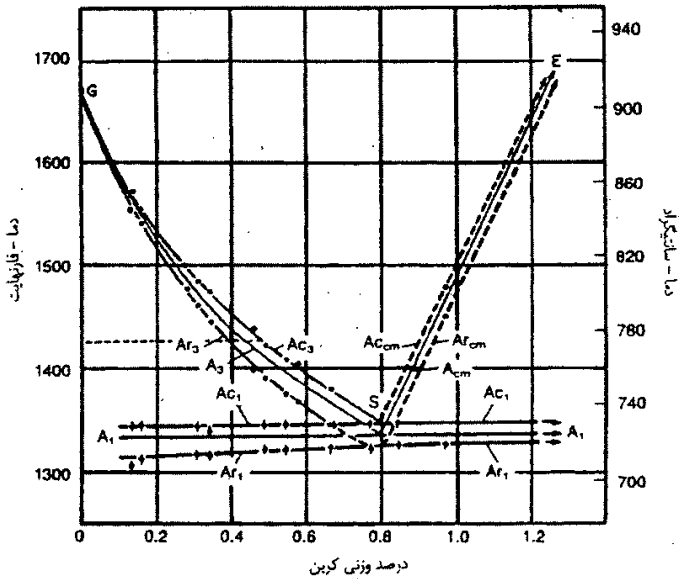
A<sub>cm</sub>: فصل مشترک ناحیه دوفازی سمانتیت-آستنیت و ناحیه تک‌فازی آستنیت

دماهای یادشده، تبدیل یک فاز به فاز دیگر را در شرایط تعادلی، یعنی تحت شرایط گرمایش و سرمایش بسیار آهسته، مشخص می‌کنند. به‌همین خاطر گاهی به‌جای حروف A<sub>1</sub>، A<sub>3</sub> و A<sub>cm</sub>، از حروف Ae<sub>1</sub>، Ae<sub>3</sub> و Ae<sub>cm</sub> استفاده می‌شود (e از اول واژه تعادلی (Equilibrium) گرفته شده است). با احتساب آثار آهنگ گرمایش و سرمایش، سوای دماهای بحرانی تعادلی، دو

سری دمای تعادلی دیگر در دیاگرام آهن-کربن وجود دارد که با علامت‌های  $Ac_1$ ,  $Ac_3$ ,  $Ac_{cm}$  و  $Ar_1$ ,  $Ar_3$  و  $Ar_{cm}$  مشخص می‌شوند (شکل الف.۲). به‌طور کلی، برای یک فولاد، دماهای بحرانی به‌کمک آزمایش‌هایی تعیین می‌شوند. درعین حال فرمول‌های تجربی نیز وجود دارند که آثار عناصر آلیاژی بر دماهای بحرانی را مشخص می‌کنند. به‌طور مثال، فرمول‌های زیر آثار برخی عناصر آلیاژی را بر دماهای  $Ac_1$  و  $Ac_3$  نشان می‌دهند [3]:

$$Ac_1 = 723 - 10/7 Mn - 16/9 Ni + 29/1 Si + 16/9 Cr + 290 As + 6/38 W$$

$$Ac_3 = 910 - 203 \sqrt{C} - 15/2 Ni + 44/7 Si + 104 V + 31/5 Mo + 13/1 W$$



شکل الف.۲. دماهای بحرانی برای حالت تعادل (A)، سرمایش ناتعادلی (AR) و گرمایش ناتعادلی (AC). آهنگ گرمایش و سرمایش برابر ۰/۱۲۵ درجه سانتیگراد در دقیقه بوده است.

### منابع

- [۱] گل‌داز، محمدعلی، عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۵.
- [2] Barralisset, J., G. Maeder, and Ed. Pollina, *Précis de Métallurgie: élaboration, structures-propriétés et normalisation*, Paris, 1983.
- [3] Naumann, Friedrich Karl, *Failure Analysis: Case Histories and Methodology*, Translators from The German Version: Dr. Claus G. Geotzel, Mrs. Lilo K. Geotzel. Max-Plank-Institut Für Eisenforschung.



## ضمیمه (ب)

### رژیم‌های شیمیایی مورد استفاده در بویلرهای درام‌دار با هدف

#### پیشگیری از خوردگی و رسوب‌گذاری

کنترل خوردگی سیستم‌های تولید بخار و دستگاه‌های وابسته به آن‌ها حین عملیات از هر نظر ضروری است، در غیر این صورت، مشکلاتی نظیر خوردگی لوله‌های دیگ بخار، تعمیرات، تعویض و خارج‌شدن واحد از سیستم، پیش خواهد آمد و در چنین شرایطی، بازگرداندن سیستم به حالت عملیاتی مستلزم صرف هزینه‌های گزاف خواهد بود. هدف از تزریق مواد شیمیایی (کنترل شیمیایی) به سیکل گردش آب و بخار، ایجاد لایه محافظ پایدار به‌منظور به‌حداقل رساندن عوارض نامطلوب از قبیل خوردگی و رسوب‌گذاری در لوله‌های انتقال سیال است. برای دستیابی به این اهداف، مقادیر کنترل‌شده مواد شیمیایی را در نقاط مشخص به سیستم تزریق می‌کنند. به‌طور مثال، برای نیل به کنترل شیمیایی مناسب و مطمئن در بویلر یک نیروگاه، لازم است دقت فراوانی در نحوه و اجرای کنترل قبل از بویلر، در بخش‌های گوناگون داخلی بویلر، بخار، کندانسیت و تمامی سیکل آب و بخار، به‌کار گرفته شود. چنان‌چه در کنترل هر یک از بخش‌ها مشکلی به‌وجود آید، حتی اگر بقیه اجزای سیکل به‌خوبی کنترل شده باشند، باز هم سیستم به سلامت بهره‌برداری نمی‌شود. خوردگی‌های مکرر و متنوع، سرعت مکانیسم‌های متفاوت مخصوصاً در آب تغذیه اکونومایزر، هیترهای فشار قوی و ضعیف و نیز رسوب آلودگی‌ها در بخش‌های گوناگون بویلر و پس از بویلر، عموماً باعث کاهش انتقال حرارت، کاهش بازده بویلر و توربین، کاهش عمر قطعات و تجهیزات، افزایش زمان و هزینه تعمیرات و خروج واحدها، افزایش سوخت به نسبت بخار تولیدی، افزایش مصرف آب تغذیه و تخلیه دائمی<sup>۱</sup> شده و نیز موجب افزایش آلودگی‌های محیط‌زیستی و... می‌شود [۱، ۲، ۳].

در این ضمیمه، برخی رژیم‌های شیمیایی به‌کاررفته در بویلرهای درام‌دار، برای پیشگیری از خوردگی و رسوب‌گذاری به‌اختصار بررسی می‌شوند.

الف) فسفات هماهنگ<sup>۱</sup>

در این روش، سود اضافی در بویلر باقی نمی‌ماند. مقدار فسفات توصیه‌شده برای آب بویلر درام‌دار در فشارهای گوناگون، در منحنی‌های خاصی ارائه می‌شوند. یکی از فسفات‌های مورد استفاده، تری‌سدیم‌فسفات است. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد کریستال‌هایی که از یک محلول تری‌سدیم‌فسفات در درجه حرارت بالا رسوب می‌کنند، ترکیبی از دی‌سدیم‌فسفات و هیدروکسید سدیم هستند. هیدروکسید سدیم می‌تواند سبب از بین رفتن لایهٔ مگنتیت محافظ شود.

برای اطمینان از عدم حضور سود اضافی، نسبت مولی سود به فسفات در بویلرهای با فشار بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ پوند بر اینچ‌مربع، باید  $\frac{2}{6}$  باشد که در آن، میزان فسفات برحسب  $PO_4$ ، تابعی از pH آب بویلر است. حضور هیدروکسید سدیم آزاد بالا، در بویلرهای با فشار کمتر از ۱۰۰۰ پوند بر اینچ‌مربع، چندان مشکل‌آفرین نیست؛ درحالی‌که بر رعایت میزان فسفات برای بویلرهای تا فشار ۲۰۰۰ پوند بر اینچ‌مربع تأکید شده است. طبق دستورالعمل‌های موجود، مقدار فسفات برای بویلرهای درام‌دار با فشار ۲۰۰۰ تا ۲۸۳۵ پوند بر اینچ‌مربع، می‌تواند در محدودهٔ ۱۰-۳ ppm با رعایت pH بین ۹ تا ۹/۷ باشد.

وقتی از مواد شیمیایی فرآر استفاده می‌شود، باید دقت کرد که نسبت مولی صحیح رعایت شود. از آنجاکه فسفات‌های تجاری رایج در بازار، غالباً از ترکیبات  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  و  $Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$  هستند، بنابراین مخلوطی با ۶۵٪ وزنی فسفات‌تری‌سدیک و ۳۵٪ وزنی فسفات‌دی‌سدیک می‌تواند نسبت مولی  $Na/PO_4 = \frac{2}{6}$  ایجاد کند. وقتی pH پایین باشد، می‌توان با افزایش نسبت تری‌سدیم‌فسفات، pH را افزایش داد و بالعکس؛ یعنی وقتی pH بالا باشد، این کار با تقلیل این نمک میسر است.

