

انواع خوردگی ، و استراتژی پیشگیری و راهکارهای مقابله

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد عمران سازه

انواع خوردگی که در صنعت پتروشیمی و دارویی

۱) رایج ترین انواع خوردگی ها

۲) ترک خوردگی کلرایدی

۳) خوردگی در عایق های حرارتی

۴) ترک خوردگی آمونیاکی

۵) اکسیداسیون

● استراتژی پیشگیری از خوردگی شامل موارد زیر میباشد

۱) افزایش آگاهی از هزینه های بالای خوردگی و پتانسیل های کاهش هزینه

۲) تغییر این نگرش غلط، که کاری در مورد کاهش هزینه های خوردگی نمیتوان انجام داد

۳) تغییر سیاست ها، قوانین ، استانداردها و تمرین مدیریت تاجایی که هزینه های خوردگی از طریق مدیریت

اثر بخش، خوردگی کاهش دهیم

۴) افزایش آموزش و مهارت کارمندان به منظور شناخت و شناسایی روش های کنترل خوردگی

۵) بازنگری در فرآیند طراحی محصولات در راستای جلوگیری از افزایش هزینه های خوردگی

۶) طراحی و تدوین متدهای پیش بینی پیشرفته در عمر محصول و تشخیص در حین فرآیند

۷) ایجاد فناوری های پیشرفته کنترل خوردگی

● هزینه های خوردگی در این بخش صنعت به دسته تقسیم میشود

هزینه های پیش گیری و حفاظت

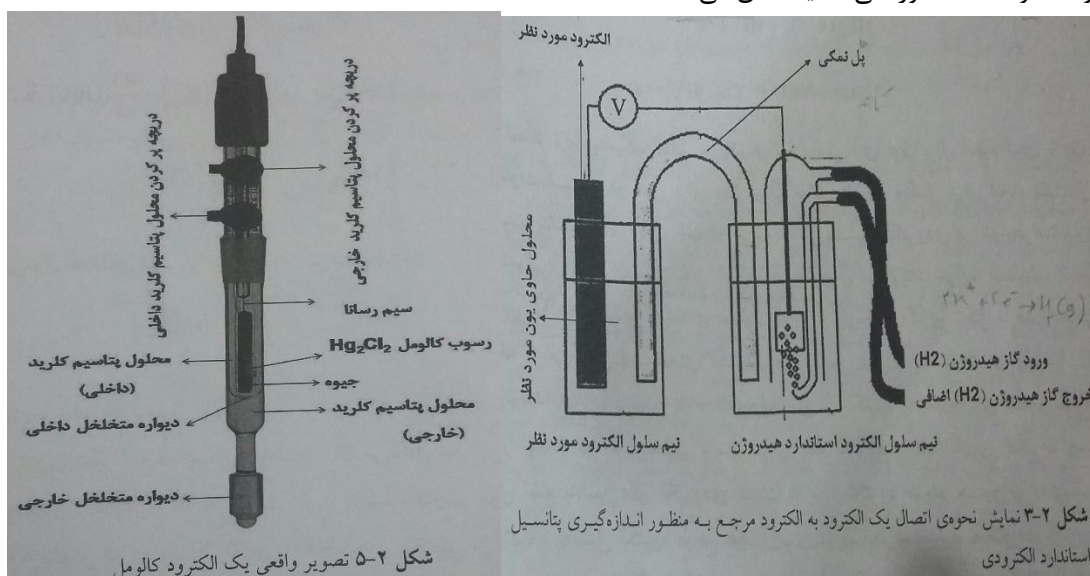
هزینه های جایگزینی سازه های فرسوده

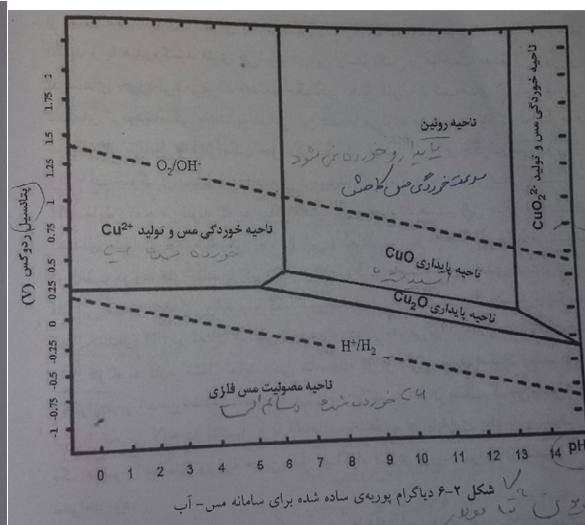
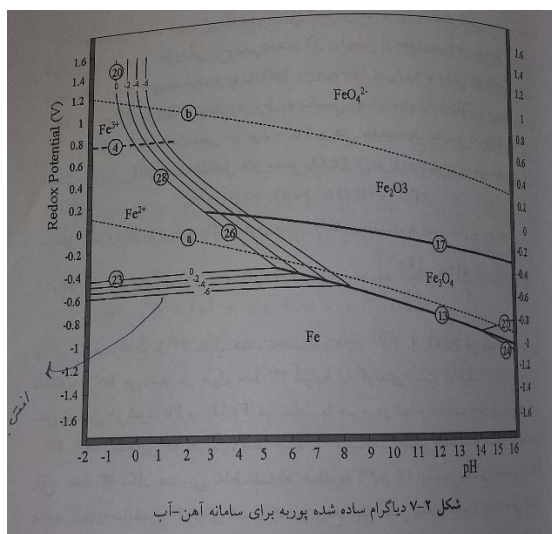
هزینه هدر رفتن آب

در صنعت دارویی، خوردگی در ذرات آهن موجود در دیواره های مخازن، آستر شیشه ای و عایق ها اتفاق می افتد.

۴۵ درصد آسیب ها در این صنعت از بابت خوردگی لوله ها، تانک ها، راکتور، شفت ها، برج ها، کمپرسور ها، مبدل حرارتی ، گرمکن ها

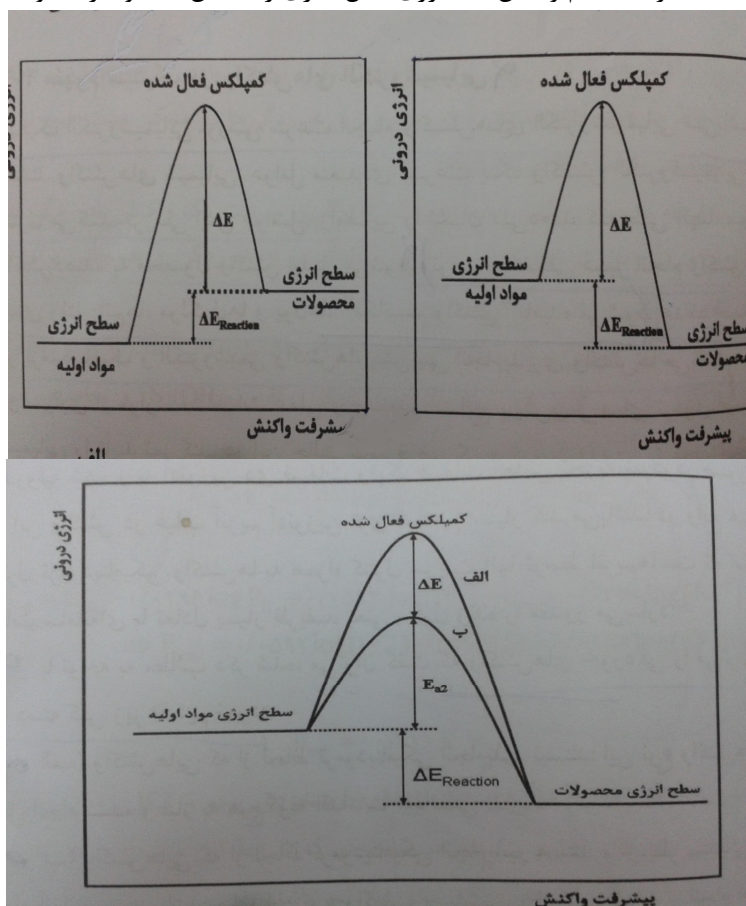
در صنایع شیمیایی و پتروشیمی به علت استفاده از مواد اولیه خورنده مثل نفت خام، اسیدها و باز ها در مخازن نگه داری ، لوله ها و تانک ها خوردگی شدید اتفاق می افتد.





سنتیتیک خوردگی

تمایل ترمودینامیکی (مقدر پتانسیل یا تغییرات انرژی آزاد گیبس) ارتباطی به سرعت واکنش ندارد و هرگاه پتانسیل الکتروشیمیایی یک واکنش مثبت باشد (تغییرات انرژی آزاد آن منفی باشد) نشان می دهد که واکنش انجام پذیر است کاتالیزور: ماده ای است که با تغییر مکانیسم و کنش سد انرژی فعال سازی را کاهش داده و سرعت واکنش را افزایش می دهد.



سینتیک الکترو شیمیایی بررسی سرعت انجام واکنش های الکترو شیمیایی میباشد. توضیح تفصیلی مسیر انجام واکنش بر مبنای رفتار اتم ها . مولکول ها و یون ها " مکانسیم واکنش " نامیده می شود. هدف اصلی در ترمودینامیکی و الکتروشیمی واکنش ها پیش بینی انجام پذیری واکنش ها می باشد.

نکته: کاتالیزور های مخصوصی به انم آنزیم ها در تعیین این که کدام واکنش در سامانه های زیستی با سرعت قابل ملاحظه انجام شود عواملی مهم هستند.

واکنش خوردگی را می توان به سه دسته کلی تقسیم نمود:

الف) واکنش های که از لحاظ ترمودینامیکی انجام پذیر نیستند: این نوع واکنش ها در عمل انجام نشده و نیاز به هیچ گونه اقدامات محافظتی ندارد

ب) واکنش های که از لحاظ ترمودینامیکی انجام پذیر هستند و از نظر سینتیکی نیز انجام آنها سریع می باشد : برای این نوع واکنش می بایست برای جلوگیری از انجام شدن اقدام های خاص محافظتی صورت گیرد.

ج) واکنش های که از نظر ترمودینامیکی تمایل بسیار زیادی به انجام شدن دارد ولی از لحاظ سرعت کند هستند : برای این نوع از خوردگی نیز ممکن است هیچ نوع تمهید محافظتی خاصی لازم نباشد.

واکنش آندی: واکنشی که در آن عمل اکسایش رخ می دهد

واکنش کاتدی: واکنشی که در آن عمل کاهش رخ می دهد

چهار عامل زیر به صورت مستقیم بر مقدار چگالی جریان مبادله و در نتیجه بر سرعت انجام

واکنش الکتروشیمیایی اثر می گذارد:

الف) جنس الکترود:

جنس الکترود عامل اساسی در تعیین مقدار چگالی جریان مبادله می باشد.

ب) میزان صیقلی بودن سطح:

هرچه سطح دارای پستی و بلندی های میکروسکوپی بیشتری باشد چگالی جریان مبادله برای واکنش الکتروشیمیایی که در روی این سطح انجام می شود بدلیل افزایش مساحت سطح الکترود یستر خواهد بود.

ج) ناخالصی ها:

در اغلب فلز ها حضور ناخالصی در حد بسیار کم باعث کاهش چگالی جریان مبادله می شود.

د) موقعیت اتم یا یون در سطح الکترود:

گونه هایی که در موقعیت هایی با سطح انرژی بالا (ناپایدار) نظیر لبه ها نقص های بلوری و محل های پیچش سطح قرار داشته باشند بسیار آسان از گونه های که در سطح صاف قرار دارد واکنش می شوند و همین امر باعث افزایش چگالی جریان مبادله می شود.

زمانی که یک واکنش الکترودی در حال تعادل باشد چگالی جریان های واکنش های رفت و برگشت از لحاظ مقدار با هم برابر ولی از لحاظ علامت عکس یکدیگر می باشند.

نکته: جابجایی پتانسیل از مقدار تعادلی در اثر اعمال جریان از مدار خارجی را قطبش می نامند مقدار این جابجایی اضافه ولتاژی نامند.

بنابراین قطبش آندی به فرآیندی اطلاق می شود که طی آن سطح فلز از طریق از دست دادن الکترون اکسید می شود (خورده می شود)

قطبش فعال سازی یک مرحله کند از یک نیم واکنش الکتروشیمیایی می باشد که طی آن پیشرفت واکنش نیازمند انرژی پتانسیل می باشد.

نکته: سرعت کاهیده یون هیدروژن از روی سرعت کندترین مرحله تعیین می شود و بستگی به جنس الکترود . چگالی جریان و محیط اطراف الکترود دارد.

به طور کلی قطبش فعال سازی به عوامل زیر بستگی دارد:

الف) چگالی جریان:

قطبش فعال سازی با افزایش چگالی جریان افزایش می یابد و قطبش فعال سازی با چگالی جریان مبادله نسبت عکس دارد. ب) جنس الکترود:

مقدار چگالی جریان مبادله بستگی به جنس الکترود دارد.

ج) زبری سطح:

هرچه سطح زبرتر باشد (پستی و بلندی بیشتری داشته باشد) مقدار قطبش فعال

(د) دما:

با افزایش دما چگالی جریان مبادله افزایش یافته و انرژی لازم برای غلبه بر سد انرژی کاهش می یابد و در نتیجه قطبش فعال سازی کم می شود.

ه) فشار:

بستگی به نوع گونه دارد و در نیم واکنش های که گونه گازی شکل دارند موثر می باشد نظیر کاهش هیدروژن که افزایش فشار باعث کاهش اضافه ولتاژ فعال سازی می شود.

PH :

اثر لین عامل بستگی به نوع نیم واکنش دارد در نیم واکنش کاهش یون هیدروژن افزایش ----- سبب افزایش اضافه ولتاژ می شود. pH

ی) جذب سطحی:

جذب سطحی گونه هایی اولیه (واکنشگر) باعث کاهش اضافه ولتاژ فعال سازی و جذب سطحی گونه هایی محصول باعث افزایش اضافه ولتاژ می شود.

نکته: در نزدیکی پتانسیل برگشت پذیر به جای لگاریتم جریان چگالی جریان به شکل خطی به اضافه ولتاژ وابسته می باشد رابطه خطی جریان با اضافه ولتاژ مشابه قانون اهم می باشد.

الف) چگالی جریان خوردگی

ب) پتانسیل خوردگی

ج) شیب های تافل

ایده تئوری پتانسیل مختلط دارای دو فرض اساسی زیر می باشد:

الف) هر واکنش الکتروشیمیایی از دو یا چند نیم واکنش آندی و کاتدی تشکیل

می شود

ب) طی یک واکنش الکتروشیمیایی هیچ نوع تجمع بار الکتریکی نمی تواند

اتفاق بیافتد.

نکته: لازمه انجام واکنش های برگشت اعمال جریان از مدار خارجی می باشد (که در شرایط خوردگی آزادانه در محیط اسیدی چنین جریانی به سامانه اعمال نمی باشد)

پتانسیل خوردگی از پتانسیل تعادلی استاندارد برای نیم واکنش های کاهش و اکسایش هیدروژن منفی تر بوده و از پتانسیل تعادلی استاندارد برای نیم واکنش های کاهش و اکسایش آهن مثبت تر می باشد

پتانسیلی است که در آن خط آندی انحلال و خط کاتدی کاهش هیدروژن همدیگر را قطع می کنند سرعت واکنش آندی و رپتانسیل خوردگی سرعت خوردگی می باشد و پتانسیل خوردگی همیشه مقداری بین پتانسیل برگشت پذیر دو نیم واکنش دخیل در فرآیند خوردگی دارد بطور کلی می توان گفت که پتانسیل خوردگی از پتانسیل آند مثبت تر و از پتانسیل کاتد منفی تر می باشد.

نمودار ایوانس یک نمودار سینتیکی که روی محور عمودی آن الکترو (بر حسب ولت) و روی محور افقی آن سرعت واکنش الکتروشیمیایی (بر حسب آمپر) نشان داده می شود این نمودار که توسط ایوانس ارائه شده است برای بحث در رابطه

با خوردگی های موضعی مانند خوردگی های گالوانی و حفره ای ایجاد ترک بر اثر تنش درونی مورد استفاده قرار می گیرد.

نکته: به هنگام خوردگی اختلاف پتانسیل بین الکترو (آند و کاتد) از یکدیگر افت اهمی خواهد بود

الف) خوردگی الکتروشیمیایی موضعی که خوردگیدر سراسر سطح قطعه یکسان نمی باشد.

ب) خوردگی الکتروشیمیایی سراسری که خوردگی در سرتاسر سطح قطعه به صورت یکنواخت انجام می باشد در این حالت پتانسیل خوردگی با اختلاف پتانسیل تعادلی آند و کاتد برابر می باشد



عوامل مؤثر در خوردگی فلزات

- ۱) درجه خلوص فلز: هر چه فلز خالص تر باشد و ناهمگنی کمتری داشته باشد دیرتر خورده می شود .
 - ۲) تغییرات فیزیکی و مکانیکی فلز
 - ۳) غلظت ماده مؤثر و جنس آن (عامل خورنده)
 - ۴) مقدار اکسیژن
 - ۵) محیط PH
 - ۶) درجه حرارت
- اثرات زیانبار خوردگی
- از بین بردن ظاهر
 - مخارج تعمیرات و نگهداری و بهره برداری
 - خواباندن کارخانه
 - آلوده شدن محصول
 - نشت یا از بین رفتن محصولات با ارزش
 - اثرات بر امنیت و قابلیت اعتماد

طبقه بندی خوردگی

- خوردگی را به روش های مختلف طبقه بندی می کنند:
- خوردگی در درجه حرارت های بالا، خوردگی در درجه حرارت های پایین
- خوردگی مستقیم (اکسیداسیون)، خوردگی الکتروشیمیایی
- خوردگی تر، خوردگی خشک

محیط های خوردگی

نوع خوردگی، واکنش های خوردگی و سرعت خوردگی اجسام
آب، خاک، اتمسفر و گازهای خشک.

آب دریاچه ها، رودخانه ها، چشمه ها و آب های زیر زمینی

عوامل خوردگی در آب شیرین:

غلظت O_2 ، pH، سختی و یونهای

عوامل اصلی خوردگی آب:

گازهای حل شده نظیر O_2 و CO_2

غلظت اکسیژن

مهمترین ویژگی برای خوردگی آب

شرکت اکسیژن در واکنش های کاتدی

O_2 تنها عامل اکسنده آب شیرین

عامل ضد قطبش آهن و مس

نفوذ به سطح فلز در مرحله تعیین سرعت

دما، غلظت و سرعت جریان و ترکیب محلول عوامل موثر در انتقال اکسیژن به سطح فلز هستند

دما

افزایش دما سبب افزایش سرعت خوردگی می شود

هر $10^{\circ}C$ ، سرعت را دو برابر می کند.

$80^{\circ}C$ ، بیشترین سرعت خوردگی در آب

$80^{\circ}C$ ، به بالا حلالیت O_2 کاهش می یابد

با زیاد شدن دما، انحلال اکسیژن در آب کاهش می یابد.

غلظت اکسیژن:

تاثیر خوردگی در سامانه های مختلف:

الف) سامانه بسته :

دما = غلظت اکسیژن = سرعت خوردگی

ب) سامانه ی باز اشباع از هوا:

دارای ماکزیمم خوردگی در $80^{\circ}C$

ج) سامانه با غلظت ثابت اکسیژن:

دارای خوردگی متوسط

در اجسام نیمه غوطه ور در آب :

بیشترین خوردگی در لایه بلا فصل است

به علت فزونی غلظت اکسیژن در آن ناحیه

pH آب تازه ۴/۵ تا ۸/۵ می باشد.

pH بالاتر = کاهش خوردگی

pH پایین تر = افزایش خوردگی

pH پایینتر ۴ = خوردگی درغیاب اکسیژن

pH آب شهری حدود ۸ است.

محصولات خوردگی pH بالا پوشش های محافظ هستند

اکسید ها، هیدروکسید ها و نمک های هیدروکسید.

مخازن آب گرم و سرد، لوله ها، اتصالات،...

آب شیرین (یا آب تازه)

آب دریا.

آب خالص موجود در تأسیسات بخار

نمکهای معدنی محلول در آب

کلسیم، منیزیم، بیکربنات، سولفات کلرید و نیترات

آهن و منگنز

کلرید مهمترین مورد:

هدایت الکتریکی

کارایی فیلم های محافظتی

کلرید = انحلال اکسیژن

مواد آلی : ذرات معلق یا حل شده می باشند. در لوله های داغ سبب ترک میشوند.

سرعت جریان

سرعت جریان بر میزان خوردگی موثر است.

در تصفیه خانه ها تعداد حفره های خوردگی موضعی زیاد میشود.

علل:

عدم حرکت آب در طول مسطح فلز.

عدم استفاده از پوشش های محافظ نگهدارنده

سرعت بسیار بالای آب سبب خوردگی سایشی خواهد شد.

جلبک ها و باکتری ها

تغییر ترکیب شیمیایی محیط خورنده

مصرف CO_2 آب و تولید اکسیژن

باکتری ها اکسیژن را مصرف میکنند.(خوردگی موضعی)

گالیونلا . اسفار تیلوس

کاهش سطح مقطع لوله های کم قطر

سختی آب

آب نرم 60ppm نیمه سخت 60-120ppm
سخت 120-180ppm بسیار سخت بالای 180ppm

سختی آب:

موقت و دائم

خوردگی آب نرم بیشتر است

اسیدی شدن

توسط باران اسیدی انجام می شود

کاهش pH

از بین رفتن پوشش محافظ

افزایش شدت خوردگی

قلیایی کردن و کربناتی کردن

افزایش pH (قلیایی کردن)

کربناتی کردن (بالا بردن غلظت HCO_3)

شدت خوردگی کاهش می یابد

آب دریا

تنها الکترولیت طبیعی حاوی نمک با غلظت بالا

خوردگی بسیار بالا

pH در محدوده 8.1

غلظت نمک ۳,۵ درصد وزنی (سدیم کلرید)

کلرینیتی

شوری

آب دریا، دارای حرکات نیرومندی است که سبب یکنواخت شدن غلظت آب دریا می شود

اختلاف های قابل ملاحظه ای در شرایط خوردگی وجود دارد که از موارد زیر ناشی می شود:

الف) به علت محدودیت نفوذ نور، نوع و وسعت رشد ارگانیسم ها در اعماق مختلف آب تغییر می کند

و این تغییر، بر خوردگی مؤثر است.

ب) سرعت متفاوت حرکت و دمای آب در نقاط مختلف دریا نتیجه، سرعت خوردگی متفاوتی خواهد داشت.

ج) در بعضی نقاط دریا و در اعماق زیاد، خط چگالی وجود دارد که سبب جدایی و ممانعت از تبادل جریان آب بین بخش های

زیرین آب و بخش های فوقانی دریا می شود.

سرعت جریان آب مهمترین عامل طراحی و خوردگی در سامانه های آب دریا افزایش سرعت آب موجب افزایش خوردگی

سرعت جریان بالا عامل خوردگی سایشی است

اکسیژن حل شده پارامتر مهمی در خوردگی فلزهای فرورفته در آب دریا می باشد. آب دریا با شوری متداول در

تماس با اتمسفر، دارای مقادیر اکسیژن حل شده مطابق جدول ۴ - ۱ می باشد.

جریان داشتن آب دریاها سبب تأمین اکسیژن لازم برای خوردگی می شود.

این جدول مطابقت کمی با انتظار مبتنی بر کاهش سرعت خوردگی با افزایش عمق نشان می دهد

کاهش اکسیژن باعث کاهش سرعت خوردگی نشده است

حرکت آب تأمین کننده اکسیژن تازه برای سطح فلز

شیمی آب در مولدهای بخار باید تنظیم شود

از ته نشین شدن رسوب و خوردگی در واحدهای مختلف شبکه پیشگیری شود.
غلظت اکسیژن،

، سیلیکات‌ها و نیز pH آب توجه داشت.

انواع عملیات شیمیایی مرسوم برای جلوگیری از خوردگی در دیگ بخار آب عبارت‌اند از:
هوازدایی، کنترل pH و افزودن بازدارنده‌ها.

خاک

شاه‌لوله آبرسانی و فاضلاب ساخته شده از فولاد یا چدن،

لوله‌های فولادی انتقال گاز طبیعی دفن شده در زیر زمین

مخازن فولادی نفت و بنزین

خوردگی در فونداسیون‌های دکل‌های انتقال نیرو

تیرهای فولادی تأسیسات برای مثال پل‌ها و سازه‌هایی که درون خاک قرار دارند

مجموعه‌ای از مواد معدنی و آلی، آب و گاز (معمولاً هوا) می‌باشد

تجزیه سنگ‌ها و گیاهان و جانوران

ترکیب pH. مقدار رطوبت و اندازه دانه

هرچه دانه‌ها درشت‌تر = رطوبت و هوای بیشتر

مقدار اکسیژن بیشتر = خوردگی بیشتر

اجزای اصلی خاک

الف) ذرات گرد و خاک (معدنی و آلی)

معدنی (خاک، شن و سنگ ریزه و..)

آلی (زغال سنگ، گل و لجن)

ب) فاز گازی:

شامل اکسیژن و نیتروژن

دی اکسید کربن حاصل از تجزیه

مکانیسم خوردگی در خاک

به طریق الکترو شیمیایی

الکترولیت: رطوبت خاک و یونهای موجود

در pH ۵ به بالا و فاصله اندک آند و کاتد

پوشش محافظ تشکیل می‌شود = کاهش سرعت خوردگی

یونهای تشکیل شده در آند همراه جریان به سمت کاتد

و یونهای تشکیل شده در کاتد به طرف آند مهاجرت می‌کنند.

آند

در آند محصولات محافظ خوردگی ایجاد نمی‌شود.

در سطوح صاف و شفاف آند حفره ایجاد می‌شود.

سرعت خوردگی در طول زمان افزایش می‌یابد.

کاتد بزرگ سبب جریان آندی بالا و ایجاد حفره می‌شود.

تقسیم بندی خاک‌ها

بر اساس مقاومت الکتریکی

خاک ماسه ای = مقاومت الکتریکی بالا = کمترین خوردنگی

خاک رسی = مقاومت الکتریکی کم = خورنده

باکتری ها و فسیل آلی خاک را خورنده تر می کنند.

اختلاف اندازه = تفاوت قدرت نگهدارندگی رطوبت = اختلاف در هواگیری خاک ها = تفاوت در سرعت خوردگی.

خوردگی فولاد در انواع خاک ها

خاک های کم هواگیر >> خاکهای خوب هوا گیر

خاکهای خوب هوا گیر >> مخلوط کم هواگیر با خوب هوا گیر

خوردگی گالوانیکی

در خطوط لوله دفن شده در دو نوع خاک (رسی و شنی):

رسی (آند) = خوردگی بیشتر (عدم تشکیل لایه محافظ)

شنی (کاتد) = به علت فراوانی اکسیژن و تخلخل بالا

در خطوط لوله دفن شده در دو نوع خاک با رطوبت متفاوت

خاک با رطوبت بالاتر = ناحیه خوردگی (آند)

خاک خشک = خورده نمیشود (کاتد)

عوامل خوردگی خاک: رطوبت ، pH، پتانسیل اکسایش کاهش، مقاومت الکتریکی خاک، قابلیت نفوذ آب و هوا

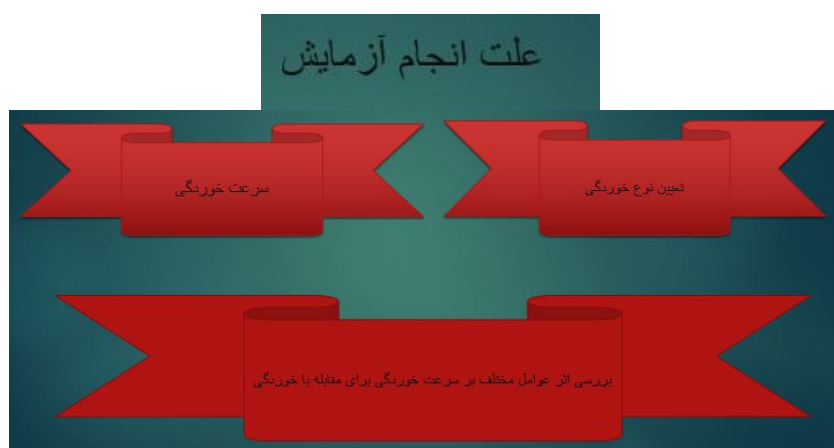
حضور نمک ها و فعالیت میکروبی

اکثر موارد روی مقاومت الکتریکی خاک اثر میگذارند به این دلیل معیار مناسبی برای سنجش میزان خوردگی در خاک می باشد.

آزمایش های خوردگی به منظور بررسی کمی و کیفی فلزها است

سرعت خوردگی

اهمیت آن در طراحی تاسیسات و نیز ارائه راه کارهای عملی برای مقابله با خوردگی و اندازه گیری مستقیم سرعت خوردگی اغلب وقت گیر و ناممکن است-در آزمایش های خوردگی: سرعت خوردگی، ماهیت محیط های خورنده، ماهیت آلیاژها مورد بررسی قرار می گیرند. در آزمایش های خوردگی شرط واقعی محیط خوردگی در آزمایشگاه نیز تا حد امکان ایجاد شود.



جزئی، متناوب، کامل

غوطه وری

اتمسفری

دمای بالا

نور خورشید، آلودگی هوا، گرد و غبار... از عوامل مهم در آزمایش های اتمسفری هستند

از نوع اکسیداسیون تسریع شده که به کمک افزایش دما و تغییر اتمسفر قابل ایجاد است.



آزمون های تسریع شده

آزمون پاشش آب نمک و مه آب نمک

آزمون غوطه وری یا کاهش وزن

آزمون های ویژه



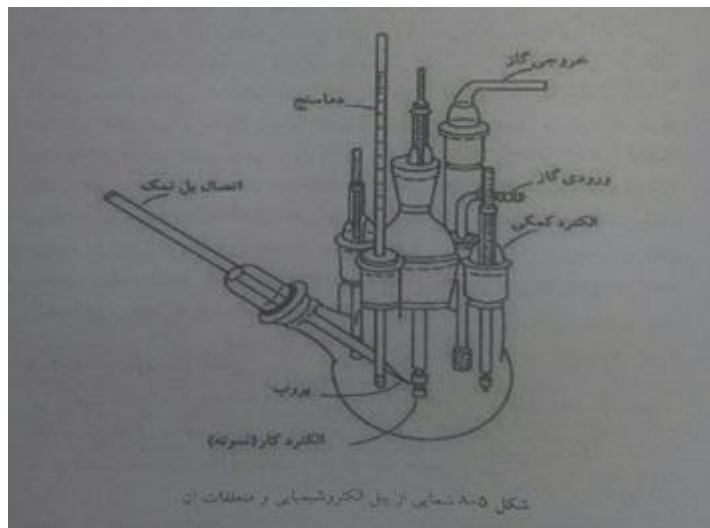
- ۱-آزمون های رطوبتی
- ۲-آزمون های کوپن
- ۳-آزمون های خوردگی همراه با تنش

۴-آزمایش هیویی

۵-آزمایش وارن

۶-آزمایش استراس

۷-آزمایش استریچر



۱- پتانسیواستات

وسیله ای ست که پتانسیل الکتروکاردالکتروولیت رابه طور خودکار درپتانسیل ثابت و یا پتانسیل های کنترل شده نسبت به یک الکتروود مرجع ثابت نگه میدارد.

دارای سه پایانه ی خروجی است که به الکترودهای مرجع-کار و کمکی (خنثی) وصل میشوند.

۲- مولتی متر: میتوان به کمک آن پتانسیل -جریان ومقاومت را با دقت بالا اندازه گیری نمود.

مولتی مترهای دیجیتالی بهترو دقیق تر از مولتی مترهای عقربه ای هستند.

۳- کامپیوتر:

برای ثبت اطلاعات استفاده میشود

۴- سل (پیل) قطبش :

به صورت تجاری دردسترس میباشد.

یک پیل الکتروشیمیایی شامل یک آند و یک کاتود در تماس الکتریکی بایکدیگرو غوطه وردرالکتروولیت موردنظرمیباشد.

دراین پیل یک الکتروود مرجع جهت اندازه گیری پتانسیل -یک الکتروود کمکی از جنس پلاتین یا کربن -یک محل ورود و

یک محل خروج گاز جهت هوادهی و یا هوازدایی و یک دماسنج جهت اندازه گیری دمای الکتروولیت منظور شده است.

قطبش پتانسیودینامیک برای اندازه گیری سرعت خوردگی به روش برونمایی تافل

رابطه ی بین جریان و پتانسیل در سطح الکتروود | الکتروولیت

آزمون سینتیکی پتانسیل مناسبی برای تعیین خوردگی و سرعت خوردگی

قطبش پتاسیو استاتیک

یک سری پله ی پتانسیل اعمال میشود که در هر پله مدت زمانیکه الکتروود در آن پتانسیل باقی میماند ثابت باشد.

اندازه گیری جریان عبوری از مدار

قطبش پتاسیو دینامیک چرخه ای

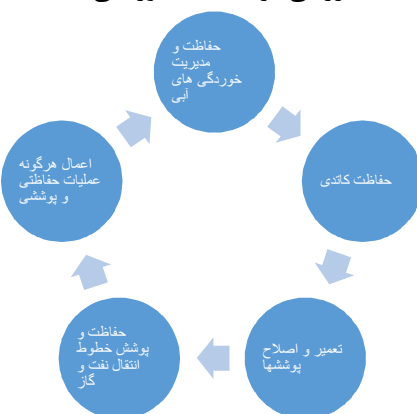
احتمال خوردگی موضعی آلیاژ های فولاد زنگ نزن

روش های امپدانس جریان متناوب ولتامتری بادامنه ی چرخه ای کوچک و آنالیز نوفه های الکتروشیمیایی

موارد استفاده:

جهت اندازه گیری سرعت خوردگی

بررسی فرایندهای خوردگی

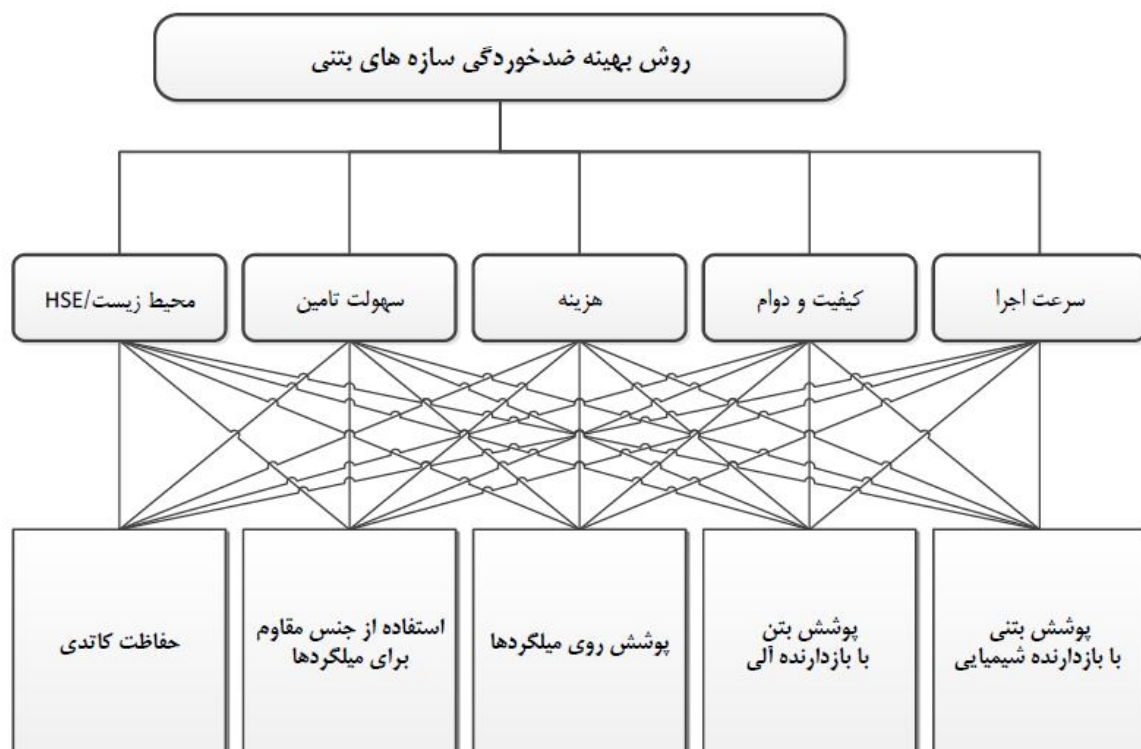


عوامل ایجاد خوردگی



دسته بندی باکتری ها





سلسله مراتبی مسئله انتخاب روش بهینه ضد خوردگی

انواع خوردگی

- Uniform attack
- Galvanic corrosion
- Crevice corrosion
- Intergranular corrosion
- Pitting
- Selective leaching
- Erosion corrosion
- Stress corrosion
- Hydrogen damage

- خوردگی یکنواخت
- خوردگی گالوانیکی
- خوردگی شیار
- خوردگی بین دانه ای
- حفره دار شدن
- جدایش انتخابی
- خوردگی سایشی
- خوردگی توام با تنش
- خسارات هیدروژنی

خوردگی یکنواخت

- نازک شدن فلز به دلیل خورده شدن سطح آن.
- معمول ترین و متداول ترین نوع خوردگی.
- بالاترین تناژ فلز خورده شده.
- قابل پیش بینی و بی خطر.



خوردگی یکنواخت

- مثال های خوردگی یکنواخت
 - خورده شدن روی یا فولاد زنگ نزن در اسید سولفوریک
 - خوردگی اتمسفری : سقف شیروانی
 - خوردگی فولاد کربنی در مجاورت گاز ترش
 - لوله های آب زیر زمین

خوردگی یکنواخت

• راه های پیشگیری:

1. انتخاب مواد و پوشش مناسب
2. استفاده از ممانعت کننده ها
3. حفاظت کاتدی

خوردگی گالوانیک

- قرار گرفتن دو فلز غیر هم جنس در اتصال با هم.
- فلز مقاوم، مقاومتر می شود و فلز ضعیف، سریعتر خورده می شود.
- وجود پتانسیل الکتریکی بین دو فلز باعث تشکیل پیل الکتریکی می شود.

خوردگی گالوانیک

- ممکن است به مرور زمان در اثر واکنش فلزات با محیط یا ایجاد محصولات خوردگی روی سطح فلزات سرعت خوردگی گالوانیک کم شود.
- وضعیت سطح ماده در میزان فعالیت آن و قرار گیری آن به جای آنند یا کاتد موثر است.
- در اتمسفرهای مرطوب امکان خوردگی گالوانیک وجود دارد. چون بین دو فلز یک الکترولیت برای انتقال الکترون وجود دارد.

اثر محیط

- در محیطهای آبی فولاد و روی هر دو خورده می شوند. در حالت اتصال این دو فلز روی سریع تر خورده می شود. در ماهایی ممکن است جای کاتد و اند عوض شود.
- تانتال نسبت به چدن در اسید سولفوریک غلیظ کاتد است بنابراین جریان بین کاتد و آنند به سرعت به صفر می رسد. در دمای بالای ۱۴۵C جای قطبهای پیل گالوانیکی عوض می شود.

اثر فاصله دو الکترود

- در محل اتصال دو فلز شدت خوردگی زیاد است و با فاصله از محل اتصال شدت خوردگی کاهش می یابد.
- میزان تغییرات شدت خوردگی نسبت به فاصله بین دو الکترود بستگی به مقاومت الکتریکی الکترولیت متصل کننده ی دو الکترود دارد. مثلاً در آب خالص خوردگی فقط به ناحیه اتصال محدود می شود .

اثر اندازه سطح

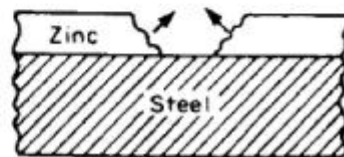
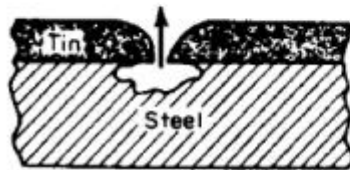
- هرچه اندازه سطح آند نسبت به سطح کاتد کوچکتر باشد سرعت خوردگی در آند بیشتر است.
- باید سطح فلز نجیب تر را پوشش داد.

خوردگی گالوانیک

راه های پیشگیری

- از اتصال فلزات با فاصله زیاد در سری الکتروشیمیایی پرهیز شود.
- به نسبت سطح آند و کاتد توجه شود.
- از عایق کاری در اتصال بین فلزات غیر هم جنس استفاده شود.
- در استفاده از پوشش ها دقت شود به ویژه بر روی آند.
- در لحیم کاری دو فلز غیر هم جنس از فلز جوش نزدیک به یکی از دو فلز استفاده شود.
- قسمت های آندی را ضخیم تر و یا با قابلیت تعویض مناسب انتخاب شود.
- حفاظت کاتدی نیز می تواند موثر باشد.

حفاظت کاتدی



خوردگی شیاری

- این خوردگی در مناطقی که دارای مایع ساکن هستند مانند زیر واشرها، پیچ و مهره ها، پرچ ها، رسوبات روی سطح و یا حفرات و ترک های زیر، رخ می دهد.



- به خوردگی شیاری

(crevice corrosion)

خوردگی لکه ای

(deposit corrosion)

و یا خوردگی واشری

(gasket corrosion)

نیز گفته می شود

خوردگی شیاری

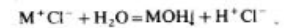
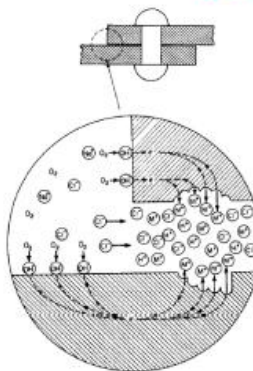
- در زیر رسوبات و شن و ماسه و لکه های کثیفی روی سطوح فلزی ایجاد می شود.
- در نواحی تماس فلز با غیر فلزات مانند واشرها، چوب، پلاستیک، آربست و پارچه و... دیده می شود.
- دهانه شیار باید به قدری باز باشد که مایعات به تواند وارد آن شوند و در عین حال محل ساکنی برای مایعات محسوب شود.

خوردگی شیاری

مکانیزم

- پیل غلظتی اکسیژن در داخل و خارج شیار.
- اتمام اکسیژن داخل شیار باعث می شود که یونهای کلر یا هیدروژن که سرعت حرکت بیشتری نسبت یونهای هیدروکسید به داخل شیار نفوذ کنند. و با یون فلزی واکنش دهند.
- در اثر افزایش سرعت خوردگی در شیار یون های بیشتری به داخل شیار نفوذ کرده و سرت خوردگی رابیشتر می کند.
- در شیار الکترون تولید می شود که در اطراف شیار مصرف می شود که از خوردگی اطراف شیار جلوگیری می کند.

خوردگی شیاری



خوردگی شیاری

- موادی که توسط یک پوسته محافظ غیر فعال می شوند بیشتر در معرض خوردگی شیاری هستند چرا که در شیار غلظت یونهای خورنده به قدری زیاد می شود که پوسته محافظ خورده می شود و خوردگی با سرعت بالا رخ می دهد.
- برای شروع خوردگی شیاری نیاز به گذشت یک زمان اولیه است که بستگی به شرایط دارد. (شش ماه تا یک سال)

خوردگی شیاری



خوردگی شیاری

راه های پیشگیری:

- استفاده از جوشکاری به جای پیچ و مهره و پرچ و پرس کاری.
- شیارها در محل قرار گیری دو فلز روهم با لحیم پر شود
- طراحی مخازن و تانکرها به گونه ای باشد که تمام مایعات آن تخلیه شود.
- تمیز کردن رسوبات از سطح تجهیزات.
- در مدت کار نکردن مواد جاذب رطوبت حذف شوند.
- استفاده از واشرهای جامد که رطوبت را به خود جذب نمی کنند.

خوردگی فیلامنتی

- نوعی از خوردگی شیاری است که در زیر پوشش ها رخ می دهد. به همین دلیل به آن خوردگی underfilm نیز گفته می شود.
- جهت خراش ها و یا پولیش سطح را دنبال می کند.



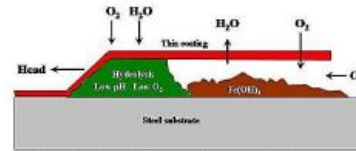
خوردگی فیلامنتی

- به طور متداول در ظروف لعاب دار و یا لاکی دیده می شود.
- فلزات آلومینیوم، منیزیم و فولاد پوشش داده شده با طلا، نقره، قلع، فسفات و لاک مستعد این نوع خوردگی هستند.
- خوردگی فلامنتی باعث تضعیف ماده نمی شود بلکه فقط ظاهر فلز را دچار مشکل می کند.
- این نوع خوردگی روی بسته بندی مواد غذایی دیده می شود و با اینکه باعث آلودگی ماده غذایی نمی شود مشکلاتی برای فروش به وجود می آورد.

خوردگی فیلامنتی

مکانیزم

- رطوبت در سر فیلامنت جمع شده و پیل اختلاف غلظت اکسیژن و هیدرولیز نمک فلزات باعث بوجود آمدن خوردگی در سر فعال فیلامنت می شود.



Cross sectional view of a corrosion filament on a steel substrate

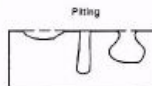
خوردگی فیلامنتی

- راه ها پیشگیری
- عدم قرار گیری در هوای مرطوب
- استفاده از پوشش های ترد. (باز هم سطح تخریب می شود و این پوشش هاب به ضربه حساس اند.)
- پوشش هایی با قابلیت نفوذ کمتر رطوبت

Relative humidity, %	Appearance
0-65	No corrosion
65-80	Very thin filaments
80-90	Wide corrosion filaments
93	Very wide filaments
95	Mostly blisters, scattered filiform
100	Blisters

خوردگی حفره ای

- نوعی خوردگی شدیداً موضعی که با ایجاد حفرات روی سطح می شود.
- منظور از حفره سوراخی است که نسبت قطر به ارتفاع آن کمتر از یک باشد.
- حفرات در اغلب موارد مجزا از هم هستند ولی ممکن است حفرات به قدری به هم نزدیک باشند که سطحی زبر تولید کنند.



خوردگی حفره ای

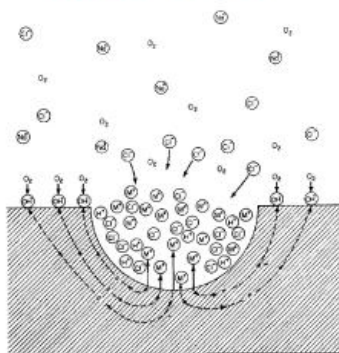
- به دلیل حجم کم خوردگی این نوع خوردگی با چشم قابل شناسایی نیست.
- چندین ماه یا سال طول می کشد تا حفرات ناشی از خوردگی روی سطح تشکیل شود. اما به از تشکیل حفرات آنها به سرعت رشد می کنند.
- حفرات معمولاً در جهت جاذبه تشکیل و رشد می کنند. به ندرت دیده می شود که در یک محیط خورنده حفرات در روی سطوح عمودی یا روی سقف تشکیل شود.

خوردگی حفره ای

مکانیزم

- در داخل حفره در اثر خورده شدن فلز تجمع یون های مثبت باعث جذب یون های کلر محیط می شود. نمک فلزی حاصل در آب هیدرولیز شده و یون های کلر و هیدروژن تشکیل می شوند که سرعت خوردگی را افزایش می دهند.
- در داخل حفره اکسیژن احیا نمی شود در حقیقت حفره نقش آند برای فلز اطراف خود را اجرا می کند. و احیا اکسیژن روی سطح فلز انجام شده و الکترون مورد نیاز آن از حفره تامین می شود.

خوردگی حفره ای



خوردگی حفره ای

- خوردگی حفره ای حالتی بین خوردگی یکنواخت و عدم خوردگی است.

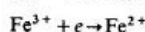
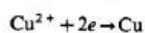


- خوردگی حفره ای نوعی از خوردگی شیاری است با این تفاوت که برای این نوع خوردگی نیازی به شیاری نیست بلکه بر روی سطح آزاد فلز حفرات ایجاد می شود.

عوامل موثر

ترکیب شیمیایی محلول

- در اثر موارد حفره دار شدن یون کلر در محیط وجود دارد. در تمام آب ها دریا و نمک دار مقداری یون کلر وجود دارد.
- یون های هالوژن ها در خوردگی حفره ای موثر اند. کلر و برم بیشترین قدرت حفره دار کردن را دارند و یون های فلوئور و ید قدرت کمتری دارند.
- هالوژنیدهای فلزاتی همچون آهن، مس و جیوه به شدت حفره را هستند.



عوامل موثر

سرعت حرکت

- برای ایجاد حفرات نیاز به شرایط مایع کم تحرک است. تا حفرات در مرحله ایجاد به توانند به حالت پایدار برسند.
- پروانه پمپ انتقال آب دریا اگر به طور مداوم کار کند دیرتر دچار خوردگی حفرة ای می شود نسبت به زمانیکه مدتی کار نکند.

عوامل موثر

متغیرهای متالورژیکی

- فولاد ساده نسبت به فولاد زنگ نزن مقاومت بهتری نسبت به حفرة دار شدن دارد. هر چند بسیار سریع تر دچار خوردگی می شود.
- خواص سطح اثر زیادی بر رفتار خوردگی سطحی دارد. در سطوح کاملاً صیقلی حفرات دیرتر تشکیل می شوند ولی حفرات ایجاد شده بزرگتر بود و سریعتر رشد می کنند. سطوح تراشیده و خراش دار به سرعت حفرة دار می شوند

خوردگی حفرة ای

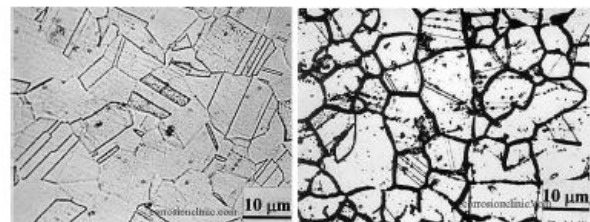
روش های پیشگیری

- انتخاب مواد مناسب با توجه به محیط کار
- کنترل میزان یون کلر، دما و pH محیط
- استفاده از فولادهای پر آلیاژتر مانند ۳۱۶ که به دلیل داشتن مولیبدن مقاومت بهتری به خوردگی حفرة ای دارد.
- استفاده از ممانعت کننده های خوردگی

خوردگی بین دانه ای

- مرز دانه ها نسبت به خود دانه ها دارای ماهیت فعال تری هستند و بسته به شرایط خورنده ممکن است با سرعت اندکی بیشتر از دانه ها و یا با سرعتی بسیار بیشتر خورده شوند.
- خوردگی بین دانه ای زمانی رخ می دهد که مرز دانه مملو از ناخالصی ها باشد یا برخی از عناصر آلیاژ در آن کمتر از دانه ها باشند.

خوردگی بین دانه ای



خوردگی بین دانه ای

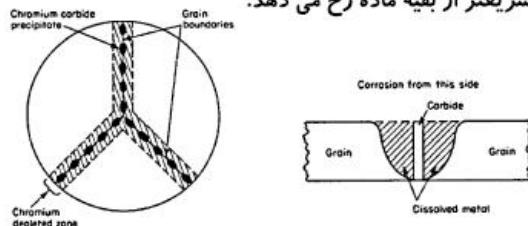
- خوردگی مرز دانه باعث خوردگی در آلیاژهایی می شود که در آن محیط مقاومت به خوردگی خوبی دارند.
- خوردگی بین دانه ای در آلومینیوم داری آهن رخ می دهد چون آهن به مقدار کمی در آلومینیوم حل می شود و مابقی آهن در مرز دانه های تجمع می کند.
- در فولاد زنگ نزن که مرز دانه های خالی از کرم شده باشد.
- در برنج هایی که در مرز دانه های میزان روی بیشتر از داخل دانه باشد.

خوردگی بین دانه ای

- در فولادهای زنگ نزن وجود حداقل ۱۰٪ کرم در زمینه لازم است تا با تشکیل لایه محافظ اکسید کرم جلو خوردگی گرفته شود.
- اگر فولاد زنگ نزن در محدوده ۵۰۰ تا ۸۰۰ در حدود یک ساعت حرارت داده شود. کرم از زمینه خارج شده و با کربن واکنش داده و تشکیل کاربید کرم را می دهد. به این پدیده حساس شدن گفته می شود. حساس شدن ابتدا در مرز دانه ها رخ می دهد و سپس در داخل دانه ها.

خوردگی بین دانه ای

- حساس شدن باعث می شود که در نواحی اطراف مرز دانه درصد کرم کمتر از ۱۰٪ شود و خوردگی در این مناطق سریعتر از بقیه ماده رخ می دهد.



خوردگی بین دانه ای

- فاسد شدن خط جوش (Weld Decay) یکی از نمونه های بارز خوردگی بین دانه ای است.
- در هنگام جوشکاری فولادهای زنگ نزن به علت افزایش دمای قسمت های اطراف ناحیه جوشکاری تا دمای حساس شدن، این مناطق دچار جدایش کرم از زمینه شده و راحت تر خورده می شوند.



خوردگی بین دانه ای

- روش های پیشگیری در فولاد زنگ نزن آستنیتی
- انجام عملیات حرارتی محلول سازی و کوینچ.
 - اکثر فولادهای موجود در بازار از این نوع اند.
 - عملیات حرارتی قطعات بزرگ نیاز به کوره های خیلی بزرگ دارد (مخازن بزرگ)
 - اگر سرعت سرد کردن کم باشد تمام نمونه حساس می شود.
- استفاده از کاربیدزهای قوی.
 - استفاده از عناصری که نسبت به کرم میل ترکیبی بیشتری با کربن دارند؛ مانند نیوبیم، تانتالوم و تیتانیوم.