ب) شلانت<sup>۲</sup>

اخیراً این نحوهٔ کنترل شیمیایی در برخی بویلرهای صنعتی متداول شده است. واژهٔ شلانت از واژهٔ یونانی *chela* به معنی انبر یا پنجهٔ متوقف‌کنندهٔ اعضای سخت‌پوستان دریایی مانند خرچنگ، گرفته شده است. بنابراین شلانت به دسته‌ای از آمین‌ها و اسیدهای آلی اطلاق می‌شود که قادرند با یون‌های فلزی ترکیب شوند و واکنش دهند. دو مادهٔ مهم شلانت مصرفی در صنایع، اتیلن‌دی‌آمین تتراستیک‌اسید (EDTA) و نیتریلوتری‌استیک‌اسید (NTA) هستند.

1. coordinated Phosphate program

2. chelant

در عمل، از نمک‌های تتراسدیم (EDTA) و نمک تری‌سدیم (NTA) بیش از اسید استفاده می‌شود. میزان واکنش این دو ماده برای فلزات گوناگون در جدول ب. ۱ ذکر شده است. انتخاب میان این دو شلانت به فاکتورهای بسیاری بستگی دارد؛ مانند غلظت یون‌های فلزی گوناگون برای شلانت‌شدن، غلظت شلانت که باید اقتصادی در نظر گرفته شود و خصوصیات شیمیایی آب بویلر. غالباً شلانت با غلظتی متجاوز از آنچه که برای شلانت‌کردن یون‌های فلزی در آب تزریقی لازم است، به سیستم اضافه می‌شود. شلانت اضافی وارد بویلر خواهد شد و با رسوب‌هایی نظیر تری‌کلسیم‌فسفات و هیدروکسید منیزیم واکنش می‌دهد. کلسیم و منیزیم محلول نیز شلانت خواهند شد. در نهایت با تخلیه بویلر، این ترکیبات و همچنین فسفات‌سدیم و هیدروکسید سدیم از آب بویلر خارج خواهند شد. این مواد آلی قادرند با یون‌های فلزی دوطرفیتی موجود در سیستم، مانند کلسیم، منیزیم و آهن ترکیب شوند و محلول به‌وجود آورند. با تخلیه بویلر و جایگزینی آب جدید، می‌توان آن‌ها را از سیستم خارج کرد.

جدول ب. ۱. سرعت‌های واکنش شلانت‌های EDTA و NTA

یون فلز (ppm/ppm)		یون‌های فلزی
EDTA	NTA	
۴/۶۷	۲/۷۵	کلسیم
۴/۶۷	۲/۷۵	منیزیم
۴/۳۵	۴/۹۰	آهن
۴/۳۵	۴/۳۰	مس
۱۷/۳۰	۱۰/۰۰	آلومینیم

این روش کنترلی می‌تواند برای بویلرهای تا فشار ۱۵۰۰ پوند بر اینچ مربع عملی باشد؛ هرچند برخی سازندگان، این روش را فقط برای بویلرهای تا فشار ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع توصیه کرده‌اند. باید دقت کرد که این مواد قادر نیستند با یون‌های سه‌طرفیتی آهن و مس ارتباط شلانتی داشته باشند. ضمن اینکه از این مواد نباید در حضور اکسیژن، چه در بویلر و چه در سیستم آب تغذیه، استفاده کرد؛ در نتیجه عملیات حذف اکسیژن باید در تمامی قسمت‌ها به‌خوبی انجام شود. تجربه نشان می‌دهد مقدار زیاد شلانت باقی‌مانده در آب بویلر مشکل‌زاست، زیرا شلانت اضافی سبب خوردگی سطوح غیرآهنی می‌شود. شرکت بابکوک<sup>۱</sup> میزان تزریق را بر اساس سختی و آهن موجود در آب پیشنهاد کرده است؛ ضمن اینکه مقدار ۱ ppm شلانت باقی‌مانده

در آب بویلر، توصیه شده است. در این حالت، برای جلوگیری از نشتی‌های ناخواسته در مبدل‌های حرارتی و غیره، تزریق فسفات پیشنهاد شده است که در این صورت، میزان فسفات باقی‌مانده باید در محدوده ۳۰-۱۵ ppm باشد.

در صورتی که سطوح داخل درام از رسوب لجن‌گونه پوشیده شده باشند، باید تزریق شلات با مقدار ۲-۱ ppm افزایش یابد.

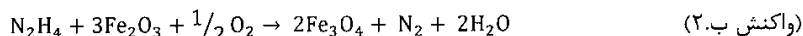
چنانچه سطوح کاملاً تمیز و عاری از رسوب باشند، مقدار شلات باید کمی کاهش یابد. ضمناً وسایل تزریق و پمپ‌های شلات باید از فولاد زنگ‌نزن ساخته و آماده شوند.

### ج) هیدرازین<sup>۱</sup>

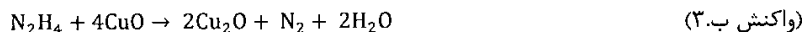
یکی از مهم‌ترین مواد جذب‌کننده اکسیژن، هیدرازین است. واکنش هیدرازین با اکسیژن به صورت واکنش ب.۱ است.



یکی از مهم‌ترین مزایای هیدرازین این است که هیچ ماده جامدی به سیستم اضافه نمی‌کند. همچنین، هیدرازین با اکسید آهن III یا  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  که محصول خوردگی است، فیلم مقاوم  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ایجاد می‌کند (واکنش ب.۲).



این ماده همچنین قادر است با محصولات خوردگی لوله‌های مسی (CuO) ترکیب شود و آن‌ها را احیا کند (واکنش ب.۳).



می‌دانیم که اکسیدهای مغناطیسی  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{Cu}_2\text{O}$ ، اکسیدهای محافظ برای فولاد (آهن) و مس هستند. در حقیقت هیدرازین سطح این فلزات را به صورت روئین<sup>۲</sup> درمی‌آورد. این عمل نه فقط برای روئین کردن سطوح فلزی، بلکه برای احیای اکسیدهای معلق در آب مؤثر است. مقدار هیدرازین لازم برای حذف اکسیژن و همچنین احیای  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و CuO محلول در آب، در جدول ب.۲ ذکر شده است.

استفاده از هیدرازین در بویلرهای با فشار کم به دلیل واکنش ضعیف این ماده در درجه حرارت‌های پایین محدود است، زیرا در درجه حرارت‌های پایین‌تر از  $105^\circ\text{C}$ ، واکنش حذف اکسیژن به‌کندی شکل می‌گیرد.

1. hydrazine

2. passive

عمل حذف اکسیژن در دی‌اریتور می‌تواند مقدار اکسیژن را تا ۷ ppm کاهش دهد. اخیراً مواد آلی دیگری ساخته شده که قادرند در درجه حرارت‌های پایین واکنش خوبی بدهند. در مقایسه با هیدرازین، بعضی از آن‌ها مانند آمرزین<sup>۱</sup>، سرعت واکنش حذف اکسیژن را ۱۰ تا ۱۰۰ برابر افزایش می‌دهند. هیدرازین می‌تواند در فشار ۷ پوند بر اینچ‌مربع و ۲۳۱ درجه فارنهایت (۱۱۰/۵ درجه سانتیگراد) در بویلرها، از فاز مایع به بخار تبدیل شود. درجه تبخیر<sup>۲</sup>، متناسب است با درجه حرارت آب بویلر و فشار.

جدول ب.۲. مقدار هیدرازین لازم برای حذف اکسیژن و احیای  $Fe_2O_3$  و  $CuO$  محلول

غلظت یون‌ها (ppm)	مقدار هیدرازین مورد نیاز (ppm)
O <sub>2</sub> : ۱	۱
Fe <sup>2+</sup> : ۱	۰/۰۴۸
Cu <sup>2+</sup> : ۱	۰/۱۲۵

در دماهای ۲۳۱ تا ۵۱۸ درجه فارنهایت، تبخیر هیدرازین افزایش می‌یابد، اما این ماده تجزیه نمی‌شود؛ درحالی‌که در دماهای بالاتر از ۵۱۸ درجه فارنهایت، هیدرازین تجزیه می‌شود (واکنش ب.۴):

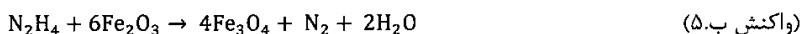


شدت این واکنش در غلظت‌های پایین هیدرازین کم است. با افزایش غلظت، سرعت واکنش بیشتر می‌شود. در نیروگاه‌هایی که درجه حرارت سوپرهیتر یا آب بویلرشان بیش از ۵۱۸ درجه فارنهایت است، باید به آثار این تجزیه بر لوله‌های مسی توجه کرد.

چنانچه مقدار هیدرازین باقی‌مانده در آب تغذیه کمتر از ۰/۲ ppm نگه داشته شود، مقدار موجود در بخار نمی‌تواند از ۰/۵-۰/۳ ppm تجاوز کند. به‌طور کلی، اگر هیدرازین با دقت به‌کار برده شود تا بر اثر تجزیه آن، آمونیاک اضافی در سیستم ایجاد نشود، کاربرد هیدرازین برای کاهش اکسیژن، بازده بسیار خوبی خواهد داشت. استفاده از هیدرازین نه‌فقط نمک‌های آب تغذیه را افزایش نمی‌دهد، بلکه با قلیابیت مناسبی که ایجاد می‌کند، خوردگی عمومی را نیز کنترل می‌کند. هیدرازین اکنون در بویلرهایی با فشار ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ پوند بر اینچ‌مربع به‌کار می‌رود. باید توجه داشت که به‌دلیل سمی بودن، کاربرد آن نیازمند مراقبت‌های ویژه‌ای است. پوست دست نباید با هیدرازین تماس داشته باشد [۱].

**د) روش کنترل شیمیایی فرآر (AVT)**

در این روش، از آمونیاک برای کنترل pH آب تغذیه استفاده شده و با بالابردن قلیائیت آب تغذیه، pH محیط به ۸/۸ تا ۹/۲ رسانده می‌شود. در این وضعیت، خوردگی فولاد به کمترین حد رسیده و برای تأمین pH گفته‌شده، از دی‌سدیم و نری‌سدیم فسفات استفاده می‌شود. حدود میزان تزریق باید بر اساس فشار دیگ‌های بخار تنظیم شود، زیرا بر اثر افزایش میزان تعیین‌شده فسفات در درام، پدیده انتقال املاح اتفاق می‌افتد. وجود ناخالصی در فاز بخار، روی پره‌های توربین نشست می‌کند و باعث خوردگی فلزی و ایجاد لرزش یاتاقان‌ها و نیز لنگی روتور توربین می‌شود. برای حذف اکسیژن محلول، از هیدرازین به‌عنوان اکسیژن‌گیر استفاده می‌کنند (واکنش ب.۱). بیشتر اکسیژن محلول در آب تغذیه را با هیدرازین از محیط خارج می‌کنند بقیه آن صرف تقویت لایه محافظ خوردگی (اکسید مغناطیسی آهن:  $Fe_3O_4$ ) می‌شود.



در روش AVT، ضخامت لایه مغناطیسی  $Fe_3O_4$  طی دوران بهره‌برداری افزایش می‌یابد که به‌مرور باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود. بر اساس توصیه سازندگان دیگ‌های بخار، برای انتقال حرارت بهتر و جلوگیری از گرم‌شدن بیش‌ازحد لوله‌ها، پس از مدتی و به‌صورت دوره‌ای، زدودن این لایه و تشکیل دوباره آن لازم خواهد بود [۱، ۳].

**ه) روش کنترل شیمیایی خنثی (NWT)**

در روش NWT باید درجه خلوص آب تغذیه بسیار بالا باشد (کمتر از  $0.2 \mu S/cm$ ). برای ایجاد لایه محافظ خوردگی، به سیستم اکسیژن تزریق می‌کنند. با این کار، لایه محافظ از نوع هماتیت ( $Fe_2O_3$ ) تشکیل می‌شود. مکانیسم این واکنش (واکنش ب.۶) به‌صورت ترکیب اکسیژن اضافی با  $Fe_3O_4$  و تشکیل لایه محافظ جدید ( $Fe_2O_3$ ) است.



لایه هماتیت، چسبندگی و قدرت پوشانندگی بیشتری نسبت به اکسید مغناطیسی آهن دارد و همچنین، سرعت افزایش ضخامت لایه هماتیت کمتر از اکسید مغناطیسی آهن است؛ در نتیجه، مشکل انتقال حرارت آن نسبت به رژیم AVT کمتر است. از این‌رو، تناوب دوره‌های اسیدشویی دیگ‌های بخار نیز کمتر خواهد بود. در روش NWT، pH در محدوده ۶/۵ تا ۷/۵

کنترل شده و اکسیژن محلول در محدوده ۲۰۰-۲۰ ppb حفظ می‌شود. در این روش، حین بهره‌برداری از هوازدا استفاده نمی‌شود. در روش NWT، چون pH در محدوده گفته شده نگه داشته می‌شود، pH پایین باعث خوردگی آلیاژهای فولاد می‌شود [3].

### (و) روش کنترل شیمیایی مخلوط (CWT)

روش CWT<sup>۱</sup> در واقع ترکیبی از دو روش قبلی است که با هدف رفع مشکلات پیش آمده در روش‌های NWT و AVT به کار گرفته می‌شود. در این روش، با افزودن آمونیاک به آب تغذیه، pH را به محدوده ۸ تا ۸/۵ می‌رسانند و همانند روش NWT، به سیستم اکسیژن تزریق می‌شود. درجه خلوص آب دیگ بخار در این روش (CWT) بالاست و استفاده از آب با کندانسیتیته کمتر از  $0.12 \mu s / cm$  و اکسیژن (مورد نیاز آب تغذیه) در محدوده ۲۰-۲۰۰ ppb ضرورت دارد [3، ۴].

### منابع

- [۱] سیدرضی، سیدمحمد، کنترل خوردگی در صنایع، انتشارات انجمن خوردگی ایران، جلد اول، ۴۰۴-۴۰۷، ۱۳۷۵.
- [۲] پیشنمازی، سیداحمد، نقش آب و کنترل خوردگی در صنایع، انتشارات انجمن خوردگی ایران، ۲۳۸-۳۲۵، ۱۳۷۷.
- [3] *Combined Water Treatment Procedure - MHI - PP1-9-1990.*
- [۴] کیان‌بخش، علیرضا، «اجرای روش کنترل شیمیایی CWT در بویلرهای نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی و منافع حاصل از آن»، اولین کنفرانس نیروگاه‌های برق ایران، شرکت مدیریت تولید برق شهید رجایی، ۱۳۸۷.





## واژه‌نامه توصیفی

- acid:** اسید؛ ماده مرکبی که وقتی در آب حل شود، یون‌های هیدروژن ( $H^+$ ) آزاد می‌کند.
- alkaline:** (۱) دارای خواص یک قلیا؛ (۲) دارای pH بیشتر از ۷.
- alloy steel:** فولاد آلیاژی؛ فولادی که برای ایجاد تغییراتی در خواص مکانیکی یا فیزیکی، مقادیر مشخصی عناصر آلیاژی به آن افزوده شده است.
- amphoteric:** ماده‌ای که می‌تواند به هر دو شکل اسید و باز، واکنش شیمیایی انجام دهد. در مورد برخی فلزات خاص، این خاصیت به معنای تمایل طبیعی آن‌ها به خورده شدن در هر دو محیط با pH بالا و پایین است.
- anode:** آند؛ محلی در یک پیل خوردگی که خوردگی در آنجا رخ می‌دهد و یون‌های فلز وارد محلول می‌شوند. در این ناحیه واکنش اکسیداسیون رخ می‌دهد.
- attemperator:** وسیله‌ای برای کاهش و کنترل دمای بخار سوپرهیت (فوق اشباع).
- austenite:** آستنیت؛ محلول جامد کربن یا دیگر عناصر آلیاژی در آهن غیرمغناطیسی با شبکه کریستالی به شکل مکعبی با سطوح مرکزدار (Face-Centered Cubic-FCC).
- austenitic stainless steel:** فولاد زنگ‌نزن آستنیتی؛ فولادی زنگ‌نزن و غیرمغناطیسی که علاوه بر کروم، معمولاً دست‌کم ۸٪ نیکل دارد.
- backing:** پشت‌بند؛ قطعه‌ای که هنگام جوشکاری، برای افزایش کیفیت جوش در ریشه جوش، در زیر یا پشت اتصال قرار می‌گیرد. ممکن است به شکل یک رینگ یا نوار فلزی، یک پاس (pass) جوش یا یک ماده نافلزی مانند کربن، فلاکس دانه‌دانه (granular flux) یا یک گاز محافظ (protective gas) باشند.
- base metal:** (۱) هنگام جوشکاری، فلزی که جوش داده می‌شود؛ (۲) پس از جوشکاری، بخشی از فلز که هنگام جوشکاری ذوب نشده است.

- black liquor**: مایعی که پس از پخت خمیر کاغذسازی در فرایندهای تولید کاغذ با جوش شیرین یا سولفات، به جا می‌ماند.
- blowdown**: فرایند خارج کردن بخش چشمگیری از آب بویلر، به منظور خارج کردن نمک‌های جمع شده، رسوبات و دیگر آلودگی‌ها.
- brittle fracture**: شکست ترد؛ شکست فاقد یا دارای اندکی تغییر شکل پلاستیک.
- cathode**: کاتد؛ در یک سلول خوردگی، ناحیه‌ای است که واکنش احیا در آنجا رخ می‌دهد. معمولاً در این ناحیه، صدمه‌ای به ماده وارد نمی‌شود.
- caustic cracking**: خوردگی قلیایی؛ نوعی خوردگی تحت تنش (Stress-Corrosion Cracking-SCC) که وقتی فولادهای کربنی و زنگ‌زن آستنیتی (فولادهای سری ۳۰۰) در معرض محلول قلیایی تغلیظ شده قرار گیرند، باعث ایجاد ترک در آن‌ها می‌شود.
- caustic embrittlement**: بیان قدیمی از یک نوع خوردگی تحت تنش (SCC) که غالباً فولادهای کربنی یا آلیاژهای آهن-کروم-نیکل را که در دماهای  $250^{\circ}\text{C}$  -  $200^{\circ}\text{C}$  ( $480^{\circ}\text{F}$  -  $400^{\circ}\text{F}$ ) در معرض محلول‌های هیدروکسید سدیم تغلیظ شده قرار گرفته‌اند، تحت تأثیر قرار می‌دهد.
- cavitation**: کاویتاسیون؛ تشکیل و ترکیدن سریع حباب‌های ریز بی‌شمار در مایعی که در معرض تغییر فشار سریع و شدید قرار گرفته است.
- cavitation damage**: خرابی ناشی از کاویتاسیون؛ زوال یک قطعه جامد بر اثر قرار گرفتن در معرض کاویتاسیون. ممکن است به شکل کنده شدن فلز قطعه، تغییر شکل سطح، تغییر خواص ماده یا تغییر کیفیت ظاهری سطح باشد.
- cementite**: سمانتیت؛ ترکیبی از آهن و کربن که در شیمی به کاربید آهن موسوم شده و فرمول شیمیایی تقریبی آن  $\text{Fe}_3\text{C}$  است.
- chelating agent**: ماده شلانت‌کننده؛ یک ترکیب آلی که اتم‌های آن در محلول، بیش از یک پیوند کئوردینانسی با فلز برقرار می‌کنند.
- cold work**: تغییر شکل دائمی یک فلز بر اثر یک نیروی خارجی
- corrosion**: خوردگی؛ واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده (معمولاً فلز) و محیط اطراف آن که باعث زوال فلز و از بین رفتن خواص ماده می‌شود.
- corrosion fatigue**: خستگی- خوردگی؛ فرایندی که طی آن، فلز بر اثر وجود هم‌زمان خوردگی و بارگذاری تناوبی، زودتر از موعد انتظار می‌شکند (شکست‌ها در تنش کمتر یا تعداد سیکل‌های کمتر نسبت به مواقعی که محیط خورنده وجود ندارد، رخ می‌دهند).