خوردگی بین دانه ای

روش های پیشگیری در فولاد زنگ نزن آستنیتی

- کاهش میزان کربن به زیر ۰.۰۲٪.
- کاهش میزان کربن فرایندی نسبتاً مشکل است.
- آلیاژهای 304L و 316L از این دسته اند
- این آلیاژها مستعد جذب کربن از محیط اطراف خود هستند. مثلاً اگر قبل از جوشکاری سطح با روغن یا نفت تمیز شود کربن جذب آلیاژ شده و مشکل فاسد شدن جوش رخ می دهد.
- روش های تولید مانند ریخته گری در ماسه روغنی و یا نورد و یا آهنگری در دمای بالا نیز باعث جذب کربن می شود.

خوردگی شیار چاقو

- خوردگی شیار چاقو (Knife-Line Attack) نوعی خوردگی بین دانه ای است که در ناحیه باریکی در کنار ناحیه جوش در فولادهای زنگ نزن پایدار شده رخ می دهد.
- تفاوت این نوع خوردگی با فاسد شدن خط جوش در باریک تر بودن آن و نزدیکی آن به ناحیه جوش است.
- خوردگی شیار چاقو در فولادهای پایدار شده رخ می دهد و همچنین مکانیزم این دو نوع خوردگی متفاوت است.
- در فولادهای ۳۴۷ (Nb + ۸-۱۸) و ۳۲۱ (Ti + ۸-۱۸) دیده می شود.

خوردگی شیار چاقو

مکانیزم

- در هنگام جوشکاری در قسمت های نزدیک ناحیه مذاب دما به قدری بالا می رود که رسوبات کاربید نیوبیم در زمینه حل می شود و سپس این ناحیه به قدری سریع سرد می شود که این رسوبات دوباره تشکیل نمی شوند و در دمای حساس شدن کربن در زمینه وجود دارد و با کرم تشکیل کاربید کرم را می دهد و این ناحیه مستعد به خوردگی بین دانه ای می شود.

خوردگی شیار چاقو

روش های جلوگیری

- انجام عملیات حرارتی مناسب. (آهسته سرد کردن در محدوده دمایی تشکیل رسوبات پایدار کننده)
- در قطعاتی امکان افزایش دما تا انحلال رسوبات پایدارکننده وجود دارد بهتر است از فولادهای کم کربن استفاده شود.

Melting Point, °F		°C
2250	Columbium carbide dissolves Chromium carbide dissolves	1230
1450	Columbium carbide precipitates Chromium carbide dissolves	790
950	Chromium carbide precipitates	510
70	No reactions	38

خوردگی بین دانه ای

- در آلیاژهای آلومینیوم یکی از روش های افزایش استحکام رسوب سختی است که باعث به وجود آمدن نواحی با ترکیب شیمیایی متفاوت می شود که این نواحی دارای اختلاف پتانسیل الکتریکی هستند و مستعد به خوردگی می شوند. در تمام آلیاژهای آلومینیوم این موضوع وجود دارد اما مشکل خوردگی بین دانه ای فقط در آلیاژهای حاوی مس دیده شده است.
- آلیاژهای روی دارای آلومینیوم نیز ممکن است مشکل خوردگی بین دانه ای داشته باشند.

جدایش انتخابی

- در این نوع خوردگی یکی از اجزای آلیاژ از آن جدا شده و دچار خوردگی می شود.
- معروف ترین مثال این نوع خوردگی زدایش روی (Dezincification) است.
- در سیستم های آلیاژی دیگر نیز جدایش انتخابی دیده می شود مانند جدایش کبالت (Decobaltification) در Co-W-Cr. آلومینیوم در برنز آلومینیوم، سیلیسیوم در برنز سیلیسیوم و در دماهای بالا اکسیداسیون انتخابی کرم در فولاد زنگ نزن و جدایش آهن و کروم از اینکونل در نمک مذاب فولورید پتاسیم و کلورید سدیم و...

زدایش روی

- در برنج زرد معمولی که در حدود ۳۰٪ روی دارد. جدایش روی به گونه رخ می دهد که با چشم قابل مشاهده است.
- جدایش روی به دو صورت یکنواخت و موضعی انجام می شود.



زدایش روی

- جدایش یکنواخت در آلیاژهای دارای میزان زیاد روی و محیطهای اسیدی قوی رخ می دهد. جدایش موضعی در آلیاژهای دارای مقدار کم روی و محیطهای خنثی و بازی رخ می دهد.
- حاصل این خوردگی ماده ای متخلخل و نفوذ پذیر است که استحکام خود را بشدت از دست داده است. اما تغییر ابعادی از خود نشان نمی دهد.
- اضافه کردن روی به مس باعث کاهش مقاومت به خوردگی می شود. برنج قرمز با ۱۵٪ روی بندرت دچار جدایش روی می شود.

زدایش روی

مکانیزم

- علت به اختلاف پتانسیل الکتریکی مس و روی بر می گردد.

راه های پیشگیری

- کاهش اکسیژن در محیط
- افزودن عناصر آلیاژی قلع، آرسنیک، آنتیموان به برنج
- استفاده از آلیاژهای مس-نیکل برای قطعات مهم

جدایش انتخابی

- گرافیت شدن نیز نوعی جدایش انتخابی در چدن خاکستری است که محیطهایی با قدرت خوردگی متوسط دیده می شود.
- این خوردگی گرافیت چدن به عنوان کاتد عمل کرده و آهن خورده می شود. ظاهر چدن خوردگی خفیفی را نشان می دهد در حالیکه ماده استحکام خود را از دست داده.
- گرافیت شدن در محیطهای خورنده قوی رخ نمی دهد چون گرافیت نیز از سطح چدن جدا می شود. چدن نشکن و مالبیل نیز به علت عدم وجود شبکه پیوسته گرافیت، گرافیت نمی شوند.

خوردگی سایشی

- خوردگی سایشی فرآیند خوردگی به همراه سایش مکانیکی سطح فلز است.
- خوردگی سایشی در فلزاتی مانند آلومینیوم و فولاد و زنگ نزن که توسط پوسته محافظ از خوردگی محافظت می شوند شدید است.
- فلزات نرم مانند مس و سرب که به راحتی دچار سایش می شوند در اثر خوردگی سایشی به سرعت منهدم می شوند.
- محیط های مانند داخل لوله های آب، توربین ها، موتورهای جت، پروانه های کشتی و موتورهای آب که در آنها جریان سیال وجود دارد مستعد به ایجاد خوردگی سایشی هستند.

نوع پوسته محافظ

- سرب به علت پوسته محافظ در اسید سولفوریک حدود ۲۰ سال عمر می کند. اما در زانویی لوله حاوی ۳٪ اسید سولفوریک در ۹۰ درجه فقط چند هفته عمر کرد.



- پروانه ای از جنس فولاد زنگ نزن در محیط اسیدی ۲ سال کار می کند ولی هنگامی که خاصیت اسیدی محیط اندکی کم شد عمر آن به ۳ هفته کاهش یافت.

سرعت حرکت سیال

- معمولاً هرچه سرعت حرکت بیشتر باشد سرعت خوردگی نیز بیشتر است. چون میزان سایش افزایش می یابد.
- در سرعت های پایین تغییر سرعت اثر چندانی بر سرعت خوردگی ندارد و تا رسیدن سرعت حرکت سیال به یک حد بحرانی این شرایط ادامه دارد.
- افزایش سرعت سیال در برخی موارد خاص سرعت خوردگی را کم می کند.
- حرکت سیال مانع انجام برخی از انواع خوردگی مانند شیاری و حفره دار شدن، می شود

تلاطم جریان

- حرکت سیالات به دو صورت تلاطم و آرام تقسیم بندی می شود.



- هنگامی که جریان سیال تلاطم است تماس آن با سطح فلز بیشتر است و اگر در سیال ذراتی معلق وجود داشته باشد با شتاب بیشتری با فلز برخورد می کند. و سرعت خوردگی بیشتر است.

جنس ماده

- موادی که نجیب تر هستند مقاومت به خوردگی سایشی بهتر دارند مثلاً آلیاژ نیکل-مس مقاومتر از روی-مس است.
- افزودن عنصر سوم به آلیاژ که پوسته مقاومتری ایجاد می کند موثر است. مانند ۸-۱۸ و ۳۱۶، برنج آلومینیوم دار و افزودن آهن به نیکل-مس.
- مواد با سطح سخت تر مقاومت به سایش بیشتری دارند و در برابر خوردگی سایشی نیز مقاوم تر اند. البته عملیات حرارتی برای افزایش سختی در برخی مواقع مقاومت به خوردگی را کاهش می دهد.

خوردگی سایشی

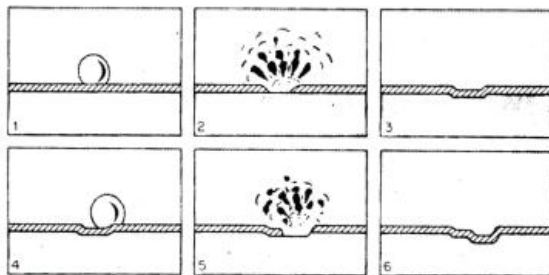
- روش های پیشگیری
- انتخاب مواد مقاومتر
- طراحی مناسب
 - افزایش قطر لوله ها
 - کاهش تغییر اندازه و زوایه لوله ها
 - استفاده از ضخامت بیشتر در مناطق حساس
 - اتصال لوله ها به وسط تانک ها
- تغییر محیط
 - کاهش دما
 - استفاده از فیلتر برای حذف ذرات معلق
 - استفاده از ممانعت کننده ها
- استفاده از پوشش

خسارت حبابی

- در اثر کاهش و افزایش فشار بر مایع امکان ایجاد و از بین رفتن حباب در داخل مایع وجود دارد. از بین رفتن حباب در مایعات باعث ایجاد موج انفجاری می شود که می تواند سطح فلز را تخریب کند.
- ظاهری مشابه خوردگی حفره ای دارد با این تفاوت که حفرات به هم نزدیک هستند و سطح خشن شده است.

خسارت حبابی

- مکانیزم



خوردگی فرسایشی

- خوردگی فرسایشی در محل اتصال دو فلز که تحت بار یا لرزش قرار دارند رخ می دهد.
- شرایط لازم برای ایجاد خوردگی فرسایشی:
 - حرکت نسبی دو سطح فلزی
 - حرکت مکرر و منقطع
 - حضور تنش کافی بین دو سطح
- نوعی خاصی از خوردگی سایشی که اتمسفر انجام می شود.



Example of Fretting Corrosion

خسارت حبابی

روشهای پیشگیری

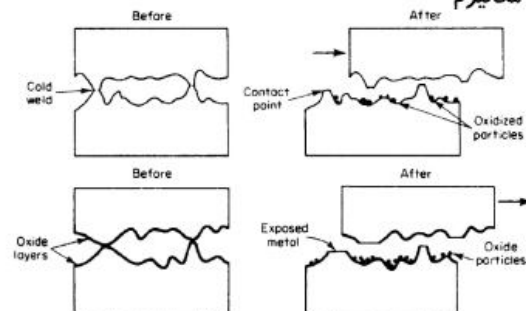
- استفاده از مواد مقاوم تر
- استفاده از پوشش پلاستیک نرم
- کاهش سرعت حرکت سیال
- سطوح کاملاً صاف فلزی
- استفاده از حفاظت کاتدی: تولید حباب های هیدروژن

خوردگی فرسایشی

- روشهای پیشگیری
- روغنکار و استفاده از گیریس
- افزایش سختی سطح با عملیات حرارتی و کار سختی
- ایجاد سطوح صاف
- طراحی بهتر به منظور کاهش تنش بین سطوح، کاهش ارتعاش و جابجایی دو سطح.

خوردگی فرسایشی

- مکانیزم



خوردگی تنش

- ترکهای ریز در محدود تنش های مجاز ماده تشکیل می شوند و باعث انهدام ناگهانی و خسارات زیادی می شوند.
- هر آلیاژ فقط در برخی از محیط های خاص دچار خوردگی تنش می شود.
- فولاد زنگ نزن آستنیتی در حضور تنش فقط در محیط های کلر دار دچار SCC می شود و در حضور آمونیاک مشکلی ندارد. اما برنج در محیط آمونیاک دار دچار SCC می شود اما در محیط کلر دار مشکلی ندارد.

خوردگی تنش

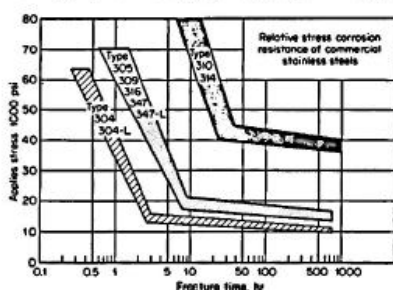


- ایجاد ترک های ریز در حضور همزمان تنش کشش و محیط خورنده را خوردگی تنش می گویند.
- در این خوردگی ماده ظاهراً دچار خوردگی نمی شود و فقط ترک های ریزی در آن به وجود می آید.

خوردگی تنش

اثر تنش

- تنش باید کششی و بیشتر از یک حد مجاز باشد.



خوردگی تنش

- ترک خوردن فصلی برنج یکی از مثالهای این نوع خوردگی است. پوک فشنگ ها در محل اتصال به مرمی در فصلهای بارنگی در جنگ جهانی دوم دچار ترک خوردگی می شدند.
- تردی بازی فولاد نیز نوعی خوردگی تنش است. در دیگهای بخار قسمت هایی که روی آنها سوراخ پرچ وجود دارد به صورت ترد دچار شکست می شوند. و در محل شکست رسوبات سفید رنگ هیدروکسید سدیم دیده می شود

خوردگی تنش

اثر محصولات خوردگی

- محصولات خوردگی حجمی بیشتر از فلز داشته باشند و در ناحیه ای تشکیل شوند که امکان خروج راحت را نداشته باشند تنش زیادی را به اطراف خود وارد می کنند. به این فرایند wedging action یا اثر گوه ای گفته می شود.
- مثلاً در چدن خاکستری در اسید سولفوریک جوشان فصل مشترک چدن-گرافیت به سرعت خورده می شود و اثر گوه ای در قسمت های داخلی تر دیده می شود.
- فرورفتگی لوله اینکونلی در محل عبور لوله از سوراخ صفحه فولاد کربنی در نیروگاه هسته ای.

خوردگی تنش

شکل ترک

- ترک در جهت عمود بر تنش به صورت بین دانه ای و درون دانه ای رشد می کند.



Material	Environment	Material	Environment
Aluminum alloys	NaCl-H ₂ O ₂ solutions NaCl solutions Seawater	Ordinary steels	NaOH solutions NaOH-Na ₂ SiO ₃ solutions Calcium, ammonium, and sodium nitrate solutions
Copper alloys	Air, water vapor Ammonia vapors and solutions		Mixed acids (H ₂ SO ₄ -HNO ₃) HCN solutions Acidic H ₂ S solutions
	Amines Water, water vapor		Seawater
Gold alloys	FeCl ₃ solutions Acetic acid-salt solutions	Stainless steels	Molten Na-Pb alloys Acid chloride solutions such as MgCl ₂ and BaCl ₂
Inconel	Caustic soda solutions		NaCl-H ₂ O ₂ solutions
Lead	Lead acetate solutions		Seawater
Magnesium alloys	NaCl-K ₂ CrO ₄ solutions Rural and coastal atmospheres		H ₂ S NaOH-H ₂ S solutions
	Distilled water		Condensing steam from chloride waters
Monel	Fused caustic soda Hydrofluoric acid	Titanium alloys	Red fuming nitric acid, seawater, N ₂ O ₄ , methanol-HCl
Nickel	Hydrofluosilicic acid Fused caustic soda		

خوردگی تنش

اثر محیط

- برخی ترکیبات باید در محیط وجود داشته باشد تا خوردگی تنش رخ دهد.
- خشک و تر شدن و یا گرم و سرد شدن سرعت SCC را افزایش می دهد.

خوردگی تنشی

روش های پیشگیری

- کاهش تنش کشش
- حذف ناخالصی های مضر از محیط
- حفاظت کاتدی
- استفاده از ممانعت کننده ها

خسارات هیدروژنی

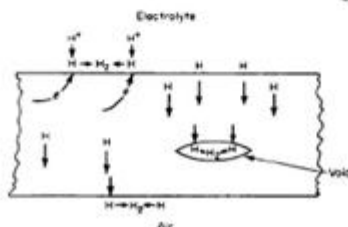
- خسارت هیدروژنی اصلاحی کلی برای خسارات مکانیکی وارد شده به فلز در اثر حضور و یا واکنش با هیدروژن است. که به چهار دسته تقسیم می شوند.
- تاول زدن هیدروژنی
- تردی هیدروژنی
- دکربوره کردن
- خوردگی هیدروژنی

خسارات هیدروژنی

- در تردی هیدروژن اتمهای هیدروژن به داخل فلز نفوذ می کنند و باعث ترد شدن آن و رشد سریع ترک می شوند.
- دکربوره کردن در دماهای بالا رخ می دهد و باعث می شود تا کربن از سطح فولاد خارج شود که در اثر آن سطح سختی و استحکام خود را از دست می دهد.
- خوردگی هیدروژنی به حالتی گفته می شود که در دمای بالا هیدروژن با یکی از اجزای آلیاژ واکنش دهد و باعث افت خواص مکانیکی آن شود.

خسارات هیدروژنی

- در تاول زنی هیدروژن اتمهای هیدروژن به داخل فلز نفوذ می کنند و در داخل حفرات آن به صورت مولکول گازی تجمع می کنند.



خوردگی یکنواخت

از ویژگی های بارز آن می توان به یکسان بودن نرخ خوردگی در تمامی قسمتهایی از سازه فلزی اشاره نمود که در معرض محیط خورنده قرار گرفته اند. به عبارت دیگر، در این گونه خوردگی ضخامت سازه فلزی که در معرض محیط خورنده قرار دارد بطور نسبتاً یکنواخت تدریجاً کاهش می یابد. از دیگر خصوصیات خوردگی یکنواخت علاوه بر کاهش وزن می توان به تغییر ظاهر سطح فلز اشاره نمود بطوریکه سطوح صاف و صیقلی پس از بروز این نوع خوردگی تقریباً زبر و کدر می گردند. زنگ زدگی قطعات فولادی در اتمسفر و خوردگی آلیاژهای مس در آب دریا نمونه هایی مشخص از این صورت خوردگی به شمار می روند در این نوع خوردگی شامل خوردگی اتمسفری، خوردگی دوفلزی، خوردگی ناشی از جریان های سرگردان، خوردگی یکنواخت در اثر فعالیت موجودات جاندار، خوردگی در نمک مذاب، خوردگی ناشی از فلز مذاب و خوردگی در درجه حرارت های بالا می شود.

Thickness is reduced uniformly



Uniform Corrosion

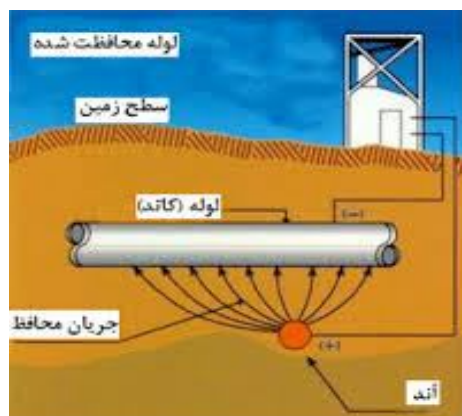
پیش بینی و اندازه گیری این نوع خوردگی نسبتاً آسان می باشد. به منظور تعیین نرخ خوردگی می توان از روشهایی نظیر کاهش وزن یا تکنیکهای الکتروشیمیایی مانند طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سود جست. در طراحی ها بایستی به این نکته نیز توجه نمود که نرخ خوردگی به برخی پارامترها نظیر دما و غلظت عوامل مهاجم وابسته می باشد.

این نوع خوردگی به عنوان نوعی از خوردگی که به صورت یکنواخت از ضخامت ماده کم می کند تعریف شده است. برخی از انواع خوردگی ممکن است تحت تأثیر ساز و کارهای دیگری اتفاق افتد، اما چون منجر به کم شدن ضخامت می شود، می توان آن را تحت عنوان خوردگی یکنواخت مطرح کرد. در این نوع خوردگی که متداول ترین و معمول ترین نوع خوردگی محسوب می شود، که معمولاً بوسیله یک واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بطور یکنواخت در سرتاسر سطحی که در تماس با محلول خورنده قرار دارد، ایجاد می گردد. خوردگی به صورتی یکنواخت به سطح فلز حمله می کند و به این ترتیب نرخ آن از طریق آزمایش قابل پیش بینی است. خوردگی یکنواخت یا سرتاسری، از نقطه نظر فنی اهمیت چندانی ندارد زیرا عمر تجهیزاتی که تحت این نوع خوردگی قرار می گیرند را می توان به راحتی تخمین زد.

روش های جلوگیری از خوردگی یکنواخت :

تا کنون روش های متعددی جهت جلوگیری و مقابله با این نوع خوردگی پیشنهاد گردیده است که برخی از شناخته شده ترین آنها عبارتند از:

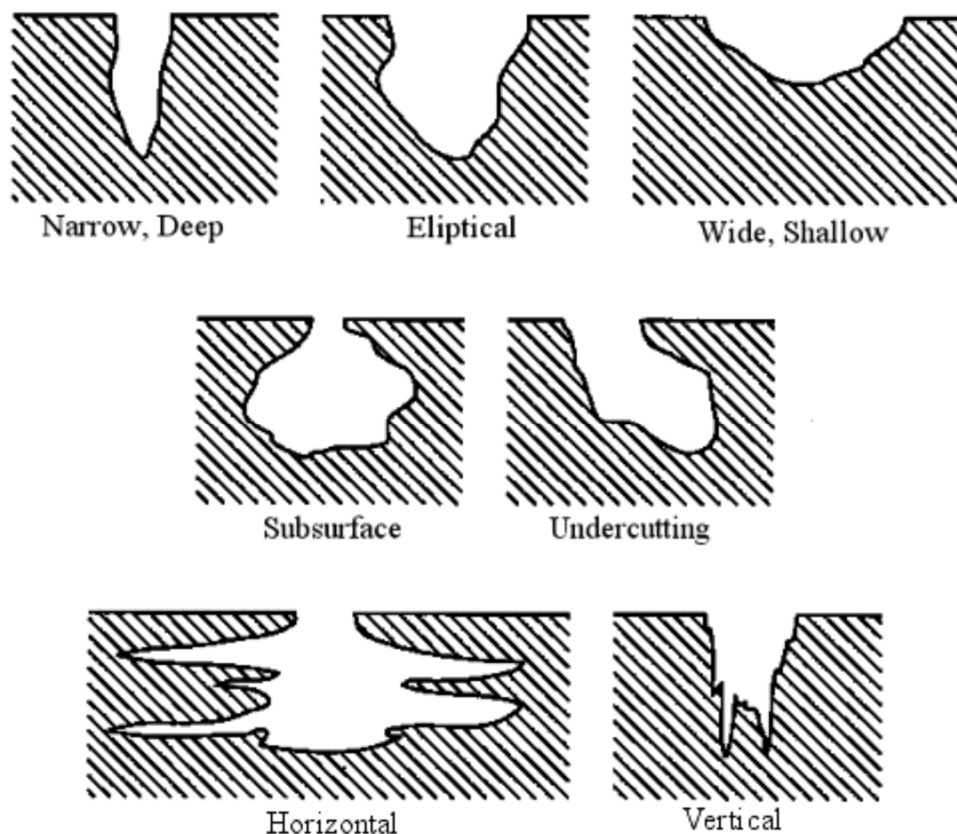
- انتخاب صحیح مواد
- پوشش های محافظ
- حفاظت آندی و کاتدی
- بازدارنده های خوردگی



خوردگی حفره ای

خوردگی حفره ای نوعی از حملات موضعی است که به ایجاد سوراخ در سازه فلزی می انجامد. بدلیل مشکلات فراوان در تشخیص و پیش بینی، معضل حفره دار شدن بسیار خطرناکتر از خوردگی یکنواخت بنظر می رسد. این نوع خوردگی حفراتی را با دهانه باز یا پوشیده از محصولات خوردگی تولید می نماید. اگرچه یک حفره کوچک و باریک از دست رفتن میزان اندکی از فلز را به دنبال دارد اما می تواند به ایجاد مشکل برای کل سیستم منجر شود بطوریکه تنها یک حفره در سیستمی بزرگ ممکن است فاجعه عظیمی را در پی داشته باشد. به عنوان نمونه می توان به سوراخ شدن خطوط انتقال نفت گاز یا محصول نفتی اشاره نمود که صدمات جبران ناپذیری را بطور مستقیم یا غیر مستقیم به محیط زیست، سلامتی انسانها و اقتصاد وارد می آورد. خوردگی حفره ای در اشکال متفاوتی ظاهر می گردد

این نوع خوردگی تقریباً همیشه به وسیله یون های کلر و کلرید ایجاد می شود و به ویژه برای فولاد ضد زنگ بسیار مخرب است؛ چون در این خوردگی، سازه با چند درصد کاهش وزن نسبت به وزن واقعی اش، به راحتی دچار شکست می شود. معمولاً عمق این حفرات برابر یا بیشتر از قطر آنهاست و با رشد حفرات، ماده سوراخ می شود



شروع خوردگی حفره ای را می توان ناشی از موارد زیر دانست:

1- تخریبات موضعی مکانیکی یا شیمیایی در فیلم اکسیدی محافظ. غلظت بالای کلراید به عنوان

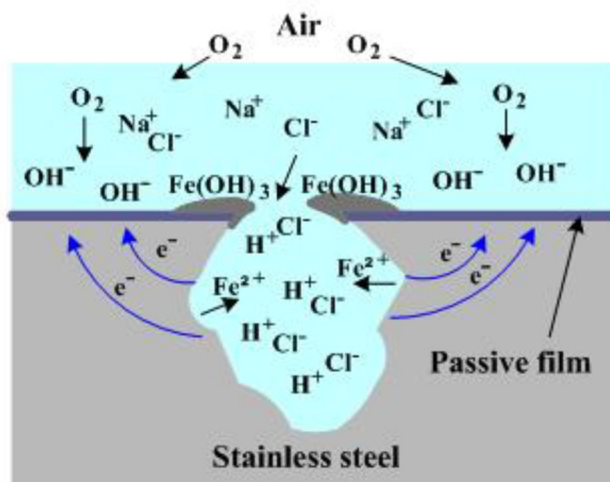
یکی از عوامل اصلی تخریب فیلم پسیو موجود بر روی سطح مطرح می باشد.

2- تخریبات موضعی یا اعمال نامناسب پوشش های محافظ

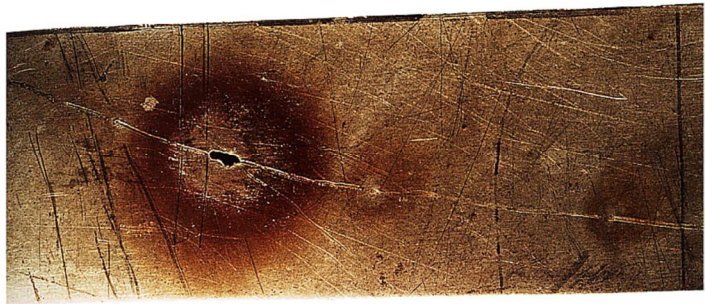
3- حضور نایکخواختی ها در سطح فلز

بطور کلی، فاکتورهای محیط (شیمی و مواد) متالورژی (نقش عمده ای را در آغاز خوردگی حفره ایفا می نمایند. علاوه بر آن، دو فاکتور مذکور تعیین می نمایند که آیا حفره موجود از قابلیت پسیو شدن مجدد برخوردار است یا خیر. به این معنا که حضور اکسیژن کافی در محل واکنش، شانس تشکیل اکسید و پسیو شدن را در حفره افزایش می دهد. همچنین در صورت حضور عناصر آلیاژی نظیر Cr , Mo , Ti , W , N حفره موجود مجدداً قادر به پسیو شدن می باشد

Pitting corrosion



فولاد **stainless** از حساسیت بالایی به این نوع خوردگی برخوردار است اما دیگر فلزات نیز نظیر آهن پسیو، آلومینیوم، مس، نیکل و آلیاژهای آنها در معرض آسیب های خوردگی حفره ای قرار دارند. از دیگر پیامدهای جدی خوردگی حفره ای می توان به نقش آن در افزایش تنش در سازه اشاره نمود.



روش های جلوگیری از خوردگی حفره ای :

- انتخاب صحیح مواد با توجه به محیط
- کنترل ، غلظت کلراید و دما
- حفاظت کاتدی
- استفاده از آلیاژهای مقاوم تر به خوردگی حفره ای
- بازدارنده های خوردگی
- جلوگیری از ساکن بودن الکترولیت
- پوشش های مناسب و لزوم دقت فراوان بر فرایند اعمال

خوردگی بین دانه ای

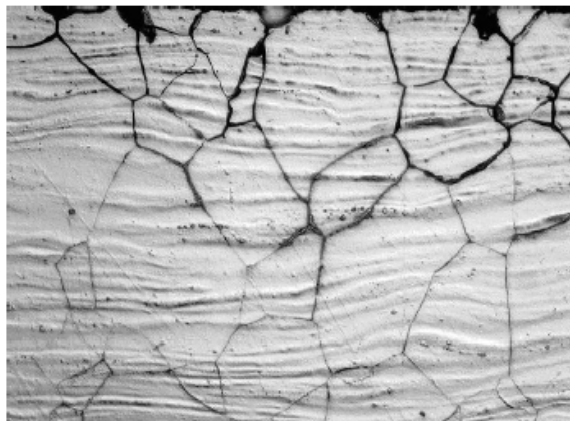
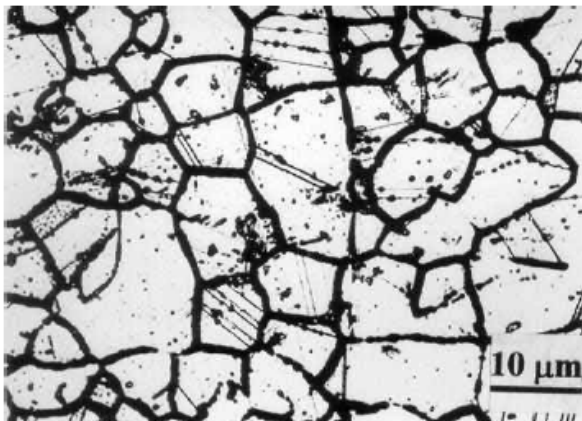
در اکثر حالات خوردگی نظیر خوردگی یکنواخت، مرز بین دانه ها رفتاری مشابه با خود دانه ها ارائه می نمایند. اما در برخی شرایط خاص، مرز بین دانه ها برخلاف بالک ماده حملات موضعی شدیدی را تجربه می کنند. بدین ترتیب، آلیاژها یکپارچگی خود را از دست می دهند که به ضعف در خواص مکانیکی می انجامد. این نوع از خوردگی که برخی اوقات خوردگی بین کریستالی نیز نامیده می شود به سبب حضور ناخالصی ها در مرزها، تجمع یا نقصان موضعی یک یا چند عنصر آلیاژی بوقوع می پیوندد. به عنوان مثال، مقادیر اندکی از آهن در آلومینیوم یا تیتانیوم به مرز بین دانه ها رانده شده و باعث خوردگی می شود. انواع مختلفی از آلیاژها در معرض خوردگی بین دانه ای هستند اما یکی از مهمترین است که به نقصان کروم در نزدیکی مرزها ارتباط داده می شود. برخی **austenitic stainless steel** آنها به تعبیر دیگر دلیل حملات موضعی در مرز بین دانه ها در فلزات پلی کریستالاین را انرژی درونی بالاتر در مناطق مرز دانه ای می دانند. این مساله با رانش ناخالصی ها به مرزها و رسوب فاز دوم که ممکن است نوبل تر باشد تشدید می گردد. وسعت و میزان خوردگی بین دانه ای وابسته است به سطح حساس کردن و تهاجم محیط خورنده.

Preferential corrosion along
grain boundaries



Intergranular Corrosion

بواسطه برخی تنش ها، ترک هایی ممکن است در مرز بین دانه ها ایجاد گردد که در اصطلاح به این یا بطور ساده تر Intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) نوع خوردگی اطلاق می گردد .
corrosion cracking تشخیص خوردگی بین دانه ای در مراحل اولیه بسیار دشوار است .بدین منظور بایستی از کوپن گذاری (کوپن های آزمایشگاهی استاندارد (و آنالیز میکروسکوپی سطح بهره گرفت.



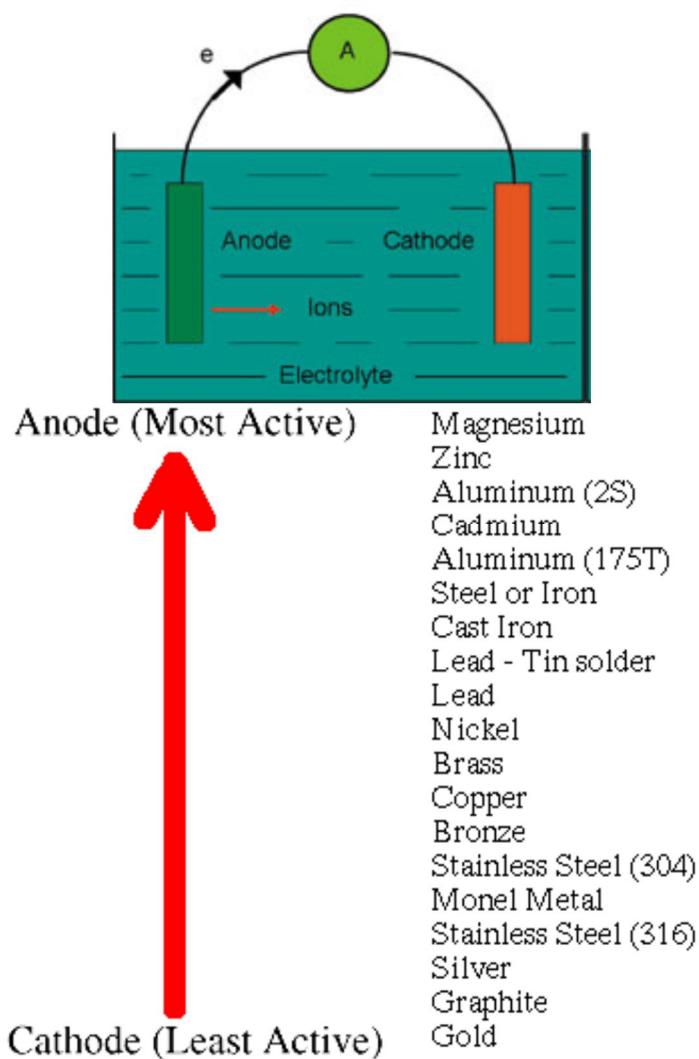
روش های جلوگیری:

- استفاده از انواع کم کربن استنلس استیل (نظیر 304L و 316L)
- استفاده از انواع آلیاژ پایدار شده با تیتانیوم (به عنوان مثال نوع ۳۲۱) یا نایوبیوم (به عنوان مثال نوع ۳۴۷)
- حرارت دهی آلیاژها برای زدودن فازهایی از مناطق مرز دانه ای که مقاومت در برابر خوردگی را کاهش می دهند.

خوردگی گالوانیک

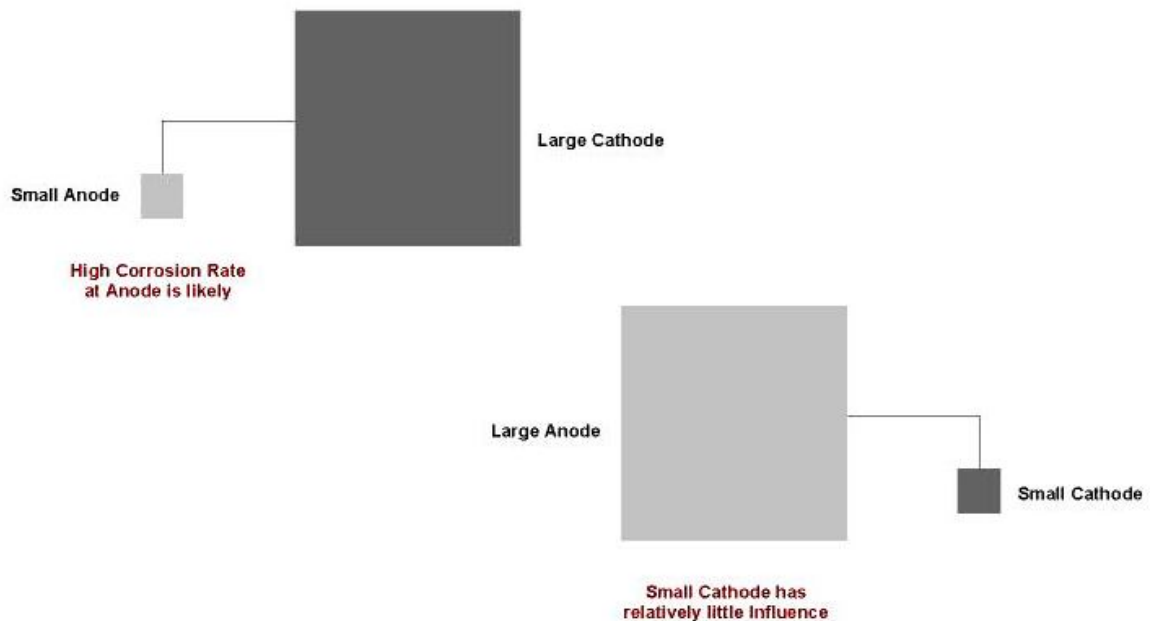
این نوع خوردگی الکتروشیمیایی زمانی بوقوع می پیوندد که دو فلز مختلف در معرض الکترولیت در تماس الکتریکی با یکدیگر قرار گیرند .بنابراین، سلی الکتروشیمیایی تشکیل شده که در آن فلزات فعال تر و نجیب تر به ترتیب به عنوان آنود و کاتد عمل می نمایند. به عنوان نمونه می توان به افزایش نرخ خوردگی فولاد در آب دریا اشاره نمود زمانیکه در تماس با آلیاژهای مس قرار می گیرد .حملات گالوانیک می تواند طبیعتی یکنواخت داشته باشد یا در اثر تماس بین آلیاژها وابسته به نوع محیط بصورت موضعی نمود یابد .خوردگی گالوانیک درصورت عدم حضور فیلم های محافظ یا جدایش آنها توسط عواملی نظیر خوردگی سایشی تشدید می گردد .تحت این شرایط، وقوع خوردگی گالوانیک حتی برروی سطح یک فلز نیز دور از انتظار نیست که آنرا می توان ناشی از اختلاف پتانسیل مکانهای مختلف موجود برروی سطح دانست .
سری گالوانیکی که در صفحه بعد به آن اشاره شده است فلزات را بر اساس تمایلشان به خوردگی طبقه بندی می نماید .
سری مذکور به منظور تعیین وقوع خوردگی گالوانیک یا قدرت آن بکار می رود.
همانطور که در سری گالوانیک مشاهده می گردد برخی فلزات نظیر طلا و نقره غیر فعال هستند در حالیکه در انتهای دیگر این سری، فلزات بسیار فعال با تمایل شدید به خوردگی قرار دارند .اینگونه فلزات را می توان به عنوان آندهای فدا شونده مورد استفاده قرار داد .فاصله دو فلز در سری گالوانیک بر چگونگی انجام خوردگی گالوانیک زمانیکه در تماس با یکدیگر قرار می گیرند موثر است. این نوع خوردگی وقتی رخ می دهد که دو فلز یا آلیاژ متفاوت (یا دو ماده متفاوت دیگر همانند الیاف کربن و فلز) درحضور یک ذره خورنده با یکدیگر تماس پیدا کنند. در منطقه تماس، فرآیندی الکترو شیمیایی به وقوع می پیوندد که در آن ماده ای به عنوان کاتد عمل کرده و ماده دیگر آنود می شود. در این فرآیند کاتد در برابر اکسیداسیون محافظت شده و آنود اکسید می شود. فلز مقاومتر خورده نمی شود، اما آهنگ خوردگی فلز فعالتر که مقاومت خوردگی کمتری

دارد، افزایش می یابد. به علت وجود جریان های الکتریکی بین فلزات غیر همجنس، این نوع خوردگی، گالوانیک یا دو فلزی نامیده می شود



یکی از فاکتورهای موثر بر خوردگی گالوانیک، تاثیر هندسه سطح می باشد به این معنا که با افزایش نسبت سطح کاتد به آنده، نرخ خوردگی افزایش می یابد.





روش های جلوگیری خوردگی گالوانیک

-انتخاب مواد با توجه به فاصله آنها در سری گالوانیک

-توجه به نسبت سطح کاتد به آنده

-عایق کردن فلزات متفاوت در صورت امکان

-پوشش های محافظ

خوردگی سایشی

جریان سریع سیالات اغلب به فیلم های سطح یا رسوباتی که نقش حفاظت در برابر خوردگی را ایفا می نمایند آسیب هایی را وارد می آورد. نازک شدن یا جدایش فیلم های موجود بر روی سطح در اثر سایش ناشی از جریان سیالات منجر به خوردگی تسریع شده ای می شود که به خوردگی سایشی معروف است. بنابراین می توان گفت که این صورت از خوردگی منتج از ترکیب محیط شیمیایی مهاجم و سرعت بالای جریان سیالات می باشد. اینگونه حملات در سازه هایی که مسیر و سرعت جریان را تغییر می دهند یا باعث افزایش آشفتگی می گردند شدیدتر است.

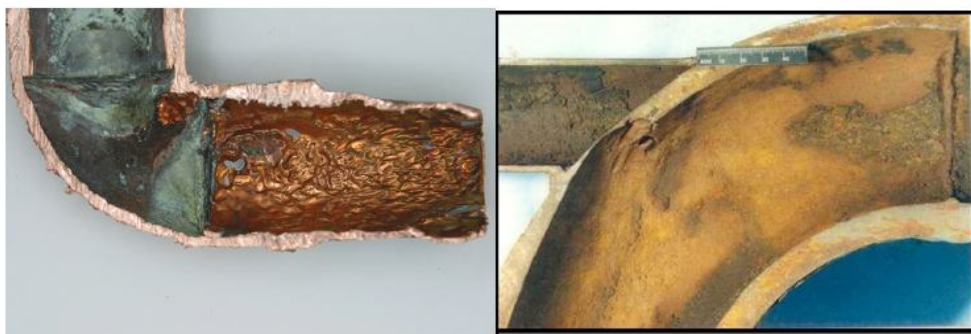
خوردگی سایشی عبارتست از افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفتن یک فلز در اثر حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز. در این فرآیند یون های فلزی حل شده روی سطح فلز، در اثر حرکت سیال روی سطح باقی نمانده و یا محصولات جامد حاصل از خوردگی از سطح فلز به طریق مکانیکی جدا می شوند. این نوع خوردگی وقتی رخ می دهد که محیطی نسبت به یک محیط ثابت دیگر حرکت کند (به عنوان نمونه مایع یا دوغابی که درون یک لوله جریان دارد) یک پدیده مرتبط با این گونه خوردگی، سایش **Fretting** است که هنگام تماس دو ماده با یکدیگر و حرکت نسبی آنها از جمله ارتعاش به وجود می آید. این عمل می تواند پوشش های ضد خوردگی را از بین برده و باعث آغاز خوردگی شود



سیالات می توانند از نوع مایع یا گاز و تک فاز یا چند فاز باشند. شیمی سطح بدلیل اثرات مکانوشیمیایی نقش مهمی را در خوردگی مذکور ایفا می نماید. خوردگی سایشی در آلیاژهای نرم نظیر مس و آلومینیوم شیوع بیشتری دارد بطوریکه این نوع خوردگی از جمله بزرگترین معضلات لوله های مسی به شمار می رود.

روش های جلوگیری از خوردگی سایشی :

- تغییر در سرعت سیالات و الگوی جریان پذیری آنها
- استفاده از آلیاژهای سخت تر و مقاوم تر در برابر خوردگی
- پوشش های با مقاومت خوردگی و سایشی بالا



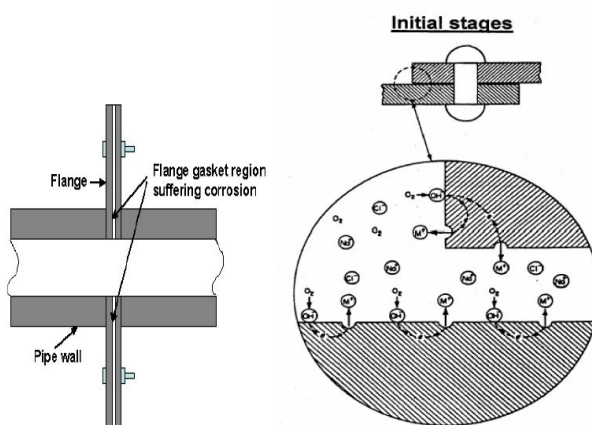
خوردگی شباری

خوردگی شباری نوعی از حملات موضعی است که در اثر حضور حجم اندکی از محلول ساکن در داخل درزها و ترک ها بین سطوح فلزی یا بین سطوح فلزی و غیر فلزی اتفاق می افتد. به عبارت دیگر، این نوع خوردگی بوسیله تغییرات در شیمی موضعی داخل شکاف که در ادامه به آنها اشاره شده است آغاز می گردد:

- تغییر غلظت اکسیژن
- تغییر غلظت بازدارنده
- ایجاد شرایط اسیدی

-جذب عوامل مهاجمی نظیر کلراید به داخل شکاف

بدلیل محدود شدن دسترسی اکسیژن به داخل شکاف، یک differential aeration cell بین شکاف (آند (و سطح خارجی) کاتد (تشکیل می گردد.



عدم تعادل در نسبت سطح کاتد به آند شرایطی بسیار خورنده را در داخل شکاف ایجاد می نماید که می باشد. اسیدی شدن موضعی الکترولیت تاثیر (pH 1-3) نتیجه آن تشکیل محیطی بشدت اسیدی زیادی بر افزایش نرخ خوردگی فلزات دارد. یونهای فلزی ایجاد شده، محصولات خوردگی را تشکیل می دهند که ممکن است باعث مسدود شدن شکاف گردد. تجمع بار مثبت در شکاف جاذبی قوی است برای بارهای منفی نظیر کلرایدها. بطورکلی، ترکیب شیمیایی الکترولیت و افت پتانسیل در شکاف فاکتورهای مهم در شروع خوردگی مذکور محسوب می گردند.

این نوع خوردگی در بیشتر مواقع در شیارهایی که در معرض محیط خورنده قرار دارند منجر به خوردگی موضعی شدیدی می شود و معمولاً همراه با حجم های کوچک محلول ها یا مایعاتی که در اثر وجود سوراخ، سطوح و اشرفا، محل روی هم قرار گرفتن دو فلز، رسوبات سطحی و شیارهای زیر پیچ، مهره ها و میخ پرچ ها ساکن شده اند یا به اصطلاح حالت مرده پیدا کرده اند، ایجاد می شود. این ساز و کار وقتی رخ می دهد که یک ذره خورنده در فاصله ای باریک، بین دو جزء گیر کند. با پیشرفت واکنش، غلظت عامل خورنده افزایش می یابد. بنابراین واکنش با نرخ فزاینده ای پیشروی می کند.

روش های جلوگیری از خوردگی شیار

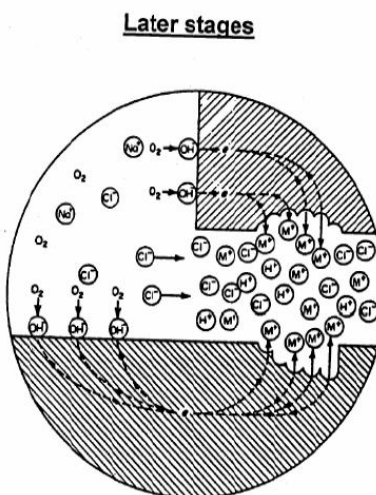
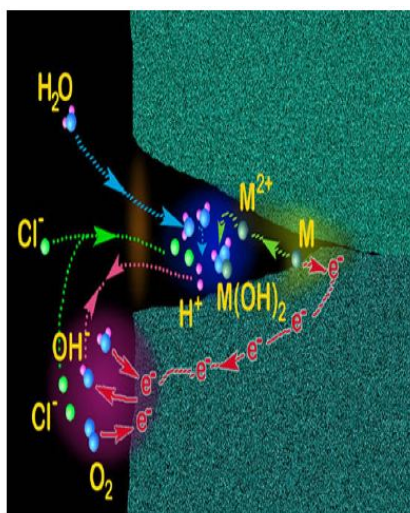
- استفاده از جوش بجای پیچ و مهره

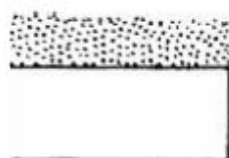
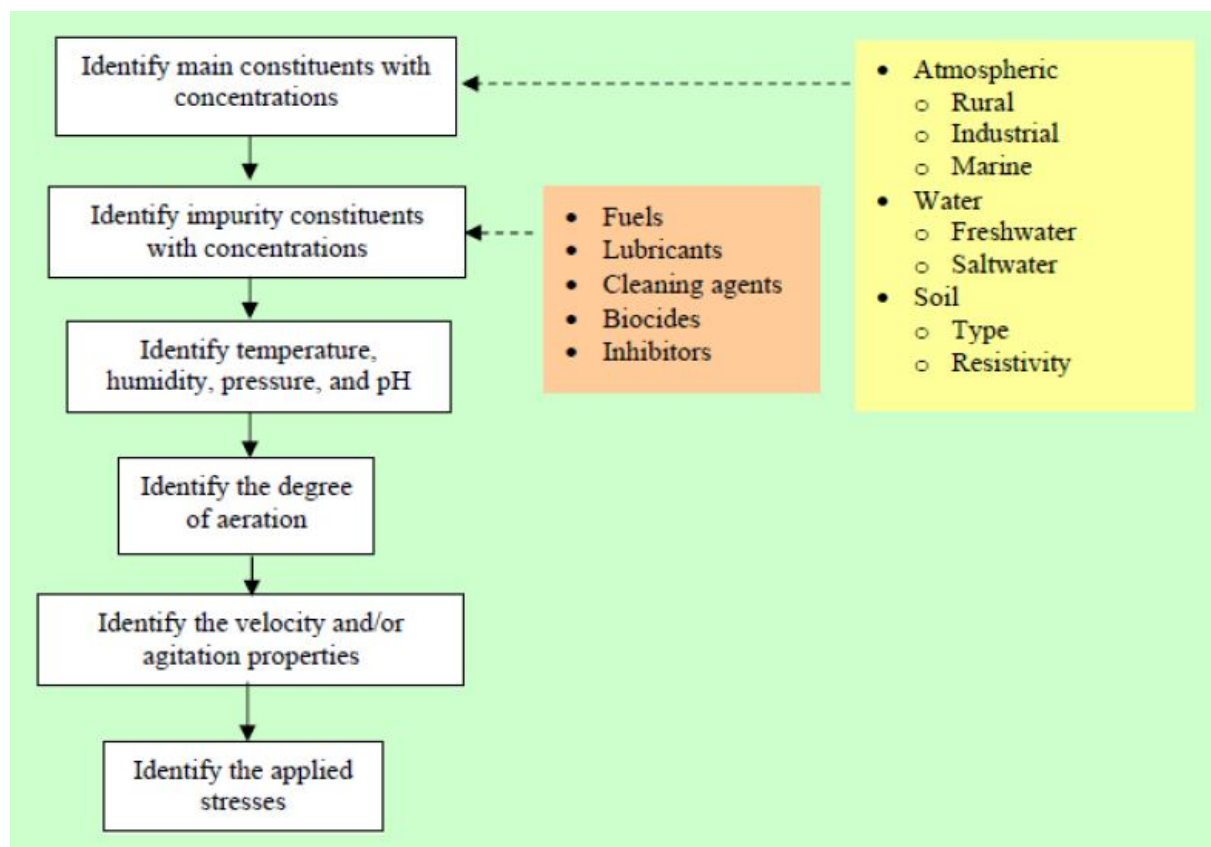
- گریسکاری تمام سیلها و استفاده از سیلهای غیر متخلخل

- حتی الامکان حذف شکاف ها در طراحی

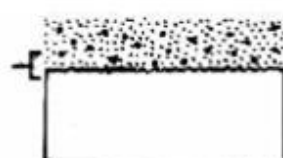
استفاده از آلیاژهای مقاوم تر به خوردگی شیار (نظیر Molybdenum-containing grades of stainless steel)

- پوشش های محافظ

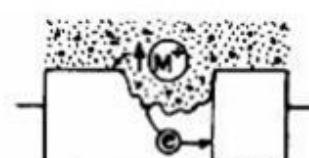




Uniform



Intergranular



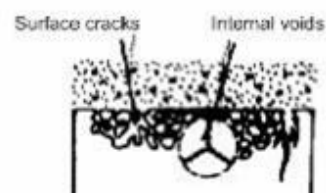
Galvanic



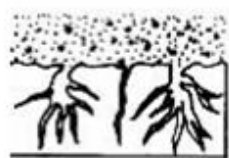
Crevice



Pitting



Hydrogen damage



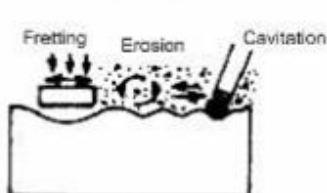
Stress corrosion



Corrosion fatigue



Hydrogen induced cracking



Cavitation, erosion and fretting

انواع مکانیزمهای خوردگی

➤ خوردگی الکتروشیمیایی:

این نوع خوردگی هنگامی ایجاد می شود که در فلز یا در جسم، ناهمگنی وجود داشته باشد. وجود ناهمگنی در فلز سبب ایجاد پیل شده و بین کاتد و آند جریان الکتریکی به وجود آمده و فلز خورده می شود. چون تمام فلزات همگن نیستند بنابراین اگر در یک الکترولیت قرار گیرند خورده می شوند آن هم به شکل الکتروشیمیایی.

➤ خوردگی بیوشیمیایی:

که توسط عوامل زیستی مانند باکتری ها این نوع خوردگی ایجاد می شود. مانند خورده شدن لوله های نفت در دل زمین به وسیله باکتری ها .

➤ خوردگی فرسایشی:

که با سایش بین یک ماده جامد یا مایع یا حتی گاز با فلز موجب خوردگی فرسایشی می شود. مانند خوردگی لوله های آب به وسیله عبور آب از درون آن .

➤ خوردگی تنشی

این پدیده عبارت است از ترک خوردن در اثر خوردگی توأم با تنش که نتیجه اعمال همزمان تنش های کششی و محیط خورنده روی فلز است. در این شرایط ترک های ریزی که ناشی از فرآیندهای خوردگی موضعی هستند، به داخل فلز یا آلیاژ پیشرفت می کنند.

➤ آبشویی ترجیحی (جدایش انتخابی)

جدایش انتخابی نوعی خوردگی است که در آن عناصر خاصی از آلیاژ، حل شده و از آن جدا می شوند. روی، آلومینیوم، کبالت، نیکل و کروم از معمول ترین عناصری هستند که به این طریق از آلیاژ جدا می شوند .

این نوع خوردگی انتخابی وقتی رخ می دهد که عنصری از یک آلیاژ جامد از طریق یک فرآیند خوردگی ترجیحی و عموماً با قرار گرفتن آلیاژ در معرض اسیدهای آبی خورده می شود. متداول ترین مثال جدا شدن روی از آلیاژ برنج است .

- خوردگی دو فلزی

- خوردگی موضعی

- خوردگی توأم با تنش

➤ خوردگی توأم با خستگی

خستگی عبارت است از تمایل فلز به شکست در اثر تنش های متناوب، خوردگی خستگی، تقلیل مقاومت خستگی فلز، در اثر وجود محیط خورنده ایجاد می شود

➤ خوردگی ناشی از جریان

یک تفاوت بسیار روشن میان خوردگی ناشی از جریان و سایش مکانیکی وجود دارد. خوردگی ناشی از جریان در نتیجه شدت آشفته گی سیال و انتقال جرم ناشی از جریان سیال روی یک سطح به وجود آمده و تشدید می شود، در حالیکه سایش مکانیکی بوسیله برخورد فیزیکی سیال به عنوان فاز دوم با سطح به وجود می آید

➤ خوردگی اتمسفری

این نوع خوردگی عمدتاً به خاطر رطوبت و اکسیژن است ولی بوسیله ناخالصی هایی نظیر ترکیبات گوگردی و نمک طعام حادث می شود.

➤ خوردگی در خاک

عوامل مؤثر بر خوردگی خاک ها عبارتند از: رطوبت، قلپایی بودن، اسیدیته، قابلیت نفوذ آب و هوا، نمک ها، جریان های سرگردان و اکسیژن

➤ خوردگی بیولوژیکی

از بین رفتن یا انهدام یک فلز بوسیله فرآیندهای خوردگی که به طور مستقیم یا غیر مستقیم، نتیجه فعالیت موجودات جاندار باشد را در گروه خوردگی بیولوژیکی دسته بندی کرده اند. این موجودات شامل انواع میکروسکوپی مثل باکتری ها و انواع ماکروسکوپی مثل جلبک ها و جانوران دریایی دیگر هستند

- خوردگی یکنواخت

- خوردگی دوفلزی

- خوردگی توسط اکسیژن

- خوردگی بین دانه ای

- خوردگی انتخابی

- خوردگی میکروبی

➤ - خوردگی حبابی

این نوع خوردگی نوعی خوردگی سایشی موضعی است که در اثر ترکیدن مکرر حباب های بخار و به دنبال آن خسارت الکتروشیمیایی و تخریب موضعی سطح ایجاد می شود و معمولاً در منطقه صدمه دیده متمرکز می شود. خوردگی حبابی در مواردی مانند محل هایی که جریان آشفته مایع وجود دارد (برای مثال در نزدیکی پروانه کشتی ها و در پرده های پمپ های آب) رخ می دهد

➤ خوردگی موضعی

که شامل خوردگی فیلامنتی، خوردگی شیاری، خوردگی حفره ای و خوردگی موضعی در اثر فعالیت موجودات جاندار است.

➤ خوردگی ناشی از عوامل متالورژیکی

شامل خوردگی مرزدانه ای، جدایش انتخابی یا آلیاژ زدایی و خوردگی شیاری در فولاد کربنی است

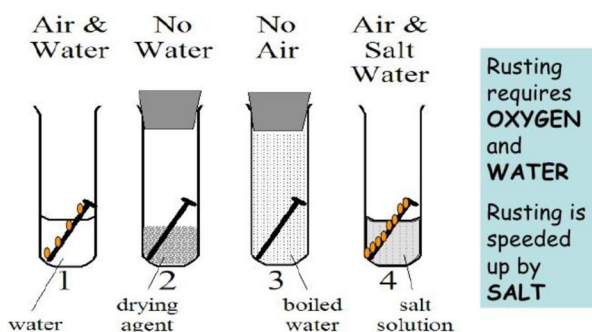
➤ خوردگی ناشی از عوامل مکانیکی

که شامل فرسایش، خوردگی مالشی یا اصطکاکی، خوردگی حبابی و برخورد قطرات آب، خوردگی خستگی، خوردگی توأم با تنش، خسارات هیدروژنی و تردی در اثر تماس با فلز مذاب است

➤ خوردگی ناشی از عوامل محیطی

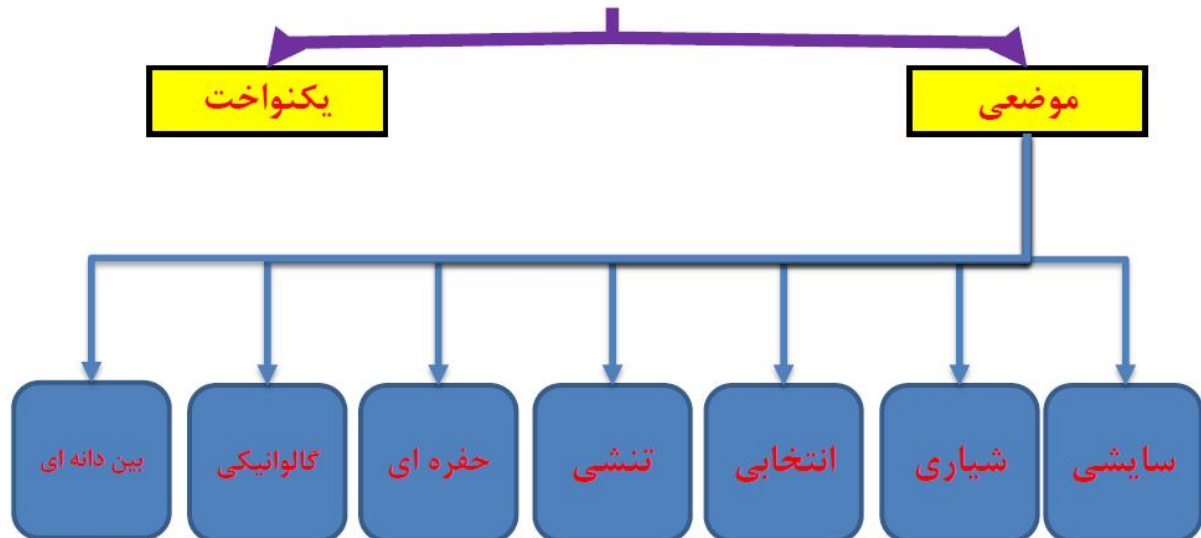
شامل خوردگی توأم با تنش، خسارات هیدروژنی، تردی در اثر تماس با فلز مذاب و ترک خوردن ناشی از فلز جامد است . خسارات هیدروژنی یک اصطلاح کلی است که دلالت بر خسارت مکانیکی وارد شده به فلز در اثر وجود یا واکنش با هیدروژن دارد که خود به چهار گروه تاول زدن هیدروژنی، تردی هیدروژنی و خوردگی هیدروژنی تقسیم بندی می شود ترک خوردگی ناشی از هیدروژن نوعی از ترک است که توسط اتم های هیدروژن که به داخل فولاد نفوذ کرده و در داخل ساختار فلز ترکیب شده و مولکول های هیدروژن تشکیل داده اند، ایجاد می شود. ترک ناشی از سولفور یکی از انواع ترک ناشی از تردی هیدروژن سولفور، توأم با تنش کششی بوجود می آید.

CHEMICALS FOR RUSTING



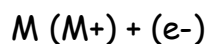
وجود اکسیژن و رطوبت از مهمترین عوامل خوردگی می باشند.
همچنین وجود نمک باعث تسریع در خوردگی می شود

انواع خوردگی



حفاظت کاتدی

خوردگی فلز M طبق واکنش زیر انجام می شود:



حفاظت کاتدی در حقیقت تامین الکترون برای فلزی است که

باید محافظت شود.

به دو روش انجام می شود:

۱- به وسیله یک مولد برق

۲- به وسیله یک آند فدا شونده

۱- به وسیله یک مولد برق (rectifier)

29

۲- (sacrificial anode) به وسیله یک آند فدا شونده

معیار انجام حفاظت کاتدی برای تجهیزات فولادی:

حداقل ولتاژ ۰ - ۰.۸۵ ولت نسبت به الکتروود مرجع مس-سولفات

مس

حفاظت آندی

این روش بر اساس تشکیل یک پوسته اکسیدی محافظ روی

سطح فلز از طریق اعمال جریانهای آندی می باشد. از دستگاهی

الکترونیکی به نام پتانسیواستات استفاده می شود. این دستگاه

فلز را در یک پتانسیل ثابت نسبت به یک الکتروود مقایسه نگه

می دارد. فقط فلزاتی که در محیط مورد نظر رفتار فعال -

غیرفعال دارند قابل انجام حفاظت آندی هستند.

30

پوشش ها

پوشش ها می توانند مانع مناسبی بین فلز و محیط باشند . پوشش ها می توانند بصورت فلزی (روکش دهی **Cladding** ، گالوانیزه نمودن و ...) و یا پوشش های غیر فلزی (رنگ ، لاستیک و ...) باشند .

بازرسی لوله ها API 570

در بازرسی ، هدف تعیین وضعیت موجود ، مطابقت با استاندارد و تعیین موارد خلاف استاندارد می باشد . این کار در دو مرحله انجام می گیرد :

1- هنگام ساخت

- جنس و قطر و ضخامت لوله ها
- نوع و مشخصات فنی والو ها
- نوع و مشخصات فنی اتصالات
- رنگ ، پوشش و عایق لوله ها
- نگهدارنده های سیستم
- مدارک بازرسی ها و تست ها خصوصا جوش ها و تست فشار

2- هنگام بهره برداری

- ضخامت لوله ها و اتصالات

- نشستی های سیستم

- وضعیت رنگ و عایق لوله ها

- وضعیت نگهدارنده ها

روشهای پیشگیری از خوردگی

- انتخاب مواد

- تغییر محیط خورنده

- طراحی مناسب

- حفاظت کاتدی

- حفاظت آنودی

- پوشش ها

انتخاب صحیح مواد

1- استفاده از آلیاژ مناسب

- این روش متداولترین روش جلوگیری از خوردگی است . برای انتخاب صحیح آلیاژ باید به جداول و مراجع موجود در این زمینه مراجعه نمود .

چند مثال :

- اسید نیتریک ----- فولاد زنگ نزن

- اسید سولفوریک غلیظ ----- فولاد ساده کربنی

- اسید سولفوریک رقیق ----- سرب

- محلول های قلیائی ----- آلیاژهای نیکل

- اسید کلریدریک گرم ----- هاستالوی

- داخل بدن ----- تانتال

- آب مقطر ----- قلع

2- استفاده از فلزات خالص

• مقاومت خوردگی یک فلز خالص معمولاً بهتر از فلز ناخالص است.
چند مثال:

• استفاده از آلومینیوم خالص برای نگهداری آب اکسیژنه.

• استفاده از زیرکونیوم تولید شده به روش قوس الکتریکی در نیروگاههای اتمی برای حصول مقادیر بسیار کم خوردگی

3- استفاده از غیر فلزات (قطعات و روکشهای غیر فلزی)

به دسته های زیر تقسیم می شوند:

۱- الاستیک ها و پلاستیک ها

• در مقابل اسید کلریدریک مقاومتر از فلزات و در مقابل اسید سولفوریک و اسید نیتریک ضعیفتر از فلزات هستند.

۲- سرامیک ها

• مقاومت خوردگی عالی در دماهای بالا ولی ترد و شکننده

۳- کربن و گرافیت

• مقاومت خوردگی بالا ولی شکننده

۴- چوب

• در محیطهای خورنده از بین می رود.

تغییر در محیط خورنده

1- کاهش دما

• معمولاً کاهش دما منجر به کاهش سرعت خوردگی می گردد. مثل فولاد زنگ نزن در اسید نیتریک

• در برخی مواقع بی تاثیر است یا باعث افزایش سرعت خوردگی می شود مثل فولاد در آب نمک

2- کم کردن سرعت محیط خورنده

• کاهش سرعت معمولاً باعث کاهش نرخ خوردگی می گردد. سرعتهای خیلی بالا باعث خوردگی سایشی می شوند.

استثناء: فولاد زنگ نزن معمولاً در محیط متحرک بهتر عمل می کند.

3- خارج کردن اکسیژن یا اکسید کننده ها

• یکی از قدیمی ترین روشهای کاهش نرخ خوردگی است. این کار با عبور دادن آب دیگ بخار از میان قراضه های فولادی انجام می شد.

• امروزه با اعمال خلا و دمیدن گاز خنثی به داخل محلول یا استفاده از مواد حذف کننده اکسیژن این کار انجام می شود.
استثناء: برای فولاد زنگ نزن اکسیژن زدائی توصیه نمی شود.

4- تغییر غلظت

• معمولاً کاهش غلظت عامل خورنده باعث کاهش خوردگی می شود.

• تعدادی از اسیدها مثل سولفوریک و فسفریک در غلظت های بالا در دماهای متوسط کاملاً خنثی هستند و با افزایش غلظت آنها خوردگی کاهش می یابد.

5- استفاده از ممانعت کننده ها

• موادی هستند که با اضافه کردن آنها به مقدار کم باعث کاهش سرعت خوردگی می شوند. دارای انواع زیر هستند:

•آندی (پسیو کننده -) افزایش پتانسیل خوردگی در نتیجه ایجاد لایه پسیو و کاهش خوردگی ممانعت کننده های آندی مانند کروماتها، نیتريت، و نیتراتها، فسفات. (استفاده از آنها نیاز به دقت بالا داشته زیرا استفاده زیاد آن موجب خوردگی موضعی می شود)

•کاتدی - با کاهش سرعت واکنش موجب کاهش خوردگی می شود. به عنوان مثال، یونهاى کلسیم، منیزیم، و روی بصورت هیدروکسید رسوب و باعث کاهش واکنش در این منطقه می شود. حذف اکسیژن از محیط های خورنده به طور قابل توجهی نرخ خوردگی را کاهش خواهد داد. (جاذب اکسیژن، مانند سولفیت سدیم و هیدرازین که با اکسیژن واکنش نشان می دهند)

•اهمی - با کاهش هدایت یونی، نرخ خوردگی کاهش می یابد. این ممانعت کننده از طریق جذب قوی به سطح فلز عمل می کند. مهار کننده های اهمی شامل آمین ها و سولفونات

•رسوبی - با تشکیل یک لایه رسوبی موجب کاهش خوردگی می شوند. سیلیکات و فسفات نمونه هایی از چنین مهار کننده می باشد.

•ممانعت کننده های فاز بخار - ترکیبات شیمیایی که فشار بخار نسبتا بالا و روی سطح فلزی جذب می شوند. برای مثال بسته متخلخل کوچک حاوی ممانعت کننده فاز بخار و خشک کن در بسته بندی تجهیزات حساس الکترونیکی در طول حمل و نقل.

در طراحی می بایست به نکات زیر توجه داشت:

- 1• استفاده از جوش به جای پرچ
- 2• سهولت تخلیه کامل در تانکها و محفظه ها
- 3• سهولت تعویض قطعات در معرض خوردگی
- 4• حداقل تمرکز تنش در قطعات در معرض محیط خورنده
- 5• عدم تماس الکتریکی فلزات غیر همجنس
- 6• پرهیز از زوایای تند در زانوها
- 7• حداکثر یکنواختی دما

بررسی راهکارهای نگهداری و بهسازی و مقابله با خوردگی

در مخازن ذخیره و نگهداری آب

حسین میسمی ، مدیر دفتر تحقیقات شرکت آبفاز اصفهان

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد عمران - سازه

Iman.Elyasian@gmail.com

چکیده

با توجه به نقش و اهمیت جایگاه تامین آب شرب و بهداشتی مورد مصرف اقشار مختلف مردم در شهرها و روستاهای کشور و بالا بردن میزان بهره بری از منابع آب قابل استحصال از یک سو و از سوی دیگر کاهش مشکلات فراروی تاسیسات و ابنیه آبی و افزایش عمر کاربری تاسیسات تهیه ، انتقال، توزیع ، تصفیه، و ذخیره سازی آب شرب از جایگاه ویژه ای برخوردار است. یکی از دغدغه های اساسی صنعتگران و کاربران کشور حفظ و نگهداری تاسیسات و زیر ساختهای آبی می باشد که هزینه های سنگینی صرف ساخت و بهره برداری از آنها شده است و در مرحله بهره برداری، نگهداری بهینه از آنها از اهمیت خاصی برخوردار است.

در این مقاله سعی بر این است که با توجه به سوابق موجود و تجربیات گذشته نیم نگاهی به بحث خوردگی مخازن ذخیره و نگهداری آب شرب بتنی و فلزی و یا مصالح مرکب صورت پذیرد. خوردگی مخازن بیشتر به صورت محیطی می باشد. ترکیبات موجود در آب مانند ترکیب های گوگرد، هیدروژن، دی اکسید کربن و سایر ناخالصی های موجود در عمل تسريع خوردگی بسیار موثر است.

کلمات کلیدی: بهسازی، مقاوم سازی، خوردگی، خوردگی توام، خوردگی مخازن

۱-مقدمه:

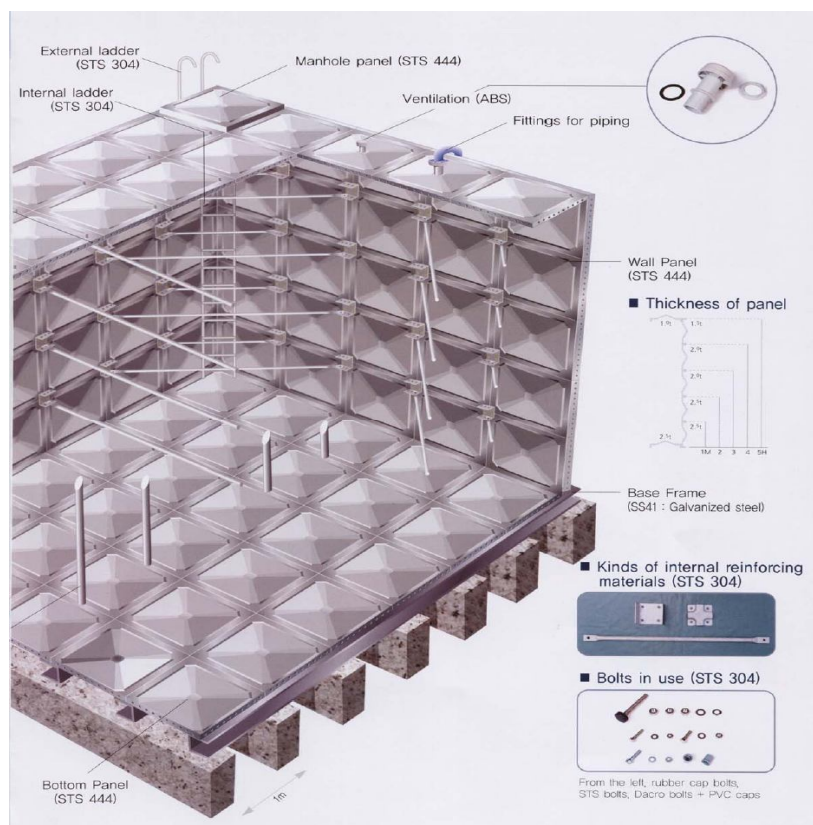
شرایط حیات و ملزومات آن امروزه کلید های توسعه و رشد بشری می باشند ولی بروز مشکلات عدیده ای مثل بلایای طبیعی ، آسیب های محیطی نظیر خوردگی باعث کاستی ها و نقصان در بهره برداری آنها گردیده است. در این مقاله سعی شده با تجربیات شرکت آبفای بر روی معضل خوردگی کنکاشی دیگر صورت پذیرد و کارآمدی روشهای موجود حفاظتی بررسی گردد.

۲- مخازن نگهداری و ذخیره آب شرب:

مخازن ذخیره سازی که بدلیل شرایط کاری مختلف مخازن، بایستی با ضریب ایمنی متفاوتی طراحی و ساخته شوند با توجه به نوع کاربری از ساختارهای متفاوتی برخوردار هستند. در صنعت آب کشور شاهد بکارگیری وسیع مخازن بتنی و فلزی و میا مصالح مرکب می باشیم که در اینجا به تشریح خوردگی های رخ داده در این نوع مخازن خواهیم پرداخت. اینگونه مخازن از مواد فلزی و یا غیر فلزی (کامپوزیت ها) و یا ترکیب آنها ساخته می شوند که بایستی حتی الامکان طراحی آنها براساس حداقل هزینه و مصالح بکارگرفته شده صورت پذیرد و ساخت آنها گاهی دارای مراحل ساخت و طراحی پیچیده ای دارا می باشد . مخازن باید توانایی تحمل بارهای استاتیکی، دینامیکی و خستگی در شرایط محیطی مختلف و در مواقعی که دارای آسیب وارده هستند را داشته باشند.

۱-۲- مخازن فلزی (All metal)

گرچه نوع آلیاژ مورد استفاده و همچنین تنش های طراحی این گونه مخازن در استاندارد مشخص نشده است و لیکن این گونه مخازن فولادی، آلومینیومی و یا مرکب بتنی باید تست های کارایی را بگذرانند. این تست ها برای اطمینان از مقاومت کافی این مخازن در مقابل خستگی و خوردگی لازم است . ایمنی این مخازن با انواع آزمایش های مخرب و غیرمخرب از قبیل سختی، تست فشار هیدرواستاتیک و ... تعیین می باشد.



شکل ۱-

۲-۲- مخازن (Hoop Wrapped)

این مخازن از فولاد، آلومینیوم و یا بتن مرکب ساخته شده اند که با الیاف کامپوزیت و FRP یا انواع ژئوممبران ها دوکف در جهت شعاعی تقویت شده اند. به جز دو قسمت ابتدائی و انتهایی مخزن که عموماً از الیاف شیشه، کربن یا آرمید با رزین می باشند، کامپوزیت های مورد استفاده در مخازن بیشتر اپوکسی و یا رزین ایزو فتالیک پلی استر می باشند.

۳-۲- مخازن (Fully Wrapped)

این مخازن از فولاد یا آلومینیوم یا مرکب بتنی ساخته شده اند که با الیاف کامپوزیت در جهت شعاعی و محوری تقویت شده اند. تقویت این مخازن با الیاف کامپوزیت در دو جهت، قابلیت تحمل بار فشار بیشتری را نسبت به مخازن نوع دوم دارند و همچنین این مخازن سبک تر از مخازن نوع دوم می باشند. البته در نوع مرکب به دلیل بارگذاری های متنوعی که در نظر گرفته شده ، اثرپذیری بیشتری در نظر گرفته می شود.

۴-۲- مخازن All composite

این مخازن مشابه مخازن نوع سوم با الیاف کامپوزیت در جهت شعاعی و محوری تقویت شده اند، با این تفاوت که دیواره (لایندر) مورد استفاده در این مخازن از مواد پلیمری (پلی اتیلن) می باشد. باربری این مخازن متناسب با تقویت صورت گرفته می باشد و در مقاطع عرضی تحمل بیشتری نسبت به مخازن فلزی و بتنی تنها و تقویت نشده دارند.

۵-۲- مخازن بتن مسلح:

این مخازن از جنس بتن کامل با پوشش داخلی دوگانه فلزی و کاورینگ می باشند. عمر این مخازن بیشتر از سایر مخازن می باشد. و در مناطق جنوبی کشور بخوبی جواب می دهند. البته به دلیل مشکلات اجرا در مناطق سردسیر غیرقابل اجرا می باشند.

۶-۲- مخازن سنگی:

این مخازن سابقاً در مناطقی که مصالح مناسبی در دسترس نبود ساخته می شد و سنگ موجود در محل مبنای مصلح بسیار مناسب می توانست باشد. خوردگی و تخریب در این مخازن وابستگی شدیدی به کیفیت نوع سنگ مصرفی و مصالح و ملات بکار گرفته شده داشت.

۳- شرایط بهره برداری مخازن

شرایط بهره برداری از مخازن بسیار متنوع بوده و با توجه به منطقه، اقلیم، کیفیت آب، نحوه ساخت، موقعیت بکارگیری و شرایط پر و خالی شدن متغیر است.

۱-۳- مشکلات بوجود آمده از کیفیت آب

انتقال و ذخیره سازی آب یا هر مایع دیگر به کنترل ترکیب و کیفیت آن می باشد . در حالت کلی اگر ترکیب آب طبق ضوابط خاصی در خطوط لوله جریان یابد ذخیره سازی آن با مشکلی مواجه نخواهد داشت . دی اکسید کربن، اکسیژن و سولفور (H_2S) از عوامل تاثیر گذار در خوردگی و آسیب مخازن مخصوصاً مخازن بتنی بدون پوشش می باشند. در مورد مقدار سولفید هیدروژن محدوده ها مشخص شده است و هر چه مقدار آن بیشتر باشد مقدار بروز خوردگی بیشتر می باشد. تاثیر کیفیت آب و دیگر شاخصه ها در خطوط انتقال و ذخیره سازی به طور جداگانه بررسی می گردد.

۱-۳-۱- آب : هنگامی که آب در مجاور بدنه مخزن قرار می گیرد، بجز موادی که آب باعث تخریب آنها نمی شود برای سایر موارد مشکل ایجاد می کند. در فصل زمستان خوردگی کاهش می یابد . ماندن آب در خط لوله و مخازن احتمال وقوع این مشکل را افزایش میدهد . وجود آب می تواند باعث خوردگی و بوجود آمدن ترکیبات بازی شود.

۲-۳-۱- دی اکسید کربن: در آب داخل مخازن فولادیو بتنی که در معرض آب نیز باشند باعث بروز تشدید خوردگی می گردد.

سرعت خوردگی بسته به فشار، دما، مقدار کربنات آهن، غلظت و مقاومت مواد تشکیل دهنده بدنه و دیواره مخزن متغیر و انعطاف پذیر می باشد. خوردگی می تواند صرفاً محدود به نقاطی شود که آبه ماندگی رخ داده اس. و سطح بالای مخزن آسیب نبیند ولی به دلیل بروز پدیده شبنم و تبخیر آب گاهی خوردگی در بالادست به دلیل وجود هوا حتی بیشتر می باشد.

۳-۱-۳- ترکیبات هیدراته : با افزایش فشار درون مخازن هیدرات ها می توانند در دماهای بالاتر از صفر درجه تشکیل شوند(یعنی در مناطق سردسیر این پدیده کمتر رخ می دهد). این امر می تواند باعث مسدود شدن لوله ها، شیرها، رگولاتورهای فشار ، حوضچه های تخلیه ، شیرهای آتش نشانی و شیرهای ایمنی شود . به همین دلیل عموماً یک محدوده مجاز برای مقدار آب موجود در مخازن تعریف می کنند غلظتترکیبات خوردنده آب باید به قدری کم باشد که نقطه انجماد در فشار ۵ درجه سانتیگراد کمتر از حداقل دمای محلی باشد . در عمل این به معنی مجاز بودن مقدار ۱۰ تا ۵۰ میلیگرم بر متر مکعب می باشد.

۴-۱-۳- سولفید هیدروژن: در صورت وجود سولفید هیدروژن در آب می تواند بصورت ترکیبات سولفید هیدروژن اسیدی ظاهر شده و باعث افزایش خوردگی و تردی فلز شود. آزمایشها نشان می دهد .مقدار خوردگی به میزان هیدروژن محیط بستگی دارد.

۵-۱-۳- سولفور : سولفور بدلیل قابلیت انحلال پایین در آب، خوردگی زیادی در این مورد بوجود نمی آورد.

۶-۱-۳- مرکاپتان : این ماده بودار، به مقدار کم در آب حل می شود و باعث خوردگی زیاد نخواهد شد.

۴- بروز خوردگی :

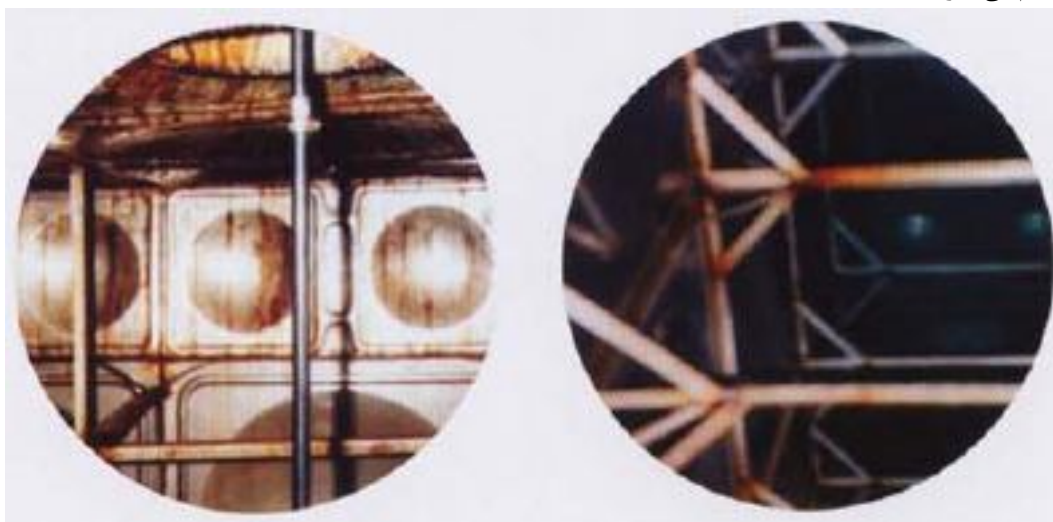
خوردگی در علم مهندسی یکی از مهمترین مسائلی می باشد که علاوه بر پدید آوردن مشکلات اقتصادی، زیست محیطی، فنی، ایمنی و ... بخش قابل ملاحظه ای از تحقیقات و پژوهش های صنعتی را به خود اختصاص داده است . افزایش قیمت انرژی، نیروی انسانی، فشارها و دماهای بالا و محیط های خورنده تر و پیچیده تر در فرآیندهای صنعتی باعث می شوند که زیان های اقتصادی ناشی از خوردگی در سالهای آتی بطور تصاعدی افزایش یابند . اهمیت خوردگی در صنایع هنگامی فزونی پیدا می کند که اثرات سوء آن بطور مستقیم امنیت کاربران را تهدید کند . در تاسیسات خدماتی نظیر خطوط انتقال و مخازن آب ، خوردگی باعث کاهش عمر بهره برداری و صرف هزینه های سنگین نگهداری می شود.

۴-۱- خوردگی شیاری (Crevice Corrosion):

شایعترین نوع خوردگی در مخازن آب خوردگی شیاری است. این حالت در شیارها و نواحی روی سطح مخزن که محلول های خورنده در این قسمت ها ساکن شده اند رخ می دهد . خوردگی شیاری در محل تماس لاستیک و فلز شروع شده و پیشروی می کند . در تسمه های نگهدارنده مخزن نبایستی در زیر تسمه ها و اشتر بکارگیری شود تا از گیر افتادگی مایعات در زیر آن جلوگیری شود.

۴-۲- حفره دار شدن (Pitting):

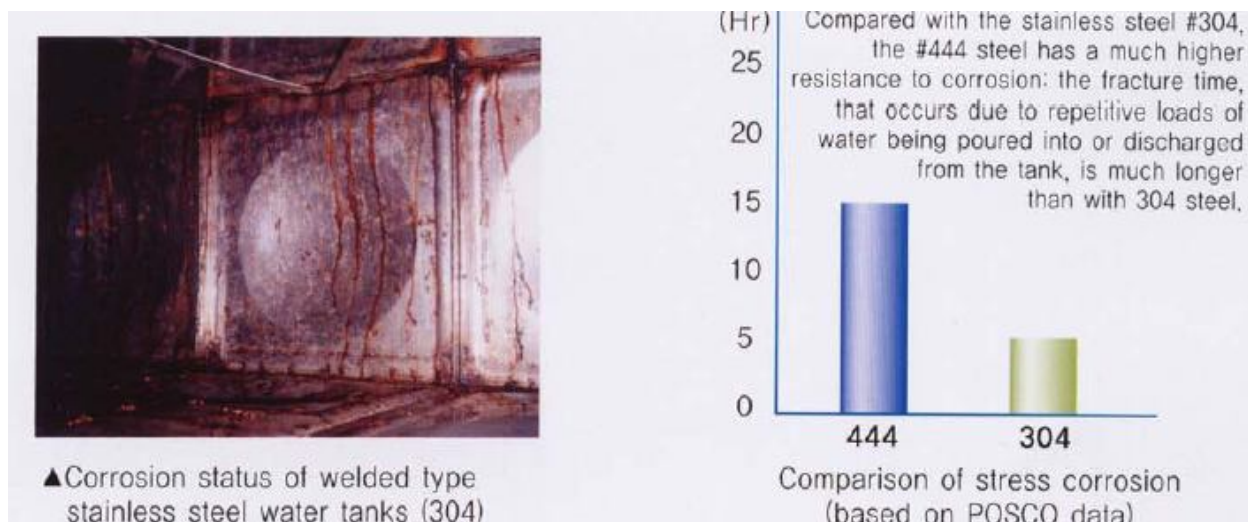
در خوردگی حفره ای سطح کوچکی از فلز در اثر عیوب خاصی مانند نقص در پوشش دهی در مجاورت محیط خورنده قرار می گیرد و با شدت زیادی خورده می شود . این نوع خوردگی شدیداً موضعی و متمرکز است که باعث سوراخ شدن فلز یا کامپوزیت می شود. حفره ها معمولاً در جهت نیروی جاذبه رشد می کنند . حفره دار شدن در اثر یک واکنش آندی اتوکاتالیتیکی می باشد. مخازن مورد استفاده بایستی از عوامل خورنده محافظت گردند که این عمل با پوشش مناسب (کاورینگ رزین یا زئولیت های دو لایه مرکب همراه با سیمنت دریایی) انجام می گیرد.



شکل ۲ - بروز خوردگی شدید در مخازن ذخیره آب

۴-۳- خوردگی بین دانه ای (Intergranular Corrosion):

مرزدانه ها نواحی پر انرژی بوده و از نظر شیمیائی فعال تر می باشند . بدین علت مو قعیکه سطح یک فلز یا مواد سازند مصالح مرکب در معرض یک ماده خورنده قرار می گیرد، مرز دانه ها اندکی سریعتر از سطح دانه ها خورده می شوند. همانطور که می دانیم آلیاژها به دو حالت همگن و ناهمگن وجود دارند آلیاژهای همگن در برابر خوردگی مقاوم ترند زیرا در این نوع آلیاژها حالت گالوانیکی وجود ندارد . بنابراین برای تشکیل یک آلیاژ همگن در ساخت مخازن باید عناصر تشکیل دهنده این محلول جامد کنترل گردد . با توجه به ترکیب شیمیائی فولادهای فوق بعنوان مواد مصرفی جهت ساخت مخازن به تشریح در این مکانیزم مقاومت در برابر خوردگی در این نوع فولادهای آلیاژی می پردازیم . کرم (Cr) به عنوان فلز پایه بازی برای محافظت از آهن نقش قربانی را در خوردگی ایفا می کند. به این ترتیب که در اثر هجوم اکسیژن به سطح فلز مورد نظر مقدار زیادی اکسید آهن ایجاد می شود اما به علت میل ترکیبی بیشتر کرم با اکسیژن، میزان کم اکسید کرم جایگزین آهن شده و لایه چسبنده کرم در سطح، لایه مقاومی ایجاد می نماید و کرم در برابر نفوذ اکسیژن در سطح ترکیب اکسید آهن سدی ایجاد می نماید. و به این صورت از فلز محافظت می کند.



شکل - ۳ بروز خوردگی شدید در تانک استیل سیار ذخیره آب

۴-۴ خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی (Galvanic or two metal Corrosion):

اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو فلز غیر همجنس که در تماس با یکدیگر می باشند سبب برقراری جریان الکترون بین آنها شده و عامل ایجاد خوردگی گالوانیکی می گردد . در این خوردگی اثرات محیطی مانند دما، رطوبت و اثر سطح، نسبت سطح آند و کاتد نقش مهمی در سرعت خوردگی دارند. با محافظت بدنه فولادی مخازن فلزی در تماس مستقیم با آلومینیوم کمتر دچار خوردگی شده و عمر مخازن افزایش می یابد این ترفند در مخازن بتنی نیز قابل استفاده است باید به این نکته توجه داشت که در هنگام انتخاب قطعات و اتصالات سیستم آب به نوع جنس مورد استفاده دقت نمود. در اتصالات سعی شود بجای واشر و متعلقات فلزی از مواد ترکیبی، پلاستیکی و پلی اتیلن استفاده شود تا خوردگی در مخازن کاهش یابد.



شکل - ۴ تخریب موضعی بدنه داخلی در اثر خوردگی مخزن

۴-۵ خوردگی توام با تنش درجه حرارت (Stress Corrosion) SCC:

نتیجه اعمال همزمان تنش های کششی ، ترکیب شیمیائی محلول، SCC محیط خورنده روی فلز می باشد . فاکتورهای مهم در ترکیب شیمیائی فلز یا کامپوزیت مورد استفاده در مخزن، تنش و ساختمان فلز می باشد. یک مثال از این تنش ها می توانند باعث ایجاد فشردگی در یک نقطه و عدم فشردگی در نقطه دیگر شوند این عمل سبب تشکیل یک پیل می گردد و در آن نقاط دارای فشردگی کم به عنوان آند مساعد جهت خوردگی توسط محیط می شوند حال آنکه نقاط دارای فشردگی اتمی به عنوان کاتد محافظت در نتیجه باران های اسیدی نمی تواند ایجاد شود چرا که این اسیدها قدرت کافی جهت فرایند SCC را ندارند.

۴-۶ راه حل:

مخازنی که با الیاف شیشه پوشانده شده اند نبایستی در تماس با اسید باشند . باتری ها نبایستی نزدیک مخازن قرار داده شوند . این باتری ها براحتی می توانند کج شده و اسید سولفوریک از آنها ریزش کند . در ضمن باتری ها بخار اسید سولفوریک ساطع می نمایند که بر روی مخازن می نشیند . مطمئن شوید که باتری وسیله نقلیه در فاصله مطمئن از مخازن کامپوزیت پوشیده شده با الیاف شیشه قرار دارند.

۵- مخازن پیش ساخته آب و کاربردهای آن

با توجه به محدودیتهای ذاتی آب در کشور ، عدم توازن بارندگی ، پدیده های طبیعی خشکسالی ، کاهش کیفیت منابع آب موجود ، روند افزایش جمعیت و مصرف ، رشد صنایع و بخش وسیع کشاورزی ، که سهم عظیمی از آبهای با کیفیت را به خود اختصاص داده اند ، نیاز به برنامه ریزی و مدیریت اصولی در کاهش تبعات و اثرات آن و توجه به موضوع ذخیره سازی صحیح آب دارد .



شکل - ۵ حفاظت در برابر خوردگی با انتخاب مصالح مناسب

۵-۱- قابلیت های مخازن پیش ساخته آب

مخازن پیش ساخته نسبت به مخازن درجا مزایا و توانمندیای متفاوتی دارند.

- می توان آنها را متفاوت با نوع ماده در برابر خوردگی مقاوم نمود.

- در برابر اثرات محیطی قابل مقاوم می باشند.

- مخازن پیش ساخته آب کاملاً پیچ و مهره ای بوده و براحتی مونتاژ ، دیمونتاژ و جابجا می شوند.

- دارای طراحی دقیق از لحاظ شکل و استحکام مکانیکی بوده، تحت استاندارد ISO می باشند.

- در ابعاد و حجمهای مختلف از ۲۵ الی ۱۷۷۵ متر مکعب ارائه شده و با حداقل نفرات و در زمانی کوتاه در محل مورد نظر و براحتی نصب می گردند.

- جلوگیری از تبخیر آب به میزان ۹۰ الی ۹۵ درصد و جلوگیری از رویش جلبک ، بعلت وجود پوششهای شناور داخل مخازن (Airfloat floating sheets) و یا پوششهای روی مخزن (Genaroof or Airtop siloroof) که علاوه بر آن ، مانع ورود

گرد و غبار حاصل از باد و حشرات به داخل مخزن می گردد.

- دارای استحکام کششی فوق العاده ای هستند.

- مقاومت بالائی در برابر تغییر طول ناشی از حرارت دارند.

- در برابر بادهای شدید مقاوم می باشند.

- در برابر هوادهی مصنوعی در پروژه های تصفیه فاضلاب و پرورش ماهی و میگو مقاومت کافی دارند.

- استفاده از حداقل فضای ممکن جهت ذخیره آب در حجم های متفاوت ، حتی داخل سالن های سر پوشیده.

- کمیت و کیفیت آب در این مخازن بطور روزانه و براحتی قابل اندازه گیری و کنترل می باشد.

- جهت ذخیره آب در مناطق با درجه فرسایش بالا ورقه های تانکر در هر دو طرف توسط کوتینگ شده اند ، لذا در مقابل فرسایش حتی در مناطق شوره زار تا ۳۰ سال مقاومند.

- انواع مختلفی از پوششهای Aquatex با توجه به شرایط آب وهوایی از مناطق سردسیر تا گرمسیر با درجه UV بالا و برای مصارف گوناگون کشاورزی و باغبانی و صنعتی و ... بطور تخصصی پیش بینی شده است.



شکل ۶- مخازن سطحی قابل پیاده سازی سریع و مقاوم در برابر خوردگی و بعضی عوامل محیطی

۲-۵- کاربرد مخازن پیش ساخته آب

- مناسب برای ذخیره آب آشامیدنی در نقاط مختلف کشور ، تحت استاندارد بین المللی ISO ۹۰۰۱ , ATA , KIWA .
- مناسب برای ذخیره سیالات مختلف صنعتی با ایمنی کامل جهت جلوگیری از نشت روغن یا سوخت و یا مواد شیمیایی به محیط بیرون از مخزن و حفاظت از محیط زیست.
- مناسب برای پرورش صنعتی ماهی و میگو در توسعه طرحها.
- مناسب برای ذخیره آب باران و سایر آب ها جهت استفاده در کشاورزی و باغبانی و آبخیزداری در نقاط مختلف کشور.
- مناسب برای ذخیره آب ، در پارکها و زمینهای ورزشی و میدانی شهری.
- مناسب جهت ذخیره موقت نفت.
- گروه های مصرف : ساختمانی ، صنعت ، محیط و ...

۳-۵- معایب مخازن بتنی نسبت به مخازن پیش ساخته آب

- ۱ - مخازن بتنی نسبت به مخازن پیش ساخته گالوانیزه بسیار گرانترند.
- ۲ - نصب مخازن بتنی به زمان بیشتری نیاز دارد و بعد از ساخت نیز بلافاصله قابل استفاده نیستند چرا که بتون باید سفت شود، در صورتی که مخازن پیش ساخته آب اینطور نیستند.
- ۳ - مخازن پیش ساخته آب، قابل دمونتاز شدن و جابجایی هستند اما مخازن بتونی اینگونه نیستند بنابراین مخازن گالوانیزه انعطاف پذیرند.
- ۴ - مخازن بتنی به فونداسیون سنگین تری در مقایسه با مخازن گالوانیزه نیاز دارند.
- ۵ - بعلت وجود سولفید هیدروژن در آبهای فاضلاب شهری و روستایی که موجب خرده شدن بتن می گردد، استفاده از مخازن بتنی در این خصوص ، به هیچ وجه مناسب نیست.
- ۶ - ترکیدگی بتون بخصوص در زمستان در سازه بتنی مخازن ذخیره ، تصفیه خانه های فاضلاب ، خطوط انتقال و شبکه های توزیع آب ، بسیار حائز اهمیت است.
- ۷ - مخازن بتنی بر خلاف مخازن پیش ساخته فلزی آب دارای محدودیتهای زمانی (فصلی) و مکانی در ساخت و نصب می باشند.
- ۸ - اگر چه بتن یک ماده محبوب و پر استفاده در مصالح ساختمانی است ، اما دارای نقطه ضعف هایی همانند مقاومت کششی و شکل پذیری پایین ، جذب کم انرژی ، انقباض و جمع شدگی بتن و در پی آن ترک خوردگی ناشی از آن و در نهایت ، ترکهای ناشی از عمل آوری نامناسب و سخت شدگی بتن می باشد.

۶- نتیجه گیری:

یکی از بحث انگیزترین مسائلی که در بررسی مخازن مورد توجه است انواع خوردگی و روشهای مقابله با آن است. در این مقاله پس از بررسی انواع خوردگی برای جلوگیری از این پدیده نامطلوب مباحثی مخازنی که با الیاف شیشه پوشانده شده اند در مجاورت مواد و ترکیبات اسیدی نباشند.

آزمایش های مختلفی مانند آزمایش در محیط اسیدی، آزمایش مخزن تحت شرایط آب شور بر تدوین شده اند ولی اکثر آنها توسط استانداردهای معتبر دیگری ISO مبنای استاندارد ۱۱۴۳۹ نیز ارائه شده اند . با بررسی آزمایش ها ملاحظه می گردد که مخازن پیش ساخته بایستی شرایط ویژه ای را در مقایسه با مخازن تحت فشار معمولی سپری نمایند.

۷-مراجع:

۱- بررسی انواع خوردگی و علل آن در مخازن نگهداری آب و فاضلاب، علی مومنی ، مجید لطفی حقیقت، شرکت توسعه منابع آب ، ۱۳۸۵

۲-آنالیز آب و هزینه های نگهداری، شرکت مهندسی آبفا کشور ، آبان ماه ۱۳۸۰

۳-علی مومنی، ناصر معالی و علی صالح زاده "گزارش جامع در زمینه مخازن آب" آرشیو معاونت اجرائی شرکت توسعه منابع آب، آذر ماه ۱۳۸۰

۴- میسمی. ح. ، نیکجو. ع. ، راهکارهای بهسازی خوردگی مخازن، دانشگاه شهید عباسپور -۱۳۸۴

5-ISO/FDIS 11439, "Gas Cylinder-High Pressure Cylinder for the On-Board Storage of Natural Gas as a Fuel for Automotive Vehicles", 1999.

6 Cylinder Care & Maintenance Handbook. Document Number : GRI- 97/0250 water Chapter

7- HOOP Wrapped Cylinders Production Testing Certificate.(testreport Faber)

8-AWWA. Handbook Of Water Storage.2003, April. VOL.I

خوردگی و راهکارهای بهسازی اثرات آن در مجاری مدفون

حسین میسمی - سعیده سعیدی

خوردگی

۱-۱ مقدمه

با افزایش جمعیت و رشد شهرها محیط زیست انسانها و سایر موجودات در خطر آلودگی های ناشی از فعالیتهای انسانی می گردد از طرفی حفظ منابع طبیعی و کوشش در احیاء آنها برای نسل های بعدی از برنامه های بسیاری از کشورهای است و بدین منظور سازمانهای گوناگون در جهت منظور فعالیت می کنند و در کنار تحقیقات و بررسی راه کارها با اعمال قانون و قواعدی در جهت تحقیق این امر می کوشند .

تولید فاضلاب توسط انسانها یکی از مواردی که در صورت عدم دفع مناسب آن می تواند خطرات جدی را برای محیط زیست موجودات و از جمله خود انسانها فراهم کند و از طرفی در صورت دفع مناسب آن می توان از آن بعنوان یک سرمایه یاد کرد .

سیستم دفع فاضلاب در شهرها با توجه به بافت سیستم شهری و وجود تاسیسات مختلف در خیابانهای اصلی و مخصوصا عدم رعایت اصول شهر سازی در شهرهای بزرگ باعث بالا رفتن هزینه های اجرا و مشکلات خاص خود در حین اجرا می گردد .بنابراین استفاده از مواد مناسب جهت بالا رفتن عمر تاسیسات از مسائل و قابل توجه سرمایه گذاران این گونه طرح هاست .

لوله بعنوان اصلی ترین و هزینه بر ترین جز یک شبکه انتقال و توزیع آب و شبکه جمع آوری و انتقال فاضلاب در ساخت ، حمل و اجرا مطرح می باشد .استفاده از لوله های مناسب از نظر مشخصات فنی و رعایت اصول فنی در ساخت مورد توجه خاص سرمایه گذاران این بخشها می باشد . لازمه تحقق این امر بررسی و شناخت کامل از عوامل مخرب لوله می باشد .

تحقیق و بررسی نوع آب یا پسابی که قرار است در لوله جریان یابد و مشخصات شیمیای و فیزیکی خاک اطراف لوله و سایر عوامل تماسی از جمله راهکارها جهت تولید و ساخت لوله مناسب می باشد خوردگی در لوله ها بر اثر عوامل فیزیکی و شیمیای از مشکلات بزرگ در تخریب و کاهش عمر مفید لوله هاست .

۲-۱ ضرورت جلوگیری از خوردگی و بهسازی نقاط آسیب دیده

همانطور که بیان شد بالا بودن هزینه های اجرای شبکه های آب و فاضلاب و مشکلات اجرای با توجه به بافت نامناسب و غیر اصولی شهر سازی از مسائلی است که ما را در تهیه و ساخت لوله های پر دوام و مناسب محدود می سازد .

از طرفی بالا بودن هزینه های بهره داری و تعمیرات از مسائلی است که کاهش آن فوق العاده قابل توجه سرمایه گذاران این بخش می باشد . با توجه به حفظ منابع زیر زمینی و حفاظت از سلامت محیط زیست جهت جلوگیری از نفوذ آلودگی حاصل از فاضلابها در آبهای زیر زمینی استفاده از لوله که عامل انتقال پساب می باشد قابل توجه می باشد .

عوامل زیادی در تخریب لوله ها وجود دارد که از آن جمله خوردگی و در این زمینه خوردگی میکروبی از عوامل مهم میباشد . استفاده از ترکیبات مناسب در جنس لوله ها و استفاده از لوله های مناسب جهت نوع ماده عبوری با توجه به نوع ترکیبات موجود در آن کاهش قابل توجهی در میزان خسارت های بعدی دارد .

اکثر شبکه های آب و فاضلاب در زمین مدفون می باشند ، بنابراین لوله باید در برابر فشارها و بارهای خارجی مقاوم باشد از طرفی در خطوط تحت فشار گاه تا مین مقاومت داخلی لوله ها بر مقاومت خارجی غلبه می نماید . و از طرف دیگر تنها جداره داخل و بیرون لوله در تماس مواد خارجی قرار دارد ، بنابراین منطقی بنظر میرسد که مقاومت لوله در برابر عوامل فیزیکی توسط مواد مناسب محافظت و برای جلوگیری از تخریب های ناشی از عوامل شیمیایی داخل و خارج لوله را توسط تمهیداتی مقاوم نمود . بالا بودن فوق العاده هزینه های ترکیبات مناسب جهت حفاظت لوله ها در برابر عوامل محیطی داخل و خارج لوله موکد مطلب بالاست . بنابر این استفاده از پوششهای مناسب با توجه به نوع ترکیبات آب یا فاضلاب عبوری از لوله در هر نوع لوله ای در کنار تامین مقاومت در برابر بارها و فشارهای وارده بر لوله از راهکار های دیگری در جهت تولید لوله هاست .

در این جا بررسی انواع لوله ها و مقایسه آنها ، بررسی انواع پوششهای رایج و مقایسه فنی و اقتصادی آنها ، بررسی انواع خوردگی و ارایه راه حل جهت کنترل خوردگی میکروبی مدد نظر می باشد.

۳-۱ شرایط ایجاد خوردگی:

بطور کلی خوردگی یک پدیده الکتروشیمیایی میباشد که در آن تحت شرایط غوطه ور بودن فلز، فلز اکسید شده و به درون محلول منتقل می شود. واکنش آندی و واکنش کاتدی متعادل کننده آن احیای همزمان برخی ترکیبات در محیط خورنده میباشد. یونهای فلزی در محلول ممکن است متعاقباً بصورت محصولات نامحلول رسوب یابند. این محصولات ممکن است شل یا توده ای باشند (Bulky) و یا ممکن است بطور محکم به سطح فلز متصل شوند و این امر ممکن است برای فلز خواص محافظت کننده نسبت به خوردگی داشته باشد و یا نداشته باشد. خوردگی زیست (Biocorrosion)، خوردگی میکروبی (Microbial corrosion)، خوردگی تاثیرپذیر از عوامل میکروبیولوژیک (MIC= Microbially Influenced Corrosion) می تواند بعنوان فرایندی الکتروشیمیایی تعریف شود که در آن میکروارگانیسمها قادر به شروع، تسهیل یا تشویق واکنش خوردگی بدون تغییر در طبیعت الکتروشیمیایی آن میباشند.