- corrosion product**: محصول خوردگی؛ ماده‌ای که بر اثر خوردگی تشکیل شده است.
- creep**: خزش؛ تغییر شکل وابسته به زمان که تحت تنش و دمای بالا ایجاد می‌شود.
- dealloying**: جدایش انتخابی؛ خورده‌شدن یک یا چند جزء از یک آلیاژ. به این مکانیسم خرابی، parting و selective leaching نیز گفته می‌شود (selective leaching را نیز ببینید).
- denickelification**: جدایش نیکل؛ نوعی خوردگی که باعث خورده‌شدن نیکل در آلیاژهای نیکل‌دار می‌شود. معمولاً این نوع خوردگی در آلیاژهای مس-نیکل و پس از بهره‌برداری درازمدت در آب تازه مشاهده می‌شود.
- dezincification**: جدایش روی؛ نوعی خوردگی که باعث خورده‌شدن روی در آلیاژهای روی‌دار می‌شود. معمولاً این نوع خوردگی در آلیاژهای مس-روی با مقادیر مس کمتر از ۸۵٪ و پس از بهره‌برداری درازمدت در آب دارای اکسیژن محلول رخ می‌دهد.
- downcomer**: لوله‌های بویلر که آب را از درام بخار خارج می‌کنند.
- ductile fracture**: شکست نرم؛ شکست فلز به‌همراه تغییر شکل پلاستیک زیاد و صرف انرژی بالا.
- ductility**: داکتیلیته؛ قابلیت تغییر شکل پلاستیک ماده بدون وقوع شکست
- economizer**: اکونومایزر؛ یک مبدل حرارتی که با بازیافت گرمای گازهای حاصل از احتراق خروجی از بویلر، باعث افزایش دمای آب تغذیه می‌شود.
- erosion**: سایش؛ تخریب فلزات یا دیگر مواد بر اثر ساینده‌گی سیال در حال حرکت که معمولاً بر اثر وجود ذرات جامد معلق شدت می‌گیرد. وقتی هم‌زمان با سایش، خوردگی نیز رخ دهد، غالباً از اصطلاح سایش-خوردگی برای مکانیسم خرابی استفاده می‌شود.
- eutectic structure**: ساختار یوتکتیک؛ ریزساختاری که یک فلز مایع، هنگام انجماد به دو فاز مجزا یا بیشتر تبدیل شود.
- exfoliation**: نوعی خوردگی که باعث می‌شود لایه‌هایی از فلز یا اکسید آن، بر اثر تشکیل محصولات خوردگی از سطح کنده شود. این نوع خوردگی در سطح خارجی قطعه رخ می‌دهد.
- failure**: خرابی؛ یک اصطلاح کلی که برای بیان یکی از سه نکته زیر به کار می‌رود:
- (۱) قطعه به‌هیچ‌وجه قابل استفاده نباشد؛ (۲) قطعه هنوز قابل استفاده باشد، اما توانایی انجام مطلوب وظیفه محوله را نداشته باشد؛ (۳) قطعه به‌شدت تخریب‌شده باشد، به‌نحوی که ادامه استفاده از آن خطرناک باشد.

**fatigue:** خستگی؛ یک نوع مکانیسم خرابی که طی آن، بر اثر اعمال تنش‌های مکانیکی تکرارشونده یا نوسان‌کننده‌ای که مقدار ماکسیمم آن‌ها از استحکام کششی ماده کمتر است، شکست رخ می‌دهد.

**ferrite:** فریت؛ فازی که معمولاً به آهن  $\alpha$  نسبت داده می‌شود و عناصری به صورت محلول جامد در آن وجود دارد.

**ferritic stainless steel:** فولاد زنگ‌نزن فریتی؛ یک نوع فولاد زنگ‌نزن با خاصیت مغناطیسی که ریزساختار آن فریت  $\alpha$  است. مقدار کروم این فولادها از ۱۱/۵٪ تا ۲۷٪ تغییر می‌کند، اما نیکل در ترکیب آن‌ها وجود ندارد.

**fish-mouth rupture:** شکست «دهان ماهی»؛ یک نوع شکست لبه‌نازک یا کلفت در لوله‌های بویلر که شبیه دهان باز یک ماهی است.

**flux:** (۱) ماده‌ای (معمولاً مایع) که می‌تواند اکسید فلزات را حل کند؛ (۲) نرخ عبور سیال، ذرات یا انرژی از یک سطح مشخص.

**gas porosity:** خلل و فرج؛ حفره‌های ریزی در فلز که بر اثر گرفتارشدن گاز یا تجمع تدریجی گازهای حل‌شده حین انجماد مذاب ایجاد می‌شوند.

**grain:** دانه؛ یک کریستال مشخص در یک فلز یا آلیاژ کریستالی.

**grain boundary:** مرزدانه؛ ناحیه باریکی در فلز که دانه‌ها را از یکدیگر جدا می‌کند.

**graphitic corrosion:** خوردگی گرافیتی؛ یک نوع خوردگی در چدن خاکستری به‌نحوی که آهن خورده‌شده و توده متخلخلی از گرافیت به‌جای می‌ماند. این نوع خوردگی در محلول‌های آبی نسبتاً نرم و اتصالات لوله که در خاک نصب می‌شوند، رخ می‌دهد.

**graphitization:** گرافیت‌شدن؛ تشکیل گرافیت در آهن یا فولاد که این امر معمولاً بر اثر تجزیه کاربرد آهن در دماهای بالا رخ می‌دهد. باید مراقب بود که این واژه با خوردگی گرافیتی اشتباه گرفته نشود.

**gulping:** ورود منقطع و اندک آب از درام بخار بویلر به سوپرهیتر بر اثر تغییرات سطح آب

**Heat-Affected Zone (HAZ):** بخشی از فلز پایه جوش که هنگام جوشکاری ذوب نشده است، اما بر اثر حرارت، ریزساختار و خواص مکانیکی آن تغییر کرده است.

**hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** هماتیت؛ یک نوع اکسید آهن مغناطیسی که به رنگ‌های خاکستری تا قرمز روشن وجود دارد. شکل‌های مایل به قرمز آن غیرمحافظ بوده و ایجاد آن‌ها، نشان‌دهنده وجود اکسیژن زیاد است.

**hydrolysis**: هیدرولیز؛ یک نوع تجزیه شیمیایی شامل شکستن یک پیوند و برقراری پیوند جدید با اجزای آب (واکنش شیمیایی یک ترکیب با آب)

**inclusion**: (آخال)؛ ذرات مواد خارجی در شبکه فلز. این ذرات معمولاً مرکب‌اند (مانند اکسیدها، سولفیدها یا سیلیکات‌ها)، اما ممکن است شامل هر ماده خارجی (و اساساً نامحلول) در شبکه فلز باشند.

**intergranular**: مرزدانه‌ای؛ وقوع فرایندی بین کریستال‌ها یا دانه‌ها؛ به آن **intercrystalline** نیز گفته می‌شود.

**intergranular corrosion**: خوردگی مرزدانه‌ای؛ نوعی خوردگی که ترجیحاً در مرزدانه‌ها رخ می‌دهد و معمولاً با خوردگی قابل چشم‌پوشی در دانه‌های مجاور همراه است.

**laning**: تغییر مسیر عمدی یا غیرعمدی محصولات احتراق که به تغییر توزیع انتقال حرارت در نقاط گوناگون منجر می‌شود.

**lap**: عیوب سطحی که ظاهری شبیه یک درز (seam) دارند و بر اثر نورد یا کوبیدن فلز داغ، فین‌ها یا گوشه‌های تیز قرار گرفته روی سطح، ایجاد می‌شوند (بدون اینکه جوشکاری انجام شود).