از موارد بسیار مهم در پدیده خوردگی خصوصیات فرآورده های حاصل از آن و پایداری فرآورده های نهایی این فرایند میباشد. اگر هر کدام از این فرآورده ها در آب محلول باشند، خوردگی سریع خواهد شد. با این وجود در بعضی از موارد هنگامیکه فرآورده های خوردگی نامحلول باشند، تشکیل یک رسوب محافظ را در سطح آب می دهند و پس از آن خوردگی بسیار آهسته انجام می شود. فرآورده های نامحلول خوردگی فقط هنگامی نقش محافظت کننده دارند که تشکیل یک لایه غیر قابل نفوذ را بدهند.

وجود ترکیبات خورنده در خاک نیز باعث از بین رفتن و تخریب لوله های آب و فاضلاب می شود ، میزان خوردگی بستگی به میزان ترکیبات مواد خورنده در خاک دارد .

نیاز به تاسیسات شهری و از جمله شبکه های آب و فاضلاب امری اجتناب ناپذیر بوده و با توجه به مسائل مطرح شده از لحاظ هزینه و اجرا و مسائل زیست محیطی استفاده از مصالحی پردوام و کارا مد نظر سرمایه گذاران و طراحان است .

۴-۱-۱ ابعاد بررسی خوردگی

توجه به پدیده خوردگی و بررسی مشکلات و ارزیابی خسارات ناشی از آن دارای سه بعد اصلی ، اقتصادی ، محیط زیست و ایمنی ، کاهش ضایعات می باشد.

۱-۴-۱ **بعد اقتصادی :** مهمترین و حساسترین بخش خوردگی و اساسی‌ترین وظیفه مهندسین خوردگی در نظر گرفتن جنبه‌های مالی و اقتصادی این موضوع بوده و در ضمن اتخاذ بهترین تصمیمات مستلزم در اختیار داشتن اطلاعات بسیار وسیع است. در واقع هدف اصلی کاهش هر چه بیشتر اتلاف معادنی است که مورد حملات خوردگی قرار می‌گیرد. که از آن جمله میتوان به خوردگی شبکه‌های لوله‌کشی، مخازن، قطعات ماشین‌آلات، کشتیها، پلها و ... اشاره کرد.

۱-۴-۱-۱ **هزینه خوردگی در کشورهای خارجی :** خسارات مالی ناشی از خوردگی در آمریکا در سال ۱۹۴۹ حدود ۵/۵ میلیارد دلار، در سال ۱۹۶۶ حدود ۱۰ میلیارد دلار برآورده شده است و در آخرین گزارش که در سال ۱۹۸۹ در آمریکا و توسط (انستیتوی ملی علوم و تکنولوژی) تهیه شده است، هزینه‌های ناشی از خوردگی در هر سال را حدود ۲۰۰ میلیارد دلار نشان می‌دهد. در انگلستان خسارات خوردگی در سال ۱۹۷۲ را ۱/۳۶۵ میلیون پوند گزارش نموده‌اند. در کانادا مقدار کل هزینه‌های خوردگی در سال ۱۹۷۹ حدود ۱۰ میلیارد دلار برآورده شده است [۲].

به طور کلی با توجه به آمار و ارقام ارائه شده و بررسیهای انجام شده در کشورهای مختلف نتیجه‌گیری می‌شود که هزینه‌ها و خسارات ناشی از خوردگی در حدود ۴-۲ درصد تولید ناخالص ملی است. با این وصف و با توجه به اینکه تولید ناخالص ملی ایران در سال ۱۳۶۶ حدود ۳۵۰۰ میلیارد ریال بوده است، کل هزینه‌های خوردگی در ایران حدود ۱۴۰ میلیارد ریال در سال خواهد بود. جدول شماره (۱-۱) نمونه‌هایی از برآورد هزینه‌ها و خسارات حاصل از خوردگی در چند کشور را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۱) برآورد خسارات خوردگی در چند کشور [۲].

کشور	سال	زیان مالی (میلیارد ریال)	ملاحظات
آمریکا	۱۹۴۹	۵/۵	فقط زیانهای مستقیم
آمریکا	۱۹۶۶	۱۰	فقط زیانهای مستقیم
آمریکا	۱۹۶۷	۸	فقط زیانهای مستقیم
انگلستان	۱۹۷۲	۱/۳۶۵	-
آمریکا	۱۹۷۹	۸۲	-
آمریکا	۱۹۷۹	70 ± 21	۰/۰۱۵ قابل اجتناب
کانادا	۱۹۷۹	۱۰	۲ میلیارد دلار قابل اجتناب
آمریکا	۱۹۸۸	$200 \pm 30\%$	-
ایران	۱۳۶۶	140	۲۱ میلیارد دلار قابل اجتناب

زیانهای اقتصادی حاصل از خوردگی در دو بخش زیانهای مستقیم و غیرمستقیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. زیانهای مستقیم شامل زیانهای مربوط به تعویض قطعات، دستگاهها و ماشین‌آلات یا اجزاء آن، تاسیسات و واحدهای عملیاتی و ساختمانها و همچنین هزینه‌های مربوط به نیروی انسانی لازم و هزینه‌های اعمال روشهای کنترل و حفاظتی می‌باشد. تعویض مخازن آب گرم به علت پوسیدگی، تعویض لوله‌های فلزی انتقال آب و گاز و نفت، استفاده از مواد بازدارنده و پوششها از جمله این هزینه‌هاست.

زیانهای غیرمستقیم به مراتب مشکلتر از زیانهای مستقیم قابل ارزیابی است و شامل خسارات و زیانهایی است که در اثر صدمات و زیانهای مستقیم وارد می‌گردد. این خسارات شامل موارد زیر است:

- از کار بازماندن دستگاهها و واحدهای عملیاتی، به علت نیاز به تعویض و نوسازی قطعات و تعمیر آنهاست.
- اتلاف محصولات که عمدتاً در مخازن یا لوله‌های انتقال نفت و گاز و آب بوده و موجب ضایعات نفت و آب و یا مواد شیمیایی دیگر می‌گردد.
- کاهش راندمان شامل گرفتگی لوله‌ها به علت رسوبات خوردگی، کاهش انتقال حرارتی در دیگهای بخار

- آلودگی محصولات نظیر خوردگی لوله های سربی و آلوده شدن آب و یا آلودگی محصولات غذایی و شیمیایی توسط محصولات خوردگی نظیر زنگ زدن آهن و غیره.

- تغییر در کیفیت ظاهری که موجب عدم مرغوبیت محصولات و تولیدات صنعتی و تزئینی می گردد.

- مخارج تعمیرات و نگهداری شامل رنگ کردن اتومبیلها، دستگاهها و وسائل خانگی در مورد اثرات ایمنی و بهداشتی خوردگی، که گاهی موجب صدمات و لطمات جبران ناپذیری می شود، می توان انفجار دیگهای بخار، تخریب قطعات وسایل تخلیه مانند کشتی و هواپیما که برای مسافرین خطر آفرین است، را اشاره نمود.

آلودگی محصولات و محیط زیست که علاوه بر زیانهای اقتصادی، مخاطرات زیادی برای سلامتی انسانها می تواند داشته باشد، آلودگی آب در اثر خوردگی لوله ها بخصوص لوله های سربی، انتشار مواد سمی و آلاینده های شیمیایی در محیط در اثر خوردگی مخازن و کشتیهای حامل این مواد و غیره، نمونه هایی از این اثرات است.

۱-۲-۴- هزینه های خوردگی در ایران: زیانهای اقتصادی و محیطی که هر روز دامنه آن گسترش می یابد می بایستی در جایگاه صنعتی ایران که در حال رشد و شکوفایی است مورد بحث و بررسی قرار گیرد. زمانی اهمیت انجام این بررسی مشخص خواهد گردید که آماری جامع از حجم زیانهای خوردگی وارد شده به صنایع را داشته باشیم. هم اکنون وجود نداشتن آماری از هزینه های خوردگی سالیانه در ایران از یکسو و عدم استفاده از تکنولوژیهای روز در کنترل خوردگی از سوی دیگر موجب اتلاف درصد بالایی از درآمد ملی کشور گردیده است. بطوریکه یک برنامه ریزی دقیق هزینه های مستقیم و غیرمستقیم خوردگی را از هر نظر ضروری می نماید.

اصولی ترین روش در کنترل خوردگی آشنایی میزان صنایع با پدیده خوردگی و آگاهی از جمله مبالغ پرداختی در این رابطه بصورت کمی است که میتواند مقدمه ای در جهت استفاده از تکنولوژیهای مدرن در کنترل خوردگی باشد. اقدامات مربوط به تعیین خسارات سالیانه خوردگی در کشورهای صنعتی که بر اساس درصدی از درآمدهای ناخالص ملی در نظر گرفته می شود از سوی سازمانهای رسمی تهیه و انتشار می یابد. این آمار مبنای توجه صاحبان صنایع در اثر کنترل خوردگی و بکارگیری آن در صنایع است. تقریباً تمامی صنایع و تاسیسات کشور در پروژه های نصب، راه اندازی و تعمیرات دوره ای با اینکه خوردگی را بصورت ملموس مشاهده نموده و با آن دست به گریبان هستند ولی متأسفانه هیچگونه برآورد هزینه ای در این رابطه نداشته و غالباً در این زمینه فاقد مستندات و محاسبات میباشد.

هزینه های خسارات خوردگی معمولاً بین ۱ الی ۵ درصد از مجموع تولید ناخالص ملی است که این درصد برای کشورهای صنعتی پیشرفته بین ۳ الی ۴ درصد (کمترین) و در کشورهای جهان سوم حدود ۴ تا ۵ درصد (بیشترین) را شامل میشود. لازم به ذکر است که با استفاده از تکنولوژیهای مدرن کنترل خوردگی میتوان بین ۱۷ الی ۲۵ درصد از خسارات خوردگی را کاهش داد. متأسفانه تاکنون موفق به تعیین رقمی تحت عنوان خسارت خوردگی سالیانه در ایران نشدیم و آماری که بتوان به آن استناد نمود یافت نمی گردد. حتی این آمار را در صنایع مادری نظیر نفت که قدمتی صدساله دارد نمی توان یافت. در یک بررسی ساده و براساس تولید ناخالص ملی زیان وارده از طریق خوردگی مستقیم به صنایع ایران در سال ۱۳۷۹ معادل ۲۷۵۰ میلیارد تومان براساس ۵ درصد از تولید ناخالص ملی بوده است که واقعاً رقمی نجومی برای کشورهای نظیر ایران میباشد [۱].

جدول (۱-۲) گزیده ای از حوادث زیست محیطی و ایمنی بدلیل خوردگی

محل	حادثه	دلیل احتمالی	نتایج
امریکا	غرق کشتی River queen	خوردگی حفره ای در ته کشتی	انهدام کشتی
حوزه نفتی دریای شمال	انهدام سکوهای نفتی	خوردگی تنشی	خسارات هنگفت مالی و جانی
فلکس پرو	انفجار راکتور دارای بدنه فولادی به ضخامت ۱۲/۳ میلیمتر با پوشش فولاد ضدزنگ به ضخامت ۳ میلیمتر	خوردگی تنشی	کشته و مجروح شدن تعداد کثیری و وارد آمدن خسارات هنگفت مالی
سوئیس	فروریختن سقف ۲۰۰ تنی بتنی سالن یک استخر سرپوشیده	خوردگی در میله های ساخته شده از فولاد ضدزنگ نگهدارنده سقف در اثر وجود یون کلر در فضای سالن	کشته شدن ۱۲ نفر و مجروح شدن تعداد زیادی

مکزیک	انفجار و آتش سوزی	نشت نفت از یک فولاد روی یک مخزن ذخیره با گنجایش ۱۳۰۰ مترمکعب	چهار نفر کشته و ۱۶ نفر مجروح، یک منطقه ۱۰ هزار نفری تخلیه گردیده و ۹۵۰ نفر آماده در چادرهای موقت جای داده شدند. دو روز طول کشید تا آتش سوزی کنترل شود.
کانادا	آلودگی محیط زیستی	نشت ۳۵ هزار لیتر نفت از خط لوله معیوب متعلق به شرکت Mibil oil	نشت این مقدار نفت در عرض یک شب باعث آلودگی بسیار زیاد زیست محیطی در منطقه گردید.
روسیه	آلودگی زیست محیطی	نشت ۱۲۰۰ تن نفت از یک خط لوله معیوب	در حدود ۴۰۰ تن از این نفت به رود ولگا وارد شد. به منظور جلوگیری از پیشرفت آلودگی یک سد اضطراری بر روی رودخانه احداث گردید.

۲-۴-۱ بعد زیست محیطی و ایمنی: زیانهای ایمنی و زیست محیطی از موارد بسیار مهمی است که چندان مورد توجه قرار نگرفته است و اثرات و نتایج واکنشهای خوردگی در بسیاری از موارد منجر به زیانهای مالی و جانی غیرقابل جبران یا تأسف باری می شود. لذا مراعات نکات ایمنی بطور دقیق مخصوصاً در موارد حساس از قبیل ظروف تحت فشار، ظروف و دستگاههای حاوی مواد شیمیایی یا سمی و رادیواکتیو، قطعات هواپیما، پلها و ... بسیار ضروری و حیاتی می باشند. در جدول (۱-۲) برخی از خسارات ایمنی و زیست محیطی وارد آمده بر اثر خوردگی ارائه شده است [۱].

۳-۴-۱ بعد کاهش ضایعات: ذخائر و منابع جهانی فلزات و نیز تولیدات آنها محدود است. لذا با توجه به رشد سریع صنایع، روند دائمی کاهش ذخائر و افزایش استخراج، سبب بالا رفتن سریع قیمتها از بین رفتن منابع و ذخائر طبیعی می گردد که از مسائل بسیار جدی در آینده خواهد بود. همچنین در نظر گرفتن ضایعات مربوط به انرژی و نیز ضایعات مربوط به نیروی انسانی از اهمیت زیادی برخوردار است بطوریکه از وظایف عمده مهندسين خوردگی کاهش هر چه بیشتر این قبیل ضایعات می باشد. [۳].

فصل دوم: مبانی خوردگی

۱-۲-۲ مبانی خوردگی

۱-۱-۲ سابقه خوردگی

در فصل گذشته به جوانب مختلف خوردگی پرداختیم در ادامه به مطالعات انجام شده در این زمینه می پردازیم. اولین اجلاس بین المللی در زمینه خوردگی در شبکه جمع آوری فاضلاب با گاز سولفید هیدروژن توسط انستیتو کنترل آلودگی آب در مونیخ آلمان برگزار شد. در این جلسه خسارات ناشی از این گاز در فاضلابروهای نواحی شمالی و مرکزی اروپا مورد بررسی قرار گرفت. در بخش نخست این پژوهش آسیب های ناشی از گاز سولفید هیدروژن در طول تقریبی ۱۱ کیلومتر از فاضلابروها با قطر بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ میلیمتر مورد بررسی قرار گرفت. طول عمر این فاضلابروها حدود ۲ تا ۱۰ بوده و خوردگی در آنها در چهار گروه مختلف دسته بندی شده است [۳].

در آفریقای جنوبی لوله های فاضلاب بتنی و آریست سیمان پس از هشت سال فرو ریخته اند، در خاورمیانه پس از ۶ سال شبکه جمع آوری فاضلاب آسیب دیده و در هامبورگ آلمان به علت خوردگی پس از ۱۷ سال شبکه فاضلاب بازسازی شد. طی بررسی های انجام شده مشخص گردید، برای شبکه های فاضلابرو با طول زیاد خسارات ناشی از خوردگی، شدیدتر است بطوریکه لوله ها در اثر خوردگی حالت فرسوده ای به خود گرفته بودند [۳]. جان شفر و فیلدهابس در سال ۱۹۷۳ اثر پراکسید هیدروژن و کلر را بر روی کنترل خوردگی و بو، در مقیاس آزمایشگاهی و عملی اندازه گیری نمودند و مشخص گردید استفاده از پراکسید هیدروژن در مقایسه با کلر اقتصادی تر می باشد [۳۰]. در سال ۱۹۸۸ نلسن و ژاکوبسن تاثیر غلظت سولفات و مواد آلی را بر روی تشکیل سولفید هیدروژن بررسی نمودند [۳۱].

دانشمند معروف ایتالیایی به نام (میشل فاراده) در سالهای ۴۰-۱۸۳۰ رابطه بین فعالیتهای شیمیایی و جریانات الکتریکی را ارائه نمود. همچنین اعلام نمود که روئین شدن آهن ناشی از تشکیل فیلم بر روی آنست. البته فرد دیگری به نام (همفری داوی) قبل از او بررسیهایی روی اصول

خوردگی گالوانیکی داشته و نظریات و نتایج آزمایشات خود را درباره چگونگی حفاظت کاتدی در بدنه کشتیها در سال ۱۸۲۴ منتشر کرده است که اقدامات این دانشمند پایه علمی و اجرایی حفاظت کاتدی را ایجاد نموده است.

بررسی ها و مطالعات برنامه ریزی شده جهت بررسی مسائل خوردگی برای اولین بار توسط (انجمن ترویج علوم انگلستان) در سالهای دهه ۱۸۳۰ انجام یافته است و به این ترتیب از همین سالها، مطالعات و تحقیقات روی موضوع خوردگی و مسائل وابسته توسط افراد و موسسات علمی و تحقیقاتی شروع شده و ادامه یافته است. در سال ۱۹۰۶ کمیته ای در (انجمن امریکایی آزمایش و مواد) برای هماهنگی، اجرا و تدوین آزمایشات مخصوص خوردگی تشکیل گردید. در سال ۱۹۴۸ سازمانی بنام (انجمن ملی مهندسين خوردگی) در آمریکا تشکیل شد که هدف آن هماهنگی فعالیتهای سازمانها و انجمن های مختلف در ارتباط با خوردگی بوده است.

در حال حاضر تعداد زیادی از تشکیلات و سازمانهای علمی و مهندسی در آمریکا در مورد مسئله خوردگی تحقیقات و فعالیت دارند. همچنین طی سالهای اخیر مجلات مختلفی در چند کشور از جمله استرالیا، بلژیک، فرانسه و انگلستان چاپ می شوند که موضوع آنها صرفاً خوردگی و مسائل آن می باشد. البته تاکنون دانشمندان و محققان زیادی در کشورهای مختلف تحقیقات متعددی درباره خوردگی انجام داده و مقالات آنها منتشر گردیده است.

۲-۱-۲ تعاریف خوردگی: خوردگی واکنش پیچیده ای بین مواد و محیط اطراف آن است که به دلیل همین پیچیدگی و تنوع، تعاریف

متعددی برای این پدیده ارائه شده است که در اغلب آنها همه جوانب این پدیده مورد توجه نبوده و برای شرایط خاصی استفاده می شود. از جمله این تعاریف عبارتند از:

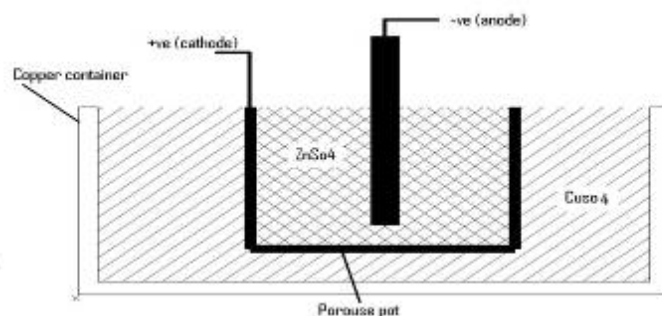
- واکنشهای بین فلزات و محیط اطراف آن
 - فساد یا انهدام مواد در واکنشهای شیمیایی یا الکتروشیمیایی با محیط اطراف
 - تخریب یا فساد حاصله از مواد به هر علتی بجز عوامل مکانیکی
 - حملات تخریبی بر روی فلزات ناشی از واکنشهای شیمیایی یا الکتروشیمیایی آن با محیط اطرافش
- برای بیان یک تعریف که جامع و کامل بوده و شامل همه انواع خوردگیها باشد، می توان گفت: خوردگی عبارتست از انهدام، فساد یا تغییر و دگرگونی در خواص و مشخصات مواد (عمدتاً فلزات) به علت واکنش آنها با محیط اطراف، در مورد انهدام و تخریبهای ناشی از عوامل صرفاً فیزیکی یا مکانیکی خوردگی نامیده نمی شود اگر چه در برخی حالات همزمان با آنها خوردگی نیز وقوع پیدا می کند که با عناوینی چون: خوردگی سایشی، خوردگی خستگی، خوردگی تنش و ... بیان می گردند [۴].

۳-۱-۲ اصول اساسی واکنشهای شیمیایی خوردگی

بیشتر فلزات در طبیعت و به طور معمول بشکل سنگهای معدنی اکسیدی و سولفیدی یافت می شوند. در این حالت درجه اکسیداسیون آنها نسبت به فلز آزاد بیشتر است. در استخراج فلز از سنگ معدن، اکسید فلز احیاء شده و به فلز آزاد تبدیل می گردد. این عمل موجب افزایش انرژی آزاد داخلی فلز و ناپایداری آن می شود. بنابراین فلز تمایل زیادی به از دست دادن انرژی اضافی از طریق دادن الکترون و اکسید شدن مجدد دارد. این تمایل فلز نیروی محرکه انجام عمل خوردگی است. این مسئله تقریباً در کلیه فلزات بجز فلزات نجیب یا غیر فعال مانند طلا و پلاتین وجود دارد.

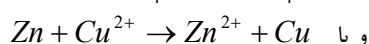
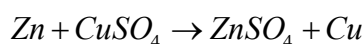
محصول خوردگی >-----فلز آزاد >-----سنگ معدن

در فرآیندهای خوردگی، تشکیل یک پیل گالوانیک یا مجاورتی موجب انجام واکنشهای شیمیایی می گردد. عبور جریان الکتریسته در داخل الکترولیت پیل و بین دو الکترود منفی و مثبت منجر به انجام واکنش شیمیایی می شود. نمونه پیلهای گالوانیک، پیل دانیل (Daniel) است (شکل ۱-۲)، که الکترود منفی آن میله ای از جنس روی بوده که در مرکز پیل و در داخل محلول سولفات روی غوطه ور است و الکترود مثبت این پیل نیز ظرف مسی پیل است:

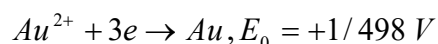
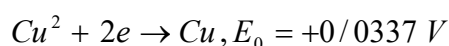
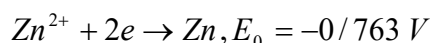


شکل (۱-۲) پیل دانیل

واکنش پیل عبارتست از:



در الکترود منفی، روی الکترود از دست داده و اکسید می شود و در الکترود مثبت نیز مس با گرفتن الکترود احیاء می شود. یعنی در یک پیل الکتروشیمیایی دو واکنش اکسیداسیون و احیا انجام می گیرد. کلیه واکنشهای الکتروشیمیایی مربوط به اکسیداسیون (یا احیاء) فلزات مطابق استاندارد به صورت واکنشهای احیائی نوشته می شود و بدین ترتیب هر واکنشی دارای پتانسیل الکترود مشخصی است [۵]. در واکنشهای:



پتانسیل منفی روی بیانگر آنست Zn نسبت به Zn^{2+} ناپایدار است در حالیکه Au نسبت به Au^{+} بسیار پایدارتر می باشد. بنابراین طلا تمایل کمتری به اکسید شدن دارد.

در واکنشهای خوردگی پیلهای گالوانیک، اکسید شدن فلز، واکنش آندی را تشکیل می دهد ولی در کاتد معمولاً واکنش دیگری غیر از احیاء یون فلزی انجام می گیرد و غالباً احیاء یون هیدروژن و تبدیل آن به گاز هیدروژن واکنش کاتدی را تشکیل می دهد. مثلاً روی در محلول اسید حل شده و به صورت یون Zn^{2+} در می آید و موجب آزاد شدن گاز هیدروژن می گردد.

در محلولهای خنثی یا قلیایی که غلظت یون هیدروژن بسیار کم است، در کاتد احیاء اکسیژن به یون هیدروکسید انجام می پذیرند. تصاعد هیدروژن احیاء یون فلزی و واکنش رسوب فلز از جمله واکنشهای کاتدی است [۴].

۴-۱-۲ سریهای الکتروشیمیایی و گالوانیک

در هر واکنش الکتروشیمیایی، الکترودها بسته به نوع آنها دارای پتانسیل الکترود استاندارد و مخصوص می باشند. جدول بندی پتانسیل استاندارد الکترودهای عناصر فلزی تحت عنوان سریهای الکتروشیمیایی (ECS) شناخته می شوند. با توجه به پتانسیل استاندارد الکترودها می توان تمایل فلزات مختلف را جهت شرکت در واکنشهای خوردگی و خورده شدن مشخص نموده ولی به طور قطعی نمی توان مشخص کرد که آیا خوردگی اتفاق خواهد افتاد یا نه (جدول (۱-۲) پتانسیل استاندارد الکترودها و جدول (۲-۲) سری گالوانیکی خاک را نشان می دهد) [۵]. جدول یا سریهای پتانسیل نشانگر پتانسیل تئوری یک فلز می باشد زمانی که در محلولی از نمک خود که اکتیو یون فلز واحد یا نرمال است، قرار دارد. فلزاتی مانند روی، سدیم و منیزیم در همه محلولهای آبی به سرعت واکنش انجام می دهد و پتانسیل پایداری را نمی توان برای آنها ثبت کرد و یا آلومینیوم که به سرعت تولید لایه اکسیدی می کند، پتانسیلی که در محلولها نشان می دهد، پتانسیل الکترود اکسید آلومینیوم خواهد بود.

جدول (۱-۲) سریهای الکتروشیمیایی الکترودها و سری گالوانیکی خاک [۱۸].

فلز	یون تشکیل شده	پتانسیل استاندارد الکتروود
طلا	Au^{3+}	+۱/۵ (نجیب)
پلاتین	Pt^{2+}	+۱/۲ (تقریباً)
پالادیم	Pd^{2+}	+۰/۹۸۷
نقره	Ag^{+}	+۰/۷۹۹
جیوه	Hg^{+}	+۰/۷۸۹
مس	Cu^{2+}	+۰/۳۳۷
هیدروژن	H^{+}	-۰/۰۰۰
سرب	Pb^{2+}	-۰/۱۲۶
قلع	Sn^{2+}	-۰/۱۳۶
نیکل	Ni^{2+}	-۰/۲۵۰
کوبالت	Co^{2+}	-۰/۲۷۷
کادمیم	Cd^{2+}	-۰/۴۰۲
آهن	Fe^{2+}	-۰/۴۴۰
کروم	Cr^{2+}	-۰/۵۵۷
روی	Zn^{2+}	-۰/۷۶۳
آلومینیوم	Al^{3+}	-۱/۶۶
تیتان	Ti^{2+}	-۱/۷۵
منیزیم	Mg^{2+}	-۲/۳۷۶
سدیم	Na^{+}	-۲/۷۱۴
پتاسیم	K^{+}	-۰/۹۲۵
لیتیم	Li^{+}	-۳/۰۴۵ (فعال)

جدول (۲-۲) سری گالوانیکی در خاک

فلز	پتانسیل پیشنهادی (تقریبی)
کربن، کک، گرافیت	ولت ۰/۱ (نجیب)
چدن پرسلیس	+۰/۱
مس، برنج و برنز	+۰/۱
فولاد ساختمانی (در بتن)	+۰/۱
سرب	-۰/۲
چدن	-۰/۲
فولاد ساختمانی زنگ زده	+۰/۱ تا -۰/۲
فولاد ساختمانی بدون زنگ	-۰/۲ تا ۰/۵

آلومینیوم	-۰/۵
روی	-۰/۸
منیزیم	-۱/۳ (فعال)

همچنین جدول نشان می دهد که مس در محلولهای بدون هوا اکسیده یا خورده نخواهد شد زیرا از الکتروود هیدروژن نجیب تر است ولی آهن چون از هیدروژن فعال تر است، اکسید می شود. در جدول به نظر می رسد که سرب در محلولهای آبی با آزاد کردن هیدروژن می تواند خورده شود زیرا فعال تر از الکتروود هیدروژن است. ولی در حقیقت سرب در این محلولها به علت اینکه دارای پتانسیل اضافی هیدروژن بسیار بالایی است، خورده نمی شود.

علاوه بر این سریهای الکتروشیمیایی اطلاعاتی درباره نوع محصولات خوردگی تشکیل شده نمی دهد. مثلا تشکیل سولفات سرب که سرب را در برابر اسید سولفوریک محافظت می کند. ضمنا در مورد سینتیک الکتروشیمیایی این واکنشها هم مطالبی را ارائه نمی کند. جدول قابل اعتمادتر برای بررسی خواص واقعی، (سریهای گالوانیک) فلزات در خاک و آب دریا می باشد. سریهای گالوانیک، میل به خوردگی عناصر فلزی در محیطهای خاک و آب دریا را نشان می دهد. معمولا پتانسیل واقعی را به علت اینکه محیط واقعی بندرت ثابت دارد، نمی توان به دست آورد. در کلیه سیستمهای خوردگی به خصوص در سیستمهای گالوانیک یا مجاورتی، پتانسیل پیل در زمانهای مختلف در اثر پلاریزاسیون متفاوت خواهد بود زیرا با ادامه خوردگی محصولات خوردگی در آن جمع شده و باعث پلاریزاسیون کاتد می گردند و در نتیجه سرعت خوردگی کاهش می یابد.

۵-۱-۲ اشکال خوردگیها

معمولترین روش طبقه بندی خوردگیها بر اساس ظاهر و شکل فلز خورده شده می باشد. برای اینکار اغلب با مشاهده مستقیم نوع خوردگی قابل تشخیص خواهد بود ولی در برخی از اشکال خوردگی، جهت تشخیص، بزرگنمایی ضروری است. اشکال و فرم عمده خوردگیها عبارتست از:

۵-۱-۱ خوردگی یکنواخت (Uniform Attach): معمولترین و متداولترین نوع خوردگی می باشد. واکنش معمولا شیمیایی یا الکتروشیمیایی بوده و به طور یکنواخت تمام سطح در تماس با محیط خورنده، خورده می شود فلز نازک و نازکتر شده و نهایتا از بین می رود. خوردگی یکنواخت در بین انواع دیگر خوردگیها بیشترین رقم ولی از نظر فنی اهمیت کمتری دارد. قرار گرفتن یک قطعه فولادی در محلول رقیق اسید سولفوریک مثالی از این نوع خوردگی می باشد.

۵-۱-۲ خوردگی گالوانیک یا مجاورتی (Galvanic Corrosion): زمانی که دو فلز غیر همجنس که دارای اختلاف پتانسیل الکتریکی زیاد هستند، در تماس با یکدیگر قرار می گیرند، در اثر اختلاف پتانسیل بین آن دو جریان الکتریکی برقرار می گردد. در نتیجه فلز دارای مقاومت خوردگی کمتر، آند شده و خورده می شود و فلز دارای مقاومت خوردگی بیشتر به صورت کاتد درآمده و خورده نشده یا کمتر خورده می شود. عواملی چون اختلاف پتانسیل دو فلز، اثرات محیط و نسبت سطح کاتد به آند، در خوردگی گالوانیک دخالت دارند. از خوردگی گالوانیک استفاده های مفیدی نیز می شود. ساخت باتریهای خشک که انرژی خود را از خوردگی گالوانیک به دست می آورند، همچنین حفاظت کاتدی که بر اساس خوردگی گالوانیک انجام می گیرد، از جمله کاربردهای مفید از خوردگی گالوانیک است. مثلا در فولاد گالوانیزه پوشش روی بر روی فولاد به علت مقاومت کم در مقابل خوردگی، به صورت آند درآمده و خورده می شود و در نتیجه از خوردگی فولاد پیشگیری و محافظت می کند.

۵-۱-۳ خوردگی شیاری (Crevice Corrosion): این نوع خوردگی معمولا در شیارها و نواحی دیگری در سطح فلز که حالت مرده دارند، اتفاق می افتد و خوردگی به صورت موضعی و شدید است. اثر وجود سوراخها، سطوح و اشراها، محل روپهم قرار گرفتن دو فلز، شیارهای زیرپچ، محیط های کوچک از مایع خورنده جایگزین شده و موجب پیدایش این نوع خوردگی می شوند.

نوعی خوردی شیاری بنام خوردگی فیلامنتی نیز وجود دارد که اکثرا در زیر پوشش های محافظ سطحی اتفاق می افتد و به همین دلیل آن را خوردگی زیر پوشش نیز می گویند. این نوع خوردگی، غیر عادی بوده و تنها به ظاهر جسم صدمه می زند که در بسته بندی مواد غذایی و کنسروها حائز اهمیت است.

۴-۵-۱-۲ **خوردگی حفره ای (Pitting Corrosion):** حفره دار شدن نوعی خوردگی شدید موضعی است که موجب سوراخ شدن فلز می گردد. این سوراخها معمولا دارای قطر کوچک ولی متفاوت هستند. در صورتیکه قطر دهانه محل خورده شده مساوی و یا کمتر از عمق آن باشد، شکل حاصل را حفره می گویند. این نوع خوردگی از مخربترین و خطرناکترین نوع خوردگی محسوب می شود، زیرا سوراخ شدن تجهیزات و وسایل فلزی موجب از بین رفتن و غیرقابل استفاده شدن آن تجهیزات می گردد.

۵-۵-۱-۲ **خوردگی بین دانه ای (Inter granular Corrosion):** این خوردگی بوسیله ناخالصیها در مرز دانه ها، غنی شدن یا فقیر شدن مرز دانه ها نسبت به یک عنصر آلیاژی در این نواحی، واقع می شود. مقادیر جزئی آهن در آلومینیوم که قابلیت انحلال کمی برای آهن دارد به مرز دانه ها رفته و باعث خوردگی بین دانه ای می شود. فقیر شدن مرز دانه ها نسبت به کرم باعث خوردگی بین دانه ای فولادهای زنگ نزن می گردد.

۶-۵-۱-۲ **جدایش انتخابی (Selective Leaching):** جدا شدن یکی از عناصر آلیاژی از آلیاژ جامد در فرآیند خوردگی می باشد. مثال این نوع خوردگی، جدا شدن روی از آلیاژهای برنج از به «زدایش روی» معروف است، می باشد. گرافیتی شدن چدن خاکستر نیز نوعی جدا شدن انتخابی است که در آن به علت حل شدن زمینه آهنی یا فولادی، شبکه گرافیتی متخلخل بر جای می ماند.

۷-۵-۱-۲ **خوردگی سایشی (Erosion Corrosion):** این خوردگی در اثر سرعت جریان یک مایع خورنده در تماس با فلز ایجاد می شود. خوردگی سایشی دارای ظاهری شیاردار، مویی شکل، سوراخهای کروی و ناهموار می باشد. کلیه تجهیزاتی که در تماس با آب متحرک هستند، در معرض خوردگی سایشی قرار دارند.

۸-۵-۱-۲ **خوردگی فرسایشی (Fretting Corrosion):** این خوردگی در محل تماس بین دو فلز که تحت بار هستند و در معرض ارتعاشات و لغزش قرار دارند، ایجاد می شود. این نوع خوردگی حالتی خاصی از خوردگی سایشی است که در تماس با اتمسفر اتفاق می افتد.

۹-۵-۱-۲ **خوردگی تنش (Stress Corrosion):** ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش نتیجه اعمال همزمان تنشهای کششی و محیط خورنده روی فلز است. ترک خوردن معمولا در جهت عمود بر تنش اعمال شده اتفاق می افتد. نوع ترک بستگی به محیط خورنده و ساختمان فلز دارد. افزایش تنش زمان شکست را کاهش می دهد. مقاومت به تنش بستگی به درجه حرارت، ترکیب شیمیایی فلز و ترکیب شیمیایی محیط دارد.

۱۰-۵-۱-۲ **خوردگی خستگی (Fatigue Corrosion):** شکست فلز در اثر تنشهای متناوب را خستگی می نامند. معمولا شکستهای خستگی در تنشهای زیر نقطه تسلیم و بعد از تعداد زیادی نوسانات تنش اتفاق می افتد. خوردگی خستگی کاهش مقاومت خستگی در اثر وجود محیط خورنده می باشد. این نوع خوردگی احتمالا حالت خاصی از خوردگی تنش است لیکن نحوه شکست و روشهای جلوگیری از آن متفاوت است.

۱۱-۵-۱-۲ **صدمات هیدروژنی (Hydrogen Damage):** صدمات مکانیکی در اثر وجود یا واکنش هیدروژن اصطلاحا صدمات هیدروژنی نامیده می شود. این صدمات شامل: تاول زدن و تردی هیدروژنی، دکرینه کردن و خوردگی هیدروژنی می باشد. تاول زدن در اثر نفوذ هیدروژن به داخل فلز بوده که موجب تغییر فرم موضعی و در برخی موارد انهدام کامل فلز می گردد. تردی هیدروژنی نیز در اثر نفوذ هیدروژن به داخل فلز می باشد که این موضوع موجب از دست دادن انعطاف پذیری فلز و استحکام آن می باشد. دکرینه کردن یا از بین رفتن کربن فولاد که تماما در اثر تماس هیدروژن مرطوب با فلز در درجه حرارت بالا می باشد. در دکرینه شدن استحکام کششی فولاد کم می شود. تجزیه شدن و پوسیدن مس اکسیژن دار در حضور هیدروژن مثالی از این خوردگی است.

۲-۲ انواع لوله های مورد استفاده در صنعت آب و فاضلاب

یکی از موارد مهم و عمده کاربرد لوله ها، سیستم های انتقال و توزیع آب و همچنین جمع آوری و انتقال فاضلاب است. بیشتر هزینه ها و مخارج پروژه های آب و فاضلاب مربوط به هزینه های تهیه و تولید، حمل و نقل و کارگذاری لوله هاست. بنابراین به منظور حفظ سرمایه ها و استفاده بهینه از آن لازم است عواملی چون مقاومت به خوردگی، عمر لوله، سهولت تهیه و تولید و هزینه های مربوطه به توجه به اهداف مورد نظر و شرایط محیط در انتخاب و کاربرد لوله های مختلف مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

اولین لوله های مدرن تحت فشار که در قرن ۱۷ در فرانسه مورد استفاده قرار گرفت، لوله های چدنی بود که به تدریج بجای لوله های چوبی بکار گرفته شده است. در قرن ۱۹ لوله های چدنی در انتقال آب و گاز مورد استفاده وسیع قرار گرفتند. بین سالهای ۱۹۳۰ و ۱۹۵۰ بجای اتصالات سربی از رینگهای لاستیکی برای لوله های چدنی مورد استفاده قرار گرفت و در سالهای ۷۰-۱۹۵۰ لوله های چدنی نشکن جایگزین لوله های چدن خاکستری شدند. اگر چه لوله های فولادی از اواسط قرن نوزدهم مورد استفاده قرار گرفته اند. ولی تا سال ۱۹۲۰ روشهای موثر جهت حفاظت لوله های فولادی در مقابل تخریب خوردگی ارائه و استفاده نشده است. بعد از جنگ جهانی دوم استفاده از حفاظت کاتدی خطوط لوله مدرن با یک استاندارد بالای حفاظتی موسوم گردید.

قیمتهای نسبتا بالای لوله های آهنی موجب توسعه لوله های سیمانی در برخی کشورهای اروپایی بعد از جنگ جهانی اول شد. لوله های ازبست سیمان برای اولین بار در همین زمان در ایتالیا ساخته شد و سپس در انگلستان در مناطقی که خاک دارای خاصیت خوردندگی زیادی نسبت به لوله های آهنی داشت، مورد استفاده قرار گرفت. ساخت لوله های بتنی تقویت شده، در انگلستان شروع شد. از سال ۱۹۵۰ لوله های ترموپلاستیک شامل PE PVC و غیره مورد پذیرش و استفاده زیادی قرار گرفت و لوله های فایبرگلاس حدود ۲۰ سال است که تولید و استفاده می شود [۶].

در حال حاضر انواع مختلفی از لوله ها با خواص و مشخصات متفاوت در صنعت آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می گیرد. برای هر یک از این لوله ها استانداردهای ملی و بین المللی متعددی توسط سازمانها و موسسات مختلف تعیین و ارائه شده است که تولید و ساخت و بکارگیری لوله ها تحت این استانداردها انجام می گیرد. با گسترش و رشد تکنولوژی و دستیابی بشر به مواد و ترکیبات جدید، ساخت و تولید لوله نیز از نظر کیفیت و نوع مواد تغییر و تحول زیادی داشته است. شناخت ویژگی های هر یک از لوله ها در کاربری درست از آنها برای اهداف مورد نیاز ضروری و مفید می باشد. در این قسمت انواع متداول لوله های آب و فاضلاب معرفی و ویژگی های هر کدام به اختصار مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲-۲ لوله های چدنی (Cast Iron)

لوله های چدنی از قدیمی ترین انواع لوله هاست که در صنعت آب استفاده شده است. چدن یک آلیاژ که دارای بیش از ۱/۷ درصد کربن بوده و به علت داشتن گرافیت آزاد به رنگ خاکستری است. ساخت آن به دو روش ریختگی در قالبهای ماسه ای و به طریق سانتریفوز انجام گرفته است که به دلیل مرغوبیت لوله های ساخته شده به وسیله سانتریفوز از نظر مقاومت تنشی و صافی سطوح داخلی، بیشتر از این روش استفاده می شود. لوله های چدنی نسبتا سنگین بوده و شکننده می باشند و هزینه های حمل و نصب آنها زیاد است. دارای مقاومت بیشتری نسبت به فولاد در مقابل خوردگی دارد و سطوح داخلی آن به سرعت ناصاف می گردد. اتصال لوله به لوله در قطرهای کوچک توسط فلنج و در قطرهای بزرگ توسط نر و مادگی انجام می گیرد. این لوله ها در سایزهای مختلف از ۱۰ تا ۲۰ اینچ و در سه کلاس LA, A, B بر اساس استاندارد ایزو در ایران ساخته می شود که به ترتیب دارای فشارهای کار ۲۰، ۲۵ و ۳۰ اتمسفر می باشند. در حال حاضر به علت معایب زیادی که لوله های چدنی دارند، کمتر مورد استفاده قرار گرفته و بیشتر از لوله های چدن نشکن یا داکتیل که برخی از معایب در آن اصلاح و برطرف شده است، استفاده می شود.

۲-۲-۲ لوله های چدن نشکن (Ductile Cast Iron)

در این لوله ها با استفاده از مقداری منیزیم و کاهش گوگرد و فسفر و همچنین گرانول کردن آهن، تغییراتی در خواص چدن پدید می آید که معایب لوله های چدن معمولی را نداشته، دارای انعطاف بیشتر و همچنین مقاومت بیشتری در مقابل خوردگی دارد. لوله های چدن نشکن حدودا از سال ۱۹۴۰ تولید شده است و بر اساس استاندارد ملی آمریکا، لوله های داکتیل در ۷ کلاس ساخته می شود که برای شرایط مختلف فشارهای داخلی و خارجی می باشد. این لوله ها دارای سایزهای ۸۰ تا ۱۰۰۰ میلیمتر می باشد. در خاکهای نسبتا خورنده نیاز به حفاظت خارجی دارد که بیشتر از پوششهای قیری و کلتار به این منظور استفاده می شود. برای حفاظت داخلی آن معمولا از ملات سیمان پرتلند به کار می رود.

۳-۲-۲ لوله های فولادی (Steel pipe)

لوله های فولادی نیز در صنعت آب و فاضلاب کاربرد زیادی دارند. این لوله ها که در سایزهای بزرگتر از ۶ اینچ ساخته می شود و استانداردهایی برای قطرهای مختلف لوله وجود دارد، از مزایای مهم لوله های فولادی، تحمل فشار زیاد میباشد در سایزهای بالا دارای ضخامت زیادی نبوده

و برای خطوط انتقال با قطرهای بزرگ، بسیار مناسب است. بخصوص از نظر اقتصادی با توجه به قیمت بالای آن فقط در خطوط انتقال و در قطرهای بالا مورد استفاده قرار می گیرد.

این لوله نرم و سبک است و اتصالاتی مانند خمها و سراهی ها نیز از تغییر شکل لوله ساخته می شوند و در نتیجه تهیه اتصالات در این لوله ها براحتی انجام می گیرد و هزینه حمل آن نیز نسبت به لوله چدنی کمتر است. لوله های فولادی بدون پوشش خارجی در خاک مقاومت کمی در برابر خوردگی دارند و به سرعت خورده می شوند لذا استفاده از پوشش ها و حفاظت کاتدی برای این لوله الزامی است. اتصالات بین لوله ها بوسیله جوش یا پرچ و یا اتصالات مخصوص مانند اتصال جانسون انجام می گیرد. عمر لوله های فولادی پوشش داده شده تا ۴۰ سال می رسد اگر چه در برخی از شرایط دارای عمر مفید بیشتری نیز می باشند. برای پوشش خارجی و داخلی این لوله ها از کلتار، ملات سیمان و پوششهای آلی استفاده می شود در ایران از عمده ترین کارخانه های ساخت لوله های فولادی، شرکت لوله سازی اهواز است. در این کارخانه صفحه های فولادی را با استفاده از پرسها و دستگاههای مختلف به شکل لوله درآورده و پس از جوشکاری داخلی و خارجی آن لوله های فولادی تولید می گردند. ظرفیت تولید این کارخانه سالیانه در حدود ۲۲۰ هزار تن می باشد [۴].

لوله های گالوانیزه و لوله های سیاه نیز از فولاد ساخته می شود. لوله های گالوانیزه در قطرهای کوچک ۸ اینچ و کمتر و برای سرویسها و لوله کشی داخلی ساختمانها ساخته می شوند. لوله های سیاه از نورد ورقهای آهن تهیه می شود که در شبکه های انتقال و توزیع آب کاربردی ندارد و به سرعت در خاک خورده می شود.

لوله های فولاد زنگ نزن (Stainless – Steel Pipe) نوع دیگری از لوله های فولادی هستند که دارای پوششی بسیار بادوام و جدانشدنی از اکسید کروم به ضخامت چند آنگستروم می باشند.

این پوشش، فولاد را در مقابل عوامل خوردگی آب و هوا حفاظت می کند. همچنین زمانی که این پوشش مورد آسیب و صدمه قرار میگیرد، قسمت صدمه دیده سریعاً ترمیم و مجدداً دارای پوشش میگردد. استفاده های وسیعی از این لوله ها در سیستمهای آب آشامیدنی از جمله در آمریکا و دیگر نقاط جهان بعمل آمده است.

در ژاپن برای مقاطع لوله کشی منازل با قطرهای کوچک و در نیویورک برای قطرهای بزرگ بکار رفته است. با توجه به عمر طولانی و مقاومت این نوع لوله ها در مقابل شیمیایی از قبیل کلر، برای قسمتهایی از واحدهای تصفیه خانه که تعویض و بازسازی آن قسمتها مشکل است، بسیار مناسب هستند [۳۲].

۴-۲-۲ لوله های آزبست سیمان (A-C Pipes)

لوله های آزبست سیمان اولین بار در سال ۱۹۲۰ در ایتالیا از اختلاط یک ماده معدنی بنام آزبستور و سیمان پرتلند و آب به طریق سانتریفوژ تهیه گردید. در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۳۸ نسبت به وارد کردن و استفاده از لوله های آزبست سیمان جهت آبرسانی اقدام شده است. و در حال حاضر چندین کارخانه در ایران این نوع لوله ها را تولید می کنند [۷].

به علت مزایای زیادی که این لوله ها دارند، به طور وسیعی از آنها در صنعت آب و فاضلاب استفاده شده و می شود. از جمله این امتیازات و ویژگیها، می توان مقاومت در عوامل خوردگی، سبک بودن، سهولت انجام اتصالات و عمر طولانی را نام برد. عیب عمده آن، خشک و شکننده بودن است که موجب صدمه دیدن آن در هنگام حمل و نقل و کارگزاری می گردد. در کارخانجات ایران لوله های آزبست سیمان در پنج کلاس B, C, D, I, F برای فشار کار خط برابر با ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ اتمسفر ساخته می شود. بر اساس استاندارد بسیاری از کشورها، مقاومت لوله های آزبست سیمان باید به حدی باشد که بتواند مجموع فشار ایستایی و فشار ناشی از ضربه را تحمل نماید.

اتصالات لوله به لوله در این لوله ها به وسیله مهره ماسوره و واشرهای پلاستیکی انجام می گیرد که بسیار قابل انعطاف بوده و بخوبی و سهولت انجام می گیرد. متعلقات معمولاً از چدن و یا فلزات دیگر ساخته می شوند.

۵-۲-۲ لوله های بتنی (Concrete Pipe)

لوله های بتنی با استفاده از سیمان پرتلند و شبکه میلگرد یا استوانه های فولادی ساخته می شوند. این لوله ها بیشتر در قطرهای بالا ساخته شده و استفاده می گردد. از مزایای مهم این لوله ها، ارزانی، مقاومت نسبت به خوردگی، تحمل فشارهای داخلی و عمر و دوام زیاد را می توان نام برد. از معایب عمده آنها به مشکلات حمل و نقل و نصب به علت سنگینی و همچنین نیاز به پیش بینی های لازم برای انشعابات و تعویض قطعات آسیب دیده، اشاره نمود. سطح داخلی این لوله ها بسیار صاف بوده و عمر آنها در شرایط نرمال تا ۷۵ سال نیز می رسد. لوله های بتنی معمولاً در محل اجرای پروژه ساخته می شود تا هزینه های حمل آن مشکل ایجاد ننماید.

نوعی لوله های بتنی بنام لوله های بتنی پیش تنیده (Prestressed Concrete Pipes) که دارای سیمهای پیش تنیده جهت تقویت سیلندر فولادی است، در فشارهای بسیار زیاد و همچنین قطرهای بالا و در انتقال و توزیع آب مورد استفاده قرار می گیرند،

۶-۲-۲ لوله های پلی اتیلن (Polyethylene Pipes) و پی وی سی (Polyvinylchloride Pipes)

لوله های پلی اتیلن یکی از لوله های پلاستیکی دارای انعطاف است که کاربرد وسیعی در شبکه های آب و فاضلاب و همچنین گازرسانی دارد. این محصول از سال ۱۹۳۹ به بازار عرضه شده است. از مزایای مهم این نوع لوله ها مقاومت بسیار زیاد آن در مقابل اسیدها و بازها و محیطهای خورنده، همچنین مقاومت در برابر سائیدگی را می توان نام برد. همچنین ارزان بودن نسبت به لوله های دیگر، عمر طولانی، سهولت ساخت و کارگزاری آن و سبکی از دیگر مزایای این نوع لوله ها محسوب می شود که موجب افزایش کاربرد این لوله ها بخصوص در دهه های اخیر شده است.

لوله های پلی اتیلن به روش اکستروژن و تزریق مواد اولیه در دستگاه و در سایزهای ۱۰ میلیمتر تا ۴۰۰ میلیمتر، در ضخامتهای مختلف برای فشارهای مورد نظر ساخته می شود. اتصالات در این لوله ها معمولاً به صورت عملیات جوشکاری و دیگر روشها انجام می گیرد. اتصال لب به لب اتصال به روش برق گذاری، اتصال فلنجی و بوشنی و اتصال به روش پیچی، از جمله اتصالات مورد استفاده در لوله های پلی اتیلن است. از معایب لوله های پلی اتیلن، عدم کارایی در فشارهای خیلی بالا، مشکل جوش دادن لوله های غیر متجانس، عدم امکان تولید لوله های با قطر بزرگ به علت اقتصادی نبودن و پرهزینه بودن آن، سوراخ شدن لوله توسط اشیاء نوک تیز، ضخامت زیاد جدار لوله را می توان بر شمرد.

لوله های PVC نیز نوع دیگری از لوله های پلاستیکی است که مقاومت شیمیایی و فیزیکی آن زیاد بوده ولی کمتر از لوله های پلی اتیلنی می باشد و همچنین سخت تر از آن است. این لوله ها در سیستمهای توزیع آب و جمع آوری فاضلاب بکار برده می شود و عمدتاً در قطرهای کمتر از ۳۰۰ میلیمتر تولید و مصرف می شود. به علت شکننده بودن آن حمل و نقل و انبار آن مشکلاتی داشته و کارگذاری آن نیاز به مراقبت ویژه دارد و نیاز به بستر سازی مناسب دارد. در قطرهای بالاتر از ۲۵۰ میلیمتر دارای تحمل فشار کم باشد همچنین این لوله ها در مقابل نور آفتاب و تغییرات آب و هوا ترک برداشته و صدمه می بینند، به همین دلیل از این لوله ها به صورت روکار استفاده نمی شود.

۷-۲-۲ لوله های دوجداره

به منظور رفع نقص لوله های پلی اتیلن و PVC و امکان استفاده از این نوع لوله های پلاستیکی مقاوم، در قطرهای بالا، با استفاده از طراحی و شکل مخصوص، نوعی لوله به نام لوله دوجداره تولید و به کار گرفته شده است. این نوع لوله ها دارای دو جدار داخلی و خارجی هستند که بین دو جدار به شکل کنگره ای و دندانه دار بوده و کاملاً پرنشده است. در نتیجه وزن آن بسیار سبک تر شده ولی از استحکام و تحمل فشار آن کاسته نمی گردد. همچنین دارای کلیه مزایای لوله های پلاستیکی می باشند.