**magnetite** ( $Fe_3O_4$ ): مگنتیت؛ یک نوع اکسید آهن مغناطیسی در رنگ‌های خاکستری تیره تا سیاه. مگنتیت یک لایه محافظ روی سطوح آهنی ایجاد می‌کند.

**martensite**: مارتنزیت؛ محلول جامد فوق اشباع کربن در آهن که ریزساختار «سوزنی شکل» دارد.

**matrix**: فاز اصلی در ریزساختار ماده که فاز دیگری را احاطه کرده است.

**microstructure**: ریزساختار؛ ساختار یک فلز که با بررسی میکروسکوپی یک سطح صیقلی و اچ‌شده مشاهده می‌شود.

**mild steel**: فولاد نرم؛ فولاد کربنی که حداکثر حدود ۰.۲۵٪ کربن دارد.

**overheating**: بیش‌گرمایش؛ حرارت‌دادن یک فلز یا آلیاژ تا دمای بالا، طوری که خواص فلز یا آلیاژ از بین برود.

**pearlite**: پیرلیت؛ یک ریزساختار مرکب که از قرارگرفتن یک‌درمیان لایه‌های فریت و سمانتیت تشکیل شده است.

**penetration**: نفوذ؛ در جوشکاری، فاصله بین سطح اولیه فلز اصلی و نقطه‌ای که مذاب متوقف شده است.

**pH:** منهای لگاریتم غلظت یون  $H^+$  که نشان‌دهنده میزان اسیدی یا قلیایی بودن محلول است. در  $25^{\circ}C$  ( $77^{\circ}F$ )، pH معادل ۷، مقدار خنثی است. کمتر شدن pH از ۷، نشان‌دهنده افزایش خاصیت اسیدی و بیشتر شدن آن از ۷، نشان‌دهنده افزایش خاصیت قلیایی است.

**pipe:** حفره مرکزی که بر اثر انقباض فلز (به‌ویژه شمش‌ها) حین انجماد ایجاد شده است.  
**plain carbon steel:** فولاد کربنی ساده؛ فولادی با حداکثر ۰.۲٪ کربن و فقط مقادیر باقیمانده‌ای از عناصر دیگر به‌جز عناصری که برای اکسیژن‌زدایی اضافه می‌شوند. به این نوع فولادها، ordinary steel نیز گفته می‌شود.

**residual stress:** تنش پسماند؛ تنش‌هایی که بر اثر تغییر شکل پلاستیک در جسم باقی می‌مانند.  
**riser:** لوله‌هایی از بویلر که آب را به سمت درام بخار می‌برند.

**root crack:** ترکی در فلز جوش یا ناحیه HAZ در محل ریشه جوش.  
**root of joint:** بخشی از جوش که قطعات قبل از جوشکاری، کمترین فاصله را از یکدیگر داشته‌اند. سطح این بخش می‌تواند یک نقطه، یک خط یا یک سطح باشد.

**root of weld:** مجموعه نقاطی که فلز جوش با سطح فلز اصلی برخورد می‌کند و کمترین فاصله را تا ریشه اتصال (root of joint) دارد یا بر آن منطبق‌اند.

**scaling:** تشکیل لایه‌های ضخیم از محصولات خوردگی روی سطح فلز در دماهای بالا  
**scaling temperature:** دما یا محدوده دمایی که مقاومت فلز به خوردگی حرارتی کاهش می‌یابد.  
**seam:** چین یا زائده‌ای روی سطح فلز که به‌شکل یک ترک به‌نظر می‌رسد و معمولاً بر اثر ناپیوستگی در فلز ایجاد می‌شود.

**seam welding:** ایجاد یک جوش طولی در ورقه فلزی یا یک لوله  
**selective leaching:** جدایش انتخابی؛ نوعی خوردگی که یک جزء از آلیاژ خورده می‌شود و دیگر عناصر (غالباً به‌شکل یک توده متخلخل) که به خوردگی مقاوتر بوده‌اند، باقی می‌مانند.

**spalling:** ایجاد ترک در ذرات و سپس کنده‌شدن آن‌ها از سطح  
**stainless steel:** فولاد زنگ‌نزن؛ فولادهایی با ۱۲٪ تا ۳۰٪ کروم. این فولادها در محیط‌های آبی مقاوم‌اند.

**stoker-chain grate:** وسیله‌ای برای انتقال سوخت جامد به کوره؛ احتراق سوخت روی شبکه‌های این زنجیر انجام می‌شود.

**stress**: تنش؛ نیرو در واحد سطح (غالباً در مورد نیروهایی به کار می‌رود که در یک سطح کوچک و در یک صفحه اعمال می‌شوند). تنش را می‌توان به دو نوع عمودی (عمود بر سطح) و برشی (موازی با سطح) تقسیم کرد. تنش واقعی، وقتی است که نیرو و سطح، هم‌زمان اندازه‌گیری شوند. تنش مصطلح که در مورد تست‌های کششی و فشاری به کار می‌رود، نیرو تقسیم بر سطح اولیه است.

**stress corrosion cracking**: خوردگی تحت تنش؛ خرابی‌های ناشی از ایجاد ترک بر اثر عملکرد هم‌زمان خوردگی و تنش. تنش می‌تواند از خارج از قطعه اعمال شود یا در قطعه وجود داشته باشد (تنش پسماند). ترک‌ها، با توجه به نوع فلز و ماده خورنده، می‌توانند مرزدانه‌ای (intergranular) یا درون‌دانه‌ای (transgranular) باشند.

**stress riser**: محل تغییرات شکل قطعه یا ناپیوستگی‌های سطح قطعه که باعث افزایش موضعی تنش می‌شوند.

**stress rupture (creep rupture)**: شکست بر اثر خزش

**synergism**: اندرکنش (cooperative) عوامل مستقل، به طوری که اثر کلی آن‌ها از مجموع اثرات عملکردی مستقل هر یک از آن‌ها، بیشتر باشد.

**tensile strength**: استحکام کششی؛ نسبت ماکسیمم بار به سطح مقطع اولیه در آزمایش کشش. به آن ultimate strength نیز گفته می‌شود.

**thermal fatigue**: خستگی حرارتی؛ مکانیسم خرابی که طی آن، بر اثر اعمال تنش‌های حرارتی تکرارشونده یا نوسان‌کننده که مقدار ماکسیمم آن‌ها از استحکام کششی ماده کمتر است، شکست رخ می‌دهد.

**transgranular**: بین‌دانه‌ای؛ وقوع فرایندی از وسط کریستال‌ها و دانه‌ها. به آن، intercrystalline یا transcrystalline نیز می‌گویند.

**tuberculation**: تشکیل موضعی و تپه‌مانند محصولات خوردگی. به آن tubercle نیز گفته می‌شود.

**ultrasonic testing**: انجام تست آلتراسونیک؛ نوعی تست غیرمخرب که طی آن، یک پرتو ماورای صوت (آلتراسونیک) به مواد هادی صوت (sound-conductor) و برخوردار از خواص الاستیک اعمال می‌شود. از این تست برای مشخص کردن ناهمگنی‌ها و ناپیوستگی‌های ساختاری در ماده استفاده می‌شود.