در لوله های دوجداره در اثر طراحی و شکل ویژه، حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد از مصرف مواد صرفه جویی می گردد که صرفه جویی در مصرف انرژی، هزینه کمتر و حفظ سلامت محیط زیست را بدنبال دارد. ساخت این لوله ها از نیمه دهه ۱۹۷۰ میلادی انجام گرفته است و در حال حاضر در قطرهای مختلف از ۸۰ تا ۳۶۰۰ میلیمتر تولید می گردد. مواد لوله از پلی اتیلن یا PVC است. در لوله های دوجداره پلی اتیلن میزان سرمایه گذاری اولیه جهت احداث کارخانه کمتر از لوله های دوجداره PVC بوده ولی قیمت تمام شده آن به دلیل ارزان تر بودن مواد PVC، بیشتر از لوله های دوجداره PVC می باشد. استفاده از لوله های دوجداره بخصوص در شبکه های فاضلاب و در قطرهای بالا بسیاری از مشکلاتی که در استفاده از لوله های بتنی و غیره در این شبکه ها وجود دارد، مرتفع گشته و موجب صرفه جویی در هزینه های طرح خواهد شد.

۸-۲-۲ لوله های فایبرگلاس

فایبرگلاس از مواد مرکبی بنام کامپوزیتها است که در این مواد یک پلیمر با خواص شیمیایی متناسب و خواص مکانیکی نسبتاً پایین توسط تقویت کننده هایی، مسلح شده و موجب افزایش خواص شیمیایی و مکانیک آن می گردد. پلیمر مصرف، رزین پلی استر غیر اشباع بوده واز پشم شیشه به عنوان تقویت کننده استفاده می شود. رزین به ۳ منظور استفاده می شود:

- ۱- پشم شیشه ها را در کنار هم نگهداشته و از پراکندگی آنها جلوگیری می کند.
 - ۲- فشارهای وارده به رزین به پشم شیشه منتقل شده و از شکستن رزین جلوگیری می کند.
 - ۳- پشم شیشه را در مقابل عوامل شیمیایی محافظت می کند و پشم شیشه نیز خواص مکانیکی رزین را تقویت کرده و افزایش می دهد.
- فایبرگلاس به علت دارا بودن خواص ویژه، کاربردهای فراوانی در صنایع از جمله در صنایع عظیم شبکه آب، آبیاری مزارع، انتقال سوخت و غیره دارد. تولید لوله های فایبرگلاس از سال ۱۹۵۳ شروع شده است و در دهه ۸۰-۱۹۷۰ توانست بالاترین سطح فنی، تکنیک و اقتصادی را در

صنایع لوله سازی و اجرای پروژه های آب و فاضلاب در کشورهای جهان، از آن خود سازد. مزایای لوله های فایبرگلاس که برتری این لوله ها را نسبت به لوله هایی چون فولادی، چدنی و آذستی در خیلی از موارد نشان می دهد، عبارتند از:

- سبکی وزن و در نتیجه سهولت حمل و نقل
- مقاومت مناسب در مقابل خوردگی و عوامل طبیعی و محیطی
- امکان اتصال با لوله های نامتجانس، نصب سریع و آسان
- عمر مفید طولانی، حداقل ۵۰ سال، نفوذناپذیری در بدنه و اتصالات
- پایین بودن هزینه های تعمیرات و نگهداری نسبت به سایر لوله ها
- افت فشار کم به علت صاف بودن دیواره داخلی

این لوله ها در قطرهای ۸۰ تا ۳۰۰۰ میلیمتر و در طولهای دوازده متری و تا فشار ۲۵ بار تولید می گردند. لوله های فایبرگلاس به دو روش فرایند رشته پیچی و فرایند گریز از مرکز یا سانتریفوژ ساخته می شوند که هر یک دارای ویژگیهای مخصوص به خود است. اتصالات در این لوله ها نیز به چندین طریق انجام می شود. از جمله اتصال لب به لب و تسمه، اتصال به طریق زنگی و تویی، اتصال فلنجی ثابت و قابل چرخش را می توان نام برد. برای ساخت تبدیلهای، زانویی ها و سرهای ها نیز از همان مواد لوله استفاده می شود. ساخت و آزمایشات کنترل کیفی این لوله ها طبق استانداردهای ASTM و AWWA می باشد.

کاربرد لوله های فایبرگلاس با توجه به خصوصیات ویژه آن، در صنایع مختلف و در محیطهای اسید و قلیایی قوی و در انتقال مواد شیمیایی خورنده، بسیار مناسب بوده و به علت سهولت نصب و طول عمر زیاد نسبت به سایر لوله ها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد. انواع لوله های دیگری با جنس و کیفیتهای مختلف از قبیل لوله های مسی، برنجی، سربی، چوبی و غیره وجود دارند که در صنعت آب و فاضلاب در زمانهای گذشته، برخی از آنها کاربرد زیادی داشته ولی در حال حاضر چندان متداول نیستند. البته شیرآلات، اتصالات مختلفی از جنس مسی، برنج و آلیاژهای دیگر ساخته شده و بکار می روند.

۹-۲-۲ مقایسه فنی و اقتصادی چند نوع از لوله ها

در جدول (۲-۳) چند نوع لوله از نظر فاکتورهای تعیین کنند کیفیت و هزینه های تهیه و کاربرد آنها مورد مقایسه با لوله های دوجداره قرار گرفته است [۸].

جدول (۲-۳) مقایسه کیفیت و هزینه های چند نوع لوله [۸].

نوع لوله عوامل	دو جداره پلی اتیلن	پلی اتیلن	PVC	بتنی	آزبست
وزن	خیلی کم	کم	کم	زیاد	متوسط
قیمت تمام شده	خیلی کمتر	کم	کم	زیاد	متوسط
میزان سرمایه گذاری	زیاد	متوسط	خیلی زیاد	کم	-
سهولت نصب	خیلی آسان	آسان	آسان	مشکل	-
مقاومت فیزیکی	خوب	خوب	خوب	خیلی خوب	خوب
مقاومت شیمیایی	خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	کم	متوسط
هزینه حمل و نقل	خیلی کم	کم	کم	زیاد	متوسط
بیشترین قطر (mm)	۳۶۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰	--
هزینه تعمیر و نگهداری	کم	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد

۱۰-۲-۲ مسائل زیست محیطی در انتخاب و استفاده از لوله های آب و فاضلاب

پیشرفت و توسعه تکنولوژی در بکارگیری منابع طبیعی و استفاده هرچه بیشتر از آن جهت رفع نیازمندیهای بشری و همچنین افزایش جمعیت که افزایش مصرف را به دنبال دارد و همچنین عدم توجه به مسائل زیست محیطی، آلودگی روزافزون محیط زیست را موجب شده است. در چند

دهه اخیر آلودگی محیط زیست و عدم توجه به آن به لحاظ مخاطراتی که برای ساکنین زمین ایجاد کرده است، نمود بیشتری داشته و توجه و نظر محققین و مسئولین جوامع را به خود جلب نموده است.

اکنون این مسئله بخوبی روشن است که استفاده از منابع طبیعی و انجام هر پروژه ای بدون در نظر گرفتن جوانب و اثرات زیست محیطی آن می تواند مخاطرات جدی برای سلامت انسانها و کاهش کیفیت زندگی در کوتاه مدت و یا بلند مدت داشته باشد. بنابر این در حال حاضر موج جدیدی از توجه و عنایت به مسائل زیست محیطی در جهان ایجاد شده است و مسئله حفاظت محیط زیست نیز به عنوان یکی از فاکتورهای اصلی و مهم در انتخاب مواد و روشها محسوب شده و پیشنهاد می گردد.

از جمله تجهیزاتی که در صنعت آب و فاضلاب استفاده وسیع از آن به عمل می آید، لوله های انتقال و توزیع آب و جمع آوری و انتقال فاضلاب است. مرکز تحقیقات آب انگلستان در سال ۱۹۸۸ برای راهنمایی و هدایت مدیران صنعت آب در انتخاب مناسبترین جنس لوله، آئین نامه انتخاب جنس لوله را منتشر کرد. در این آئین نامه یک روش دو مرحله ای برای این منظور ارائه شده است. در مرحله اول برای انتخاب جنس لوله، عوامل فنی شامل مقاومت و تحمل فشار مورد نظر قرار می گیرد، و در مرحله دوم عوامل اقتصادی شامل هزینه های نصب، راه اندازی و بهره برداری مورد توجه می گیرد. اما در حال حاضر توجه جهانی به این مسئله معطوف گشته است که بایستی معیارهای دیگری به عنوان عوامل زیست محیطی نیز در انتخاب جنس لوله به کار گرفته شود. ارزیابی اثرات محیطی یک محصول شامل تاثیرات احتمالی است که محصول مورد نظر طی مراحل تولید و بهره برداری و خارج شدن از بهره برداری بر محیط زیست می تواند داشته باشد. در این ارزیابی، مواردی چون میزان مواد خام، انرژی و آب مصرفی برای تولید، آلودگی آب و هوا و تولید ضایعات جامد را در بر می گیرد.

اگر چه معیارهای واقعی ارزیابی جنس های مختلف لوله در ارتباط با تاثیرات محیطی هنوز کاملاً مشخص نشده است ولیکن بررسی چند عامل مهم در این ارزیابی بسیار با ارزش خواهد بود. از جمله این عوامل مهم، انرژی مورد نیاز است که معمولاً در انتخاب جنس لوله مد نظر قرار نمی گیرد.

در یک بررسی و مقایسه انرژی مورد نیاز ساخت لوله های آب با فشار کار متوسط بین جنسهای مختلف لوله، شامل پلی اتیلن، PVC و چدن داکتیل از قطر ۱۵۰ تا ۴۵۰ میلیمتر، که در استرالیا توسط پرفسور آرتور ویلیامز انجام گرفته است، نشان داده شده است که لوله های چدن داکتیل از نظر انرژی ساخت اقتصادی تر می باشند. علاوه بر آن، کاهش انرژی مورد نیاز برای ساخت در کاهش اثرات مربوط به تولید گازهای گلخانه ای و آلودگی محیط زیست بسیار موثر است.

بیان این نکته نیز حائز اهمیت است که در انگلستان لوله های چدن داکتیل از مواد کهنه و اسقاطی ساخته می شود و هیچ نوع محصول آهنی یا فولادی برای این منظور تولید نمی شود. در حالیکه برای ساخت لوله های پلاستیکی از منابع با ارزش نفت و گاز استفاده می شود.

از فاکتورهای مهم دیگر، قابلیت نفوذ و نشت کردن است. لوله های پلاستیکی نظیر PE، PVC و GRP، نسبت به برخی آلاینده های موجود در خاک دارای قابلیت نفوذ متغیری هستند. این امر می تواند مخاطراتی را برای لوله های آب آشامیدنی که از زمینهای آلوده عبور می کند، از نظر سرایت آلودگی یا ایجاد طعم و مزه، به دنبال داشته باشد. این مسئله در لوله های فلزی نظیر چدن داکتیل و فولادی وجود ندارد. پلی اتیلن قابل نفوذترین لوله پلاستیکی است.

مواد سمی نظیر حشره کشها، مواد نفتی و حلالها از آلوده کننده هایی هستند که به راحتی می توانند به داخل لوله های پلی اتیلن نفوذ کنند و موارد مستندی از نشت مواد آلوده کننده به داخل لوله های در حال بهره برداری بخصوص در هلند و آمریکا وجود دارد.

عامل دیگر نشت فاضلاب از فاضلاب روها می باشد. موارد مستندی از نشت فاضلاب و آلودگی آبهای زیرزمینی از طریق فاضلاب روها وجود دارد. فاضلاب روهای ساخته شده از چدن داکتیل با توجه به مقاومت بالا و کارآئی اتصالات تحت فشار، مورد توجه و استفاده در اروپا واقع شده است.

جمع آوری لوله ها و انتقال آنها به محل ضایعات آخرین مرحله عمر خط لوله است. دفع مواد پلاستیک یک مشکل شناخته شده است که منجر به ممنوعیت تولید و استفاده از PVC در برخی کشورهای اروپایی شده است. در کنفرانس لوله های پلاستیکی که در ایندوگان برگزار شد، پروفیسور (مایک بریس) از دانشگاه برنل، اعلام نموده است که مناسب بودن کاربردهای جدید استفاده مجدد از مواد پلاستیک بازیافت شده هنوز مورد شک و تردید است.

۱۱-۲-۲ آمار شبکه های آب و فاضلاب در ایران

کاربرد وسیع انواع لوله در شبکه های آب، فاضلاب و خطوط انتقال از یک طرف و هزینه تولید، حمل، نقل، اجرا، بهره برداری و نگهداری از شبکه ها از طرف دیگر، ما در جهت انتخاب لوله های پردوام و سازگار با شرایط طرح نیازمند می سازد.

نشریه خبری صنعت آب و فاضلاب کشور، شهراب، در خصوص کارهای انجام شده و در حال انجام امور آب و فاضلاب هر ماهه منتشر می شود. در جداول زیر آمار اقتصاسی از این نشریه در خصوص دامنه فعالیتهای شبکه های آب و فاضلاب کشورمان ارائه گردیده است. جدول ۲-۴.

۴، آمار شبکه های فاضلاب در سالهای گذشته تا کنون را نشان می دهد.

جدول ۳-۴، آمار شبکه های آب در سالهای گذشته تا کنون را نشان می دهد.

جدول (۲-۴) آمار کلی شبکه های فاضلاب [۱۰ و ۹].

شرح	تا اسفند ۷۵	تا اسفند ۶۷	تا پایان سال ۷۲	تا پایان سال ۷۵	تا اسفند ۷۸	تا مهر ۸۴
جمعیت تحت پوشش شبکه جمع آوری فاضلاب (میلیون نفر)	۱/۵	۲/۵	۳/۲	۳/۷	۶	۱۱/۰۰
درصد جمعیت تحت پوشش فاضلاب شهری	۸/۵	۸/۶	۹/۱	۱۰/۴	۱۵/۲	۲۴
طول شبکه جمع آوری فاضلاب (کیلومتر)	۲۸۰۰	۵۵۰۰	۸۲۰۰	۱۰۷۸۰	۱۴۲۰۰	۲۴۴۴۷
تعداد انشعابات فاضلاب شهری (هزار انشعاب)	۲۸۰	۴۷۰	۶۱۵	۷۲۸	۱۰۶۰	۲۱۶۴
تعداد تصفیه خانه	۱۱	۱۷	۲۵	۲۶	۴۱	۸۴
تعداد پروژه های اجرایی فاضلاب (شهرها)	-	۲۳	۸۳	۱۰۹	۱۶۴	۲۰۲

جدول (۲-۵) آمار کلی شبکه آب [۱۰ و ۹].

شرح	وضعیت تا پایان شهریور ماه ۸۴
جمعیت تحت پوشش	۴۴۸۱۰۶۹۳ نفر
درصد جمعیت تحت پوشش	۹۷/۹
تعداد شهرهای تحت پوشش	۸۳۶ شهر
تعداد انشعابات آب	۹۴۲۸۷۲۴ انشعاب
حداکثر ظرفیت تامین آب	۸۷۰۰ میلیون متر مکعب در سال
میزان تولید آب	۱۳۲۲۷۹۲۷ متر مکعب در روز
طول خطوط انتقال آب	۱۶۳۰۱ کیلومتر
طول شبکه توزیع آب (با قطر ۸۰ میلیمتر و بیشتر)	۹۶۵۸۱ کیلومتر
تعداد تصفیه خانه های در مدار	۹۰ واحد
تعداد آزمایشگاه های آب	۲۱۱ واحد

وجود ۲۴۴۴۷ کیلومتر شبکه فاضلاب و ۱۱۲۸۸۲ کیلومتر شبکه انتقال و توزیع آب که بیش از نیمی از آنها بالای ۸ سال عمر دارند موکد آن است که تاکنون قطعا دچار خوردگی کم و زیاد گردیده اند.

لذا وجود این حجم لوله در شرایط مختلف محیطی، آب و هوای و عبور دهنده آب یا فاضلاب با مشخصات مختلف کیفی آنها را دچار انواع خوردگی می نماید. قطعا ارایه راه حل در خصوص پیشگیری و کنترل خوردگی نیاز به مطالعات جامع و کافی در شرایط مختلف تولید لوله، اجرا، بهره برداری و نگهداری را طلب می نماید.

۳-۲ خوردگی جدار خارجی لوله ها

۳-۳-۱ عوامل موثر در خوردگی جدار خارجی لوله ها

جدار خارجی لوله های قرار گرفته در زیرزمین تحت تاثیر عواملی مانند: نوع خاک، ترکیب شیمیایی، رطوبت و تراکم اکسیژن آن و همچنین متغیر بودن جنس و ترکیب خاک در نقاط مختلف خط لوله و فعالیت میکروارگانیسمها مورد حملات خوردگی قرار می گیرند. انواع خوردگی های جدار خارجی لوله ها که در اثر عوامل محیطی ایجاد می گردند عبارتند از:

۱-۳-۲ خوردگی حاصل از پیل غلظتی: این نوع خوردگی در اثر قرار گرفتن لوله در یک محیط ناهمگن حاصل می گردد. هرگونه تغییر در ترکیبات خاک، تراکم خاک و رطوبت خاک می تواند موجب تشکیل پیل غلظتی و خوردگی ناشی از آن در طول خطوط لوله گردد.

۲-۳-۱-۲ خوردگی ناشی از پیل الکترولیتی: وجود یک منبع الکتریکی خارجی در محیط که ممکن است در اثر حرکت وسایط نقلیه بر فنی و وجود تاسیسات تولید جریان الکتریسته در مجاورت خطوط لوله و همچنین وجود جریانهای سرگردان حاصل از حفاظت کاتدی تاسیسات مجاور باشد، موجب تشکیل پیل الکتریکی و خوردگی لوله می گردد.

۳-۳-۱-۳ خوردگی بیولوژیکی: در اثر فعالیتهای برخی از باکتریهای هوازی و بیهوازی موجود در خاک، لوله های فلزی تحت تاثیر خوردگی بیولوژیکی قرار می گیرند. مهمترین نوع باکتریهای موثر در خوردگی، باکتریهای بیهوازی احیاء کننده سولفات هستند که به وفور در شرایط بیهوازی خاکها، نظیر باتلاقها و خاک رس مرطوب، و غیره یافت می شوند. یونهای سولفید تولید شده به شدت بر واکنشهای کاتدی و آندی روی سطوح فلزی تاثیر گذاشته و انحلال آندی را افزایش می دهند. باکتریهای گوگردی هوازی نیز در زمینها حاوی گوگرد و مواد نفتی، داخل و یا اطراف سیستمهای فاضلاب با تولید اسید سولفوریک موجب خوردگی لوله ها بخصوص لوله های سیمانی می گردند. در خوردگی بیولوژیکی به طریق بیهوازی، باکتریهای احیاء کننده سولفات، باعث نرم شدن چدن و عمل «گرافیتی شدن» می گردد. این حالت در لوله های چدنی زیرزمین که مقدار زیادی از آهن خود را در اثر تجزیه و فساد از دست می دهند، دیده می شود. لوله ظاهرا سالم بوده ولی به شدت نرم و آسیب پذیر می گردند. در مورد استیل و آلومینیوم باکتریهای مذکور می توانند ایجاد حفره و سوراخ نمایند.

۳-۳-۲ انواع خاکها از نظر قدرت خوردگی

مهمترین ویژگی تعیین کننده خوردگی خاک، میزان مقاومت الکتریکی آن می باشد. این عامل تحت تاثیر ترکیبات شیمیایی و املاح موجود در خاک و درصد رطوبت خاک است. میزان رطوبت خاک مهمترین عامل موثر در مقاومت الکتریکی خاک بوده و بنابراین اندازه گیری مقاومت الکتریکی خاک بایستی در دو فصل خشک و تر صورت گیرد تا ارزیابی پتانسیل خوردگی، با دقت بیشتر و صحیح تر انجام گیرد. بر اساس استاندارد انجمن امور آب آمریکا (AWWA) خاکها از نظر قدرت خوردگی، به صورت زیر طبقه بندی شده است:

۱-۳-۲-۱ خاک دارای خوردگی ضعیف: در این نوع خاک نفوذ هوا و زهکش خاک مناسب بوده و رنگ خاک یکدست و بدون رگه و سطح آب زیرزمین بسیار پایین است و شامل خاکهای ماسه و لوم ماسه ای، لوم سیلتی با بافت سبک و نرم متخلخل می شود.

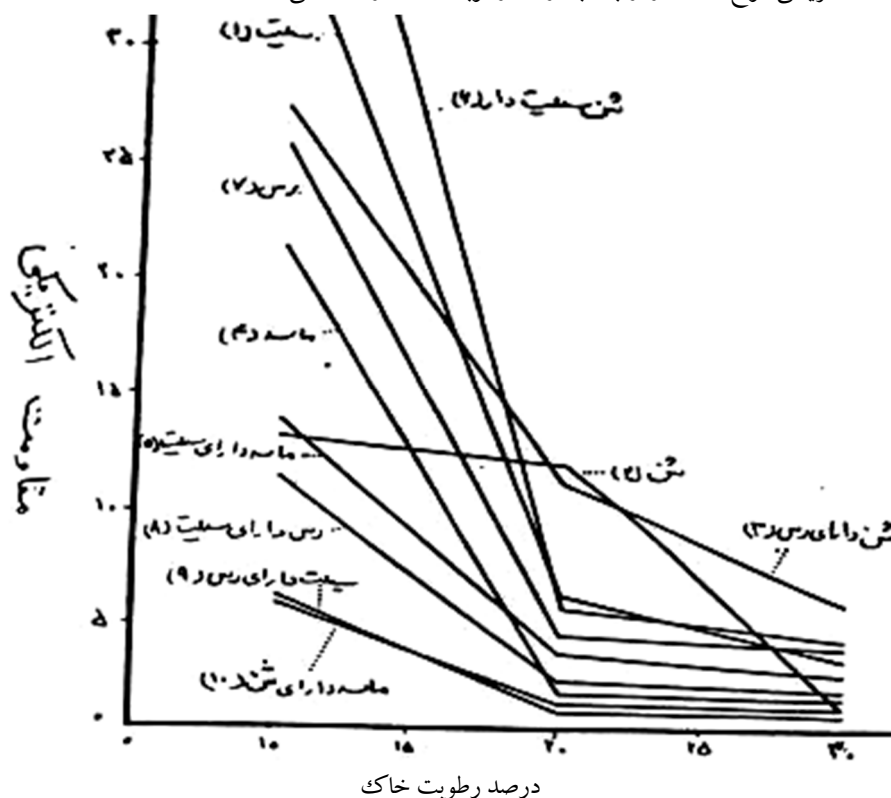
۲-۳-۲-۲ خاک دارای خوردگی متوسط: در این نوع خاک، نفوذ هوا و زهکش خاک نسبتا مناسب و دارای لایه های مختلف (زرد، قهوه ای و زرد خاکستری) است و سطح آب زیرزمینی در آن پایین است. خاکهای لوم ماسه ای، لوم لای دار و لوم رس دار در این گروه قرار دارند.

۳-۳-۲-۳ خاک دارای خوردگی زیاد: در این نوع خاک، نفوذ هوا و زهکش خاک ضعیف بوده و بافت آن فشرده و به صورت لایه ای است. سطح آب در این خاکها در عمق ۶۰ تا ۹۰ سانتیمتری قرار دارد. خاکهای لوم رس دار و رسی جزء این گروه می باشند.

۴-۳-۲-۴ خاک دارای خوردگی بسیار زیاد: نفوذ هوا و زهکشی در این نوع خاک بسیار کم بوده و سطح آب زیرزمینی تقریبا در سطح زمین قرار دارد، خاک دارای مواد آلی و گیاهی و رس بسیار زیاد است. خاکهای مردابی، لجنی و رسی دارای مواد آلی و جنگلی در این گروه قرار دارند.

در یک بررسی مطالعاتی که اداره آب فیلادلفیا برای بررسی و تعیین رابطه بین مقاومت الکتریکی خاک و اشباع و خوردگی جدار خارجی لوله انجام داده است، نشان می دهد که ارتباط ضعیفی بین میزان خوردگی و مقاومت الکتریکی خاک وجود دارد. زیرا رطوبت خاک معین شده برای هر نوع خاک، رطوبت اشباع بوده است ولی معمولا رطوبت خاک در محل حالت طبیعی، به صورت غیر اشباع است و در نتیجه مقاومت

الکتریکی گزارش شده، میزان واقعی نبوده است. همچنین نمونه های مورد آزمایش ممکن است کیفیت واقعی خاک را نداشته باشند. شکل (۲) - (۲) ارتباط بین مقاومت الکتریکی انواع خاکه در ارتباط با درصد رطوبت خاک را نشان می دهد [۳۳].



شکل (۲-۲) ارتباط بین مقاومت الکتریکی انواع خاکها و درصد رطوبت چند نوع خاک [۳۳].

برای ارزیابی خوردگی خاک روشهای استاندارد مختلفی وجود دارد. برای مثال در روش ارزیابی استاندارد ANSI/AWWA، فاکتورهای موثر در خوردگی خاک، در شرایط و وضعیتهای مختلف اندازه گیری شده و امتیازاتی برای مقادیر اندازه گیری شده در نظر گرفته می شود که مجموع امتیازات در هر نوع خاک با توجه به فاکتورهای مورد نظر، میزان خورنده بودن خاک نشان می دهد. جدول (۲-۶) ANSI/AWWA را در روش ارزیابی خورنده بودن خاک نشان می دهد [۳۳].

جدول (۲-۶) استاندارد ANSI/AWWA در روش ارزیابی خورنده بودن خاکها [۳۴].

Measuring item	Measuring value	Marks
Specific resistance (value at the dwpth of burial of pipe measured using soil bar soil measured using soil box)	>700Ω-cm	10
	700~1,000	8
	1,000~1,200	5
	1,200~1,500	2
	1,500~2,000	1
	>2,000	0
pH	0~2	3

	2~4 4~6.5 6.5~7.5 7.5~8.5 8.5	5 0 0 0 3
Pedox potential	100mv 50~400 0~50 0	0 3.5 4 5
Mpisture content	Poor drainage and constantly wet. Drainage quite good and wet in general. Good drainage and generally dry.	2 1 0
Suifide	Detected Trace None	3.5 2 0

با توجه به جدول بالا، در صورتیکه مجموع امتیازات در هر نوع خاکی بیشتر از عدد ۱۰ باشد، استفاده از روشهای حفاظتی همچون پوششها و غیره برای لوله های فلزی ضروری است. رابطه بین قابلیت خوردگی و مقاومت الکتریکی خاک نیز در تعیین خورنده بودن خاکها مورد استفاده قرار می گیرد. بر اساس استاندارد شماره ۹۲۵ وزارت نفت ارتباط بین قابلیت خوردگی خاکها و میزان مقاومت الکتریکی آنها به صورت جدول (۷-۲) نشان داده شده است.

جدول (۷-۲) ارتباط بین مقاومت الکتریکی و خوردگی خاکها [۱۱].

مقاومت الکتریکی (ohm/.cm)	قابلیت خوردگی
<۵۰۰	بسیار زیاد
۱۰۰۰-۵۰۰	زیاد
۲۰۰۰-۱۰۰۰	متوسط
۱۰۰۰۰-۲۰۰۰	ضعیف
<۱۰۰۰۰	غیر خورنده

۲-۴ پوششهای جداره لوله

استفاده از پوششها از زمانهای بسیار دور به منظور حفاظت وسایل و تجهیزات از اثرات تخریبی عوامل محیطی بر آنها، رایج بوده است. پوششها دارای انواع مختلفی است که هر یک دارای خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی ویژه ای می باشد. بسته به نوع پوشش مورد استفاده، عمل حفاظتی پوششها از طریق جلوگیری از تماس بین محیط و جسم مورد نظر و یا کاهش این تماس، انتشار مواد کندکننده حملات محیط بر روی جسم و تولید جریانهای الکتریکی، اعمال می گردد. بطور کلی هدف اصلی از کاربرد پوششهای محافظ در لوله ها، ایجاد مانع و عایق بین جدار خارجی و داخلی لوله با محیط اطراف آن می باشد که از این طریق از انجام واکنشهای شیمیایی و عبور جریان، پیشگیری شده و خوردگی در لوله کنترل و کاهش یابد [۱].

۲-۴-۱ انواع پوششهای داخلی و خارجی لوله ها

بطور کلی پوششها از نظر جنس و مواد ساخته شده به ۳ گروه عمده تقسیم می شوند:

- پوششهای فلزی (Metalic Coating)
- پوششهای معدنی (Inorganic Coatings)
- پوششهای آلی (Organic Coating)

۱-۴-۲ پوششهای فلزی: در این نوع پوششها از طریق آلیاژسازی و یا بطریقه الکتروشیمیایی در محیط الکترولیت، لایه ای از یک پوشش فلزی بر روی سطح فلزی مورد نظر قرار می گیرد که از خوردگی فلز جلوگیری و محافظت می کند. پوششهای فلزی خود بر دو نوع هستند:

گروه اول شامل فلزات نجیب مانند نیکل، مس، سرب و کرم است که دارای مقاومت زیاد در برابر خوردگی و عوامل خوردنده می باشند. نکته مهم در این پوششها اینست که بایستی بدون منفذ باشند و یا منافذ موجود با مواد مناسب پر شوند.

گروه دوم شامل فلزات قربانی شونده، همچون روی، کادمیوم، آلومینوم و قلع است. در این پوششها فلز پوشش داده شده بطریق کاتدی، تازمانیکه پوشش در محیط باقی است محافظت می گردد و فلز پوششی بجای فلز پوشش داده شده خورده شده و قربانی می گردد. لوله های گالوانیزه از اینطریق محافظت می شوند که لایه ای از روی، نقش آند قربانی شده را ایفا کرده و به عنوان پوشش محافظ از فولاد در مقابل عوامل خوردگی حفاظت می کند.

۲-۴-۱-۲ پوششهای معدنی: پوششهای معدنی شامل انواعی از پوششهای مختلف است که برخی از انواع آن که متداول بوده و کاربرد بیشتری دارند، مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۴-۱-۲-۱ لعابهای شفاف (Vitreous enamels): این لعابها شامل ترکیبات مختلفی که ضرورتاً شیشه ای بوده و دارای قابلیت پخش خوبی روی فلز هستند، می باشد. ترکیبات لعاب بصورت نمکها و اکسیدهای شیشه ای بوده و اغلب همراه با پیگمانهای رنگی است، بصورت پودر و یا مایع روی سطوح آماده شده فلزات، پوشش داده شده سپس در کوره حرارت داده می شود بطوریکه ذرات پخته شده و تشکیل یک باند با فلز دهند. لعابها دارای مقاومت زیادی در برابر خوردگی و سایش هستند.

پوششهای لعابی داخلی بدون منفذ یا شکاف بوده و بدون حفاظت کاتدی نیز مورد استفاده قرار می گیرد. از معایب عمده این پوششها، قابل انعطاف نبودن و شکننده بودن در برابر صدمات مکانیک و شوکهای حرارتی را می توان نام برد.

۲-۴-۱-۲-۲ سرامیکها - سرامیکهای شیشه ای و مواد مشابه (Ceramics): سرامیکها مواد بی شکلی هستند و از ذرات کریستالی تشکیل شده اند که در زمینه های مختلفی از مواد شیشه ای و شفاف بهم چسبیده اند. این مواد نه تنها בעلت مقاومت حرارتی بالا بلکه به علت مقاومت به سائیدگی دارای اهمیت هستند. مقاومت حرارتی پوشش سرامیکی بدلیل وجود باریوم، اکسید کرومیک و گل لعابدار می باشد. این مواد بصورت ذرات ریز روی یک سطح آماده شده بوسیله شن پاشی، اسپری شده و پس از خشک شدن در دمای ۱۰۱۰ درجه سانتیگراد برای ۳ تا ۱۰ دقیقه حرارت داده می شود.

سرامیکهای شیشه ای مواد پلی کریستالین هستند که در دو مرحله حرارت دهی، به صورت یک ماده شفاف تولید می شوند. برخی سرامیکهای شیشه ای از شیشه های سیلیکات آلومینیوم و سیلیکات آلومینیوم منیزیم مشتق شده اند. پوششهای سرامیک داخلی در لوله های انتقال پنیوماتیک در معادن، کارخانه های ساخت لوله های آهنی و فولادی، کارخانه های تولید الکتریسته و سیمان کاربرد دارند.

۲-۴-۱-۲-۳ پوششهای سیمانی و بتنی (Cements & Concrete Coatings): سیمان پرتلند پرمصرف ترین ماده برای تهیه پوششهای داخلی و خارجی ملات سیمان و بتن می باشد. سیمان پرتلند یک اصطلاح برای موادی است که دارای مقاومت سولفاته بوده و سریعاً سخت می گردند. سیمان پرتلند در مواردی چون حفاظت در مقابل صدمات مکانیکی و خوردگی داخل و خارج لوله و شن ریزی در آب دریا، کاربرد دارد. پوششهای سیمانی دارای مزایایی چون ارزانی انبساط کافی تقریباً برابر فولاد و سهولت در کاربرد و تعمیرات می باشد. این پوششها به روشهای مختلفی از جمله اسپری کردن، ماله کشی، سانتریفوژ و قالب ریزی می توانند بکار روند. ضخامت این پوششها از ۵ تا ۲۵ میلیمتر بوده و پوششهای با ضخامت بیشتر با شبکه سیمی یا حلقه های ساخته شده از فولاد به قطر ۸-۵ میلیمتر تقویت می شوند.

حفاظت داخلی لوله های چدنی و فولادی بوسیله ملات سیمان پرتلند بخوبی معمول و متداول است. این نوع پوششها بیشتر از ۶۰ سال است که در آمریکا مورد استفاده قرار می گیرد. پوششهای داخلی ملات سیمان همچنین برای لوله های انتقال آب دریا و آبهای معدنی و همینطور برای مواد دیگر نظیر لوله های نفت مورد استفاده قرار گرفته اند. پوشش اتصالات و پیوندها معمولاً با دست انجام می گیرد. جدول (۲-۸) ضخامت معمول پوشش را برای قطرهای مختلف لوله نشان می دهد.

جدول (۲-۸) ضخامت پوشش برای قطرهای مختلف لوله [۳۵].

ضخامت (میلیمتر)	قطر (میلیمتر)
-----------------	---------------

۴-۵	۱۵-۲۰۰
۶	۲۰۰-۴۵۰
۱۰	بالا تر از ۴۵۰

ملات سیمان مخلوطی از ماسه و سیمان به نسبت $\frac{1}{1}$ یا $\frac{1}{1.5}$ و آب می باشد. پوشش داخلی سیمانی معمولاً تشکیل باند و پیوندی با جدار لوله نمی دهد ولی بعلا سختی و فرم غیرقابل گسیختن، در محل خود مستحکم می گردد. وجود هیدروکسید کلسیم ، PH را در محیط بین پوشش و جدار لوله بالاتر از ۹ نگه می دارد و در چنین شرایطی، آهن بطور نرمال غیرفعال بوده و خورده نمی شود که این خاصیت قلیایی سیمان عامل مهمی در حفاظت از خوردگی لوله بشمار می آید.

پوشش داخلی سیمانی لوله ها ممکن است توسط آبهای سبک و بخصوص ابهای نمکزدایی شده شسته شود که برای پیشگیری از پوششهای قیری استفاده می کنند. پوشش سیمان پرتلند برای پوشش خارجی لوله ها اغلب بصورت بتن استفاده می شود. مثال این گونه پوششهای سنگین، خطوط لوله قرار گرفته در رودخانه ها یا دریاها می باشد. بطور معمول از گرانت درجه بندی شده، میلگرد آهنی، ماسه و سیمان پرتلند تشکیل می گردد. برای خطوط لوله زیر دریایی یک پوشش اولیه مانند کلتار برای اطمینان از حفاظت کامل لازم است. پوشش سیمانی بایستی به اندازه ای محکم باشد تا در جریان کارگزاری و حمل و نقل آسیب نبیند.

یکی از مشکلات و معایب پوششهای سیمان پرتلند، مقاومت ناچیز به شوکهای حرارتی و فشارهای مکانیکی و مقاومت کششی کم می باشد. مواد افزودنی مختلف برای پوششهای داخلی سیمانی نظیر رزین اپوکسی بطور تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. در انگلستان اضافه کردن رزینهای اپوکسی غیرقابل پخش در آب به مقدار زیادی مقاومت مکانیکی پوشش را افزایش داده است. افزایش مقدار ۰/۱ تا ۰/۴ آکریلیک به سیمان، موجب افزایش انعطاف، چسبندگی و مقاومت به خوردگی می گردد. برای افزایش مقاومت مکانیکی سیمان از مواد دیگری چون پشم شیشه و فیبر نیز استفاده شده است.

۲-۴-۱-۲-۴ رنگهای سیلیکات معدنی (Inorganic Silicate Paints): این رنگها که از انواع مهم پوششهای حفاظتی بشمار می آیند، شامل رنگهای دارای ترکیبات روی همراه با سیلیکات هستند. مقدار روی این رنگها بیش از ۹۲ درصد وزنی تا ۹۵ درصد است. سیلیکات بعنوان نگهدارنده ذرات روی در پوشش می باشد. در مقادیر بالای روی، یک تماس الکتریکی ، بین ذرات مستقل و فولاد پوشش داده شده وجود دارد که موجب حفاظت از طریق فرآیند قربانی شدن می گردد. این نوع واکنش بعد از مدتی که بیشتر ذرات روی خورده می شوند، متوقف شده و تماس الکتریکی قطع می گردد. با وجود این ، بعلا اینکه منافذ موجود در پوشش با محصولات نامحلول خوردگی روی پر می شوند، حفاظت انجام می گیرد [۱۲۱].

۲-۴-۱-۳ پوششهای آلی : انواع پوششهای آلی داخلی و خارجی لوله ها را می توان به چند گروه عمده تقسیم نمود:

- پوششهای پایه قیری آسفالت و کلتار (قطران زغال سنگ)
 - رنگها و پوششهای مشابه نظیر اپوکسی ، پلی اورتان ، وینیل ، لاستیک کلرینه و رزینهای الکید
 - پوششهای پلاستیکی نظیر پلی اتیلن ، نایلون و اپوکسی ترکیبی مایع و غیره
 - پوششهای نواری
 - فیلمهای حفاظتی موقت
 - مواد آلی حفاظتی نظیر کف پلی اورتان برای موارد خاص
- هر کدام از پوششهای اشاره شده به تفصیل مورد بحث قرار می گیرد:

۲-۴-۱-۳-۱ پوششهای قیری آسفالت و کلتار (Coal-Tar & Asphaltic Bitumen Coatings): آسفالت یک قطران نفتی است که نسبت هیدروژن به کربن در هیدروکربنهای آن بین ۰/۸ تا ۱/۶ می باشد. وقتی که در تقطیر نفتی هیدروکربنهای عطری ایجاد می شوند، موادی

چون گروههای متیل بجای هیدروژن قرار می گیرند، وزن مولکولی آسفالت و کلتار مشابه بوده و حدود ۲۵۰-۲۰۰ amu است ولی وزن مخصوص آنها کمتر از پلی مریاست [۳۶].

کلتار، قطران زغال سنگ است که نسبت به هیدروژن به کربن آن از ۰/۳ تا ۰/۷ می باشد. کلتار اصولاً یک هیدروکربن عطری است ولی از آنجا که هیدروکربنهای عطری خالص دارای فرمول ترکیبی C_nH_n با نسبت هیدروژن به کربن ۱ به ۱ می باشند، کلتار شامل پلی سیکلیک های عطری فشرده است که دارای نسبت هیدروژن به کربن کمتر از واحد می باشند [۳۶].

کلتار بیشتر از انواع دیگر پوششها مورد استفاده قرار گرفته است، اگر چه پوششهای جدیدتری نیز برای اهداف مختلف بکار گرفته می شود. از مهمترین ویژگیهای کلتار، مقاومت آن به نفوذ آب، چسبندگی خوب، کاربرد نسبتاً آسان و مقاومت در برابر تجزیه بیولوژیکی نه تنها میکروبی بلکه مقاومت در برابر سوراخ شده بوسیله ریشه های گیاهی و جویده شده توسط حیوانات رامی توان نام برد.

در قرن نوزدهم استفاده از کلتار به عنوان پوشش لوله، توسط سازندگان و تولید کنندگان آهن، کک و گاز ترویج داده شد. کلتار به تنهایی برای پوشش حفاظتی لوله مناسب نمی باشد. تقطیر ویسکوزیته کلتار را افزایش می دهد، اما با این حال هنوز در مقابل دما بسیار تغییر پذیر است و یک پوشش دارای ویژگیهای ایده آل در ۱۵ درجه سانتیگراد، ممکن است در درجه حرارت صفر و کمتر شکننده شده و در درجه حرارت حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بطور غیرقابل قبولی نرم شود. این مشکل بوسیله پخش زغال در قطران تصفیه شده در درجه حرارت حدود ۳۰۰-۲۵۰ درجه سانتیگراد به مقدار زیادی مرتفع می گردد.

پوششهای کلتار برای حفاظت لوله های زیرزمینی، معمولاً به چند طریق تقویت می شوند. در گذشته پارچه های کفنی بافته شده برای این منظور استفاده می شدند که در خاک پوسیده شده و یا آب را از محیط جذب می کردند که در چنین شرایطی رشد باکتریهای کاهنده سولفات اتفاق می افتد. فایبر شیشه ای به ضخامت ۰/۵ میلیمتر بطور وسیعی استفاده شده است.

عمده ترین استانداردهایی که برای پوشش کلتار وجود دارند عبارتند از: (BS 4164 (1980), AWWAC.203 (1978). ضخامت کل یک پوشش تقویت شده قطران زغال سنگ بین ۲/۵ تا ۳/۵ میلیمتر می باشد.

آسفالت های نفتی در دو نوع کلی تولید می شوند:

۱- تقطیر مستقیم که نوع سخت و دارای نقطه ذوب بالا می باشد.

۲- اکسید کردن آسفالت بوسیله دمیدن هوا به داخل آن که در دمای بالاتر نرم می شود. معمولاً حداقل نقطه نرم شدن مشخصی برای پوشش آسفالت لوله ها تعیین می گردد بطوری که آسفالت اکسید شده دارای یک برتری نسبت به نوع دیگر می باشد که بهمین علت داشتن حالت لاستیکی بوده و معمولاً ترجیح داده می شود.

استانداردهای عمده برای پوششهای آسفالت عبارتند از: انستیتو تعیین مشخصات (m-1) و (BS 4147 (1980)

پوششهای آسفالت دقیقاً به همان طریق پوششهای کلتار مورد استفاده قرار می گیرند و تنها درجه حرارت در پوششهای آسفالت کمی کمتر است. تفاوت شیمیایی اساسی بین کلتار و آسفالت، در هیدروکربنهای عطری تشکیل دهنده می باشد. پوششهای کلتار مقاومت بیشتری نسبت به محصولات نفتی و هیدروکربنهای مشابه نشان می دهند. همچنین این پوششها دارای اثرات باکتری کش بوده و مقاومت خوبی در برابر تخریب میکروبی و صدمه بوسیله نفوذ ریشه ها دارند. شواهدی وجود دارد که نشان می دهد کلتار تمایل کمتری به جذب آب داشته و چسبندگی بهتری به فولاد تمیز شده دارد.

۲-۳-۱-۲ رنگها و پوششهای سطحی مشابه

۲-۳-۱-۳-۱ اپوکسی (Epoxy): یکی از پوششهای عمده برای پوششهای خارجی و داخلی، اپوکسی خالص و رنگهای مشابه و وابسته است که دارای مقاومت بالایی نسبت به مواد شیمیایی و سائیدگی می باشند. بطور کلی رنگهای وابسته به اپوکسی ها به دو دسته اند، دسته اول در دمای معمول خشک می شوند ولی دسته دوم نیاز به حلال دارند. تشکیل فیلم در هر نوع بوسیله پیوند رزین اپوکسی با یک واکنش دهنده نظیر پلی آمین یا پلی آمید در دمای متعارف یا با یک رزین فنولیک یا آمینورزین که نیاز به دمای بالا دارد، انجام می شود.

محصولات این واکنشها در واکنشهای دیگری شرکت کرده و تبدیل به ساختمان پلیمریک می گردد. پلی آمیدها عاملهایی با وزن مولکولی ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ می باشند. واکنش بعدی پلی آمید با اپوکسی منجر به افزایش قابلیت انعطاف آن می گردد [۳۷].

پوششهای اپوکسی که با حلال رقیق شده اند بوسیله قلم مو و یا اسپری کردن بسته به شرایط بکار می روند. ضخامت پوشش از حدود ۲۵ میکرومتر برای پرایمر تا ۱۲۵ میکرومتر برای پوششهای میانی و نهایی، می باشد. زمان تثبیت پوشش بستگی به درجه حرارت دارد و معمولاً یک حداقل درجه حرارت مشخصی تعیین می گردد. تثبیت کامل ممکن است تا چند روز طول بکشد و معمولاً در بیشتر پوششها، بیش از ۲۴ ساعت است.

پوششهای بدون حلال از اپوکسیهای مایع همراه با پلی آمین دارای ویسکوزیته کم یا پلی آمید دارای ویسکوزیته بالا تشکیل می شود. ضخامتهای فیلم خشک بین ۳۵۰-۲۵۰ میکرومتر در محیطهای محدود مناسب می باشد. فیلمها سخت و بادوام بوده و دارای مقاومت شیمیایی بالا بوده و برای تقویت آن فیبر شیشه ای مناسب است. بمنظور بهبود خواص پوشش، اپوکسی بدون حلال اغلب بصورت گرم مصرف می شود. از کلتار همراه با اپوکسی اغلب برای افزایش مقاومت به آب و افزایش ضخامت فیلم استفاده می شود. این عمل همچنین موجب کاهش قیمت شده و کیفیت پوشش را در بیشتر شرایط بهبود می بخشد. پوششهای اپوکسی برای پوشش داخلی لوله هایی که لازم است هم از مواد جدار لوله و هم از مواد انتقالی داخل لوله محافظت و از آلودگی آن جلوگیری شود، پیشنهاد و توصیه می گردد. پوششهای داخلی اپوکسی همچنین به علت داشتن مقاومت بالا در مقابل سائیدگی، برای لوله های حامل مایعات دارای شن مواد جامد نظیر شن و ماسه مناسب هستند. رنگ اپوکسی با ضخامت ۳۵-۳۰ میکرومتر بعنوان کاهنده اصطکاک برای پوشش داخلی خطوط لوله گاز طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است که بطور موثر ظرفیت لوله افزایش یافته است.

پوششهای اپوکسی برای حفاظت لوله های غیرفلزی نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرند. مخصوصاً برای پوشش داخلی لوله های بتنی و آزبست انتقال فاضلاب خام استفاده می شود. اپوکسی های بدون حلال با ضخامت ۶۰۰-۴۰۰ میکرومتری در پوشش داخلی بکار رفته است. برای فاضلاب سپتیک بایستی دقت شود که پوششهای داخلی کاملاً بدون نقص بوده و مورد بازمینی قرار گیرند. سیستمهای اپوکسی بطور وسیعی برای حفاظت سطح خارجی لوله ها استفاده می شود. آماده سازی سطوح بخصوص برای پوشش مجدد برای ایجاد چسبندگی لازم بسیار ضروری است.

۲-۲-۳-۱-۴-۲ پلی اورتان (Polyurthan): یک دسته مهم دیگر از پوششهای داخلی و خارجی لوله ها، رزینهای پلی اورتان هستند. این مواد از واکنش بین مواد دارای گروه ایزوسیانات و یک اتم هیدروژن فعال از ترکیبات دارای هیدروژن نظیر پلی اترها، پلی استرها، برخی روغنهای گیاهی یا رطوبت اتمسفر بدست آمده است، ساخته می شود.

پوششهای پلی اورتان مقاومت خوبی به آب، حلالها، روغنها، اسیدهای آلی و معدنی و قلیاها دارند. اگرچه مقاومت قلیایی آن کمتر از اپوکسی است. رزینهای اورتان همچنین چسبندگی خوبی به فلزات داشته و دارای مقاومت خوب نسبت به سایش می باشند و بطور کلی دوام خوبی دارند. مکانیزم عمل آوری برخی از پلی اورتان ها پیچیده بوده و در چند مرحله انجام می شود. ایزوسیاناتهای آروماتیک و آلیفاتیک در عمل آوری موجب واکنش سریعتر و بهتر می گردند. روغنهای آلکید روغنی دارای هیدروکسیل بعنوان واکنش کننده ها مورد استفاده قرار می گیرند. روغن کرچک معمولاً همراه با پلی استرها بدون روغن استفاده می شود که نه تنها هزینه ماده خام را کاهش می دهد، بلکه مقاومت به آب و انعطاف فیلم را نیز افزایش می دهد. رزینهای اپوکسی معمولاً به عنوان پلی اترها و با ایزوسیاناتها واکنش انجام می دهند. این عمل در درجه حرارتهای معمول براحتی انجام شده و فیلمهای مقاوم به آب تشکیل می دهد.

کلتار نیز با پلی اورتانها در تشکیل یک پوشش لوله دارای حفاظت خوب مورد استفاده قرار می گیرد. این پوشش بعلاوه ویژگیهایی که دارد برای سرویسهای غوطه ور و زیرزمین مناسب است. همچنین این پوششها برای استفاده در محل نیز کاربرد خوبی دارد.

پوششهای بدون حلال پلی اورتان در شکلها و خصوصیات گوناگون در دسترس می باشند. یک ترکیب الاستومر بعنوان یک پوشش داخلی بروس ساتریفورژ با ضخامتی از ۲۵۰ میکرومتر تا چندین میلیمتر بکار رفته است. اظهار می شود، استفاده از این نوع پوششهای داخلی در لوله های انتقال مواد شیمیایی موجب افزایش طول عمر، چندین برابر لوله های بدون پوشش شده است.

۳-۲-۳-۱-۴-۲ وینیل (vinyl): ترکیبات زیادی از وینیل وجود دارد که دارای فرمول کلی $\text{CH}_2=\text{CHX}$ می باشند که X ممکن است CH_3 ، COO ، Cl و یا عوامل دیگر باشند. دو نوع ترکیبات وینیل پلیمری که در پوششهای لوله دارای اهمیت می باشند عبارتند: کلراید و استات و پلیمرهای مربوطه با ترکیب وینیل استات در پلیمر وینیل کلراید، ماده ای تولید می شود که محلول تر بوده و از پوششهایی که صرفاً از وینیل

کلراید هستند، مناسبتر می باشد. وزن مولکولی پلیمرهای وینیل کلراید- وینیل استات استفاده شده در پوششها نسبتاً کم بوده و حدوداً ۱۰۰۰ می باشد [۳۸].

تنهایی در پوششهای حفاظتی فلزات استفاده شده اند اما بعنوان پلیمر همراه با وینیل کلراید دارای اهمیت بیشتری است. نسبت رزین های پلی وینیل کلراید به استات از ۸/۲۰ تا ۹۰/۱۵ می باشد. گروههای قطبی اغلب در پلیمر برای افزایش چسبندگی به سطوح فلزی، شرکت می کنند. این عمل با اضافه کردن افزودنیهای اسیدهای کربوکسیلیک به مقدار کم (حدود ۱٪) نظیر اسید سالتیک حاصل می گردد.

۲-۴-۱-۳-۲-۴ لاستیک کلرینه شده (Chlorinated Rubber): رنگهای لاستیک کلرینه شده نسبت به مواد شیمیایی، آب، اسیدها و قلیاها مقاوم بوده و به طور وسیعی برای سطوح خارجی لوله های در معرض اتمسفر و کاربرد صنعتی و دریایی مورد استفاده قرار می گیرد. مقاومت به سائیدگی آن کمتر از دیگر رزینهاست. مشکل عمده در رنگهای لاستیک کلرینه، باقیماندن حلال می باشد که اغلب در فیلمهای ضخیم تا هفته ها حلال باقی می ماند. این مسئله موجب نرم ماندن پوشش و احتمال صدمه دیدن آن می گردد. بخصوص اگر در معرض نور خورشید و حرارت قرار گیرد، ممکن است تاول برند. برای کاهش این مشکل از رزینهای دیگر نظی آلکیدها، برای بهبود کیفیت لاستیک کلرینه استفاده می شود.

پوششهای لاستیک کلرینه را می توان بوسیله اسپری، قلم مو یا غلطک بنا به شرایط و نیازها، بکار برد. اغلب آنها به عنوان پوشش نهایی و لایه پرایمر یا پوششهای فلزی اسپری شده روی سطوح فولادی با نقش بهتر و کاربرد آسانتر مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۴-۱-۳-۲-۵ رزینهای آلکیدی (Alkyd Resins): رزینهای آلکیدی پلی استرهای با وزن مولکولی متوسط هستند که از ترکیب الکلای پلی هیدریک با مخلوطی از اسیدهای چرب با مونوباسیک و اسیدهای دی باسیک حاصل می گردند. الکلای معمول مورد استفاده عبارتند از: اتیلن گلیکول (دی هیدریک) گلیسرول (تری هیدریک) و پنتا اریتریتول. معمولترین اسید دی باسیک مورد استفاده، فتالیک آن هیدریک می باشد و اسید چرب غالباً نوعی از روغن گیاهی است که یک تری استر اسید چرب و گلیسرول می باشد. از ویژگیهای مهم پوشش های نوع رزینهای آلکیدی خشک شونده در هوا، کاربرد آسان و پایداری آنها بخصوص در محیطهای خورنده می باشد. ضعف اصلی این پوششها مقاومت کم آنها، قلیائیت می باشد.