**underbead crack**: زیرترک؛ ترکی در زیر سطح فلز اصلی و در نزدیکی جوش.

**undercut**: در اتصالات جوشکاری شده، شیاری در فلز اصلی و در مجاورت گوشه جوش (toe of weld) که با مذاب پر نشده است.

**weld**: جوش؛ اتصالی که با جوشکاری ایجاد شده است.

**weld bead**: مقدار فلزی که در یک پاس جوشکاری (pass) رسوب می‌کند.

**welding current**: جریانی که حین جوشکاری در مدار برقرار می‌شود.

**weldment**: قطعه‌ای که اجزایش با جوشکاری به یکدیگر متصل شده‌اند.

**weld metal**: بخشی از یک جوش که حین جوشکاری ذوب شده است.



## نمایه

اولپراتور، ۳۳، ۱۱۴، ۱۲۶، ۱۲۹، ۲۷۱، ۳۳۵، ۳۳۶، ۳۳۸، ۴۴۲، ۴۵۱	آخال‌های نافلزی، ۴۱۴، ۴۱۸، ۴۱۹، ۴۲۷ آستینیت، ۴۳، ۱۵۸، ۲۹۸، ۳۰۹، ۵۰۷، ۵۰۸، ۵۰۹
برنج، ۴۶۹، ۴۷۳	آنالیز خرابی، ۶۵، ۶۷
برنزهای آلومینیم، ۴۷۰	اتاق احتراق، ۴، ۲۶
برنزهای فسفری، ۴۷۰	احتراق اضافی، ۳۴
بستر سیال، ۳۷۳	اسید سولفوریک، ۱۹۷، ۲۶۱، ۲۶۲، ۲۶۳، ۲۶۵، ۲۶۶، ۲۶۷، ۲۶۸، ۲۷۶، ۲۷۷
بویلرهای بازیاب، ۱، ۲۵، ۲۶، ۲۹، ۳۳، ۳۵، ۳۶، ۶۰، ۶۱، ۶۲، ۷۹، ۴۴۷	اسید سیتریک، ۲۱۵، ۲۱۶
بویلرهای درام‌دار، ۲۱، ۱۶۷، ۵۱۱، ۵۱۲	اسیدشویی، ۱۱۱، ۱۳۳، ۱۶۱، ۱۶۵، ۱۶۷، ۱۷۴، ۱۷۵، ۱۹۸، ۲۰۰، ۲۱۱، ۲۲۶، ۲۲۹، ۲۸۸
بویلرهای لوله آبی، ۱۹	۲۹۰، ۲۹۳، ۲۹۴، ۴۱۶، ۵۱۶
بویلرهای یک‌بار گذر، ۱۹، ۲۰	اغتاش، ۱۳، ۸۶، ۱۰۱، ۱۳۲، ۱۹۱، ۱۹۳، ۲۸۲، ۲۹۲، ۳۰۰، ۳۱۳، ۳۱۶، ۳۱۹، ۳۲۳، ۳۲۴، ۳۳۶، ۳۴۱، ۳۴۲، ۳۴۳، ۳۷۳، ۳۸۸، ۳۹۴، ۳۹۵، ۴۰۴، ۴۰۵، ۴۰۶، ۴۰۷، ۴۰۸، ۴۳۰، ۴۴۲، ۴۶۴، ۴۷۶
بیش‌گرمایش بلندمدت، ۶۸، ۶۹، ۷۰، ۷۷	اکسیداسیون سریع، ۲۳۹، ۲۴۵، ۳۷۴، ۴۵۳
۷۸، ۷۹، ۸۰، ۹۲، ۱۱۴، ۱۱۶، ۱۱۸، ۱۲۰، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۳۴، ۱۴۵، ۱۴۶، ۱۴۸، ۱۴۲، ۱۴۳، ۱۴۹، ۱۵۱، ۱۵۳، ۱۵۴، ۱۵۶، ۱۵۸، ۱۶۲، ۱۸۴، ۳۰۲، ۴۵۹	اکونومایزر، ۴، ۵، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۴، ۲۹، ۳۱، ۳۳، ۵۱، ۵۴، ۷۸، ۱۸۵، ۱۸۷، ۲۰۳، ۲۰۴، ۲۰۵، ۲۰۶، ۲۱۴، ۲۲۶، ۲۲۹، ۲۶۳، ۲۶۴، ۲۶۷، ۲۶۸، ۲۷۵، ۲۷۹، ۳۲۵، ۳۲۹، ۳۳۲، ۳۳۸، ۳۴۰، ۳۴۱، ۳۴۳، ۳۵۳، ۳۵۸، ۳۵۹، ۳۸۰، ۳۹۷، ۳۹۸، ۴۴۲، ۴۵۱، ۴۸۷، ۵۰۵، ۵۰۶، ۵۱۱
پروانه پمپ، ۱۹۲، ۲۱۴، ۴۰۷، ۴۰۹، ۴۴۵	اندرکنش خزش - خستگی، ۴۷۹
پره‌های متحرک، ۳۸۷، ۳۸۸، ۳۹۰، ۳۹۲	
پمپ آب تغذیه، ۱۶، ۲۱، ۲۴، ۳۱، ۱۹۳	
۳۸۷، ۳۸۹، ۴۰۸، ۴۶۶، ۴۶۸	
پوسیدگی جوش، ۴۲، ۴۴۸، ۴۴۹	
پوشش پلاσμα، ۴۰۸	
پوشش فلزی، ۳۸۴	
پوشش‌های الاستومریک، ۴۰۸	

خاکستر مواد نفتی، ۲۴۱، ۲۴۳، ۳۷۷، ۳۸۲، ۳۸۳	ناول، ۱۶۰، ۱۶۱، ۱۶۲، ۱۶۴
خاکسترهای گداخته، ۲۳۹، ۲۵۳، ۳۶۳، ۳۷۳، ۳۸۰، ۳۷۹	تبخیر در سطح آب، ۱۷۲، ۱۷۳، ۱۹۸
خزش، ۳۶، ۵۱، ۶۸، ۷۰، ۷۶، ۹۰، ۹۱، ۱۰۱، ۱۰۳، ۱۱۴، ۱۳۶، ۱۴۳، ۱۶۲، ۱۸۴، ۳۰۴، ۴۵۳، ۴۷۶، ۴۸۰، ۴۹۳	ترک خستگی- خوردگی، ۲۲۵، ۳۷۹، ۳۹۹
خستگی، ۶۸، ۴۱۴، ۴۳۰، ۴۳۲، ۴۷۵، ۴۸۱، ۴۷۶، ۴۷۷	۴۹۲، ۴۹۰، ۴۸۹، ۴۸۷، ۴۷۸، ۴۱۸
خستگی ارتعاشی، ۴۷۶	تری اکسید گوگرد، ۲۶۱، ۲۶۳، ۲۶۴، ۲۶۵
خستگی حرارتی، ۳۱۵، ۴۳۳، ۴۷۶، ۴۷۷	تست اولتراسونیک، ۲۸۷
خستگی حرارتی پرچرخه، ۴۷۷	تست هیدرواستاتیکی، ۱۸۶، ۱۹۰، ۲۱۹
خستگی- خوردگی، ۳۶، ۴۹، ۲۸۴، ۳۹۹، ۴۱۶، ۴۳۹، ۴۷۸، ۴۸۰، ۴۸۴، ۴۹۰، ۴۸۸، ۴۸۷، ۴۸۵، ۴۸۰، ۴۸۱، ۴۸۲، ۴۸۳، ۴۸۴، ۴۸۵، ۴۸۶، ۴۸۷، ۴۸۸، ۴۸۹، ۴۹۰، ۴۹۱، ۴۹۲، ۴۹۳، ۴۹۴، ۴۹۵، ۵۰۰	تنش- گسیختگی، ۱۱۲
خواص مکانیکی و متالورژیکی، ۳۱۸، ۳۲۱	جدایش عناصر آلیاژی، ۴۶۹، ۴۷۱، ۴۷۳
خوردگی اسیدی، ۱۹۷، ۱۹۸، ۱۹۹، ۲۰۰، ۲۰۱، ۲۰۲، ۲۰۳، ۲۱۱، ۲۱۲، ۲۱۳، ۲۱۴، ۲۱۵، ۲۱۷، ۲۱۸، ۲۱۹، ۲۲۲، ۲۲۳، ۲۲۴، ۲۲۵، ۲۲۶، ۲۲۷، ۲۲۸، ۲۲۹، ۲۳۰، ۲۳۱، ۲۳۲، ۲۳۳، ۲۳۴، ۲۳۵، ۲۳۶، ۲۳۷، ۲۳۸، ۲۳۹، ۲۴۰، ۲۴۱، ۲۴۲، ۲۴۳، ۲۴۴، ۲۴۵، ۲۴۶، ۲۴۷، ۲۴۸، ۲۴۹، ۲۵۰، ۲۵۱، ۲۵۲، ۲۵۳، ۲۵۴، ۲۵۵، ۲۵۶، ۲۵۷، ۲۵۸، ۲۵۹، ۲۶۰، ۲۶۱، ۲۶۲، ۲۶۳، ۲۶۴، ۲۶۵، ۲۶۶، ۲۶۷، ۲۶۸، ۲۶۹، ۲۷۰، ۲۷۱، ۲۷۲، ۲۷۳، ۲۷۴، ۲۷۵، ۲۷۶، ۲۷۷، ۲۷۸، ۲۷۹، ۲۸۰، ۲۸۱، ۲۸۲، ۲۸۳، ۲۸۴، ۲۸۵، ۲۸۶، ۲۸۷، ۲۸۸، ۲۸۹، ۲۹۰، ۲۹۱، ۲۹۲، ۲۹۳، ۲۹۴، ۲۹۵، ۲۹۶، ۲۹۷، ۲۹۸، ۲۹۹، ۳۰۰، ۳۰۱، ۳۰۲، ۳۰۳، ۳۰۴، ۳۰۵، ۳۰۶، ۳۰۷، ۳۰۸، ۳۰۹، ۳۱۰، ۳۱۱، ۳۱۲، ۳۱۳، ۳۱۴، ۳۱۵، ۳۱۶، ۳۱۷، ۳۱۸، ۳۱۹، ۳۲۰، ۳۲۱، ۳۲۲، ۳۲۳، ۳۲۴، ۳۲۵، ۳۲۶، ۳۲۷، ۳۲۸، ۳۲۹، ۳۳۰، ۳۳۱، ۳۳۲، ۳۳۳، ۳۳۴، ۳۳۵، ۳۳۶، ۳۳۷، ۳۳۸، ۳۳۹، ۳۴۰، ۳۴۱، ۳۴۲، ۳۴۳، ۳۴۴، ۳۴۵، ۳۴۶، ۳۴۷، ۳۴۸، ۳۴۹، ۳۵۰، ۳۵۱، ۳۵۲، ۳۵۳، ۳۵۴، ۳۵۵، ۳۵۶، ۳۵۷، ۳۵۸، ۳۵۹، ۳۶۰، ۳۶۱، ۳۶۲، ۳۶۳، ۳۶۴، ۳۶۵، ۳۶۶، ۳۶۷، ۳۶۸، ۳۶۹، ۳۷۰، ۳۷۱، ۳۷۲، ۳۷۳، ۳۷۴، ۳۷۵، ۳۷۶، ۳۷۷، ۳۷۸، ۳۷۹، ۳۸۰، ۳۸۱، ۳۸۲، ۳۸۳، ۳۸۴، ۳۸۵، ۳۸۶، ۳۸۷، ۳۸۸، ۳۸۹، ۳۹۰، ۳۹۱، ۳۹۲، ۳۹۳، ۳۹۴، ۳۹۵، ۳۹۶، ۳۹۷، ۳۹۸، ۳۹۹، ۴۰۰	جدایش موضعی، ۴۶۹، ۴۷۰
خوردگی اسیدی حین اسیدشویی، ۲۱۱، ۲۱۵	جوشش لایه‌ای ناپایدار، ۸۰، ۸۳، ۱۳۲، ۱۷۱
خوردگی اسیدی حین بهره‌برداری، ۱۹۷	۵۰۰، ۲۸۸، ۱۹۸، ۱۹۲، ۱۷۴
۴۰۹، ۲۸۲، ۲۰۰، ۱۹۸	جوشکاری، ۴۴، ۴۶، ۴۷، ۴۹، ۲۱۱، ۲۲۲
خوردگی اکسیژنی، ۱۹۴، ۲۱۴، ۲۲۵، ۲۲۶	۲۴۸، ۲۵۵، ۲۸۹، ۲۹۸، ۳۰۰، ۳۱۳، ۳۷۷
۲۳۳، ۲۳۲، ۲۳۱، ۲۳۰، ۲۲۹، ۲۲۸، ۲۲۷	۳۸۷، ۳۸۸، ۳۸۹، ۳۹۰، ۳۹۱، ۳۹۲، ۳۹۳، ۳۹۴، ۳۹۵، ۳۹۶، ۳۹۷، ۳۹۸، ۳۹۹، ۴۰۰
۴۸۸، ۴۱۱، ۴۱۰، ۳۶۰، ۳۵۷، ۳۵۳، ۳۳۵	چدن خاکستری، ۴۰۵، ۴۶۵، ۴۶۶، ۴۶۸
خوردگی تحت تنش، ۴۲، ۴۳، ۶۸، ۲۸۴	چقرمگی، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۵۲، ۶۷
۴۹۸، ۴۹۷، ۴۸۲، ۴۸۰، ۴۷۸، ۴۳۳، ۴۳۲	۱۵۱، ۱۵۴، ۲۸۹، ۳۰۱، ۳۰۵، ۳۰۶، ۳۰۸
۵۰۵، ۵۰۲، ۵۰۱، ۵۰۰، ۴۹۹	۴۰۰
خوردگی سایشی، ۳۱۳، ۳۱۴، ۳۲۳، ۳۲۴	حباب بخار، ۸۴، ۱۷۱، ۳۳۹، ۳۴۰، ۳۴۳، ۴۰۴
۴۴۲، ۳۳۶، ۳۳۰	۴۰۸، ۴۰۷
خوردگی سمت آب، ۱۶۷	حفره‌زایی، ۷۴، ۷۵
خوردگی سمت آتش، ۵۱، ۱۲۷، ۱۲۸، ۲۳۷	حفره‌های داخل لوله، ۳۲۷
۲۵۶، ۲۵۴، ۲۵۳، ۲۳۸	حمله هیدروژنی، ۶۸، ۲۰۲، ۲۸۱، ۴۸۸، ۵۰۰
	خاکستر گداخته، ۲۴۵، ۲۵۰، ۳۶۳، ۳۶۴
	۳۸۷، ۳۸۶، ۳۸۵، ۳۶۵
	خاکستر معلق، ۲۴۵، ۲۴۷، ۲۵۰، ۳۷۳، ۳۷۵
	۳۸۴، ۳۸۳، ۳۸۲، ۳۸۱، ۳۸۰، ۳۷۹، ۳۷۷
	۳۸۶، ۳۸۵