شرکت استایرن پلیمریزه شده یا وینیل تولوئن در یک رزین آلکیدی، مقاومت شیمیایی را افزایش می دهد. آلکیدهای دارای وینیل تولوئن، مقاومت خوبی به آب و قلیائیت دارند و در پرایمر صنعتی خشک شونده در هوا و سیستمهای پوشش نهایی مورد استفاده قرار می گیرند. آلکیدهای دارای ایزوسیانات دارای مقاومت بهتری از آلکیدهای معمولی به آب و مواد شیمیایی هستند. اگر چه این پوششها دارای چسبندگی میانی ضعیف بوده و جلای کمتری نشان می دهند. از دیگر مواد بهبود دهنده نظیر آلکیدهای آکریلیک و سیلیکون برای افزایش وزن و بهتر شدن خواص سختی، دوام و مقاومت شیمیایی آن نیز استفاده می شود.

۲-۴-۱-۳-۲-۶ رزینهای اپوکسی استر: این رزینها از طریق استری شدن رزینهای اپوکسی ($n=4$) همراه با اسیدهای چرب، تشکیل می گردند که در صورت استفاده از اسیدهای چرب غیر اشباع، خشک شونده در هوا بوده و نسبت به رزینهای معمول آلکیدی ارجحیت دارند. رزینهای اپوکسی نیمه خشک شونده یا غیر خشک شونده، به طور کلی همراه با رزینهای آمینو مصرف می شوند. اسیدهای چرب مورد استفاده از تعداد زیادی روغنهای گیاهی به دست آمده اند و اپوکسی استرهای مختلف نسبت به طول روغن طبقه بندی می شوند. ترکیب اسید چرب، ویژگیهای دوام و ماندگاری فیلم را تعیین می کند و ترکیب اپوکسی به عنوان ستون فقرات و پایه پوشش، در ویژگیهای مقاومت شیمیایی و مکانیکی پوشش موثر است.

۲-۴-۱-۳-۲-۷ پوششهای پلاستیکی: ترموپلاستیکها به صورت پوششهای ضخیم و کاربرد خیلی سریع به عنوان پوششهای با صرفه اقتصادی به کار گرفته می شوند. این پوششها همچنین چسبندگی خوبی به سطح آهنی آماده شده نشان می دهند. دارای مقاومت زیاد به سائیدگی، ویژگیهای ضد خوردگی خوب و ظاهری جالب می باشند.

پوششهای پودر اپوکسی نیز به عنوان یک پوشش نسبتاً نازک و در نتیجه قابل رقابت با پوششهای ضخیم تر کلتار و آسفالت، از نظر قیمت، در لوله های زیرزمینی قابل توجه و اهمیت است

۸-۲-۳-۱-۴-۲ پوششهای پلی اتیلن (Polyethylene): از انواع پوششهای مختلف پلی اتیلن دو نوع آن در حفاظت لوله ها دارای اهمیت و کاربرد هستند که عبارتند از: پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) و پلی اتیلن با چگالی زیاد (HDPE). تفاوت های اساسی بین این دو، در وزن مخصوص و شاخص جریان مذاب (MFI) می باشد.

پلی اتیلن ماده ای است جامد، بی رنگ یا سفید شیری، مقاوم نسبت به مواد شیمیایی، آب، اسیدها، قلیاها و غیره و نسبت به سایش، ضربه و کشش مقاومت مکانیکی زیادی دارد. نقطه ذوب آن حدود ۱۱۰-۸۰ درجه سانتیگراد است و دارای وزن مخصوص حدود ۰/۹۲ می باشد. LDPE در بیشتر عملیات پوشش دهی لوله ها، با ضخامت حدود ۳ میلیمتر (بسته به قطر و ضخامت لوله) مورد استفاده قرار می گیرد. ضخامتی برابر ۱ میلیمتر می تواند در مقابله با خوردگی کافی باشد و ضخامت بیشتر حفاظت مکانیکی را افزایش می دهد. کاربرد این پوششها به دو روش است.

در روش اول، ابتدا بوسیله شن پاشی با استاندارد (Sa2 (SIS 055900) لوله ها تمیز و آماده می شوند. سپس لوله ها حرارت داده می شود تا دمای کافی برای چسبندگی خوب بین پلی اتیلن و لوله فولادی بدون استفاده از پرایمر حاصل گردد. ترکیب پودری پلی اتیلن از بالای لوله های در حال چرخش، توسط نازل هایی روی لوله پاشیده می شود تا اینکه ضخامت مورد نیاز تامین شود. به علت ساختمان مولکولی پلی اتیلن که دارای وزن مولکولی زیاد غیرقطبی می باشد، چسبندگی کمی به فلز دارد. در روش اول چسبندگی بوسیله یک واکنش ترکیبی بین پروفیل سطح فولاد و شرایط پوشش دهی به ویژه حرارت به دست می آید. در حضور اکسیژن و در تماس با یک سطح فولادی کاتالیز شده و در درجه حرارت بالای ۲۸۰ درجه سانتیگراد، گروه های قطبی مورد نیاز در پلی اتیلن ایجاد می گردند.

روش دوم که بوسیله اکستروژن انجام می گیرد دارای دو شکل است. در شکل اول پلی اتیلن مذاب به صورت فیلم مسطح از اکسترو در خارج شده و به صورت مارپیچ بدور لوله در حال گردش، پیچیده می شود. این روش معمولاً برای لوله هایی با قطر ۳-۰/۳ متر مورد استفاده قرار می گیرد. اگرچه برای لوله های با قطر بیش از ۲ متر نیز استفاده شده است در شکل دوم پلیمر مذاب به صورت تیوب با غلاف بوسیله دستگاه های اکسترو در روی لوله های با قطر کمتر از ۰/۶ متر کشیده می شود و با تخلیه هوای زیر پوشش چسبندگی لازم بین پوشش و سطح فلز لوله ایجاد می گردد. آماده سازی لوله ها برای هر دو شکل فوق مشابه بوده و ابتدا لوله بوسیله شن پاشی تمیز می شود. برای چسبندگی بهتر و مناسب در پوششهای LDPE لازم است پرایمر نیز استفاده شود. دو نوع معمول پرایمر عبارتند از نوع خمیری شکل یا نرم و نوع سخت یا پلیمر. نوع پلیمر بهتر بوده و در اروپا مصرف زیادی دارد.

آزمایشات مختلفی برای تعیین کیفیت پوششها از نظر مقاومت به صدمات مکانیکی در مراحل حمل و نقل، انبار و کارگزاری لوله و همچنین اثر دمای مختلف بر مقاومت پوشش به عمل می آید. نور خورشید در پوششهای LDPE اثر تخریبی داشته که با استفاده از پیگمانهای کربن سیاه این مشکل مرتفع می گردد. به علت مقاومت بسیار خوب پوششهای پلی اتیلن به صدمات مکانیکی، معمولاً نیاز کمتری به تعمیر پوششها در محل می باشد و برای تعمیر این پوششها از نوارهای پلی اتیلن یا ریختن پلی اتیلن مذاب در قسمت صدمه دیده استفاده می شود.

نقطه ضعف عمده در پوششهای LDPE، نرمی آن بخصوص در دمای بالا 70°C می باشد که موجب صدمه پذیری آن نسبت به صدمات مکانیکی بخصوص سوراخ شدن می گردد. این مشکل به علت پایین بودن دانسیته پوششهای LDPE می باشد و پوششهای LDPE با ضخامت ۳ میلیمتر، مقاومت بیشتری نسبت به سوراخ شدن نشان می دهند. برای افزایش مقاومت به درجه حرارت، پلیمر دیگری به نام پروپیلن می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱].

۹-۲-۳-۱-۴-۲ پوششهای پلی وینیل کلراید (PVC): پوششهای PVC بوسیله فروبردن لوله ها در پلاستیک مایع و همچنین بوسیله پودر مورد استفاده قرار می گیرند. برای استفاده از پودر PVC بکارگیری یک پرایمر چسبنده بعد از آماده سازی سطح فلز، لازم است که اغلب از ترکیبات لاستیکهای نیتریل و رزینهای فنولیک استفاده شود.

پوشش PVC به صورت اکستروژن برای ایجاد یک پوشش داخلی مقاوم به مواد شیمیایی در لوله های بتنی استفاده می شود. پوشش داخلی PVC، محلولهای شیمیایی را در دمای بالای ۱۸۰ سانتیگراد تحمل می کند اما به حلالهای کلرینه، ستن هاف استرها و تماس زیاد با مواد نفتی، مقاوم نیست. عمده ترین استفاده از پوششهای PVC در لوله های انتقال فاضلاب بخصوص فاضلاب سپتیک و پسابهای صنعتی می باشد.

۱۰-۲-۳-۱-۴-۲ پوششهای نایلون (پلی آمید): نایلونها دارای ویژگیهای خاص هستند که آنها را برای پوشش داخلی و خارجی لوله ها مناسب می سازد. این پوششها به صورت پودر استفاده شده و غالب پلیمر مورد استفاده، نایلون ۱۱ می باشد. نقطه ذوب این نایلون، ۱۸۶ درجه

سانتیگراد و نزدیک به نقطه نرم شدن آنست. چسبندگی به سطح فولاد شن پاشی شده برای اهداف مورد نظر مناسب می باشد و افزایش پرایمر چسبنده برای لوله هایی که مایعات گرم منتقل می کنند، پیشنهاد می شود. ضخامت این پوششها حدود ۴۰۰-۳۰۰ میکرومتر می باشد. مفیدترین ویژگیهای نایلون شامل: مقاومت به پوسته شدن، مقاومت به سوراخ شدن در حرارتهای بالا، مقاومت بسیار خوب به روغنها و حلالها، مقاومت به اشعه ماوراء بنفش و جذب آب کم می باشد. میزان مصرف رطوبت بستگی به ماهیت شیمیایی نایلون داشته و در نایلون ۱۱ حداقل است و در هر موردی می توان با استفاده از مواد افزودنی، این ویژگی را افزایش داد.

بعنوان پوشش داخلی، نایلون دارای سختی، مقاومت به سائیدگی و مواد شیمیایی می باشد، برای استفاده طولانی مدت (۴۰ سال) در تماس با آب گرم با روغن خام لازم است درجه حرارت بیش از ۸۵ سانتیگراد بالا نرود. در پوشش داخلی مناسب، هزینه های پمپ کاهش یافته و همچنین انتقال روغن خام آسانتر می گردد. پوشش قسمتهای جوشکاری شده پس از شن پاشی بوسیله پودر نایلون انجام می گیرد و تعمیر پوششها نیز براحتی انجام می گیرد. مزیت عمده پوششهای پودر نایلون، اقتصادی بودن و توانایی بکارگیری آن بصورت پودر می باشد.

۱-۲-۳-۴-۱-۲ اپوکسی با باند حرارتی مایع (Fusion Bonded Epoxies)

ترکیب این پوششها عبارتست از:

- ۱- رزینهای اپوکسی (n=1-4) که خصوصیات اساسی پوشش را تعیین می کند.
 - ۲- عوامل بهبود دهنده که میزان کیفیت را نشان می دهد.
 - ۳- فیلرها و رنگدانه که اثر مقاومت و سختی پوشش را افزایش می دهند.
 - ۴- عوامل تثبیت کننده و سیال ساز که بر ویژگیهای بکارگیری پودر اثر می گذارند.
- آزمایشات کنترل کیفیت در هنگام ساخت پوشش در هر مرحله مورد استفاده قرار می گیرد. و یک پوشش (FBE) برای اهداف کلی استفاده در خطوط لوله دارای دانسیته برابر ۱/۳، زمان ژل شدن ۱۵ ثانیه (۲۰ درجه سانتیگراد)، زمان بهبود کیفیت ۳ دقیقه (۲۱۰ درجه سانتیگراد و اثر مقاومت ۴ ژول، ۲۰ درجه سانتیگراد) (ASTM C 14) می باشد.
- برای پوشش موثر لوله، سطح بایستی کاملاً پاک و تمیز گردد (بوسیله شن پاشی) و لوله ها لازم است تا دمای ۲۶۰ درجه سانتیگراد حرارت ببینند، پاشیدن پودر با سرعت زیاد که بتواند پوشش با ضخامت یکسان ایجاد نماید که این کار بوسیله دستگاههای مخصوص انجام می گیرد. در انتها سرد کردن لوله بوسیله آب سرد نیز لازم است. ویژگیها و مزایای پوششهای (FBE) عبارتند از استحکام و دوام شیمیایی، مقاومت حرارتی، چسبندگی بسیار خوب، قابلیت انعطاف و مقاومت به تغییر شکل مکانیکی.

از معایب این نوع پوشش ها می توان، مقاومت ضعیف در برابر اشیاء تیز و سوراخ شدن و مقاومت که در مقابل اشعه خورشید را نام برد.

۱-۲-۳-۴-۱-۲ پوشش لاستیک (Rubber): لاستیکها بعلاوه داشتن خاصیت الاستومری و همچنین مقاومت شیمیایی در پوشش داخلی لوله ها مورد استفاده قرار می گیرند. لاستیک طبیعی با مواد شیمیایی مختلف ترکیب شده و پس از اضافه کردن سولفور و دادن حرارت در دمای بین ۲۰۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد، ویژگیهای لازم را بدست می آورد. سولفور توسط دو پیوند در پلیمر با کربن ترکیب شده تا به درجه معینی از سختی و حالت فنی بیشتر برسد.

لاستیک مصنوعی شامل کیس پلی ایزوپرن یا لاستیک طبیعی - مصنوعی با همان ساختمان لاستیک طبیعی و دیگر مواد می باشد. لاستیکهای طبیعی دارای مقاومت شیمیایی بالا می باشند، اگر چه در تماس با روغنهای معدنی و حلالها یا اسیدهای اکسیدکننده قوی چندان رضایت بخش نیست. لاستیک کلروپرن به روغنهای معدنی مقاوم می باشد و لاستیک نیتریل برای این اهداف مناسب است. لاستیک کلروپرن دارای مقاومت بهتری به ازون و نور خورشید به لاستیک طبیعی می باشد.

۱-۲-۳-۴-۱-۲ پوششهای نواری پیچی (Tape Wrappings): این طریقه پوشش دهی برای حفاظت لوله ها حدود ۶۰ سال قدمت دارد.

اولین نوع این پوشش عبارت بود از یک کتان نرم که توسط نواری از جنس مواد نفتی تقویت شده بود. نواریهای نفتی در حال حاضر تغییرات کمی نسبت به نواریهای قدیمی دارد که عمدتاً شامل، بهبود مواد تقویت کننده که از جنس فیبرهای مصنوعی نظیر شیشه در کتان که برای جلوگیری از تخریب بیولوژیکی و رشد احتمالی باکتریهای خطرناک موثر است، می باشد. اگر چه استفاده از نواریهای نفتی بعنوان روشهای قدیمی مورد توجه است، دارای کاربرد موفق آمیز و وسیع بوده است.

۱-۲-۳-۴-۱-۲ پوششهای حفاظتی موقت: پوششهای موقتی، لوله را از خوردگی و صدمات مکانیکی در فاصله زمانی که لوله ساخته می شود تا هنگام پوشش دهی و کارگذاری، محافظت می کند. این پوششهای حفاظتی موقت به چند گروه تقسیم می شوند، از جمله فیلمهای

نرم که بوسیله حلال قابل پاک شدن است. این فیلمها از طریق ته نشین حلالها و یا فرو بردن لوله در یک مخلوط مذاب گرم و یا پخش نمودن یک ترکیب سرد مانند گریس تشکیل می گردند. این فیلمها معمولاً از مواد نفتی، لائولین و ترکیبی از صابونها می باشند. پوششهای ضخیم تر را اغلب برای زمانهای بیشتری حدود ۱۲ تا ۱۸ ماه محافظت می کند.

از نوارهای پیچیدنی نظیر نوارهای نرم پایه نفتی نیز برای حفاظتهای موقتی استفاده می شود. این نوارها براحتی جدا شده و از سطح لوله پاک می شوند و دارای حفاظت از خوردگی خوبی هستند.

مواد پوششی سخت شامل رزینها و مواد قیری و غیره نیز در این پوششها استفاده می شود. پرایمرهای اکسید آهن ارزان قیمت، پرایمرهای دارای روی و پوششهای نظیر آن برای حفاظت از پوششهای حساس نظیر پلی اتیلن و قیری بکار می روند. روغنهای معدنی با ویسکوزیته متوسط به عنوان کندکننده های خوردگی و ضد اکسیدان استفاده می شوند. پوششها حفاظتی موقت دارای انواع مختلف دیگر چون پوششهای قابل جداشدن نظیر پوششهای اتیلن سلولز یا پلی وینیل الکل نیز می باشد.

۱۵-۲-۳-۱-۴-۲ غلافها آزاد پلی اتیلن (Loose polyethylene sleeving): این پوششها بطور وسیعی در لوله های چدنی مورد استفاده قرار گرفته است بطور کلی این پوششها بایستی کاملاً نزدیک و بدون فاصله با لوله قرار گیرند تا از نفوذ اکسیژن از زیر پوشش جلوگیری شود. نقص این پوششها اینست که اگر صدمه ببیند، خاک و آب خورنده به داخل غلافها رسوخ کرده و صدمات شدید وارد می سازد و در صورتیکه مراقبت لازم در هنگام استفاده به عمل آید، می تواند موثرتر از پوششهای رنگی نازک و یا پوششهای نازک قیری باشد. عمده مصارف این پوششها شامل لوله های فولادی و چدنی سرویسیها و لوله های انتقال آب چدنی است.

۱۶-۲-۳-۱-۴-۲ کف پلی اورتان (Polyurthan Foam): این پوشش در حفاظت پروفیلهای غیرمنظم و غیریکنواخت مانند شیرها و اتصالات مورد استفاده قرار می گیرد. قالبی از صفحه پلی اتیلن بدور قسمتی که پوشش داده خواهد شد، ساخته شده و سپس دو ترکیب از کف پلی اورتان با هم مخلوط شده و به داخل قالب تزریق می شود. پس از تثبیت کف، قالبهای پلی اتیلن برداشته می شوند. این روش در جایی که امکان استفاده از دیگر پوششها وجود ندارد، مفید خواهد بود.

پوششهای متعدد دیگری نیز وجود دارند که چندان معمول نبوده و کمتر مورد استفاده قرار می گیرند.

۲-۴-۲ مقایسه مشخصات فیزیکی و شیمیایی ۴ پوشش رایج

در این قسمت به مقایسه مشخصات فیزیکی و شیمیایی ۴ پوشش رایج شامل

۱- پلی اتیلن (POLY ETHYLENE)

۲- پلی اورتان (POLY URETANE)

۳- پلی وینیل کلراید (POLY VINYLE CHLORIDE)

۴- اپوکسی (EPOXY)

می پردازیم . [اختصارات: عالی (A) خوب (B) نسبتاً خوب (C) ضعیف (D)]

۱-۲-۴-۲ مقاومت پوششها در برابر محلولهای شیمیایی اسید، باز و نمک

جدول (۹-۲) مقایسه پوششها از نظر مقاومت در برابر محلولهای شیمیایی اسید، باز و نمک

نوع ماده شیمیایی	نوع پوشش			
	EPOXY	PE	PU	PVC
اسید معدنی غلیظ	C	A	D	B
اسید معدنی رقیق	A	A	C	A
اسید آلی غلیظ	C	A	D	D
اسید آلی رقیق	B	A	C	B
اسید اکسید کننده غلیظ	D	D	D	B
اسید اکسید کننده رقیق	C	B	D	A
باز غلیظ	A	B	B	A
باز رقیق	A	B	B	A
نمک اسیدی	A	A	B	A
نمک خنثی	A	A	A	A
نمک بازی	A	A	A	A

۲-۲-۲ مقایسه پوششها از نظر مقاومت در برابر محلولهای آلی

جدول (۲-۱۰) مقایسه پوششها از نظر مقاومت در برابر محلولهای آلی

نوع ماده شیمیایی	نوع پوشش			
	EPOXY	PE	PU	PVC
هیدروکربنهای الیفاتیکی	A	C	C	B
هیدروکربنهای اروماتیکی	A	C	D	D
هیدروکربنهای هالوژنه کامل	A	D	D	D
هیدروکربنهای هالوژنه جزئی	B	D	D	D
الکلهای تک عاملی	A	C	D	B
الکلهای چند عاملی	A	B	B	B
روغنهای چربها و اکسها	A	A	B	B
فنلها	C	A	D	D
کتونها	C	B	D	D
استرها	B	B	D	D
اترها	C	B	D	D

۲-۲-۳ مقایسه پوششها از نظر چسبندگی : (Sticking) : یک پوشش محافظتی صنعتی فقط وقتی خوب عمل مینماید که قابلیت چسبندگی (Sticking) مناسبی به سطح زیرین تحت حفاظت خود را داشته باشد.

پوششهای محافظتی صنعتی به سه طریق پالشی، مالشی و نصب به سیستم انتقال فاضلاب اضافه می گردند. پوششهای پالشی و مالشی (EPOXY,PU) با استفاده از خاصیت چسبندگی (Sticking) به سطوح تحت حفاظت با وسایل مربوطه پاشیده و یا مالیده می شود و این پوششها بنا به نوع آنها و نحوه اعمال دارای خاصیت توان نفوذپذیری (Permeability) می باشند و متناسب با مقاومت در مقابل گازهای مخرب، پس از عبور گازها به طرف سطح تحت پوشش سبب جدایی پوشش از سطوح گردیده نهایتاً با از دست دادن قدرت چسبندگی از آن

جدا می‌شوند ولی در پوششهای گیره‌دار اعم از PE و PVC در طراحی ساختمان فیزیکی آنها گیره‌های متصل به ورق پایه در نظر گرفته شده که پس از نصب به لحاظ اتصال مکانیکی قوی و قابل اطمینان امکان جدایی را از بین می‌برد و این گیره‌ها با اشکال V(Stud-Grip) و T(T-grip) برای اولین بار در کشور در شرکت فرنام بسیار طراحی و تولید شده است بنابراین در استفاده از پوششهایی که فاقد گیره و اتصال مکانیکی قوی می‌باشند بایستی فقط به نوع اتصال شیمیایی (Chemical Bonding) بسنده نمود روش آزمون چسبندگی آنها بایستی طراحی و پس از پاشش و یا مالش در پایان کار از این روش استفاده نمود. در جدول (۲-۱۱) مقایسه از لحاظ چسبندگی ورق‌های گیره‌دار انجام گرفته است [۱۵].

جدول (۲-۱۱) مقایسه پوششها از لحاظ چسبندگی ورقهای گیردار

چسبندگی	EPOXY	PE گیره دار	PU	PVC گیره‌دار
	B	A	B	A

در پوشش PU و EPOXY هر دو، دارای چسبندگی سطحی بوده و در پوشش پلی اتیلن و PVC گیره‌دار بوده و حالت اتصال مکانیکی توسط گیره‌ها مقایسه گردیده اند بدیهی است اتصال مکانیکی میتواند در مقایسه با اتصال شیمیایی قابلیت بهتری را در سیستم داشته باشد. قابل ذکر می‌باشد چسبندگی EPOXY به سطح مناسب می‌باشد ولی در این جدول مقایسه بین پوششهای گیره‌دار PE و PVC با پوشش اپوکسی انجام گرفته و از آنجایی که چسبندگی پوششهای گیره‌دار بسیار بالا می‌باشد به آن امتیاز A و به اپوکسی و پلی اورتان امتیاز B داده شده است.

۴-۲-۲ مقایسه درصد مواد فرار: (Volatility): پوششهای اپوکسی و پلی اتیلن اورتان دارای مواد فرار می‌باشند به طوریکه در حین اجرا بایستی برای جلوگیری از تاثیر نامطلوب بر مجریان روشهای مناسبی بکار گرفته شده و شرایط خاصی برای اپراتور و محیط کاری در نظر گرفته شود ولی پوشش PE فاقد مواد فرار بوده در مواردی که عدم آلودگی پوشش از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد پوشش بسیار مناسبی می‌باشد در مقایسه با PVC در زمانهای طولانی PE دارای برتری می‌باشد زیرا در PVC امکان جدایش و انتشار مواد نرم کننده (DOP) و سایر افزودنیها و همچنین کلر و یا ترکیبات آن وجود دارد که خود باعث آلودگی سیال می‌باشد ولی PE ضمن اینکه هیچ گونه آلودگی را در زمان نصب ایجاد نمی‌نماید و به لحاظ اینکه فاقد قابلیت تجزیه پذیری می‌باشد هیچ گونه آلودگی در زمان بهره‌برداری و با گذشت زمان در محلول فاضلاب ایجاد نمی‌کند ولی همانطور که ذکر شد در پوششهای PVC با گذشت زمان مواد افزودنی آن وارد فاضلاب می‌گردد.

در مورد PU و EPOXY نیز به مرور زمان مقداری رنگدانه (Pigment) و یا سخت کننده (Hardner) و یا بر اثر فرایند گچی شدن و یا ترک خوردگی مقداری از خود پوشش وارد فاضلاب می‌گردد و قابل ذکر می‌باشد چون در روش متداول فرایند تصفیه فاضلابها جهت جدا سازی موادی که از طریق تجزیه پوششها (PVC, PU, EPOXY) وارد فاضلاب می‌گردد تمهیداتی در نظر گرفته نمی‌شود بنابراین در صورت استفاده از آب بازیافت شده جهت مصارف کشاورزی و غیره باعث می‌شود این مواد به چرخه مصرف در گیاهان و از آن طریق به دامها و بالاخره از طریق دامها به انسان انتقال یابد عمدتاً این مواد با ایجاد ناهنجاری در رشد و تولیدمثل سلولها، امکان ایجاد سرطان را در بدن انسان ایجاد می‌نمایند [۱۵].

جدول (۲-۱۲) میزان انتشار مواد فرار پوششها در زمان اجرا

میزان انتشار مواد فرار در زمان اجرا	EPOXY	PE گیره دار	PU	PVC گیره‌دار
	زیاد	صفر	زیاد	کم
	D	A	D	B

جدول (۲-۱۳) میزان انتشار مواد فرار پوششها در زمان بهره برداری

میزان انتشار مواد فرار در زمان بهره‌برداری	EPOXY	PE گیره دار	PU	PVC گیره‌دار
	متوسط	صفر	متوسط	کم

	D	A	D	B
--	---	---	---	---

۵-۲-۲ مقایسه پوشش‌ها از نظر غیر قابل نفوذ بودن آنها: (Non Permeability): با توجه به خواص مواد اولیه ورقهای گیره‌دار (پلی اتیلن و PVC) این گونه مواد اساساً فاقد منافذ ریز (Pin Hole) می‌باشد ولی چون اپوکسی‌ها و پلی اورتانها به لحاظ چندجزئی بودن و اجرای آنها به طریقه پاشش و یا مالش نمی‌توان به فقدان منافذ فوق و حبابهای هوا اعتقاد داشت. بنابراین گازهای خورنده در محیط قادر خواهند بود با نفوذ از آن به جداره تحت حفاظت، رسیده و خوردگی (Corrosion) را آغاز نمایند و طبیعی است به این ترتیب عمر طبیعی پوشش و همین طور زمان حفاظت از سازه کوتاه‌تر خواهد بود.

جدول (۲-۱۴) مقایسه پوششها از نظر غیر قابل نفوذ بودن

عدم وجود منافذ ریز	EPOXY	PE	PU	PVC
	C	A	C	A

۶-۲-۲ مقایسه پوششها نسبت به مقاومت در برابر رشد عوامل بیولوژیک: پوشش PE مقاومت بالایی نسبت به رشد عوامل بیولوژیک داشته ولی EPOXY و PU مقاومت خوبی در برابر این عوامل ندارند مواد افزودنی به پوشش PVC نیز محیط مناسبی را برای رشد باکتریها ایجاد می نماید رشد عوامل بیولوژیک در سیستمهای فاضلاب دو مشکل عمده ایجاد می‌نماید که عبارتند از: عوامل بیولوژیک از مواد موجود در پوششها تغذیه نموده و بدین ترتیب پوشش را از بین می‌برند و با رشد و تجمع عوامل بیولوژیک در مجاری انتقال فاضلاب سطح مقطع داخلی این مجاری کاهش یافته و در مواردی انسداد کامل آن وجود دارد [۱۵].

جدول (۲-۱۵) مقایسه پوششها نسبت به مقاومت در برابر رشد عوامل بیولوژیک

مقاومت در برابر رشد عوامل بیولوژیک	EPOXY	PE	PU	PVC
	C	A	C	C

با توجه به مقایسه پوششهای EPOXY و PE و PU و PVC انجام گرفت جهت نتیجه‌گیری و مقایسه نهایی برای حروف A که نمایانگر عالی میباشند امتیاز ۲۰ و برای حرف B که نمایانگر خوب میباشد امتیاز ۱۵ و برای حرف C که نمایانگر نسبتاً خوب میباشد امتیاز ۱۰ و برای حرف D که نمایانگر ضعیف میباشد امتیاز ۵ را اختصاص می‌دهیم تا بدین ترتیب مقادیر کیفی به کمی تبدیل شده و امکان مقایسه نهایی وجود داشته باشد بدین ترتیب نتیجه مقایسه نهایی عبارت خواهد بود از:

جدول (۲-۱۶) نتیجه مقایسه پوششها

امتیاز نهایی	EPOXY	PE	PU	PVC
	۴۴۵	۵۸۵	۳۲۵	۴۷۵

همانطور که امتیاز نهایی نشان می‌دهد پوششهای پلی اتیلن دارای بالاترین امتیاز است .

۷-۲-۲ مقایسه طول عمر کارکرد پوششها: نظر به هزینه و انرژی زیاد که در احداث سیستمهای فاضلاب صرف می‌گردد مبحث ماندگاری آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به این دلیل که تکرار عملیات ساخت پس از آغاز بهره‌برداری و حین آن به لحاظ وجود سیال جاری در سیستم بسیار دشوار و در شرایطی غیرممکن خواهد بود بنابراین مطالعات طول عمر سیستمها بایستی به دقت صورت پذیرد و این عامل در پوششها به شرح جدول ۲-۱۷ به طور مقایسه‌ای نشان داده شده است. در مورد پوشش PVC با افزایش افزودنیها بدست آوردن طول عمر بیشتر امکان‌پذیر می‌باشد ولی استفاده از این پوشش را از توجیه اقتصادی خارج می‌نماید.

جدول (۲-۱۷) مقایسه طول عمر کارکرد پوششها

نوع پوشش	زمان محافظت از سازه
مواد قیری	حدود ۵ سال
پوششهای لاستیکی	حدود ۵ سال

حدود ۱۰ سال	پوششهای پلی اورتان
حدود ۱۰ سال	پوششهای اپوکسی
بستگی به افزودنیها دارد	PVC گیره دار
بیش از ۵۰ سال	PE گیره دار

۸-۲-۲-۲ مقایسه اقتصادی پوششها: این مقایسه با توجه به طول عمر و طولانی بودن استهلاک سرمایه انجام می گردد و برای مقایسه پوششهای رایج با یکدیگر به جدول زیر آمده است.

جدول (۲-۱۸) مقایسه اقتصادی پوششها

قیمت هر مترمربع به ریال (بهار ۱۳۸۴)	نوع پوشش
۵۰۰۰۰	مواد قیری
۵۰۰۰۰	پوششهای لاستیکی
۱۸۰۰۰۰	پوششهای پلی اورتان
۱۸۰۰۰۰	پوششهای اپوکسی
۸۰۰۰۰	PE ورق گیره دار
۱۲۰۰۰۰	PVC ورق گیره دار

۳-۴-۲ ویژگیها و خصوصیات پوششها

برای اینکه یک پوشش بتواند عمل حفاظتی خود را بخوبی انجام دهد، لازم است دارای ویژگیها و خصوصیتی بسته به شرایط و محیط مورد استفاده باشد. خصوصیات مهم و ضروری پوششها عبارتند از:

۱-۳-۴-۲ مقاومت در مقابل نفوذ آب: آب بعنوان یک حلال عمومی روی تمام مواد آلی تاثیر می گذارد. مولکولهای کوچک آب از طریق فضاها و مولکولی می توانند به داخل اکثر ترکیبات مواد آلی نفوذ نمایند. البته پوششی که بتواند کاملاً در مقابل نفوذ آب مقاوم باشد، وجود ندارد، ولیکن یک پوشش مناسب بایستی حداکثر مقاومت را در برابر نفوذ آب داشته باشد تا بتواند خواص خود را برای مدت بیشتری حفظ نماید. این خصوصیت از مهمترین ویژگیهای یک پوشش خوب و مناسب است.

۲-۳-۴-۲ جذب آب کم: رطوبت در داخل پوشش بسته به مقدار رطوبت در محیط، بعد از گذشت مدت زمان خاص به تعادل می رسد. هر پوشش دارای توانایی خاصی در جذب آب دارد. اگر پوشش بدرستی بر روی سطح مورد نظر چسبیده باشد و فضای خالی بین پوشش و ماده مورد حفاظت وجود نداشته باشد رطوبت در داخل پوشش بدون هیچگونه اثری باقی می ماند. بنابراین پوشش خوب، پوششی است که دارای حداقل میزان جذب آب باشد.

۳-۳-۴-۲ عدم انتقال بخار آب: مقدار بخار آبی که از یک سمت پوشش محافظ، به علت اختلاف فشار بخار مرطوب به سمت دیگر عبور می کند، مقدار بخار مرطوب انتقالی نامیده می شود. در صورتیکه پوشش از نوع مناسب بوده و بخوبی به سطح چسبیده باشد، هیچگونه اختلاف فشاری بین دو طرف پوشش وجود نداشته و پس از مدتی مقدار رطوبت موجود در پوشش با محیط اطراف خود به تعادل می رسد. ولی اگر پوشش بخوبی به سطح نچسبیده باشد، بخار آب موجود در این قسمت افزایش حجم پیدا کرده و ایجاد تورم و برآمدگی می نماید.

۴-۳-۴-۲ مقاومت دی الکتریک مناسب: از مهمترین وظیفه یک پوشش جلوگیری از عبور جریانهای الکتریکی است که اساس انجام واکنشهای خوردگی است. میزان مقاومت دی الکتریک یک پوشش از خصوصیات اساسی آن محسوب می گردد. یک پوشش مناسب قادر است از عبور الکترون از قسمتهای آند به محلول الکترولیت جلوگیری نموده و مکانیزم خوردگی را متوقف سازد. جذب رطوبت بر این خاصیت پوشش موثر است و هر چه جذب رطوبت کمتر باشد، پوشش دارای مقاومت دی الکتریک بیشتر خواهد بود.

۵-۳-۴-۲ مقاومت در مقابل عبور یونها: این ویژگی نیز ارتباط مستقیم با مقاومت دی الکتریک پوشش دارد و هر چه مقاومت دی الکتریک کمتر باشد یونهای کلرید، سولفات و سولفیت و غیره امکان بیشتری برای عبور از پوشش یافته و در نتیجه خوردگی افزایش می یابد.

پوششهای دارای وزن مولکولی زیاد و فرم مولکولی متراکم، دارای بیشترین مقاومت در مقابل انتقال یونها و عبور الکترون از پوشش می باشند. وینیل و اپوکسی مقاومت بالایی در مقابل عبور یونها دارند.

۶-۳-۲ چسبندگی مناسب: چسبندگی پوشش از عوامل مهم در دوام و ایفای نقش حفاظتی توسط پوشش است. در صورتیکه یک پوشش کلیه خصوصیات پوششی را داشته و تنها چسبندگی مناسبی نداشته باشد، اثر حفاظتی کمتری خواهد داشت. چسبندگی ناشی از یک پویند فیزیکی- شیمیایی است که بعلاوه اثر متقابل پوشش و سطح ایجاد می گردد. وجود اسیدهای رادیکالی در فرآیند پلیمریزاسیون رزین، خواص چسبندگی مناسبی در پلیمر بوجود می آید. این اسید بعلاوه تمایل زیاد به ترکیب با سطح فلز، موجب تشکیل پیوندی بین پلیمر و سطح فلز ایجاد می کند که پیوند قطبی گفته می شود. میزان زبری سطح از عوامل مهم چسبندگی می باشد.

۷-۳-۲ مقاومت در مقابل عوامل بیولوژیک: باکتریها و قارچها در اثر رشد و تکثیر بر روی پوششها، می توانند به سطح پوششها آسیب و صدمه وارد نمایند. این حالت معمولاً در قسمتهای تاریک که نور کافی وجود ندارد ایجاد می شود و پوششها در اثر اسیدهای حاصل از فعالیتهای بیولوژیکی مورد حمله و تخریب قرار می گیرند.

برخی از انواع پوششها با اینکه خواص مناسب و چسبندگی خوبی دارند ولی در مقابل حملات باکتریها بشدت آسیب پذیر بوده و سریعاً تخریب می گردند مثال این نوع پوشش، اپوکسی پلی آمیدها هستند.

پوششهای دارای سولفیدهای آهن برای لوله های زیرزمینی مناسب نیستند، زیرا باکتریهای بی هوازی احیاء کننده سولفات این پوششها را مورد تهاجم قرار می دهند.

در زمان جنگ جهانی دوم بعلاوه مشکلاتی که در اثر خوردگی بیولوژیکی ایجاد شده بود، تحقیقات وسیعی جهت جلوگیری از این نوع خوردگی به عمل آمد و نتیجه گیری نهایی این بود که برای ساخت پوششهای بایستی از موادی استفاده شود که بعنوان غذای میکروارگانیسمها مورد استفاده قرار نگیرند و همچنین در مقابل اسیدهای تولید شده بوسیله میکروارگانیسمها مقاوم باشند.

۴-۴-۲ مراحل پوشش دهی

در عملیات پوشش دهی، برای رسیدن به هدف مورد نظر و اجرای یک پوشش مناسب، مراحل و وجود دارد که لازم است بترتیب مورد توجه و اقدام قرار گیرد. این مراحل عبارتند از:

۱- تمیز کردن و آماده سازی سطح

۲- پوشش اولیه یا پرایمر

۳- پوشش میانی

۴- پوشش نهایی

۱-۴-۲ تمیز کردن و آماده سازی سطح: این مرحله از مهمترین مراحل اجرای پوشش بشمار می رود زیرا چسبندگی، دوام و مقاومت پوششها عمدتاً وابسته به تمیز و مناسب بودن سطح است و آمادگی سطح عامل اساسی در پایداری و دوام پوشش می باشد. آماده سازی سطوح شامل روشهایی چون شن پاشی و ساچمه زنی، پاک کردن چربی و روغن می گردد. از برشهای سیمی، دستی و برقی، مواد اسیدی و غیره نیز در مواردی استفاده می گردد: البته روشهای آماده سازی بسته به نوع سطح و نوع پوشش و همچنین روش استفاده از پوشش متفاوت است و برخی پوششها دارای روشهای آماده سازی اختصاصی می باشند.

مثلاً در پوشش دهی بوسیله الکتریکی، پولیش کردن سطح بر روش مکانیکی یا الکتریکی لازم است و همچنین برای پوشش دهی بوسیله فروردن سطح و ماده پوشش گرم و مذاب، زدودن لایه اکسید از روی سطح فلز ضروری است. استانداردهای مختلفی برای آماده سازی سطوح هر نوع پوشش وجود دارد که بر اساس نوع پوشش، روش بکارگیری آن، نوع سطوح و شرایط فیزیکی بکارگیری پوشش، تنظیم و ارائه شده است. در روش شن پاشی با استفاده از دستگاههایی، شن و ماسه بشدت به سطح مورد نظر پاشیده شده و موجب جدا شدن آلودگیها، زنگ زدگیها و غیره از سطح می گردد. جنس شن مورد استفاده از نوع سیلیکا بوده و داری قطر بین ۱/۱۶ تا ۱/۳۲ می باشد. میزان فشار باد، قطر نازلها و میزان شن از عوامل موثر در کیفیت شن پاشی است. همچنین استانداردهای در مورد آماده سازی سطوح در هر نوع پوشش وجود دارد که لازم است در عملیات اجرایی مورد توجه قرار گیرد. جدول (۲-۱۹) مراحل آماده سازی سطوح فولادی را نشان می دهد.

جدول (۲-۱۹) استانداردهای مراحل آماده سازی سطوح فولادی [۳۵].

استانداردها	مراحل
SSPC-SP 1-63	تمیز کاری با حلال و حذف کامل رنگ و چربی
SSPC-SP 2-63	تمیز کاری با دست و حذف رنگهای سطحی بوسیله برس و کاردک
SSPC-SP 3-63	تمیز کاری با ماشین و حذف رنگهای سطحی
SSPC-SP 4-63	تمیز کاری با آتش برای حذف رنگ و زنگ
SSPC-SP 6-63 & NACE 1	شن پاشی تجاری تا حدی که ۲/۳ سطح از مواد اضافی تمیز شود
SSPC-SP 5-63 & NACE 2	شن پاشی و تمیز کاری کامل سطح فلز تا براق شدن سطح فلز
SSPC-SP 8-63	اسید شویی جهت حذف کامل زنگ و رنگ
SSPC-SP 2-64	تمیز کاری بوسیله فسفات محلول برای آمادگی و چسبندگی بهتر
SSPC-SP 3-64	پرایمر شستشو و ایجاد یک پرایمر وینیلی
SSPC-SP 4-64	تمیز کاری بوسیله فسفات سرد و تشکیل یک لایه کریستالی روی سطح برای افزایش چسبندگی

روش ساچمه زنی نیز مشابه شن پاشی است با این تفاوت که بجای شن و ماسه از ساچمه های گرد فلزی استفاده می شود. روش ساچمه زنی فقط در کارگاه اجرا می شود زیرا دارای غبار بوده و لازم است تهویه شده و از محیط کار خارج شود. ساچمه ها از جنس مختلف نظیر آلومینیومی، برنجی، مس و غیره می باشد و کیفیت تمیز کاری و آماده سازی سطوح در این روش بهتر از روش شن پاشی است

در تمیز کردن و آماده سازی سطوح، اگر سطح لوله بیش از حد صاف و صیقلی باشد، مصرف پرایمر بیشتر شده و همچنین چسبندگی آن نیز

کمتر خواهد بود. بنابراین وجود مقداری زبری که حدوداً $\frac{1}{3}$ ضخامت رنگ پرایمر است، برای تامین چسبندگی مناسب لازم است.

۲-۴-۴-۲ پوشش اولیه یا پرایمر : بعد از مرحله تمیز کاری و آماده سازی سطوح، از مواد پرایمر که دارای پیگمانهای ضدزنگ نظیر کرومات و یا روی بوده و عامل اصلی چسبندگی به فلز می باشد، استفاده می شود که در حفاظت از خوردگی نیز موثر است.

عامل چسبندگی پرایمر موجب باقی ماندن و پایداری پوشش نهایی به سطح شده و از پوسته شدن یا تاول زدن جلوگیری می نماید. پرایمرها دارای ترکیبات مختلفی هستند که هر کدام از این ترکیبات به نحوی در کیفیت پرایمر موثر است. این ترکیبات عبارتند از: ماده اصلی چسبنده ، حلالها ، مواد پخش کننده ، مواد روان کننده ، مواد پرکننده ، مواد سخت کننده ، مواد تسریع کننده ، مواد تثبیت کننده و مواد ضدباکتری . از رنگهای دارای پیگمانهای ضدزنگ و خوردگی نیز بعنوان پرایمر استفاده می شود. میزان انحلال این رنگها در آب مخازن و لوله ها بایستی مشخص و بدقت تعیین گردد تا بتوان از آلودگی احتمالی آب جلوگیری نمود. از پیگمانهای مهم موجود در این رنگها سرنج (Pb_3O_4) و کرومات روی ($ZnCrO_4$) را می توان نام برد.

۲-۴-۴-۳ پوشش میانی : پوششهای میانی برای اهداف معینی بکار می روند که شامل: افزایش ضخامت کل پوشش ، افزایش مقاومت شیمیایی ، مقاومت در مقابل انتقال بخار آب ، افزایش مقاومت الکتریکی ، چسبندگی لازم ، ایجاد پیوند محکم با پرایمر و پوشش نهایی می باشد .

افزایش ضخامت پوشش عامل اصلی در پوشش میانی است که موجب افزایش مقاومت شیمیایی، کاهش میزان انتقال بخار، افزایش مقاومت الکتریکی و افزایش مقاومت سایشی و تحمل فشارها و ضربه ها می شود. همچنین ایجاد پیوند قوی با لایه پرایمر و پوشش نهایی از عوامل مهم دوام و پایداری پوشش نهایی است.

۲-۴-۴-۴ پوشش نهایی : آخرین مرحله از مراحل پوشش دهی، استفاده از لایه نهایی پوشش و تکمیل اجرای پوشش می باشد. پوشش نهایی بعنوان لایه محافظت کننده از پوششهای میانی و آستر بکار می رود و اولین لایه محافظی است که در تماس مستقیم با محیط خورنده نظیر آب و خاک می باشد. این لایه دارای دانسیته بالاتر نسبت به پوششهای میانی و آستری است. در برخی موارد پوشش میانی نقش اصلی حفاظت در مقابل عوامل خورنده را ایفا می کند و پوشش نهایی در اینحالت برای اهداف دیگری نظیر زیبایی و با ظاهر خوب و جالب بکار می روند.

۵-۴-۲ آزمایشها و استانداردهای تعیین کیفیت پوششها

با توجه به خصوصیات و ویژگیهایی که هر نوع پوشش با توجه به اهداف بکارگیری آن دارد، آزمایشهایی نیز برای سنجش و اندازه گیری عوامل موثر در کیفیت و راندمان پوششها وجود دارد، که استفاده از این آزمایشها، مهمترین وسیله در انتخاب و استفاده از پوشش مناسب برای تامین اهداف و مقاصد مورد نظر بشمار می آید. برای اینگونه آزمایشات، استانداردهای مختلفی نیز ارائه شده است که آزمایشات بر اساس این استانداردها انجام می گیرد. جدول شماره (۲-۲۰) مهمترین این استانداردها را که در آزمایشگاههای مربوط به پوششها بیشترین کاربرد را دارند، نشان می دهد.

آزمایشات غوطه وری و اتمسفری بر روی پوششها، از آزمایشات اصلی تعیین کیفیت محسوب می گردد. از ویژگیها و خصوصیات مهم پوششها که در آزمایشات تعیین کیفیت مورد سنجش و آزمایش قرار می گیرند عبارتند از: دوام و پایداری، چسبندگی، جذب آب، نفوذ پذیری، سختی، قابلیت انعطاف می باشد.

آزمایشات تعیین کنند دوام و پایداری پوشش شامل روشهای طبیعی و مصنوعی اثرات آب و هوایی روی پوشش و همچنین آزمایش فرسایش می باشد. دوام و پایداری پوشش از طریق آزمایشات تعیین چسبندگی، جذب آب و دیگر آزمایشات نیز تعیین می گردد. آزمایشات چسبندگی شامل ۴ نوع آزمایش است که عبارتند از: خم شدن، پوسته شدن، بریده شدن و موفقیت پوشش (Pull-Off).

آزمایشات خم شدن، انعطاف و پیوستگی را مورد آزمایش قرار می دهد و در تعیین میزان چسبندگی مفید است. نیروی لازم برای پوسته شدن پوشش و نوع نقص چسبندگی آن، نشان دهنده درجه چسبندگی به سطح است.

آزمایشات (Pull-Off) نیروی مورد نیاز برای جدا شدن یک قسمت مشخص از پوشش را اندازه گیری می کند. آزمایش بریده شدن شامل آزمایش ساده ای است که در آن بریدن پوشش توسط چاقو به فرم (V) تعیین کننده مقاومت پوشش می باشد.

جدول (۲-۲۰) استانداردهای مورد استفاده در آزمایش پوششهای داخلی و خارجی [۳۵].

انواع آزمایشات	استانداردها
روشهای آزمایشگاهی ارزیابی پوششهای مختلف در محیطهای غوطه ور	NACE TM-01- 74
آزمایش نمک پاشی	ASTM B-117-73
آزمایش نمک پاشی - اسید استیک	ASTM B-287-74
نحوه آماده سازی صفحات نمونه برای آزمایش	ASTM D-610-68 (1974)
ارزیابی مقدار زنگ آهن در روز صفحات فولادی رنگ شده	ASTM D-610-64 (1973)
ارزیابی میزان پوسته شدن سطوح خارجی رنگ شده	ASTM D-659-74
ارزیابی مقدار ترک روی سطوح خارجی رنگ شده	ASTM D-660-44 (1970)
ارزیابی سایش روی سطوح خارجی رنگ شده	ASTM D-662-44 (1970)
بررسی تورم روی سطوح خارجی پوششی	ASTM D-714-56 (1974)
تشکیل لایه یکنواخت رنگ، لعاب و سایر پوششها روی صفحات نمونه	ASTM D-623-63 (1970)
آزمایش غوطه وری در آب برای پوششهای آلی روی فولاد	ASTM D-870-53 (1973)
آزمایش مقاومت در مقابل سایش پوششهای رنگی، لعاب و سایر مواد	ASTM D-960-51 (1972)
اندازه گیری ضخامت اولیه پوششهای آلی	ASTM 1005-51 (1972)
پیشنهادهای برای شرایط تابش روی سطوح فولادی رنگ شده	ASTM D-1014-66 (1973)
اندازه گیر ضخامت اولیه پوشش آلی غیر مغناطیسی روی سطوح مغناطیسی	ASTM D-1212-70
اندازه گیری ضخامت اولیه پوشش غیر فلزی رنگ، لعاب و غیره روی فلزات غیر مغناطیسی	ASTM D-1400-67
آزمایش نفوذ بخار مرطوب از لایه های پوشش آلی	ASTM D-1653-72
ارزیابی نمونه های پوشش داده شده در محیط های خورنده	ASTM D-1654-61 (1974)
آزمایش تاثیر بخار مرتبط روی پوشش آلی	ASTM D-1735-62 (1973)
آزمایش چسبندگی پوشش های آلی	ASTM D-2197-68 (1973)
آزمایش نمونه های پوشش داده شده در رطوبت نسبی ۱۰۰٪	ASTM D-2297-68
آزمایش تخلخل بر روی لایه های رنگی	ASTM D-3258-73
نحوه بازرسی سطوح رنگ شده	ASTM D-3276-73
آزمایش سختی لایه های پوشش بوسیله نوارد تست	ASTM D-3363-74
آزمایش جدایش کاتدی روی پوششهای خطوط لوله	ASTM G-8-72
اندازه گیری ضخامت لایه پوشش روی خطوط لوله فولادی	ASTM G-12-72
اندازه گیری چسبندگی لایه ها با نوارد تست	ASTM D-3359-74

۱-۵-۲ آزمایشات غوطه وری در آب : این آزمایشات نه تنها برای تعیین تمایل به برآمدگی و تورم یا از دست دادن چسبندگی، بلکه برای اندازه گیری جذب آب یا شستشوی مواد قابل حل در آب نیز استفاده می گردد. آزمایش معمول برای پوششهای (FBE) شامل غوطه وری در آب ۵۰ درجه سانتیگراد برای ۷ روز می باشد. برای آزمایشات مطمئن تر در برخی موارد تا ۳۰ روز در درجه حرارت ۸۸ درجه سانتیگراد نیز می باشد. تغییراتی که در اثر غوطه وری و تماس با آب بر روی سطح پوشش داده شده در مدت معین ایجاد می شود، میزان مقاومت پوشش و مقدار جذب آب پوشش را نشان می دهد. در استفاده از نمونه های مواد پوشش برای آزمایش ، سطح مورد آزمایش مشابه سطح واقعی بوسیله شن پاشی و دیگر روشها تمیز و آماده می گردد.

۲-۵-۲ آزمایشات نفوذ پذیری : این آزمایش در پوششهای لوله عمدتاً برای تعیین میزان انتقال آب یا بخار و اکسیژن می باشد. اندازه گیری قابلیت انتقال یک پوشش به دی اکسیدکربن، دی اکسید سولفور و انواع مختلف یونهای خورنده نیز در برخی موارد حائز اهمیت است. در این آزمایش لایه های جدا شده بعنوان یک غشاء بین دو محیط مختلف، ثابت شده و در کنار لایه های پوشش با قابلیت نفوذ معین و ثابت، مورد آزمایش و سنجش قرار می گیرند.

نفوذپذیری بوسیله تغییراتی که در وزن، حجم، pH یا هدایت الکتریکی مواد روی یک طرف غشاء ایجاد می شود. مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای مثال، وسیله ای بنام (Payne Cup) که ظرف کم عمقی است بوسیله پوشش مورد آزمایش، پوشش داده می شود، سپس ظرف پر از آب شده و تغییرات وزن ظرف در مدت زمان معین بعثت نفوذ آب مورد اندازه گیری قرار می گیرد. برای این منظور از یک دسیکاتور با درجه حرارت و رطوبت کنترل شده استفاده می شود.

نفوذپذیری پوششهای آلی به اسیدها در پوششهای داخلی لوله های ازبست سیمان و بتنی فاضلابها حائز اهمیت است. در آزمایشات غوطه وری در اسید در درجه حرارت و غلظتهای مختلف انتشار یونهای خورنده از میان یک لایه پوشش، بوسیله بدام انداخت آن بین دو ظرف محتوی اسیدسولفوریک ۳۰٪ و آب مقطر و با اندازه گیری کاهش pH آب مقطر در همان زمان، قابل سنجش و مشاهده خواهد بود.

۳-۵-۲ آزمایش سختی : این آزمایش با استفاده از روشهای آزمایش ساده سختی بوسیله مداد، از طریق ایجاد خراش توسط پاندول دندانه دار انجام می گیرد. برای مثال در آزمایش (Persoz pendulum) زمان لازم برای ایجاد خراش یک پاندول سخت روی یک صفحه پوشش داده شده بدست آمده و با شیشه که بعنوان یک استاندارد بکار می رود، برای سنجش سختی مورد مقایسه و ارزیابی قرار می گیرد. یک آزمایش ساده برای پوششها، آزمایش (Buchholtz2) است که شامل قرار دادن یک وسیله دارای وزن استاندارد روی یک سطح پوشش داده شده برای یک مدت زمان معین می باشد. طول خراشهای ایجاد شده بعنوان یک معیار برای سختی پوششها، اندازه گیری می شود. یک جنبه خاص سختی که وابسته به ویژگیهای پلاستیکی پوششهاست، مقاومت به سوراخ شدن است. برای این منظور یک وسیله سوراخ کننده که دارای وزنه است در تماس با سطح پوشش داده شده قرار می گیرد و زمان تماس، مقدار وزنه و حرارت را تغییر داده و واکنش آنرا در مقابل مقاومت پوشش مورد سنجش قرار می دهند.

۴-۵-۲ آزمایش قابلیت انعطاف : شامل اندازه گیری قابلیت پخش و بسط پوشش و جنبه هایی از مقاومت به تماس می باشد. قابلیت انعطاف از طریق خم کردن یک صفحه پوشش داده شده به وسیله دستگاههای مخصوص آزمایشگاهی و مشاهده تمایل پوشش به ترک برداشتن، مورد سنجش قرار می گیرد. این آزمایشات همچنین بوسیله استفاده از دستگاههای اندازه گیری کشش روی فیلمهای جدا شده مناسب، انجام می گیرد. برای پوششهای نازکتر مثل رنگها، آزمایشهای گوناگونی نیز وجود دارد. برای مثال آزمایش (Erichsecupp) را که هم قابلیت انعطاف پوششها و هم برخی ویژگیها همچون چسبندگی را تعیین می کند، می توان نام برد.

۵-۲ خوردگی در لوله های آب

همانطور که در ابتدای فصل عنوان شد ، خوردگی لوله ها شامل انهدام، فساد یا دگرگونی در لوله ها به علت واکنشهای فیزیکی و شیمیایی بین اجزای مواد لوله ها و محیط اطراف آن که شامل آب و خاک می باشد. بنابراین خوردگی در لوله های فلزی اب یک پدیده الکتروشیمیایی و یا شیمیایی است که بر اساس ایجاد شرایطی همچون، وجود آند و کاتد، اختلاف پتانسی بین آنها، ارتباط فلزی بین کاتد و آند و همچنین قرار گرفتن دو قطب در یک الکترولیت ایجاد می گردد. وقتی که فلز در محیط آبی به شکل یون درآمده و یا در اثر واکنش با ناخالصیها و اجزاء آب تبدیل به یک ترکیب می گردد، الکترونها از برخی نقاط مسطح فلز به نقاط دیگر جریان می یابند. قسمتی از سطح فلز که خورده شده است،

تشکیل آند و قسمتی دیگر که الکترونها به سوی آن به حرکت در می آیند، کاتد را تشکیل می دهد. به بیان دیگر به علت اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد فلز الکترون خود را در قسمت آند از دست داده و تبدیل به یون می گردد که در ترکیب با OH موجود در محیط، هیدروکسید فلز را تشکیل می دهد. در فلزات آهنی هیدروکسید آهنی تبدیل به FeO یا همان زنگ آهن می گردد. در قسمت کاتد الکترونهای اضافی با هیدروژن موجود در محیط، تولید گاز هیدروژن می کند که موجب تشکیل یک لایه به عنوان لایه پلاریزاسیون در اطراف کاتد می گردد. (۲۶)

۱-۵-۲ اثر کیفیت آب بر خوردگی داخلی لوله ها

در خوردگی داخلی لوله های آب آشامیدنی، عامل محیطی، آب در تماس با جدار داخلی لوله هاست. بنابراین ویژگیهای آب شامل خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی از عوامل مهم موثر در خوردگی داخلی لوله ها می باشند و جهت ارزیابی و کنترل خوردگی داخلی لوله ها، اطلاع از کلیه خصوصیات و کیفیت آب بسیار ضروری است.

۱-۵-۱-۱ **کیفیت فیزیکی آب:** از مهمترین خصوصیات فیزیکی آب که در خوردگی دخالت دارند، سرعت جریان آب و درجه حرارت آب را می توان نام برد.

۱-۵-۱-۱-۱ **سرعت جریان آب:** سرعت جریان آب در لوله ها دارای ۲ اثر متناقض در خوردگی لوله هاست. در سرعتهای بالا، جریان آب موجب خوردگی فرسایشی در جدار لوله می گردد که میزان خوردگی فرسایشی متناسب با سرعت جریان و جنس جدار داخلی لوله می باشد. همچنین سرعت جریان زیاد می تواند موجب شستشوی پوششها و یا لایه های محافظ که در اثر رسوب عوامل محافظت کننده در جدار لوله تشکیل می گردد، شده و وقوع خوردگی را تشدید نماید. اثر دیگر سرعت زیاد جریان در خوردگی بعلا افزایش تماس اکسیژن محلول با سطح لوله است که نقش اساسی در بسیاری از واکنشهای خوردگی ایفا می کند.

از طرف دیگر جریانهای کند نیز می تواند در ایجاد خوردگی موثر باشند. بدین ترتیب که در جریانهای راکد داخل برخی لوله ها، برآمدگی و خوردگی حفره ای مشاهده شده است. به خصوص در لوله های آهنی که متعاقب رشد بیولوژیکی در لوله هاست. بنابراین از ایجاد نقاط با جریان راکد در سیستمهای توزیع بایستی اجتناب کرد. راهنمایی هایی از طرف موسسات مختلف از جمله (NACE) و (ASTM) و همچنین سازندگان لوله ها برای طراحی مناسب با توجه به استانداردهای لوله ها تعیین شده است. مثلاً حداکثر سرعت جریان ۴ فوت بر ثانیه برای لوله های مسی نوع (K) توصیه شده است.

۱-۵-۱-۲ **درجه حرارت آب:** اثر درجه حرارت پیچیده بوده و بستگی به کیفیت شیمیایی آب و نوع لوله استفاده شده دارد. به طور کلی سرعت واکنشهای شیمیایی از جمله واکنشهای خوردگی، با بالا رفتن دما افزایش می یابد و آب گرم خورنده تر از آب سرد می باشد. در لوله های مسی و آهن گالوانیزه آب گرم در حرارتهای بسیار بالا موجب خوردگی حفره ای و تخریب لوله می گردد.

در حالت دیگر دمای آب بطور مشخص در غیر محلول شدن کربنات کلسیم (CaCO_3) موثر بوده و کربنات کلسیم در حرارتهای بالا بسیار کم محلول است که در نتیجه موجب رسوب کربنات کلسیم و تشکیل یک لایه محافظ می گردد و خوردگی در سیستم کاهش می یابد. از طرف دیگر رسوب زیاد از حد کربنات کلسیم در جدار داخلی لوله های آب گرم ممکن است موجب گرفتگی لوله گردد [۲۸ و ۱۲].

افزایش دما همچنین می تواند شکل کلی خوردگی را تغییر دهد. به طور مثال یک آبی که در درجه حرارت پایین خوردگی حفره ای ایجاد می کند، وقتی گرم می شود ممکن است موجب خوردگی منظم شود. در اثر تغییر درجه حرارت آب ممکن است تغییراتی در ماهیت کلی خوردگی ایجاد گردد که نمونه آن عوض شدن وضعیت کاتد و آند در لوله های آهن گالوانیزه می باشد. در برخی آبهای با درجه حرارت بالای ۱۴۰ فارنهایت ممکن است روی کاتد شده و سرعت خوردگی آهن گالوانیزه از مقدار پیش بینی شده بیشتر گردد [۲۷].

۱-۵-۲-۲ کیفیت شیمیایی آب

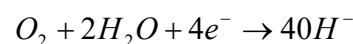
مهمترین بحث در خوردگی داخلی لوله ها، واکنش آب با جدار داخلی لوله ها را تشکیل می دهد. مواد حل شده در آب عامل مهمی در خوردگی و همچنین کنترل خوردگی می باشند. برای درک کامل چگونگی انجام این واکنشها لازم است کیفیت شیمیایی آب بطور کامل مشخص گردد. از عوامل شیمیایی آب که در خورنده بودن آن موثر و مهم هستند می توان عوامل pH، قلیائیت، اکسیژن محلول، کلر باقیمانده، کل جامدات محلول، سختی، کلرید و سولفات، سولفید هیدروژن، سیلیکاتها و فسفاتها، مواد آلی و رنگ طبیعی، آهن، روی و منگنز را نام برد.

تعدادی از فاکتورهای فوق به یکدیگر وابسته هستند و ایجاد تغییر در یکی از آنها موجب تغییر در فاکتور دیگری می شود. برای مثال ارتباط بین pH، دی اکسید کربن (CO₂) و قلیائیت را می توان نام برد. در حالیکه اغلب گفته می شود که CO₂ یک عامل موثر در خوردگی است، لیکن در هیچیک از واکنشهای خوردگی CO₂ وجود ندارد. عامل مهم خوردگی pH بوده و pH نیز تحت تاثیر تغییرات (CO₂) می باشد. در اینجا هر یک از فاکتورهای مرتبط با خوردگی به طور اجمالی مورد بررسی قرار می گیرد:

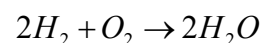
۱-۲-۵-۲ pH : غلظت یونهای هیدروژن (H⁺) در آب تحت عنوان pH بیان می گردد. به دلیل اینکه یون (H⁺) یکی از عناصر اصلی پذیرنده الکترونهای حاصل از فلزات خورده شده می باشد، pH فاکتور مهمی محسوب می گردد. در pH کمتر از ۵، لوله های آهنی و مسی سریعاً و به طور یکنواخت خورده می شوند. در مقادیر بیشتر از ۶ آهن و مس معمولاً خورده نمی شوند. اگر چه در شرایط معینی ممکن است خوردگی در pH بالا افزایش یابد ولی در pH بین ۵ و ۶، زمانی که هیچگونه لایه حفاظتی وجود ندارد معمولاً خوردگی حفره ای ایجاد می گردد. pH همچنین در تشکیل و یا حلالت لایه های حفاظتی موثر است [۲۷].

۲-۲-۵-۱ قلیائیت : توانایی آب را در خنثی کردن اسیدها، قلیائیت می نامند. قلیائیت در آبهای آشامیدنی اغلب بصورت ترکیبهای چون کربناتهای بیکربناتها (CO₃) می باشد. بخش بیکربنات قلیائیت، توانایی خنثی کردن بازها را نیز دارد. این خاصیت بنام خاصیت بافری نامیده می شود که در مقابل تغییرات pH مقاومت می کند. کربناتها و بیکربناتها در واکنشهای خوردگی شیمیایی تاثیر و دخالت دارند. توانایی آب در تشکیل یک پوشش کربنات فلزی محافظ و تاثیر غلظت یونهای کلسیم بر حل شدن کلسیم از لوله های دارای پوشش میانی و یا آزبست سیمان، از جمله این تاثیرات است. همچنین قلیائیت با تشکیل یک پوشش از کربنات سرب بر سطح فلزی، حلالت سرب از لوله های سربی یا دارای لحیم سرب را کاهش می دهد.

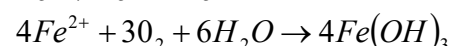
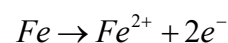
۳-۲-۵-۱ اکسیژن محلول: بنا به نظر بسیاری از متخصصان، اکسیژن مهمترین و معمولترین عامل خوردگی است. در بسیاری از موارد طبق واکنش زیر، اکسیژن پذیرنده الکترونهای فلز خورده شده می باشد:



همچنین اکسیژن با هیدروژن آزاد شده در کاتد واکنش انجام داده، موجب حذف گاز هیدروژن از کاتد می گردد و در نتیجه به واکنشهای خوردگی ادامه فعالیت می دهد.



اکسیژن همچنین با یونهای آهن فروس (Fe²⁺) ترکیب شده و آنها را تبدیل به آهن فریک می کند. یونهای آهن فروس در آب محلول هستند اما آهن فریک تشکیل یک هیدروکسید نامحلول را می دهد. آهن فریک در محل خوردگی تجمع پیدا کرده و تشکیل یک توده را می دهد و یا در نقاط دیگر لوله ته نشین می شود.



با حضور اکسیژن در آب، امکان ایجاد خوردگی حفره ای یا برآمدگی وجود دارد. در برخی حالتها، ممکن است اکسیژن با سطح فلز واکنش انجام داده و تشکیل یک پوشش محافظ از اکسید فلز را دهد [۲۸ و ۲۹].

۴-۲-۵-۱ کلر باقیمانده: کلر در ترکیب با آب تشکیل اسید هیدروکلریک و اسید هیپوکلرو را می دهد و موجب کاهش pH می گردد. این واکنش پتانسیل خوردگی آب را افزایش می دهد. بخصوص در آبهای با قلیائیت کم، به علت مقاومت کمتر در مقابل تغییرات pH این اثر بیشتر است. آزمایشات نشان داده است که سرعت خوردگی فولاد در غلظتهای بالای ۰/۴ میلیگرم در لیتر کلر، افزایش می یابد. همچنین کلر دارای خاصیت اکسیدکنندگی بیشتری از اکسیژن در آبهای طبیعی با (pH=۷) می باشد.

۵-۲-۵-۱ کل جامدات محلول (TDS): افزایش TDS در آب موجب بالا رفتن غلظت یونها و افزایش هدایت الکتریکی اب می گردد. افزایش هدایت الکتریکی توانایی آب را در انجام واکنشهای الکتروشیمیایی و خوردگی بیشتر می کند. جامدات محلول ممکن است در تشکیل لایه های محافظ موثر باشند.

۶-۲-۱-۵-۲ **سختی آب:** سختی غالباً به علت وجود یونهای کلسیم و منیزیم می باشد که بر حسب کربنات کلسیم بیان می شود. به طور کلی آبهای سخت دارای خوردندگی کمتری از آبهای سبک می باشند. البته در صورتی که یونهای کلسیم و قلیائیت موجود در آب، برای تشکیل پوشش محافظ داخلی لوله ها، به اندازه کافی باشد.

۷-۲-۱-۵-۲ **کلریدها و سولفیدها:** یونهای کلرید و سولفید در واکنش با فلزات موجب محلول باقیماندن فلزات شده و در نتیجه از تشکیل لایه های اکسید فلزی محافظ جلوگیری می کنند. کلرید در این اثر تقریباً ۳ برابر فعالتر از سولفید است. در برخی گزارشات برای برآورد میزان خوردندگی آب از نسبت سولفات به بیکربنات و مقدار کلرید استفاده شده است.

۸-۲-۱-۵-۲ **سولفید هیدروژن:** سولفید هیدروژن به علت ترکیب با یونهای فلزی و تشکیل سولفیدهای نامحلول، خوردگی را شدت می بخشد. لوله های آهنی، فولادی، مسی و لوله های گالوانیزه، مورد حمله سولفید هیدروژن قرار گرفته و تشکیل آب سیاه را می دهد. اثرات H_2S اغلب پیچیده بوده و ممکن است فوری باشد و یا ماهها ظاهر نشده و سپس به طور ناگهانی شدت یابد.

۹-۲-۱-۵-۲ **سیلیکاتها و فسفاتها:** سیلیکاتها و فسفاتها می توانند تشکیل لایه های محافظ را دهند که موجب کاهش و پیشگیری از خوردندگی گردند. این مواد شیمیایی معمولاً به عنوان مواد کند کننده خوردگی به آب اضافه می شوند.

۱۰-۲-۱-۵-۲ **رنگها و مواد آلی:** وجود رنگهای آلی طبیعی و دیگر مواد آلی به چند طریق ممکن است در خوردگی اثر نماینده برخی مواد آلی طبیعی در واکنش با سطح فلز می توانند تشکیل لایه محافظ داده و خوردگی را کاهش دهند. برخی دیگر با محصولات خوردگی ترکیب شده و خوردگی را افزایش می دهند. همچنین مواد آلی ممکن است یونهای کلسیم را محبوس نموده و مانع تشکیل پوشش کربنات کلسیم محافظ گردد. در برخی حالتها دیگر، مواد آلی به عنوان ماده غذایی در رشد ارگانیسمها در سیستم توزیع مورد مصرف قرار می گیرند و در نتیجه ممکن است موجب افزایش خوردگی بیولوژیکی گردند.

۱۱-۲-۱-۵-۲ **روی و منگنز:** این ترکیبات نقش کاهش دهنده سرعت خوردگی را در لوله های آزیست سیمان نشان داده اند. در واکنشهایی که هنوز به طور کامل مشخص نشده است، این ترکیبات فلزی می توانند با مواد لوله های سیمانی ترکیب شده و تشکیل لایه های محافظ در سطح لوله دهند. آبهایی که به طور طبیعی دارای مقادیری از آهن می باشند، حالت حفاظت در خوردگی لوله های آزیست سیمان از خود نشان می دهند. زمانی که روی به فرم کلرید یا سولفید روی به آب اضافه گردیده، حالت مشابه محافظت از خوردگی مشاهده شده است.

۱۲-۲-۱-۵-۲ **کیفیت بیولوژیکی:** باکتریهای هوازی و بیهوازی هر دو می توانند موجب خوردگی شوند. باکتریایی که به طور معمول موجب خوردگی در سیستمهای توزیع آب می گردند شامل دو نوع باکتری کاهنده سولفات و اکسید کننده آهن می باشند. هر دو نوع این باکتریها در ایجاد برآمدگی و توده در دیواره لوله از طریق دفع محصولات خود که به دیواره لوله می چسبند، نقش دارند. هنگام وقوع پدیده سرخ شدن آب، باکتریهای سولفید دیده شده اند. برخی از میکروارگانیسمها همراه با آهن تشکیل رسوبات را می دهند. فعالیت این میکروارگانیسمها می تواند منجر به افزایش غلظت آهن در نقاط معنی از سیستم توزیع گردند. کنترل این میکروارگانیسمها در بسیاری از حالتها بسیار مشکل است زیرا ممکن است تعدادی از باکتریهای بیهوازی در زیر توده های ایجاد شده، وجود داشته باشند که کلر و اکسیژن نمی توانند به آنها برسد. به علاوه این باکتریها معمولاً در نقاط بدون جریان و یا کم جریان که کلر باقیمانده وجود ندارد، یافت می شوند. غالباً رشد میکروارگانیسمها با افزایش درجه حرارت زیاد می شود. در محیط های مختلف میکرو و یا ماکروارگانیسمها قادرند شرایط زندگی خودشان را با درجه حرارت آب وفق دهند. مطلوبترین درجه حرارت برای بیشتر میکروارگانیسمها بالاتر از $10^{\circ}C$ می باشد و برای ارگانیسمهای آب و خاک $35^{\circ}C - 25^{\circ}C$ مطلوبترین درجه حرارت است [۲۸].

pH آب تأثیر عمده ای بر رشد میکروارگانیسمها ندارد. برای باکتریهای SRB بهترین شرایط pH برابر ۷ می باشد. البته باید توضیح داد که تأثیرات میکروب کشها با تنظیم pH بسیار بهبود می یابد.

رشد و انباشتگی پیوسته میکروارگانیسمها در آب دستگاه خنک کن سبب مشکلات عدیده ای می شود. در تاسیساتی که نتوان در آن رشد میکروبی را کنترل کرد، اغلب با دشواریهای خوردگی و ته نشینی روبرو می شویم. مشکل دیگری که هجوم میکروبی را باعث می شود پوسیدگی چوبهای برج خنک کن است. این کار نه تنها از بازدهی بهره برداری می کاهد، بلکه سبب افزایش بهای بهره برداری کارخانه نیز می شود.

میکروارگانیزمهای فراوانی در آب خنک کن یافت می شوند که در سوخت و ساز خود هیدروژن به کار می برند و اغلب نتیجه آن غیر قطبی شدن واکنش کاتدی خوردگی است. آزاد شدن هیدروژن از سطح فلز باعث فراهم آمدن وسیله ادامه واکنش خوردگی می گردد. آزاد شدن اکسیژن به وسیله جلبکها به عنوان بخشی از سوخت و ساز آنها سبب غیرقطبی شدن واکنش کاتدی شده و لذا خوردگی تسریع می شود [۲۸].

به طور کلی فرایندهای متابولیکی موجودات زنده میکروسکپی به طریق زیر می تواند بر رفتار خوردگی موثر باشند

الف: تاثیرات سوء مواد شیمیایی ایجاد شده (اسید سولفوریک، سولفیدهای آلی و معدنی و اسیدهای آلی و سایر ترکیبات خورنده دیگر).

ب: تشکیل سلهای الکتروشیمیایی و ایجاد خوردگی موضعی با ایجاد تغییرات در مقدار اکسیژن، غلظت نمکها، pH، مقدار گوگرد و سایر پارامترهای دیگر.

ج: غیر قطبی نمودن کاتدی که در نتیجه رشد باکترهای بی هوازی صورت می پذیرد.

د: حذف و تقلیل کاهش دهندگان خوردگی

۲-۵-۲ جوانب اقتصادی و بهداشتی خوردگی در لوله های آب آشامیدنی

خوردگی از مهمترین مسائل در سیستمهای تامین و توزیع آب می باشد که اهمیت آن به علت اثرات بهداشتی، خسارات اقتصادی و مشکلات زیادی است که در این ارتباط حاصل می گردد. صدمات و خطرات بهداشتی که پدیده خوردگی در لوله های آب آشامیدنی می تواند ایجاد نماید، عمدتاً مربوط به ورود ترکیبات و عناصر فلزی بخصوص فلزات سنگین نظیر سرب و کادمیوم از لوله ها و اتصالات سربی و دارای کادمیوم به آب و نتیجتاً آلودگی شدید آب می باشد. این دو فلز حتی در مقادیر جزئی بسیار سمی بوده و اثرات مخاطره آمیزی بر سلامتی انسان دارند. لوله های سربی و اتصالات دارای سرب در سیستمهای توزیع آب بخصوص در گذشته از عمده ترین منابع آلودگی آب به سرب بوده است به طور مثال در سال ۱۹۲۴، ۵۱٪ از سیستمهای توزیع آب در ۵۳۹ شهر ایالات متحده از لوله ها و لوازم سربی استفاده شده بود [۳۹]. و هنوز نیز در برخی موارد وجود سرب یک مشکل در سیستمهای توزیع می باشد.

در اثر خوردگی داخلی لوله های سربی که در تماس با آب خورنده قرار دارند، سرب به صورت محلول وارد آب می گردد. در مطالعه ای که بر روی خوردگی لوله های سربی و کنترل آن در شهر "Boston" در سال ۱۹۸۲ انجام گرفته است، به علت استفاده وسیع از لوله های سربی در گذشته و همچنین وجود آب سبک و خورنده، موجب افزایش غلظت سرب در آب مورد مصرف و همچنین خون مصرف کنندگان بخصوص کودکان شده بود. برای کنترل خوردگی در این شهر از NaOH برای تعدیل pH استفاده شده بود که در نتیجه خوردگی لوله های سربی و مسی به طور چشمگیری کاهش یافته و غلظت سرب به مقدار زیادی کاسته شده بود [۴۱].

از اثرات دیگر خوردگی لوله ها بخصوص لوله های مسی، آهنی و روی، تغییرات در کیفیت ظاهری آب و ایجاد رنگ و بوی نامطلوب در آب را میتوان نام برد که موجب اعتراض مصرف کنندگان می گردد. خوردگی در لوله های آهنی، رنگ قرمز در آب ایجاد می کند که علاوه بر اینکه کیفیت ظاهری آب را نامطلوب می سازد، موجب ایجاد لکه بر روی لباسهایی که با این نوع آب شستشو می شوند، می گردد. در لوله های مسی خوردگی باعث تولید رنگ سبز و آبی و طعم فلزی در آب می شود و لوله های روی نیز در اثر خورده شدن، طعم فلزی به آب می دهد. مواد حاصل از خوردگی در سیستمهای توزیع، همچنین موجب حفاظت و رشد و تکثیر میکروارگانیزمها نظیر باکتریها، مخمرها و غیره شد که علاوه بر تشدید خوردگی در سیستم، مشکلاتی را از نظر تولید بو و طعم نامطلوب و تولید لجن را ایجاد می کند.

جوانب اقتصادی خوردگی لوله های آب نیز با توجه به هزینه های کلانی که در اثر عوارض و پیامدهای حاصل از خوردگی و همچنین پیشگیری و کنترل آن توسط موسسات و سازمانهای مسئول تامین و توزیع آب، مصرف می شود، بسیار حائز اهمیت است. نظر به سرمایه گذاریهای عظیم و هزینه های سنگین که در تهیه و استفاده از لوله ها در سیستمهای انتقال و توزیع آب صورت می گیرد، وجود خوردگی و عدم مبارزه مناسب و به موقع با آن، موجب از بین رفتن این سرمایه ها در اثر تخریب و انهدام و کاهش عمر لوله ها، و صرف هزینه های اضافی جهت تعویض و کارگزاری لوله های جدید خواهد شد.

بر اساس گزارش (NBS) در سال ۱۹۷۵ هزینه های ناشی از خوردگی در سیستمهای توزیع آب در ایالات متحده، سالیانه حدود ۷۰۰ میلیون دلار بوده است [۴۲].

گرفتگی و کاهش ظرفیت آبدهی لوله ها و افزایش هزینه های پمپاژ آب و همچنین سوراخ شدن لوله ها که موجب نشست آب و هدر رفتن آن و کاهش فشار آب می گردد، از دیگر اثرات فنی و اقتصادی حاصل از خوردگی می باشد که موجب افزایش هزینه ها در سیستم توزیع آب و قیمت تمام شده آب برای مصرف کنندگان نیز می گردد. آسیبهایی که در اثر خوردگی به لوله های آب وارد می شود علاوه بر اینکه هزینه های تعویض و استفاده از لوله جدید را موجب می گردد، توقف و اختلال در امر سرویس دهی و توزیع آب در منطقه و در نتیجه مخاطرات بهداشتی به علت عدم دسترسی به آب سالم بهداشتی و هزینه های تامین آب در زمان تعمیر و تعویض سیستم را به دنبال خواهد داشت. پیشگیری و کنترل خوردگی در سیستمهای توزیع آب علیرغم هزینه های فراوان آن، در مقایسه با هزینه های تعویض و کارگزاری لوله جدید، بسیار مقرون به صرفه بوده و بسیاری از مشکلات را نیز ندارد.

آژانس (EPA) آمریکا، مقررات و راهنمایی هایی برای کنترل و پیشگیری از خوردگی و اهمیت پرداختن به این امر مهم ارائه نموده است.

۶-۲ خوردگی در لوله های بتنی فاضلاب

۱-۶-۲ لوله های بتنی

لوله های بتنی به علت قیمت مناسب گزینه ای مناسب برای نصب در سیستم انتقال و جمع آوری فاضلاب محسوب می گردند بتن پرمصرفترین ماده ساختمانی در دنیاست و دلیل این مقبولیت جهانی به علت قیمت پائین و راحتی کاربرد و مقاومت استاتیکی خوب آن است در سیستم های فاضلاب وجود انواع عوامل خوردنده شیمیایی باعث ایجاد خوردگی (Corrosion) در سطوح تماس با این سازه می گردند و این مشکل بایستی در تمام مراحل طراحی و اجراء سیستم های فاضلابی مورد توجه قرار گرفته و برای جلوگیری از ایجاد شرایط نامطلوب و نیز برای افزایش زمان ماندگاری سازه ها در سیستم های فاضلاب استفاده از پوشش های مقاوم الزامی می باشد.

۱-۶-۲-۱ مشخصات سیمان مصرفی: سیمان پودری نرم، جاذب آب و چسباننده خرده سنگ است و اساساً از مخلوط سیلیکات ها و آلومینات های کلسیم که از پختن و ذوب ناقص مخلوط موادی که از آهک، سیلیس و آلومین غنی هستند در درجه حرارت بالا بدست می آید.

جدول (۲-۲۱) حدود تقریبی مواد اصلی تشکیل دهنده سیمان

CaO	%60 - %67	MgO	%0.1 - %5
SiO ₂	%17 - %25	Fe ₂ O ₃	%0.5 - %6
Al ₂ O ₃	%3 - %8	SO ₃	%1 - %3
	K ₂ O, Na ₂ O	%0.4 - %1.3	

جدول (۲-۲۲) مواد فرعی تشکیل دهنده سیمان

TiO ₂	%0.2 - %0.25	MnO ₂	%0.1 - %0.2
------------------	--------------	------------------	-------------

امروزه انواع متنوعی از سیمان با ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی مختلف تولید و عرضه می شوند سیمان پرتلند مصرفی در محصولات فارسیت در انواع تیپ ۱، تیپ ۲ و تیپ ۵ در ادامه ذکر گردیده است. (۲۵)

۱-۶-۲-۱-۱ سیمان تیپ ۱: این نوع سیمان برای مصارف عمومی میباشد و برای کلیه سازه هایی که خواص ویژه انواع سیمانها در آنها ضرورت نداشته باشد مصرف می شود. همچنین در مواردی که سیمان و بتن در معرض سولفات های موجود در آب یا خاک و یا تحت اثر شرایط نامساعد ازدیاد درجه حرارت نباشد مصرف می گردد.

جدول (۲۳-۲) محدودیتهای سیمان تیپ ۱

Ins.Res	Max	%1.5	SiO ₂	Min	%19
CAO	Max	%66	Al ₂ O ₃	Max	%8
SO ₃	Max	%3	MgO	Max	%5
Fe ₂ O ₃	Max	%5			

۲-۱-۱-۲ سیمان تیپ ۲: در شرایطی که احتمال محدود سولفاتها وجود دارد می توان از این نوع سیمان استفاده نمود. حرارت حاصل از هیدروتاسیون این نوع سیمان کمتر از نوع ۱ میباشد لذا برای اجرای سازه های نسبتاً حجیم و همچنین برای کار در هوای گرم مناسب تر است.

جدول (۲۴-۲) محدودیتهای سیمان ضد سولفات تیپ ۲

SiO ₂	Max	%21	Ins.Res	Max	%0.75
Al ₂ O ₃	Max	%6	C ₃ A	Max	%8
Fe ₂ O ₃	Max	%6	Loss	Max	%3
MgO	Max	%5	SO ₃	Max	%2.5
C ₃ S + C ₃ A			Max	%58	

۳-۱-۱-۲ سیمان تیپ ۵: سیمان ضد سولفات قوی میباشد که برای ساخت سازه های مختلفی که در معرض حمله سولفاتها میباشند استفاده می گردد. حرارت حاصل از هیدروتاسیون کمی دارد و زمان گیرش آن نیز کندتر از سیمان تیپ ۲ میباشد.

جدول (۲۵-۲) محدودیتهای ترکیب سیمان تیپ ۵

MgO	Max	%4	Ins.Res	Max	%0.75
SO ₃	Max	%2.3	C ₃ A	Max	%5
	Less	Max	%3		
	C ₄ AF + 2C ₃ A	Max	%20		

بعضی از زمینها دارای مقادیر زیادی از سولفات کلسیم و سولفات منیزیم میباشند. سولفات کلسیم و سولفات منیزیم با کریستالهای C₃A(3CaO Al₂O₃) ترکیب شده و تولید تری سولفوآلومینات محلول می نمایند که باعث ایجاد خلل و فرج در سازه های ساخته شده از سیمان می گردد. بنابراین لازم است سیمان مصرفی برای ساخت و تولید این نوع محصولات دارای کمترین مقدار C₃A باشد که بایستی نسبت آلومینوم به آهن کم گردد یعنی از سیمان تیپ ۵ استفاده نمود. (۲۵)

۲-۱-۲ عوامل موثر در استقامت بتن: بتن ها در طول زمان خراب می شوند، سرعت خراب شدن بتن تابع دو عامل است، کیفیت بتن و محیطی که بتن در معرض آن قرار می گیرد. کیفیت بتن اشاره به خصوصیات ترکیب اصلی مخلوط بتن نظیر نسبت آب به سیمان، نوع سیمان، سختی و اندازه خرده سنگ و هوای نفوذی و همچنین اقدامات کارگذاری آن دارد.

عوامل دوم که در سرعت خراب شدن بتن تاثیر دارد، عوامل محیطی است، تصفیه خانه های فاضلاب شرایط محیطی سختی را برای بتن فراهم می کنند، مانند چرخه مرطوب شدن، خشک شدن، یخ زدن، آب شدن یخ ها، شرایط بی هوایی در مجاری فاضلاب روها و ... [۴۳]. به هر حال بتن با کیفیت بالا نیز خراب خواهد شد، به همین دلیل عاقلانه تر خواهد بود که از بتن با کیفیت بالا نیز حفاظت گردد تا استحکام و دوام آن افزایش یابد. بهترین زمان جهت حفاظت از بتن زمانی است که بتن تازه باشد.

مهمترین مساله برای حفاظت از بتن، تشخیص این مساله است که چرا بتن خراب می شود. داشتن این اطلاعات اجازه می دهد که بتوان متوجه اصل موضوع شد و حفاظت لازم برای پیشگیری از خرابی آن را در نظر گرفت. این تشخیص معمولا از شرکت های مشاور مهندسی و شرکت های آزمایش کننده بتن که آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی انجام می دهند، قابل حصول است. [۴۳].

۳-۱-۶ پایایی و دوام بتن: بتن باید بتواند شرایط محیطی را که در طرح آن در نظر گرفته شده است را تحمل نماید و در طول سالیان معین گسیخته نگردد، به چنین بتنی، بتن بادوام گفته می شود.

پارامترهایی که می تواند باعث شود بتن ساخته شده دارای پایایی کمی باشد به دو عامل اصلی بستگی دارد که عبارتند از عوامل خارجی (محیطی) و عوامل داخلی. عوامل خارجی می تواند بصورت فیزیکی، شیمیایی و یا مکانیکی باشد، میزان خسارات ایجاد شده توسط این عوامل بستگی به کیفیت بتن ساخته شده خواهد داشت، گرچه بتن به هر اندازه با کیفیت بالا نهیه گردد امکان دارد تحت عوامل شدید خارجی گسیخته شده و دوام کمی را از خود نشان دهد. عوامل داخلی نیز عبارتند از واکنش قلیایی سنگدانه ها و نفوذپذیری بتن و تغییرات حجمی در اثر اختلاف بین خواص حرارتی سنگدانه ها و خمیر سیمان [۲۰].

از عوامل دیگر در پایایی و دوام بتن می توان به نفوذپذیری آن اشاره کرد، می دانیم که در خمیر سیمان و هم در سنگدانه ها منافذی وجود دارند و به علاوه خود بتن نیز دارای منافذی می باشد که در اثر عدم تراکم کامل و یا آب انداختن آن بوجود آمده اند، این منافذ ممکن است بخشی بین ۱ تا ۱۰ درصد حجم بتن را اشغال نماید بتنی که دارای حجم منافذ ۱۰ درصد باشد معرف بتنی است که کرومو شده و مقاومت آن کم خواهد بود.

هرچه نسبت آب سیمان خمیر کمتر شود روند کاهش در ضریب نفوذپذیری بتن سریعتر می گردد. همچنین خمیرهایی که به اندازه یکسان هیدراته شده باشند هر چه مقدار خمیر سیمان بیشتر باشد، یعنی نسبت آب به سیمان کمتر باشد نفوذپذیری کمتر است [۲۰].

۴-۱-۶ کیفیت لازم برای آب مصرفی جهت حصول بتن بادوام: تقریبا هر آب طبیعی که قابل آشامیدن بوده و مزه و بوی نامشخصی نداشته باشد می توان به عنوان اختلاط برای ساختن بتن بکار برد، با وجود این آب مناسب برای ساختن بتن ممکن است برای آشامیدن مناسب نباشد. آبی که مناسب بودن آن مورد تردید است، می توان برای ساختن بتن مصرف کرد به شرطی که مکعب ملات سیمان ساخته شده با آن دارای مقاومت ۷ و ۲۸ روزه ای به حداقل ۹۰ درصد نمونه های مشابه ساخته شده با آب قابل شرب باشد، همچنین اطمینان حاصل شود که ناخالصیهای آب اختلاط، زمان گیرش سیمان را به طور زیان آوری کاهش یا افزایش نمی دهد و نیز ناخالصیهای بیش از حد آب اختلاط ممکن است باعث شوره زدن، لکه دار شدن یا خوردگی میلگردها شود. بنابراین حدودهای اختیاری را می توان برای مقدار کلرورها، سولفات ها، قلیاها و ذرات جامد را در آب اختلاط در نظر گرفت. عموما آبی که کل ذرات محلول در آن کمتر از ۲۰۰۰ پی پی ام باشد می توان به گونه ای رضایتبخش برای ساختن بتن استفاده کرد. آبی که بیشتر از این مقدار حاوی ذرات محلول است، باید برای تعیین اثر آنها روی مقاومت و زمان گیرش آزمایشهای لازم به عمل آید، که مختصری در مورد این ترکیبات در آب اختلاط اشاره می کنیم [۲۰].

۱-۴-۱-۶ کربناتها و بیکربناتهای قلیایی: کربنات سدیم می تواند باعث گیرش خیلی سریع شود بیکربناتها هم می توانند گیرش را تسریع و یا کند نمایند، وجود این نمک ها با غلظت های زیاد مقاومت بتن را به گونه ای چشمگیر پایین می آورد. آیین نامه ایران میزان کربنات و بیکربنات موجود در آب اختلاط را ۱۰۰۰ پی پی ام محدود می نماید و در مورد منیزیم این مقدار را به ۴۰۰ پی پی ام محدود می کند [۲۰].

۲-۴-۱-۶ کلرور و سولفات: نگرانی برای مقدار کلرور زیاد در آب عمدتا به علت اثرات زیان آور احتمالی یون کلر روی خوردگی میلگرد هاست، یونهای کلرور بر قشر حفاظتی اکسید شده روی میلگردها که از محیط شیمیایی با درجه قلیائی بالای موجود در بتن تشکیل می شود، حمله می کنند مقدار کلرور که می تواند موجب خوردگی میلگردها شود حدود ۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب است. کلرورها می توانند از طریق هر یک از مواد اختلاط مانند مواد افزودنی، دانه ها، سیمان و آب اختلاط در مجاورت نمک های یخ زده آب دریا وارد بتن شوند. با توجه به منابع متعدد اتخاذ یک حد قابل قبول برای مقدار کلرور در هر یک از موارد در آب اختلاط دشوار است.

به منظور حفظ آرماتورها در برابر خوردگی، حداکثر یون کلرور قابل حل در آب در بتن سخت شده در سن ۲۸ روز که از مواد متشکله مشتعل بر آب، سنگدانه و مواد افزودنی ناشی می شود. نباید از حداکثر مقدار مجاز بین ۰/۰۶ تا ۱ درصد وزنی سیمان تجاوز نماید. آب دریا اغلب حاوی کلرورها و سولفاتهای سدیم و منیزیم است، عموماً آب دریا با حداکثر ۳۵۰۰ پی پی ام نمک محلول را می توان برای اختلاط بتن بدون میلگرد بکار برد [۲۱].

۳-۴-۱-۲ دیگر نمک های محلول: کربناتهای کلسیم در آب خیلی کم محلول هستند و بنابراین بندرت در غلظت های زیاد یافت می شوند که به مقاومت بتن اثر گذارند عموماً غلظت این نمکها در آب اختلاط تا حدوده ۵۰۰ پی پی ام قابل قبول است.

۵-۱-۲-۶ کیفیت لازم برای سنگ دانه ها جهت حصول بتن پایا و بادوام: این مواد از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار هستند سنگدانه های ضعیف نمی توانند ایجاد بتن مقاوم نمایند، بنابراین خواص سنگ دانه ها در مقاومت بتن اهمیت بسزایی خواهد داشت. سنگدانه ها باید تمیز، سخت، مقاوم و دانه های با دوامی بوده و از مواد شیمیایی جذب شده یونهای رسی و مصالح ریز دیگر در مقادیری که روی هیدراتاسیون و چسبندگی خمیر سیمان تاثیر می گذارد، عاری باشد. بویژه باید از مصرف دانه هایی که حاوی مقادیر زیادی شیل یا سایر سنگهای رسی، مصالح نرم و متخلخل اجتناب شود، دانه هایی که نسبت سطح به حجم آنها زیاد است، باعث کم شدن کارایی مخلوط می گردند، دانه های دراز و باریک و ورقه ای از این نوع مواد هستند که می توانند به نحو نامطلوبی بر دوام بتن اثر بگذارند، زیرا آنها تمایل به قرار گرفتن در یک سطح دارند و آب و هوا در منافذ زیر آنها جمع می گردد، یک سطح خشن تر مانند دانه های شکسته منجر به یک چسبندگی بیشتر می شود [۲۰].

به طور کلی سه گروه از مواد زیان آور وجود دارند که ممکن است در سنگدانه ها یافت شوند.

(۱) ناخالصیهایی که در فرآیند هیدراتاسیون سیمان دخالت دارند.

(۲) قشرهای پوشش که از توسعه چسبندگی کامل بین سنگدانه ها و خمیر سیمان جلوگیری به عمل می آورند.

(۳) بعضی از دانه ها که خودی خود ضعیف و ناسالم میباشند.

۶-۱-۲-۶ عمل آوری بتن: عمل آوری بتن تاثیر بر روی خواص بتن سخت شده مانند دوام و مقاومت فشاری و ... دارد. زمانی که سیمان با آب مخلوط می شود. یعنی عمل هیدراتاسیون انجام می پذیرد، اندازه انجام این واکنش و کامل شدن آن میزان مقاومت، دوام و وزن مخصوص بتن را مشخص خواهد نمود. اغلب بتن تازه دارای آبی است که بیش از حد کامل برای تشکیل هیدراتاسیون است و این هر گونه کاهش قابل ملاحظه آب که از طریق تبخیر و یا دیگر عوامل صورت می گیرد، هیدراتاسیون کامل را به تاخیر می اندازد. [۲۰].

۲-۶-۲ ساخت لوله های بتنی فاضلاب

سه روش ساخت برای تولید لوله های بتنی پیش ساخته وجود دارد که عبارتند از:

۱- قالب گیری خشک

۲- فشرده کردن مکانیکی بتن

۳- قالب گیری تر

روش اول و دوم در شیوه جدا کردن بلافاصله قالب از لوله دسته بندی می شوند. جدا کردن بلافاصله قالب از لوله در صورتی امکان پذیر است که از بتن غیر قابل ریزش استفاده شود. این بتن در مدت قالب گیری و ساخت لوله کاملاً متراکم می شود به طوریکه خواص بتن اجازه می دهد قالب داخلی یا خارجی بلافاصله پس از ساخت لوله از آن جدا شود. بدین سان قالب برای استفاده دوباره بر فرآیند تولید بر می گردد. لذا در این روش تعداد قالب های مورد نیاز برای هر اندازه بسیار اندک بوده و در هر واحد تولیدی برای ساخت لوله به بیش از یک یا دو قالب نیازی نیست. در قالب گیری خشک، فرآیند تولید، از چند جنبه قابل ملاحظه است از جمله استفاده از ماشینی که می تواند برای ساخت و طراحی انواع مختلفی از لوله مورد استفاده قرار گیرد.

فرآیند تولید لوله بتنی شامل ریختن بتن ما بین دو قالب خارجی و هسته داخلی است که سپس با استفاده از دستگاه ویریه توزیع و فشرده می شود، عمل ارتعاش ممکن است به صورت هیدرولیک یا الکتریکی از قالب خارجی و یا به صورت هیدرولیکی از قالب داخلی انجام گیرد قابلیت های فراوان این روش بتنی بر این است که در قالب گیری خشک امکان ساخت لوله به تعداد بیشتری وجود دارد [۲۲].

ماشین تولید لوله به یکی از دو روش زیر عمل می کند

- پس از اتمام فرآیند ساخت، ابتدا قالب بیرونی از لوله جدا می شود و سپس قالب داخلی.

- پس از اتمام فرآیند ساخت، ابتدا قالب داخلی از لوله جدا می شود، سپس قالب بیرونی.

در بعضی از روشها قالب داخلی به دور محوری ثابت تعبیه شده است و قالب در جهت بالا و پایین در حرکت است. ماشینهای قالب گیر خشک ممکن است گاهی دارای یک یا چندین ایستگاه مدل زنی بوده و شامل مدل‌های مختلفی از لوله تا محدوده قطر ۳۰۰ الی ۴۰۰۰ میلیمتر و با طول ۲/۵، ۳/۵ و ۵ متر باشد. این ماشینها در ساخت لوله های پهن در انواع شکلهای گرد، بیضی، قوسی و کانالهای با پوشش پی وی سی در اندازه های بزرگ قابل استفاده هستند. ماشینهای قالب گیر خشک، در برگیرنده مشخصات عمومی انواع اتصالات هستند. اتصال لوله های بتنی با یکدیگر توسط ملات سیمانی، مواد آب بندی (ماستیک)، نوار آب بندی لاستیکی یا واشر لاستیکی و اتصالات فولادی صورت می پذیرد [۲۲].

در روش دیگر جدا کردن بلافاصله قالب از لوله، فرآیند ساخت فشرده کردن مکانیکی بتن است، مشخصه ویژه این روش، توانایی تولید با سرعت بالا و ساخت انواع مختلف از مدل‌های لوله گرد از قطر ۱۰۰ میلیمتر تا ۲۱۰۰ میلیمتر و به طول ۳/۵ متر است. از لوله های گرد برای جمع آوری آبهای سطحی و باران، انتقال فاضلاب شهری، آبیاری و تهیه آب آشامیدنی استفاده می شود، با اضافه کردن تجهیزات جنبی به این نوع ماشینها امکان ساخت آدم رو نیز فراهم شود [۲۲].

این فرایند تولید، در برگیرنده تمامی استانداردهای تولید لوله بتنی از جمله ساخت لوله و اتصالات از قبیل اتصالات با ملات سیمان اورینگ و واشر آب بندی است. در فرآیند تولید لوله، بتن غیر قابل ریزش خشک به داخل قالب تغذیه می گردد، در این سیستم فقط قالب خارجی مورد استفاده قرار می گیرد و سیستم فاقد قالب داخلی است، قسمت داخلی لوله توسط سرگردنده شکل می گیرد.

مکانیسم سرگردنده بدین صورت است که سرگردنده توسط یک محور به سیستمی که حرکت چرخشی محور را تامین می کند متصل است. سرگردنده با حرکت چرخشی سریع و نیروی گریز از مرکز، بتن را به دیواره قالب بیرونی پرتاب کرده و بتن توسط غلطکها کوبیده می شود و غلطک ماله در جهت مخالف چرخیده و دیواره را صاف می کند که از نقطه نظر ضریب زبری لوله بسیار مهم است.

روش سوم ساخت لوله بتنی، استفاده از قالب گیری تر است که این روش با دو روش قبلی دیگر متفاوت است. در این روش جدا کردن قالب از لوله با تاخیر انجام می شود. در این فرآیند از بتن نسبتا تر استفاده می شود. اسلامپ بتن بین ۵۰ تا ۷۵ میلیمتر است و لوله به صورت عمودی مابین فضای حلقوی هسته مرکزی و قالب خارجی ساخته می شود، این فرآیند برای ساخت لوله های با قطر بزرگ مناسب است. قالب به صورت آزاد و بدون تکیه گاه می ایستد و هیچ ماشینی برای تولید بکار گرفته نمی شود. معمولا چندین قالب کنار هم چیده می شوند و عمل بتن ریزی انجام می گیرد. لوله معمولا تا روز بعد از قالب گیری در محل، ثابت باقی می ماند، بدین ترتیب در هر روز برای ساخت هر تعداد لوله از یک قطر به همان تعداد قالب نیاز است.

قالب گیری تر از قابلیت بسیاری برخوردار است، چون هیچ محدودیتی در استفاده از ماشین وجود ندارد و لوله ممکن است در چندین طول و قطر در یک خط قالب گیری شود معمولا طول لوله ها حداکثر ۷ متر و در محل وسیع و سرباز تولید می شود. از این لوله ها بیشتر در کلاس فشارهای متوسط و بالا استفاده می شود.

روش دیگر در بتن ریزی تر بدین صورت است که قالب به طور افقی قرار گرفته و با سرعت به دوران در می آید، سپس بتن تر درون قالب ریخته شده و با نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش قالب، بتن به بدنه قالب می چسبد، از این روش برای تولید لوله های بتنی فشار قوی جهت انتقال آب استفاده می شود [۲۲].

۳-۶-۲ مکانیسم خرابی لوله های بتنی: بتن از سیمان، آب و سنگدانه ساخته می شود و دارای محیطی قلیایی است و خرابی آن می تواند فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیکی باشد.

۱-۳-۶-۲ خوردگی فیزیکی: خوردگی فیزیکی می تواند به دلایل، یخ زدگی و آب شدگی، تر و خشک شدن، تغییرات دما، سایش و فرسایش باشد.

خوردگی فیزیکی در لوله های فاضلاب از عوامل ضعیف می باشد، زیرا در اثر اجرای خطوط شبکه فاضلاب در عمق زیاد (معمولا بیش از ۳ متر) یخ زدگی و آب شدگی مکرر در این سازه ها رخ نمی دهد. تر و خشک شدن نیز نسبت به عملکردهای شیمیایی دارای اهمیت کمتری است و تغییرات دما نیز با توجه به محل کارگذاری لوله ها زیاد می باشد. در سازه هایی که فاقد آشغالگیر باشند وجود سایش و فرسایش ممکن است رخ دهد، اما لوله های فاضلاب معمولا در معرض چنین تخریب هایی قرار نمی گیرند. بنابراین خوردگی ناشی از اثرات فیزیکی در لوله های فاضلاب دارای اهمیت زیادی نیست. البته در اثر عدم طراحی صحیح ممکن است لوله ها مقاومت کافی در برابر بارهای خارجی نداشته باشد، که چون این مقوله خارج از بحث خوردگی است، از آن صرف نظر می شود [۹].

۲-۳-۲ خوردگی شیمیایی: با توجه به وجود مواد مختلف در فاضلابهای شهری، لوله های فاضلابی دائماً در معرض تغییرات شیمیایی قرار دارند. حالت های قلیائی، اسیدی و خنثی هر سه در این مجاری بوجود می آیند و بخصوص حالت اسیدی می تواند اثرات منفی روی دوام بتن داشته و باعث بیشترین عامل خوردگی باشد.

وجود اسیدهای مختلف در فاضلاب و بخصوص ترکیبات شیمیایی نظیر CO_2 و H_2S و ... در خوردگی شیمیایی موثرند. حضور یون کلرور در بتن باعث خوردگی شدید آرماتورهای می شود و در اثر خوردگی آرماتورها، حجم آنها افزایش یافته و باعث ایجاد فشارهای داخلی در بتن می شود، این فشار میتواند تنش کششی زیادی در بتن ایجاد کرده و باعث ترک خوردگی بتن شود. این ترک خوردگیها باعث می شود که آرماتورها بیشتر در معرض رطوبت و گازهای اسیدی قرار گیرند و خوردگی را تشدید نمایند و این عمل تا تخریب کامل سطوح پوشش آرماتورها ادامه می یابد و بعد از تخریب آنها و خوردگی آرماتورها، سازه به طور کلی خراب می شود و قسمت بالای لوله که بیشتر در معرض این خطرات است ریزش نموده و باعث تخریب کامل مجاری فاضلاب می شود. احتمال وقوع خوردگی بستگی به میزان کلرور موجود در بتن دارد که با درصد وزن کلرور نسبت به وزن سیمان سنجیده می شود

۲-۳-۳ خوردگی بیولوژیکی: در این پدیده فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی دخیل هستند و میکروارگانیسم ها بر روی ستنیک های خوردگی اثر می گذارند. خوردگی بیولوژیکی فرآیندی است که در سطح بینا بینی رخ می دهد و به عواملی چون غلظت اکسیژن محلول، BOD، پتانسیل اکسیداسیون و احیاء، Ph، درجه حرارت، نسبت h/D ، و املاح و ... مربوط می شود [۲۳]. در مبحث بعد به تفصیل به بررسی خوردگی بیولوژیکی در لوله های فاضلاب خواهیم پرداخت.

۲-۶-۴ خوردگی بیولوژیکی

خوردگی زیست (Biocorrosion)، خوردگی میکروبی (Microbial corrosion)، خوردگی تاثیرپذیر از عوامل میکروبیولوژیک (MIC= Microbially Influenced Corrosion) می تواند بعنوان فرایندی الکتروشیمیایی تعریف شود که در آن میکروارگانیسمها قادر به شروع، تسهیل یا تشویق واکنش خوردگی بدون تغییر در طبیعت الکتروشیمیایی آن میباشند. خوردگی میکروبی را میتوان مخرب ترین نوع خوردگی دانست. این مسئله علت های مختلفی دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

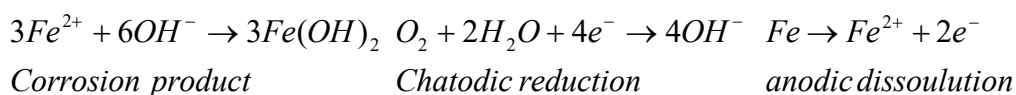
وجود ارگانیسمها در تمام محیطها

عدم شناخت دقیق اثر میکروارگانیسمها

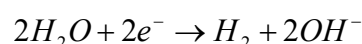
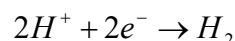
حساسیت اکثر آلیاژها و فلزات صنعتی

خوردگی یک پدیده الکتروشیمیایی میباشد که در آن تحت شرایط غوطه ور بودن فلز، فلز اکسید شده و به درون محلول منتقل می شود. واکنش آندی و واکنش کاتدی متعادل کننده آن احیای همزمان برخی ترکیبات در محیط خورنده میباشد. یونهای فلزی در محلول ممکن است متعاقباً بصورت محصولات نامحلول رسوب یابند. این محصولات ممکن است شل یا توده ای باشند (Bulky) و یا ممکن است بطور محکم به سطح فلز متصل شوند و این امر ممکن است برای فلز خواص محافظت کننده نسبت به خوردگی داشته باشد و یا نداشته باشد [۱۶].