سیلیکات، ۲۸۱، ۳۳۹، ۳۴۲، ۳۵۴، ۳۶۶	سایش، ۳۶، ۴۵، ۶۸، ۱۱۲، ۱۹۰، ۲۲۳، ۳۰۱
شرایط فیزیکی آب، ۳۱۸، ۳۲۲	۳۰۵، ۳۱۳، ۳۱۸، ۳۱۹، ۳۲۰، ۳۲۱، ۳۲۲
شکست خزشی، ۷۴، ۷۵، ۸۸، ۹۰، ۱۰۶، ۱۲۰	۳۲۶، ۳۳۸، ۳۴۵، ۳۶۰، ۳۶۴، ۳۷۳، ۴۰۹
۵۰۰، ۴۵۴، ۲۳۹	۴۱۹، ۴۴۴، ۴۹۳
شکست لبه‌کلفت، ۹۲، ۱۰۸، ۱۳۶، ۱۳۹، ۱۴۰	سایش فیزیکی، ۳۷۴
۲۸۳، ۲۹۰، ۲۹۱، ۲۹۴، ۲۹۵، ۳۰۱، ۴۵۶	سپر حفاظتی، ۳۸۴
۴۵۷	سرباره‌های جوش، ۳۰۰، ۴۲۹
شیمی آب، ۱۹۸، ۳۱۸	سمانتیت، ۵۰۹
ضریب هندسی، ۳۲۰	سوپرهیتر، ۴، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۲۰، ۲۱
طراحی اولیه هارپ، ۳۱۸، ۳۱۹	۲۴، ۲۹، ۳۱، ۳۳، ۵۱، ۶۰، ۶۳، ۶۶، ۷۷
عیوب جوشکاری، ۴۲۷، ۴۳۳	۸۳، ۸۶، ۹۰، ۹۲، ۹۵، ۹۶، ۹۹، ۱۰۰
عیوب ناشی از تولید، ۴۱۳، ۴۱۵	۱۰۱، ۱۰۳، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۰، ۱۱۱
غلظت اکسیژن، ۳۱۸، ۳۱۹، ۳۵۳	۱۱۲، ۱۱۹، ۱۲۱، ۱۲۹، ۱۳۲، ۱۳۳، ۱۳۵
فریت، ۴۲، ۴۳، ۴۶، ۴۷، ۹۱، ۹۲، ۹۳، ۱۰۳	۱۴۱، ۱۴۲، ۱۴۶، ۱۴۷، ۱۴۸، ۱۵۰، ۱۵۴
۱۰۴، ۱۱۶، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۶، ۱۳۷، ۱۴۴	۱۵۵، ۱۶۶، ۱۸۲، ۱۸۵، ۱۸۶، ۱۹۲، ۲۰۷
۱۴۶، ۱۲۸، ۳۲۱، ۳۷۰، ۴۲۴، ۴۲۵، ۴۵۸	۲۰۸، ۲۰۹، ۲۲۵، ۲۲۶، ۲۲۷، ۲۲۸، ۲۳۰
۵۰۷، ۵۰۸، ۵۰۹	۲۳۹، ۲۴۲، ۲۴۷، ۲۴۹، ۲۹۵، ۳۱۲
فسفات، ۹۵، ۹۷، ۱۰۱، ۱۳۹، ۱۴۰، ۲۱۹	۳۴۲، ۳۴۵، ۳۴۷، ۳۶۰، ۳۶۱، ۳۶۳، ۳۶۴
۲۲۰، ۲۲۹، ۳۴۳، ۳۵۴، ۳۵۵، ۳۶۰، ۳۶۱	۳۶۵، ۳۷۴، ۳۷۵، ۳۷۶، ۳۷۹، ۳۸۰، ۳۹۲
۳۶۳، ۳۶۶، ۳۹۵، ۳۹۷، ۳۹۸، ۴۰۹، ۴۱۵	۳۹۳، ۳۹۴، ۳۹۵، ۳۹۶، ۳۹۹، ۴۰۰، ۴۰۱
۴۶۸، ۴۶۸، ۴۷۳، ۴۶۸	۴۰۲، ۴۱۸، ۴۲۶، ۴۳۷، ۴۴۸، ۴۵۴، ۴۵۵
فسفات هماتنگ، ۱۳۹، ۱۷۴، ۱۷۵، ۱۷۶، ۱۷۸	۴۵۶، ۴۵۸، ۴۶۰، ۴۶۱، ۴۶۲، ۴۷۴، ۴۸۷
۱۷۹، ۲۰۰، ۲۰۲، ۲۱۵، ۲۱۶، ۲۲۲، ۲۲۳	۴۹۱، ۴۹۲، ۴۹۴، ۴۹۵، ۴۹۶، ۴۹۷، ۵۰۱
۲۵۶، ۲۸۹، ۲۹۰، ۲۹۱، ۲۹۲، ۲۹۴، ۲۹۵	۵۰۳، ۵۰۴، ۵۱۵
۳۶۴، ۳۶۷، ۳۹۳، ۴۱۸، ۴۲۸، ۴۴۰، ۴۴۱	سوپرهیترهای پلاتن، ۹
۴۵۵، ۴۵۷، ۴۹۱، ۵۱۲	سوپرهیترهای تشعشی، ۹، ۲۴۵
فن گردش مجدد دود، ۱۷	سوپرهیترهای جابه‌جایی، ۹، ۱۰
فولادهای آلیاژی، ۴۱	سولفات، ۳۳۹، ۳۴۷
	سیکل آب و بخار، ۲۶، ۵۱۱
	سیکل ترکیبی، ۱، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۶۰، ۱۱۴
	۱۴۲، ۲۷۱، ۲۷۴، ۲۷۵، ۳۲۲، ۳۲۳، ۳۲۵
	۳۳۵، ۳۳۶، ۳۳۸، ۳۴۲، ۳۴۳، ۳۴۴، ۳۴۷، ۳۹۴
	۴۹۵، ۴۹۷

گرافیت‌شدن، ۴۷، ۷۷، ۷۸، ۱۰۶، ۱۱۶، ۴۳۶،  
۴۳۷، ۴۳۸، ۴۴۲، ۴۶۰، ۵۰۷

گرافیت‌شدن زنجیره‌ای، ۷۷، ۷۸

لایهٔ اکسیدی، ۸۷، ۱۰۴، ۱۰۸، ۱۱۱، ۱۱۲،

۱۱۳، ۱۱۵، ۱۱۶، ۱۲۰، ۱۲۱، ۱۵۶، ۱۶۲،

۱۶۳، ۲۷۰، ۲۸۶، ۳۰۳، ۳۰۷، ۳۱۰، ۳۱۵،

۳۱۶، ۳۱۸، ۳۷۰، ۳۷۶، ۳۸۸، ۴۵۸، ۴۹۳

لایهٔ محافظ، ۱۱۴، ۱۸۴، ۱۸۵، ۲۲۵، ۲۲۶،

۲۲۷، ۲۲۸، ۲۳۹، ۲۷۲، ۲۷۳، ۳۰۷، ۳۱۵،

۳۲۸، ۳۳۴، ۴۹۳، ۵۱۱، ۵۱۶

لبه‌کلفت، ۸۹، ۱۰۰، ۱۰۱، ۱۰۴، ۱۳۴، ۱۳۶،

۲۸۳، ۲۹۱، ۲۹۳، ۳۰۸، ۳۰۹، ۴۱۴،

۴۱۸، ۴۵۴، ۴۵۸، ۴۸۸، ۴۹۴، ۴۹۹، ۵۰۰،

۵۰۵

لبه‌نازک، ۸۹، ۱۳۴، ۱۳۵، ۱۴۱، ۱۵۲، ۳۸۳،

مادهٔ نامناسب، ۶۸، ۸۶، ۴۵۳

متالوگرافی، ۶۷، ۹۴، ۱۰۲، ۱۱۱، ۱۱۶، ۱۱۷،

۱۱۸، ۱۱۹، ۱۲۸، ۱۳۸، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۵۷،

۱۶۲، ۱۷۳، ۱۹۹، ۲۰۶، ۲۰۹، ۲۱۸، ۲۷۳،

۲۸۶، ۲۸۷، ۳۰۹، ۳۱۰، ۳۷۰، ۳۸۳، ۴۱۴،

۴۲۰، ۴۶۰، ۴۹۳، ۵۰۰

محلول جامد بین‌نشینی، ۵۰۸

مس، ۴۰، ۴۵، ۱۰۰، ۱۱۷، ۱۹۰، ۱۹۳، ۲۰۱،

۲۱۵، ۲۸۵، ۲۸۶، ۳۰۳، ۳۰۴، ۳۰۵، ۳۱۰،

۳۳۹، ۳۴۲، ۳۴۹، ۳۵۳، ۳۷۰، ۴۶۹، ۴۷۱،

۴۷۳، ۵۱۳، ۵۱۴

مس-نیکل، ۴۶۹، ۴۷۲، ۴۷۴

مشعل، ۱۳، ۳۴، ۱۳۲، ۲۲۸، ۲۵۳، ۲۵۷،

۲۶۰، ۲۶۱، ۳۶۷، ۳۹۸، ۴۲۱، ۴۲۶،

مفرغ، ۷۰

مقاومت خزشی، ۵۱، ۴۵۳

فولادهای زنگ‌نزن، ۴۱، ۴۶، ۳۹۲، ۴۰۵، ۴۴۸،

۴۹۷، ۴۹۸، ۵۰۴

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، ۴۲، ۴۳، ۴۹، ۹۳،

۲۴۷

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی-فریتی، ۴۳

فولادهای زنگ‌نزن با قابلیت رسوب‌سختی، ۴۳

فولادهای زنگ‌نزن فریتی، ۴۲

فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی، ۴۳

فولادهای غیرآلیزای (کربنی)، ۳۹

قطرات آب، ۷، ۸، ۱۰، ۳۷۴، ۳۷۵، ۳۸۷،

۳۹۰، ۳۹۱

کاربید، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۷۷، ۹۱، ۱۰۴، ۱۰۹،

۱۲۱، ۱۲۲، ۱۵۸، ۳۷۰، ۴۲۵، ۴۴۶،

کاربید کروم، ۴۴۹، ۴۴۸

کانالیزه‌شدن دود، ۷۹، ۱۹۰، ۲۰۰، ۲۸۸،

۳۶۳، ۳۷۵، ۳۸۰، ۴۰۰

کویتاسیون، ۲۱۴، ۳۸۸، ۳۹۲، ۴۰۳،

کاهش ضخامت، ۸۷، ۹۶، ۱۱۲، ۱۲۷، ۱۳۴،

۱۴۹، ۱۵۱، ۱۵۶، ۱۶۱، ۱۹۲، ۲۰۸، ۲۴۲،

۲۴۵، ۲۴۷، ۲۵۰، ۲۷۸، ۳۰۳، ۳۱۴، ۳۲۰،

۳۲۲، ۳۲۳، ۳۳۰، ۳۳۵، ۳۹۲، ۴۱۹، ۴۴۴،

کربنات، ۲۲۹، ۲۵۹، ۳۴۲، ۳۵۳، ۳۵۴، ۳۶۰،

۳۶۱، ۳۶۶

کنترل شیمیایی خنثی، ۵۱۶

کنترل شیمیایی فرار، ۵۱۶

کنترل شیمیایی مخلوط، ۵۱۷

گرادبان‌های حرارتی، ۴۷۵

گرافیت، ۷۹، ۹۴، ۱۰۷، ۱۱۷، ۱۲۶، ۱۲۸،

۴۴۱، ۴۵۶، ۴۵۸، ۴۶۳، ۴۶۴، ۴۶۵، ۴۶۶،

۴۶۷، ۵۰۹

ویزگی‌های هیدرودینامیکی، ۳۱۸، ۳۲۲  
 هدر، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۲۱، ۲۴، ۳۱، ۸۶  
 ۱۱۴، ۱۵۵، ۱۹۱، ۲۷۰، ۳۲۳، ۳۲۴، ۳۲۵  
 ۳۲۶، ۳۲۷، ۳۲۸، ۳۳۲، ۳۳۳، ۳۳۴، ۳۳۵  
 ۳۵۸، ۳۶۵، ۳۹۶، ۳۹۷، ۴۰۰، ۴۱۵، ۴۴۲  
 ۴۴۷، ۴۸۹، ۴۹۱  
 هیتر فشار قوی، ۳۲۴  
 هیترهای هوا، ۱۳  
 هیدرازین، ۲۳۱، ۳۲۹، ۳۴۸، ۵۱۴، ۵۱۵، ۵۱۶  
 هیدروکسید سدیم، ۱۶۹، ۱۷۰، ۱۷۱، ۱۷۴  
 ۱۷۷، ۱۸۰، ۱۸۱، ۲۸۱، ۲۹۴، ۳۵۵  
 ۳۵۹، ۳۶۰، ۳۶۱، ۳۷۱، ۳۷۲، ۴۳۴، ۴۹۷  
 ۴۹۸، ۴۹۹، ۵۰۱، ۵۰۲، ۵۰۳، ۵۰۵، ۵۱۲  
 ۵۱۳

مگنتیت، ۸۷، ۸۸، ۸۹، ۹۶، ۹۸، ۱۰۰، ۱۱۴  
 ۱۶۹، ۱۷۰، ۱۷۱، ۱۷۴، ۱۸۱، ۱۸۷، ۱۹۷  
 ۲۲۵، ۲۲۶، ۲۲۸، ۲۳۱، ۲۳۹، ۲۵۳، ۲۷۳  
 ۲۸۱، ۲۹۹، ۳۴۱، ۳۴۷، ۳۵۱، ۳۵۲  
 ۳۵۳، ۳۶۰، ۳۶۲، ۳۶۳، ۳۶۴، ۳۶۵، ۳۷۱  
 ۳۹۲، ۳۹۶، ۴۷۷، ۴۸۵، ۴۸۸، ۵۰۵، ۵۱۲  
 منحنی خزش، ۷۱، ۷۲، ۷۳، ۷۴، ۱۱۱  
 نزدیک‌ترین دما، ۳۳، ۳۵  
 نفوذ بیش از حد، ۴۳۰، ۴۳۱  
 نقاط سه‌گانه، ۷۴، ۷۵  
 نقطه شبنم، ۲۶۲، ۲۶۳، ۲۶۴، ۲۶۵، ۲۶۶  
 ۲۷۵، ۲۷۶، ۲۷۷، ۴۴۸  
 نمک‌های مولد قلیا، ۱۷۰، ۱۷۴، ۳۷۲، ۵۰۰  
 ورم، ۸۰، ۸۶، ۸۸، ۹۰، ۹۱، ۹۷، ۹۸، ۹۹  
 ۱۰۰، ۱۲۱، ۱۳۶، ۱۴۲، ۳۵۵، ۳۵۷، ۳۶۲  
 ۳۶۵، ۳۷۶

# Boiler and Related Failures

New Edition

Seyed Ebrahim Moussavi Torshizi