در شرایط مطلوب، غالباً فیلمهای محافظ تشکیل می شود. مکانیسم کلی خوردگی تحت این شرایط در معادلات زیر آمده است:



در غیاب اکسیژن، واکنشهای کاتدی معمولی احیای یونهای هیدروژن و یا آب است.



نرخ این واکنشها در محلولهای خنثی محدود است و از اینرو فرایند خوردگی را مهار می کنند.

۲-۴-۱ ارگانیسمهای دخیل در فرایند خوردگی: عوامل بیولوژیکی که موجب خوردگی در محیطهای مختلف می شوند بطور خلاصه با ذکر یک یا چند نمونه از آنها در جدول زیر ذکر شده اند.

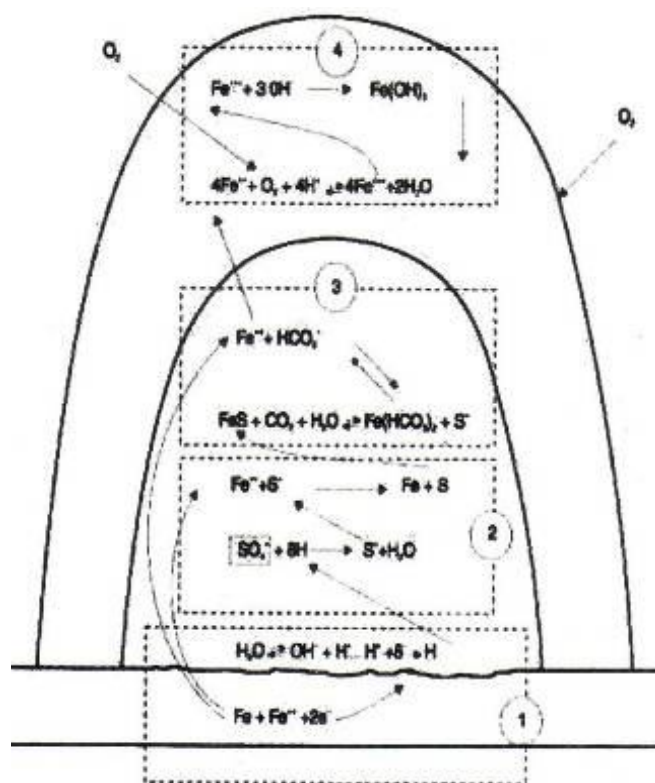
جدول (۲-۲۶) ارگانسیمهای دخیل در فرایند خوردگی [۱۶].

Desulfovibrio	۱- باکتریهای احیا کننده سولفات (SBR)	باکتریهای بی‌هوازی	میکروارگانسمهای پریوکاریوتیک
Dethiosulfovibrio	۲- باکتریهای اکسید کننده گوگرد		
Thiobacillus	۱- باکتریهای اکسید کننده گوگرد	باکتریهای هوازی	
Gallionella	۲- باکتریهای اکسید کننده آهن		
Pseudomonas , Aeromonas , Shewanella putrefaciens	۳- سایر باکتریها		
Hormoconis resinae Aspergillus	قارچها		میکروارگانسمهای یوکاریوتیک
Chlorella , Spirogyra	جلبکها		
Seaweeds , Hydroids , Bivalve molluscs , crustacea	ارگانسمهای چند سلولی یوکاریوتیک		

۲-۴-۶ برخی از روشهای عملی میکروارگانسیمها در آغاز کردن یا تشویق خوردگی:

- تولید متابولیت‌های اسیدی (مثلاً اسید سولفوریک تولید شده توسط باکتریهای اکسید کننده سولفور یا افزایش موضعی در غلظت پروتون مشتق شده از متابولیت‌های آلی اسیدی قارچها)
 - تولید متابولیت‌هایی که قادرند ویژگیهای محافظتی لایه غیر آلی را کاهش داده یا بی اثر کنند. (اثر سولفیدهای بیوژنیک روی فیلم محافظ اکسید مس روی سطح آلیاژهای مس - نیکلی)
 - تغییر شیب اکسیژن جهت ایجاد اختلاف دمشی (Differential (aeration) مثلاً اثر بیوفیلماهای هوازی باکتریها روی خوردگی فولاد زنگ نزن در آب دریا
 - حمله انتخابی باکتریها در نواحی جوشکاری شده فلزات (حمله ترجیحی به austenite توسط گالیونلا اکسید کننده آهن روی جوشهای مرکب (ferrite - austenite)
 - تسهیل شروع حفره دار شدن (Pitting) توسط اثرات اتصال میکروبی (مثلاً شروع حفره دار شدن در نقاط اتصال میسلیم قارچی H.resinae روی آلیاژهای آلومینیوم)
 - مصرف میکروبی بازدارنده های خوردگی (مثلاً مصرف نیترات - بازدارنده خوردگی آلومینیوم - توسط قارچ H.resinae در سیستمهای آب/سوخت)
 - تخریب میکروبی پوششهای محافظ (زنگها، اپوکسی، پوششهای قیری) مصرف قارچی پوششهای محافظ در تانکهای ذخیره سوخت
 - انحلال فیلمهای محافظ روی سطح فلزات (مثلاً احیای محصولات خوردگی غیر آلی Fe^{3+} غیر محلول به ترکیبات Fe^{2+} محلول توسط یک ویبریو دریایی
 - تولید متابولیت‌هایی که انرژی سطحی (Surface Energy) سطح متقابل لایه محافظ الکترولیت را کاهش می دهد.
- ۲-۴-۳ خوردگی در شرایط هوازی: کلنی سازی سطح فلزات توسط طیف وسیعی از ارگانسیمهای هوازی معمولاً خوردگی را توسط تشکیل سلولهای اختلاف دمشی و غلظتی تشویق می کند. مشکلات مرتبط با این پدیده در سیستمهای آبهای خنک کننده و مبدلهای حرارتی، تاسیسات ساحلی و شرایط دریایی دیده می شود.
- مکانیسم اصلی برای توضیح عمل میکروارگانسیمهای اکسید کننده فلز (اکسید کننده های آهن و منگنز) در خوردگی بیولوژیک تشکیل سلولهای اختلاف دمشی (differential aeration cell) است که با تاولها در ارتباط اند. این ارگانسیمها یونهای فرو را به فریک اکسیده می کنند و متعاقب آن هیدروکسید فریک را رسوب می دهند

یک سلول هوادهی (aeration) تیپیک از این نوع هنگامی تشکیل می‌شود که ساختار تاول در ناحیه خارجی آن بعلت تهیه مداوم اکسیژن از آب بعنوان یک کاتد عمل می‌کند. برعکس آند (ناحیه بی‌هوازی) در ته تشکیلات ایجاد می‌شود که دستیابی به اکسیژن آن محدود است (شکل ۲-۳).



شکل (۲-۳) پروسه خوردگی

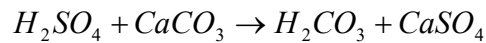
در تمام موارد تسهیل خوردگی اغلب بعلت حضور SBR در ناحیه داخلی توپرکله‌ها می‌باشد که آنجا شرایط بی‌هوازی ایجاد می‌شود. ارگانوسمهای اکسید کننده فلز اکسیژن‌زدهای موثری هستند و بنابراین شرایط مطلوب رشد باکتریهای بی‌هوازی اجباری را ایجاد می‌کنند. از طرفی باکتریهای مثل گالیونلا احتمالاً به باکتریهای احیا کننده سولفات و دیگر باکتریهای بی‌هوازی وابسته‌اند تا شرایط میکروآتروفیلیک را در محیط خود ایجاد کنند. توپرکله‌ها قادر به کند کردن نفوذ بیوسیدها یا بازدارنده‌های خوردگی هستند و تاثیر آنها را کم می‌کنند. یکی از جنبه‌های مهم این مدل خوردگی بیولوژیک این است که همین توپرکل (و سلول الکتروشیمیایی) تشکیل می‌شود، حتی مرگ میکروارگانوسمها نمی‌تواند مکانیسم اختلا دمشی را خاموش کند زیرا یک سد واقعی (Substantial Brrier) برای جذب اکسیژن استقرار یافته است [۱۶].

۴-۶-۲ خوردگی در شرایط بی‌هوازی: برای توجیه خوردگی در شرایط بی‌هوازی و خوردگی تحت تاثیر باکتریهای احیا کننده سولفات تئوریهایی متعددی ارائه شده‌اند. تعدادی از این تئوریه‌ها پس از سالها هنوز نیز مورد توجه محققان هستند (مانند تئوری دیلاریزاسیون کاتدی و تئوری فسفر) و تعدادی دیگر رد شده‌اند. آنچه مورد توافق همگی محققان MIC می‌باشد این است که هیچکدام از تئوریهایی ارائه شده نمی‌تواند فرایند MIC را بطور دقیق توجیه کند.

با ملاحظه واکنشهای الکتروشیمیایی که در قسمت مکانسیمهای خوردگی بیولوژیک بحث شده‌اند خوردگی قابل توجه آهنی در محیط فاقد اکسیژن و نزدیک خنثی قابل انتظار نمی‌باشد چرا که هیچیک از دو واکنش کاتدیک معمول نمی‌توانند به میزان قابل توجهی اتفاق بیفتند. اما در عمل، اغلب خوردگیهای شدیدی اتفاق می‌افتند و می‌تواند چندین بار بیشتر از مقداری باشد که در شرایط معمول اکسیژن‌دار تجربه می‌شود. مکانیسمی که توسط آن باکتریهای احیا کننده سولفات باعث القای خوردگی می‌شوند موضوعی بحث‌انگیز است و این جدال بر این سؤال متمرکز شده است که آیا متابولیسم فعال باکتریها یا متابولیتها و محصولات اکسیداسیون عامل اصلی می‌باشند.

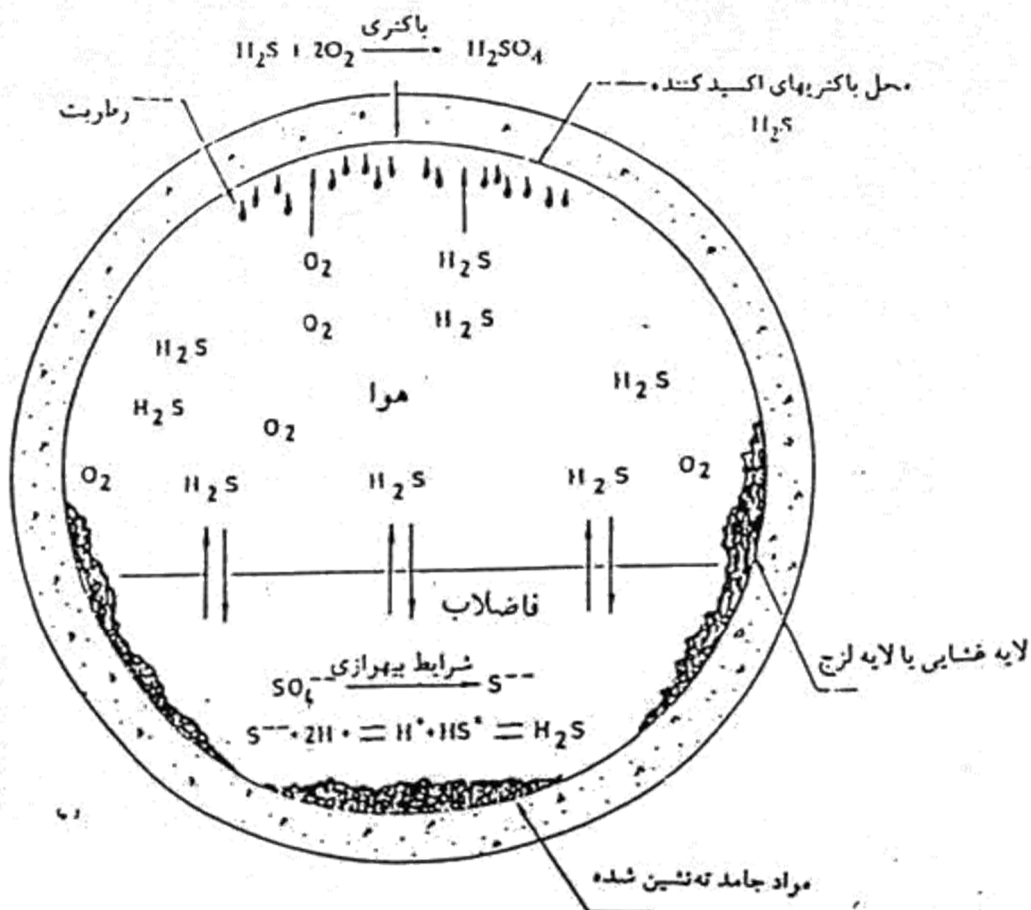
۵-۴-۲ پروسه خوردگی در فاضلابروها: وقتی مجموعه شرایط برای حضور و رشد باکتریهای احیاء کننده سولفات فراهم باشد (یعنی طراحی نامناسب فاضلاب روها، شیب ناکافی، تجمع رسوبات و تشکیل لایه لزج) باکتریها احیاء کننده سولفات، سولفات را احیا کرده و گاز H_2O تولید می نمایند.

این گاز در اثر تلاطم وارد اتمسفر فوقانی لوله های فاضلاب می شود و وجود رطوبت و اکسیژن را برای واکنش اکسیداسیون H_2O توسط باکتریهای اکسید کننده سولفور فراهم می سازد، در نتیجه اسید سولفوریک تولید می شود که اسید سولفوریک با انحلال کلسیم موجود در بتن سبب خوردگی آن می گردد.



شکل (۲-۴) مراحل تشکیل H_2O در فاضلاب روها را نشان می دهد.

بیشترین خوردگی در لوله ها بتنی فاضلابی در سطوح اطراف فاضلاب رخ می دهد. نسبت خوردگی در این سطوح ۳ تا ۴ و ۴ تا ۷ میلیمتر در سال گزارش شده است و این مقدار با افزایش فاصله از سطح فاضلاب کاهش می یابد، اما در تاج لوله نیز خوردگی شدید وجود دارد که از ۴-۱ میلیمتر گزارش شده است [۴۴].



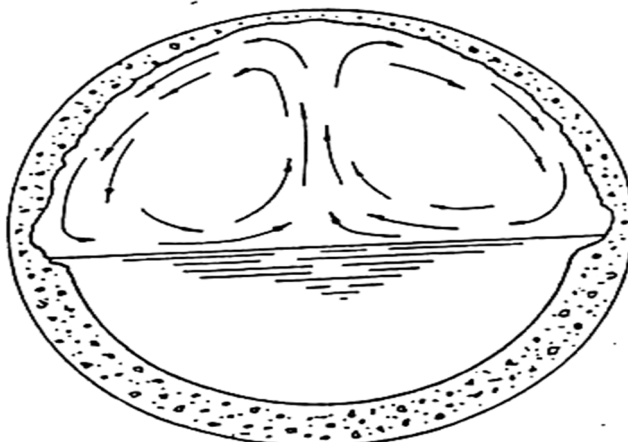
شکل (۲-۴) چگونگی تولید H_2O در فاضلاب روها

همچنین سرعت خوردگی بر اساس اندازه گیری ضخامت جداره لوله که طی ۱۲ سال در معرض خوردگی بوده مطابق جدول (۲-۲۷) محاسبه و گزارش شده است [۲۴]. در این گزارش غلظت SH_2 در فضای لوله ۳-۴۰۰ ppm و دما ۳۰-۱۰ درجه سانتیگراد بوده است. مرور کلی بر فرآیندهای خوردگی ناشی از عمل میکروارگانیزم ها که با سرعت افزایش می یابد، نشانگر آن است که بایستی شرایطی ایجاد کرد که حداقل

از خسارات قابل پیشگیری اجتناب شود، که در این راستا مهمترین مساله این است که در مقابل خوردگی بیولوژیکی چه باید کرد؟ در این مبحث جهت آشنایی بیشتر با پدیده خوردگی بیولوژیکی لوله های بتنی فاضلاب، بررسی اجمالی سیکل گوگرد در طبیعت ضروری است.

جدول (۲-۲۷) بررسی وضعیت خوردگی در قسمتهای مختلف لوله

بخش لوله	ضخامت (mm)	سرعت خوردگی (mm/y)
چپ	۳۲	۴/۷
راست	۳۶	۴/۳
تاج لوله	۶۵	۱/۹
کف لوله	۸۸	۰



شکل (۲-۵) توزیع نامتعادل خوردگی در فاضلاب رو بتنی

۶-۴-۲ سیکل گوگرد در طبیعت : گوگرد در محیط زیست نسبتا فراوان است و آب دریاها منبع اصلی سولفات ها محسوب می گردند، سایر منابع شامل مواد معدنی گوگرد دار مانند پیریت (FeS_2) و چالکوپریت ($CuFeS_2$)، سوخت های فسیلی و مواد آلی است. گوگرد یک عنصر ضروری برای میکروارگانیسمها است و در ترکیب آمینواسیدها، کوفاکتورها، فرودوکسین ها، و آنزیمها وارد می شود. باکتریها در چرخه گوگرد نقش بسیار برجسته ای دارند که بخشی از این نقش را بکمک واکنشهای اکسیداسیون و احیا ایجاد می کنند [۴۶].

۷-۴-۲ اشکال مختلف سولفید در فاضلاب : اصطلاح سولفید به سولفید معدنی در بالاترین درجه احیاء آن گفته می شود که ظرفیت آن منفی می باشد. در فاضلاب سولفید مخلوطی است از:

۱-۴-۲-۲ سولفیدهای فلزی نامحلول : شواهدی وجود دارد که فاضلاب محتوی چندین نوع سولفید آهن می باشد که شامل پیرویت که از FeS تا Fe_4S_5 متغیر است، اسمیتیت (Fe_3S_4) و پیریت (FeS_2)، علاوه بر اینها مقدار کمی از سولفیدهای روی، مس، کادمیوم و دیگر فلزات نیز در فاضلاب یافت می شود.

۲-۴-۲-۲ سولفید محلول : این سولفید مخلوطی از H_2S و HS^- بوده که در حال تعادل با یون هیدروژن طبق فرمول زیر است:



یون سولفید ثانویه " S " به مقدار قابل ملاحظه ای وجود ندارد. فقط ممکن است در pH بالا وجود داشته باشد. به عنوان مثال کمتر از ۰/۰۵ درصد از سولفید به صورت " S " در pH=11 و کمتر از ۰/۵ درصد در pH=12 می باشد.

همچنین در فاضلاب ترکیبات گوگرد آلی نیز وجود دارد که ظرفیت آنها ۲ منفی می باشد که آنها را سولفیدهای آلی می نامند. ترکیبات گوگردی آلی فرار در تولید بو در فاضلاب دارای اهمیت می باشند.

علاوه بر اینها ترکیبات گوگردی غیر فرار نیز در فاضلاب وجود دارد که توسط فرآیندهای بیولوژیکی شکسته شده و تبدیل به سولفید معدنی می شود. نمونه هایی از این نوع ترکیبات که بصورت طبیعی در فاضلاب وجود دارند شامل پروتئینهای آلبومینوئیدی می باشد [۲۵].

۸-۴-۲ خواص فیزیکی و شیمیایی سولفید هیدروژن : H₂S معمولاً به صورت گاز بوده که در درجه حرارت ۶۲- درجه سانتی گراد تحت فشار یک اتمسفر و در ۲۵ درجه سانتیگراد تحت فشار ۲۰ اتمسفر تبدیل به مایع می شود. در حرارت ۲۵ درجه سانتی گراد و فشار یک اتمسفر یک لیتر گاز H₂S دارای ۱/۴ گرم وزن بوده که از این مقدار ۱/۳۱ گرم آن گوگرد است.

این گاز دارای حلالیت متوسط در آب بوده و بیش از CO₂ و دیگر گازهای معمولی در آب حل می شود. جدول (۲-۲۸) حلالیت سولفید هیدروژن و غلظت تعادلی آن را در اتمسفر در تماس با محلول 1 mg/l سولفید را نشان می دهد [۲۵].

درصد H₂S و HS در فاضلاب تابعی از pH است که آن را می توان از طریق ثابت یونیزاسیون از روی فرمول لگاریتمی زیر به دست آورد:

$$\log \frac{[HS]}{[H_2S]} = pH - pk$$

pk = لگاریتم منفی ثابت یونیزاسیون کاربردی می باشد که به شکل ریاضی نوشته شده باشد.

مقدار pk تحت تاثیر درجه حرارت و قدرت یونی محلول است. در جدول (۲-۲۹) مقدار pk در غلظت های مختلف ذکر شده است. مقدار pk را برای اهداف کاربردی برابر ۷ در نظر می گیرند.

در جدول (۲-۳۰) درصد سولفید محلول به صورت H₂S به عنوان تابعی از pH - pk یا به صورت تابعی از pH اگر pH=7 در نظر گرفته شود، قید گردیده است. در جدول (۲-۲۸) نسبت های از سولفید محلول که بصورت H₂S وجود دارند ارایه گردیده است .

میزان خروج H₂S از محلول به داخل هوا تحت هر شرایطی متناسب با غلظت H₂S است. بنابراین میزان خروج H₂S در pH=7 برابر نیمی از میزان خروج آبن از یک محلول اسیدی دارای همان غلظت سولفید می باشد. در pH برابر ۹ درصد خروج H₂S از محلول حدود یک درصد میزان خروج آن از محلول اسیدی است. اگر درصدی از سولفید از محلول خارج شود، باقیمانده سولفید محلول دوباره به همان نسبت به صورت H₂S و HS^۰ درمی آید زیرا تعادل فوراً خود به خود برقرار می شود.

توزیع نسبی هر یک از گونه های H₂S، HS^۰ و S^۰ به عنوان تابعی از pH می باشد که pH کمتر از ۶/۵ بصورت H₂S از ۶/۵ تا ۹ به سمت HS^۰ و در pH بیشتر از ۱۰ به سمت S^۰ پیش می رود [۴۳].

جدول (۲-۲۸) حلالیت سولفید هیدروژن در آب در فشار یک اتمسفر

درجه حرارت (سانتیگراد)	حلالیت (mg/l) بر حسب سولفید	سولفید هیدروژن در اتمسفر در تعادل با محلول ۱ میلیگرم در لیتر سولفید	
		میزان سولفید در هوا (mg/l)	فشار جزئی . میلیونیم Atm
۰	۶۶۴۸	۰/۲۱۴	۱۵۰
۱	۶۴۳۴	۰/۲۲۱	۱۵۵
۲	۶۲۲۷	۰/۲۲۸	۱۶۰
۳	۶۰۲۸	۰/۲۳۵	۱۶۶
۴	۵۸۳۴	۰/۲۴۲	۱۷۱
۵	۵۶۴۶	۰/۲۴۹	۱۷۷
۶	۵۴۶۵	۰/۲۵۶	۱۸۳
۷	۵۲۹۱	۰/۲۶۳	۱۸۹
۸	۵۱۲۴	۰/۲۷۱	۱۹۵
۹	۴۹۶۴	۰/۲۷۹	۲۰۱
۱۰	۴۸۱۰	۰/۲۸۷	۲۰۸
۱۲	۴۵۲۹	۰/۳۰۲	۲۲۱
۱۴	۴۲۷۱	۰/۳۱۸	۲۳۴
۱۶	۴۰۳۳	۰/۳۳۴	۲۴۸

۱۸	۳۸۱۶	۲۶۲	۰/۳۵۱
۲۰	۳۶۱۸	۲۷۶	۰/۳۶۸
۲۲	۳۴۳۲	۲۹۱	۰/۳۸۵
۲۴	۳۲۵۸	۳۰۷	۰/۴۰۳
۲۶	۳۰۹۵	۳۲۳	۰/۴۲۱
۲۸	۲۹۴۵	۳۴۰	۰/۴۴۰
۳۰	۲۸۰۶	۳۵۶	۰/۴۵۹
۳۵	۲۴۹۱	۴۰۱	۰/۵۰۸
۴۰	۲۲۲۱	۴۵۰	۰/۵۶۰

جدول (۲۹-۲) ثابت لگاریتمی یونیزاسیون کاربردی برای سولفید هیدروژن

هدایت الکتریکی ویژه در ۲۵ درجه سانتیگراد بر حسب میکروموس بر سانتیمتر	درجه حرارت بر حسب (°C)						
	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
۰	۷/۲۴	۷/۱۷	۷/۱۰	۷/۰۳	۶/۹۵	۶/۸۹	۶/۸۲
۲۵	۷/۲۳	۷/۱۶	۷/۰۹	۷/۰۲	۶/۹۵	۶/۸۸	۶/۸۱
۱۰۰	۷/۲۲	۷/۱۵	۷/۰۸	۷/۰۱	۶/۹۴	۶/۸۷	۶/۸۰
۲۰۰	۷/۲۱	۷/۱۴	۷/۰۷	۷/۰۰	۶/۹۳	۶/۸۶	۶/۷۹
۴۰۰	۷/۲۰	۷/۱۳	۷/۰۶	۶/۹۹	۶/۹۲	۶/۸۵	۶/۷۸
۷۰۰	۷/۱۹	۷/۱۲	۷/۰۵	۶/۹۸	۶/۹۱	۶/۸۴	۶/۷۷
۱۲۰۰	۷/۱۸	۷/۱۱	۷/۰۴	۶/۹۷	۶/۹۰	۶/۸۳	۶/۷۶
۲۰۰۰	۷/۱۷	۷/۱۰	۷/۰۳	۶/۹۶	۶/۸۹	۶/۸۲	۶/۷۵
۳۰۰۰	۷/۱۶	۷/۰۹	۷/۰۲	۶/۹۵	۶/۸۸	۶/۸۱	۶/۷۴
۴۰۰۰	۷/۱۵	۷/۰۸	۷/۰۱	۶/۹۴	۶/۸۷	۶/۸۰	۶/۷۳
۵۲۰۰	۷/۱۴	۷/۰۷	۷/۰۰	۶/۹۳	۶/۸۶	۶/۷۹	۶/۷۲
۷۲۰۰	۷/۱۳	۷/۰۶	۶/۹۹	۶/۹۲	۶/۸۵	۶/۷۸	۶/۷۱
۱۰۰۰۰	۷/۱۲	۷/۰۵	۶/۹۸	۶/۹۱	۶/۸۴	۶/۷۷	۶/۷۰
۱۴۰۰۰	۷/۱۱	۷/۰۴	۶/۹۷	۶/۹۰	۶/۸۳	۶/۷۶	۶/۶۹
۲۲۰۰۰	۷/۱۰	۷/۰۳	۶/۹۶	۶/۸۹	۶/۸۲	۶/۷۵	۶/۶۸
۵۰۰۰۰×	۷/۰۹	۷/۰۲	۶/۹۵	۶/۸۸	۶/۸۱	۶/۷۴	۶/۶۷

* تقریباً برای آب دریا

جدول (۳۰-۲) نسبت هایی از سولفید محلول که بصورت H₂S وجود دارد

نسبت H ₂ S	مقدار Ph اگر Pk=7	PH-Pk	نسبت H ₂ S	مقدار Ph اگر Pk=7	PH-Pk
۰/۲۴	۷/۵	+۰/۵	۰/۹۹	۵/۰	-۲/۰
۰/۲۰	۷/۶	+۰/۶	۰/۹۸	۵/۲	-۱/۸

۰/۱۷	۷/۷	+۰/۷	۰/۹۷۵	۵/۴	-۱/۶
۰/۱۴	۷/۸	+۰/۸	۰/۹۶	۵/۶	-۱/۴
۰/۱۱	۷/۹	+۰/۹	۰/۹۷	۵/۸	-۱/۲
۰/۰۹۱	۸/۰	+۱/۰	۰/۹۱	۶/۰	-۱/۰
۰/۰۷۴	۸/۱	+۱/۱	۰/۸۹	۶/۱	-۰/۹
۰/۰۵۹	۸/۲	+۱/۲	۰/۸۶	۶/۲	-۰/۸
۰/۰۴۸	۸/۳	+۱/۳	۰/۸۳	۶/۳	-۰/۷
۰/۰۳۹	۸/۴	+۱/۴	۰/۸۰	۶/۴	-۰/۶
۰/۰۳۱	۸/۵	+۱/۵	۰/۷۶	۶/۵	-۰/۵
۰/۰۲۵	۸/۶	+۱/۶	۰/۷۲	۶/۶	-۰/۴
۰/۰۲۰	۸/۷	+۱/۷	۰/۶۷	۶/۷	-۰/۳
۰/۰۱۶	۸/۸	+۱/۸	۰/۶۱	۶/۸	-۰/۲
۰/۰۱۳	۸/۹	+۱/۹	۰/۵۶	۶/۹	-۰/۱
۰/۰۱۰	۹/۰	+۲/۰	۵/۶۰	۷/۰	۰/۰
۰/۰۰۳	۹/۵	+۵	۰/۴۴	۷/۱	+۰/۱
۰/۰۰۱	۱۰/۰	+۳/۰	۰/۳۹	۷/۲	+۰/۲
			۰/۳۳	۷/۳	+۰/۳
			۰/۲۸	۷/۴	+۰/۴

۹-۴-۲ بو و سمیت H_2S : به صورت طبیعی در چشمه های گوگردی وجود دارد. وجود آن در مواد آلی تحت فشار دارای بوی تخم مرغ گندیده می باشد. غلظت آستانه تشخیص بوی آن در آب توسط انسان ۰/۱-۰/۰۱ میلیگرم در لیتر تا ۰/۰۰۰۱-۰/۰۰۰۰۱ میلیگرم در لیتر است. این گاز سنگین تر از هوا بوده و سبب مرگ بسیاری از کارگران در منهلها و محفظه های بسته در فاضلاب روها شده است. اگر غلظت این گاز در محیط زیاد باشد، توانایی حس شامه انسان را در تشخیص وجود آن از بین برده و سبب می شود که کارگران دیگر قادر به تشخیص بوی آن نباشند.

اثرات فیزیولوژیک این گاز در شکل (۲-۶) خلاصه شده است. گاز H_2S در غلظت های کم نیز می تواند سبب صدمات بهداشتی به انسان شود ولی مرگ در اثر غلظت 300ppm در هوا ایجاد می شود. چنین غلظتی را می توان در محیط های مسدود دارای توربلانس زیاد در فاضلاب محتوی ۲ میلیگرم در لیتر سولفید محلول در pH=7 مشاهده نمود [۲۵].

شکل (۲-۶) اثرات فیزیولوژیک گاز H_2S

PPm		
۰،۱ ۰،۲ ۳	آستانه بو	
۱۰	بوی زننده	بوی تخم مرغ گندیده
۵۰	سوزش چشم، بینی و گلو	آستانه خطر برای چشم
۱۰۰	آسیب دیدگی چشم	

کاهش حساسیت به بو	سوزش دستگاه تنفسی	۳۰۰
تهدید حیات	تورم ریه	۵۰۰
	آسیب شدید به سیستم عصبی	۱۰۰۰
آسیب فوری در اثر از بیت رفتن دستگاه تنفسی	مرگ	۲۰۰۰

۱۰-۴-۶-۲ منابع گوگردی برای تولید سولفید هیدروژن در لایه های بیولوژیکی موجود در سیستم های مجاری فاضلاب :

تولید سولفید از اکسیداسیون ترکیبات گوگردی (معدنی) و ترکیبات آلی گوگردی مختلف یک پدیده شناخته شده در ارتباط با تصفیه فاضلاب در طول مسیر مجاری فاضلاب روها، که در شرایط بی هوازی صورت می گیرد، می باشد. سولفید هیدروژن بخاطر مسائل بهداشتی و سلامتی، بوی بد و خوردگی آن ایجاد مشکل می نماید.

هر فرد روزانه ۵-۴ گرم ترکیبات گوگردی تولید می نماید که منابع گوگردی فاضلاب، گوگرد آلی موجود در مدفوع و سولفاتی است که به عنوان متداول ترین آنیون آبهای طبیعی مطرح است.

اشکال عمده گوگرد در فاضلاب که با آن مواجه هستیم عبارتند از سولفاید (H_2S)، گوگرد عنصری (S)، سولفات (SO_4) سولفیت (SO_3) و تیو سولفات ($S_2O_3^{2-}$) [۳۱].

سولفیت بطور عمده صنایع در کاغذسازی و نیشکر از طریق تیوسولفات و در آزمایشگاهها توسط عمل فوتوگرافی تولید می شود که در صنعت کاغذ و نیشکر غلظت آن بیش از ۱۰۰۰ میلیگرم در لیتر می باشد و سطح نسبتا پایین تر آن ۰ تا ۱۰ میلی گرم در لیتر در فاضلاب کارخانجات تولید نشاسته سیب زمینی و در فاضلاب ها از راکتورهای متان گزارش شده است.

بر اساس تحقیقات به عمل آمده تشکیل سولفید هیدروژن از سولفیت و تیوسولفات پتانسیل مهمی در لایه های بیولوژیکی مجاری فاضلاب است. بسته به شرایط رشد لایه های بیولوژیکی سرعت تولید سولفید از سولفیت ۱ تا ۱/۷ برابر سرعت حاصل از سولفات است و همچنین سرعت تولید سولفید از تیوسولفات در مقایسه با سولفات ۱/۵ تا ۲/۴ برابر می باشد. بهر حال با توجه به تجربیات و بررسی های متعددی که توسط دانشمندان و دست اندرکاران مسائل آب و فاضلاب انجام گردیده است به این نتیجه رسیده اند که وجود مواد گوگردار و ترکیبات آن در فاضلاب ها موجب خوردگی مجاری انتقال را فراهم می آورد. بدین صورت که اگر مجاری انتقال فاضلاب را در نظر بگیریم به همراه بخارات متصاعد شده از سطح فاضلاب مقداری سولفید محلول که به یونهای S^{--} و HS^- تبدیل می شود و بعد بصورت مولکول H_2S درمی آید و فضای قسمت بالای مجرا را پر می کند یعنی می توان نوشت:



۱۱-۴-۶-۲ میکروبیولوژی سیکل گوگرد: با کتریهای سولفور، ارگانیزم های جدی و مزاحم در آب هستند. زیرا آنها می توانند مشکلات عدیده ای از جمله بو، مزه و خوردگی ایجاد نمایند [۴۷].

بحث میکروبیولوژی سیکل گوگرد گسترده است. در این مبحث به دو دسته مهم که در واکنشهای اکسیداسیون و احیاء شرکت دارند اشاره می شود:

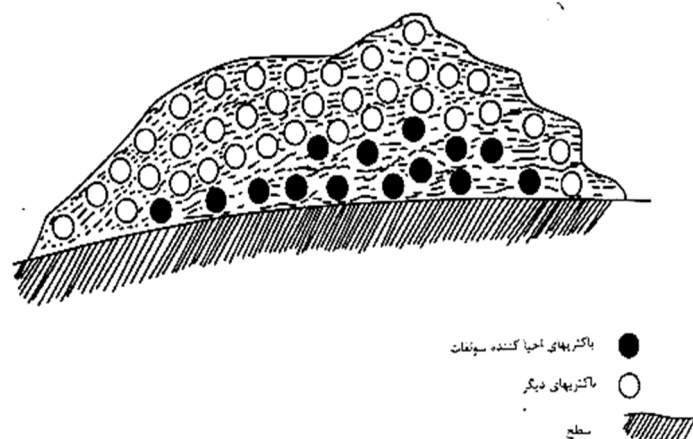
۱-۱۱-۴-۶-۲ باکتریهای احیاء کننده سولفات: باکتریهای احیاء کننده سولفات (SRB) نامیده می شوند و تولید بوئی شبیه تخم مرغ گندیده دارند، این باکتریها گرم منفی و بی هوازی مطلق هستند و از سولفات به عنوان پذیرنده الکترون استفاده می کنند و از منابع کربن با وزن مولکولی کم نظیر اسیدهای آلی، اسیدهای چرب و الکل ها به عنوان دهنده الکترون استفاده می کنند. محصول عمل احیاء توسط باکتریها سولفید هیدروژن است.

این باکتریها از محیطهایی مانند هاضم بی هوازی لجن، رسوبات دریاچه ها و دستگاه گوارش جدا شده اند، گستره pH برای رشد آنها ۴/۱۰ - ۴/۲ و pH بهینه برای رشد آنها ۷/۵-۷/۲ است. دمای بهینه برای رشد آنها ۴۲-۲۴ درجه سانتی گراد است.

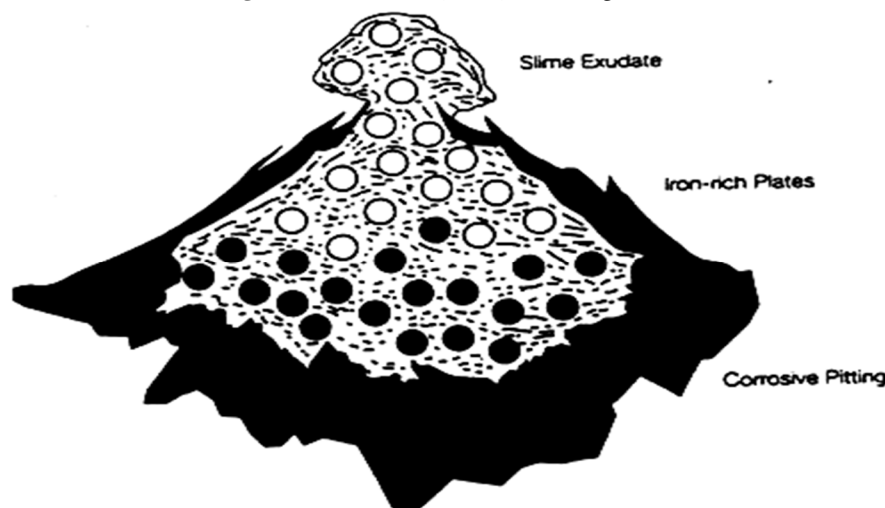
در هر کجایی که این باکتریها وجود داشته باشند، اکسیژن را از آب حذف نموده و سولفید هیدروژن به محیط اضافه می نمایند. بنابراین وجود اکسیژن در داخل آب SRB را محدود می کند و اکسیژن برای فعالیت های SRB همانند یک سم می باشد [۴۸].

۱-۱-۱۱-۴-۶-۲ **بیولوژی و اکولوژی SRB : SRB** معمولاً خودشان را بوسیله لایه های همزیست و جوش ها و یا دیگر لایه های باکتریایی محافظت می کنند.

شکل (۷-۲) برش یک لایه لزج، همراه با باکتریهای احیاء کننده سولفات که بر روی یک سطح وجود دارند و دیگر باکتریها که بر روی سطح بالایی لایه قرار دارند را نشان می دهد. در شکل (۸-۲) نیز برش عرضی یک جوش نشان داده شده است.



شکل (۷-۲) برش عرض از یک لایه بیولوژیکی



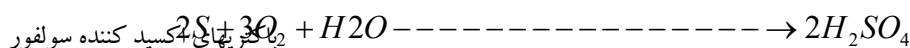
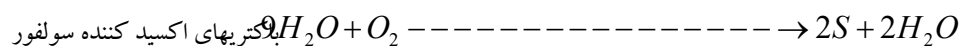
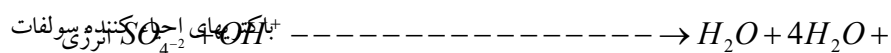
شکل (۸-۲) برش عرضی یک جوش

بوی تخم مرغ گندیده معمولاً از هنگامی زیاد میشود که یک سیستم آب یا چاه برای مدت زمان طولانی مورد استفاده قرار نگیرد و در خطوط فاضلاب اکسیژن صفر باشد. در این نمونه ها اکسیژن موجود در آب بوسیله باکتریهای مختلف مصرف می شود، یک قسمت از اکسیژن مصرفی برای رشد و فعالیت باکتریها SRB استفاده می شود که با تولید بوی تخم مرغ گندیده شدید همراه است [۴۷].

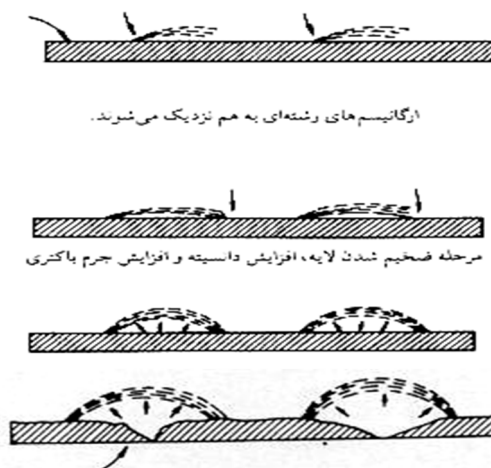
همینکه SRB در سطح داخلی لایه بیولوژیکی با توپرسل ثابت شد شروع به تولید گاز سولفید هیدروژن می نماید. شروع خوردگی با حفره و گودی است که با سوراخ شدن محافظ مثل دیواره ها و نقص سیستم خاتمه می یابد. توپرسل می تواند در لوله های آبرسانی نیز خوردگی ایجاد نماید، این موضوع معمولی ترین پدیده خوردگی بیولوژیکی در یک سیستم لوله کشی است و بیشتر در مناطق تشکیل می شود که سرعت جریان در لوله کمتر از ۹۰ سانتی متر در ثانیه بشاشد.

پدیده تبرسل به این ترتیب است که ارگانیزم های رشته ای در رسوبات بیولوژیکی در جداره داخلی لوله های آب شروع به رشد و چسبیدن سر دیگر ارگانیزم های رشتهای به دیواره لوله، حفره ای سلول مانند درست می شود که باکتریها با ایجاد H_2O و CO_2 محیط حفره سلولی را اسیدی کرده و لوله را خورده و سوراخ می کنند، علاوه بر آن مزه و بوی آب را نیز تغییر می دهند.

شکل (۹-۲) مراحل پیشرفت خوردگی بیولوژیکی لوله های آب و پدیده توبرسل را نشان می دهد. بنابراین مسیرهای خطوط لوله آب در یک تاسیسات فولاد ممکن است حیات چند ماهه داشته باشند، زیرا باکتریهای احیاء کننده سولفات یون SO_4^{2-} را به H_2O تبدیل می کنند و H_2O با آهن به فرم سولفید فریک و اکشن می دهد و سولفورهایی که از لابلای هیدروکسید فریک متخلخل فرار می کنند توسط باکتری سولفور به اسید سولفوریک تبدیل می شود.



با انتشار گازهای CO_2 و SH_2 به علت فعالیت بیولوژیکی، جرم ارگانیزم منبسط شده و توبرسل تشکیل می شود، در این مرحله، pH آب قسمت داخلی توبرسل کاهش می یابد که این مساله موجب خوردگی قسمت زیرین توبرسل می شود. توبرسل به رشد بیشتر ادامه می دهد، لایه های ارگانیزم با رسوبات آهن و دیگر محصولات خوردگی ضخامت بیشتری می یابد، محیط پایین از نظر pH در زیر توبرسل سبب خوردگی شدید و حتی سوراخ شدن دیواره لوله می شود [۲۲].



(شکل ۹-۲) مراحل پیشرفت خوردگی بیولوژیکی لوله های آب

با انتشار گازهای SH_2 و CO_2 به علت فعالیت بیولوژیکی، جرم ارگانیزم منبسط شده و توبرسل تشکیل می شود. در این مرحله pH قسمت داخلی توبرسل کاهش می یابد که این مساله موجب خوردگی قسمت زیرین توبرسل می شود.

۱-۲-۱-۴-۶-۲ شناسایی باکتریهای احیاء کننده سولفات: به دلیل اینکه SRB در طول زمانیکه روی سطوح رشد می کنند باعث ایجاد خوردگی می شوند، نتیجه آزمایشات روی خود آب ممکن است منفی باشد، در صورتی آزمایشات مثبت است که باکتریها از یک محل خوردگی به کلنی دیگری حضور یابند.

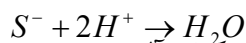
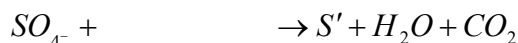
شاخص اولیه مشکلات SRB شامل حضور بو، توبرسل، خوردگی تجهیزات فلزی و لایه های لزج سیاه رنگ می باشد. در آزمایشات باکتریولوژیکی می توان از حضور یا عدم حضور SRB استفاده نمود. این باکتریها در مناطق حفاظت شده اغلب بوسیله انواع دیگر باکتریها که ممکن است حضور داشته باشند، احاطه می شوند. برای مطالعه بیشتر در این زمینه می توان به کتاب استاندارد متدز برای آزمایشات آب و فاضلاب مراجعه نمود. روش دیگر برای پایش مشکلات SRB، روش سنجش DO می باشد، کاهش قابل توجه در اکسیژن محلول آب ممکن است به عنوان یک عامل هشدار دهنده باشد که در آن صورت شرایط برای رشد SRB مساعد است. این روش ساده می تواند برای پایش حضور و تهاجم SRB مورد استفاده قرار گیرد [۴۸].

باکتریهای احیاء کننده سولفات عبارتند از:

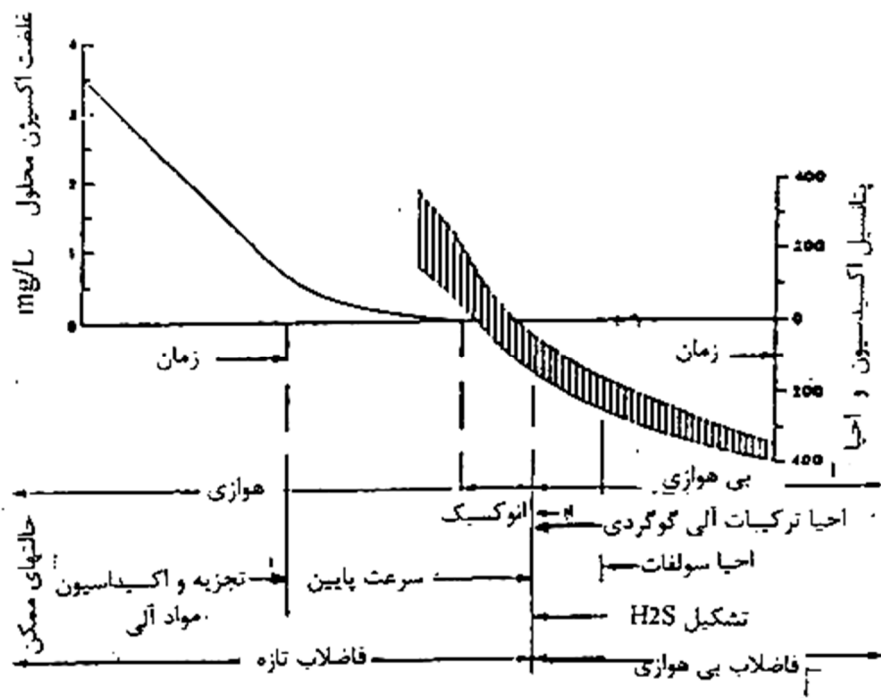
- دی سولفو و بیریو، دی سولفاتوماسیلیوم.
- دی سولفوروموناس (از سولفور استفاده می کنند)
- دی سولفوباکتر
- دی سولفو کوکوس، دی سولفوسارسینا، دی سولفونما، دی سولفو و بیریو مهمترین جنس از جنس های یاد شده است و دی سولفوریکنس مهمترین گونه آن می باشد [۴۹].

این باکتریهای مسئول احیاء سولفات هستند و در گروهی قرار می گیرند که احیاء سولفات را به سمت تولید اکسیژن برای تجزیه مواد آلی سوق می دهند. یک مقدار کمی از احیاء سولفور برای سنتز توسط باکتریها مصرف می شود، اما اغلب آنها آزاد می شوند. H_2O آزاد شده بستگی به pH محیط دارد، این روش مانند ته نشینی نترات در دنتریفیکاسیون مشابه است که در محیط بدون اکسیژن صورت می گیرد [۵۰]. بطور طبیعی فاضلاب خانگی ۳ تا ۶ میلی گرم در لیتر سولفور آلی دارد که منبع اصلی آن مواد پروتئینی است، در غیاب اکسیژن محلول، بر اثر فعالیت باکتریهای پروتولیتیک روی ترکیبات آلی سولفوردار، ابتدا سولفید تشکیل می شود، چرا که این باکتریها در پتانسیل احیاء بالاتری نسبت به باکتریایی که سولفات را مرحله به مرحله احیاء می کنند، برخوردار هستند. فاضلاب همچنین دارای سولفور دیگری به شکل سولفات ($4mg/l$) می باشد که از مواد پاک کننده خانگی حاصل شده اند. علاوه بر اینها فاضلاب دارای سولفور معدنی (مثل سولفات ها که ناشی از سولفات آبهای جاری است) نیز می باشد [۵۰].

واکنش احیاء سولفات، توسط باکتریهای احیاء کننده سولفات که بی هوازی مطلق هستند چنین می باشد:



احیاء سولفات دارای پتانسیل اکسیداسیون و احیاء بهینه در محدوده ۲۰۰- تا ۳۰۰- میلی ولت است که این محدوده به pH ۶/۵ تا ۸ وابسته است. این تغییر پذیری در وضعیت فاضلاب بستگی به اکسیژن محلول (DO) و پتانسیل ردکس دارد که به صورت دیاگرام توسط بن و اسکلت در سال ۱۹۷۹ ارائه شده است.



شکل (۲-۱۰) تغییر در شرایط فاضلاب در ارتباط با غلظت اکسیژن محلول و پتانسیل اکسیداسیون و احیاء همانطور که در شکل مشاهده می شود در ابتدای شبکه که فاضلاب تازه می باشد دارای اکسیژن محلول است و در طول مسیر فاضلاب از شرایط هوازی به بی هوازی پیش رفته و پتانسیل اکسیداسیون هم با این ترتیب کاهش می یابد که این روند با احیاء سولفات و تشکیل H_2O همراه است [۵۰].

۲-۱۱-۴-۶-۲ باکتریهای اکسیدکننده گوگرد: خوردگی لوله های بتنی بر اساس اکسیداسیون H_2O صورت می گیرد، چرا که با اکسیداسیون H_2O ، اسید سولفوریک حاصل می شود، اکسیداسیون H_2O توسط باکتریهای اکسید کننده صورت می گیرد. این باکتریها به طور عمده به دو گروه تقسیم می شوند:

الف) باکتریهای سبز و ارغوانی سولفور

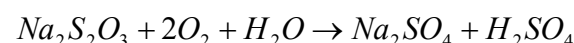
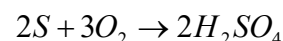
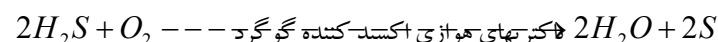
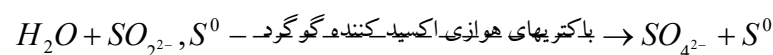
عمدتاً فوتوتوتروفیک هستند و به نور وابسته اند. بنابر این در لوله های فاضلاب که تاریک است حضور ندارند از این گروه می توان به کلروپیوم و کروماتیوم اشاره کرد.

ب) باکتریهای بی رنگ سولفور که نقش عمده ای در خوردگی بیولوژیکی لوله های فاضلاب دارند. این باکتریها هوازی، گرم منفی و بدون اسپور هستند، که در تاریکی رشد می کنند و جنس های تیوباسیلوس، تیوندندان، بجیاتوآ و سولفولوبوس را می توان نام برد.

سولفولوبوس باکتری اسید دوست و گرمادوست است که در چشمه های آب گرم اسیدی حضور دارد، دما برای این باکتری ۵۵-۸۵ درجه سانتی گراد و pH برابر ۲-۳ می باشد. از بین جنس های فوق الذکر تیوباسیلوس در خوردگی بیولوژیکی لوله های بتنی فاضلاب نقش مهمی دارد و گونه تیواکسیدانس دارای اهمیت است.

تیوباسیلوس تیواکسیدانس محیط اسیدی قوی را ترجیح می دهد و در فاضلاب روها چنین محیطی برای آن فراهم است [۴۷و۳۱].

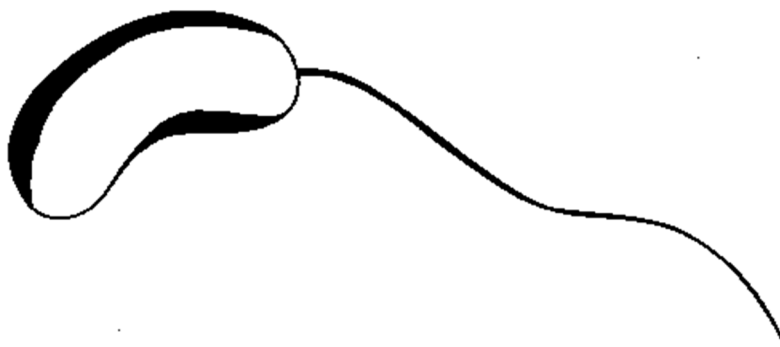
واکنش های اکسیداسیون به شرح زیر است:



جهت آشنایی با باکتریهای احیا کننده سولفات و همچنین باکتریهای اکسید کننده یک نمونه از آنها در اشکال (۲-۱۱) و (۲-۱۲) آمده است [۴۸].



شکل (۲-۱۱) بجیاتوآ باکتری بی رنگ اسید کننده سولفور به اشکال رشته ای و منفرد

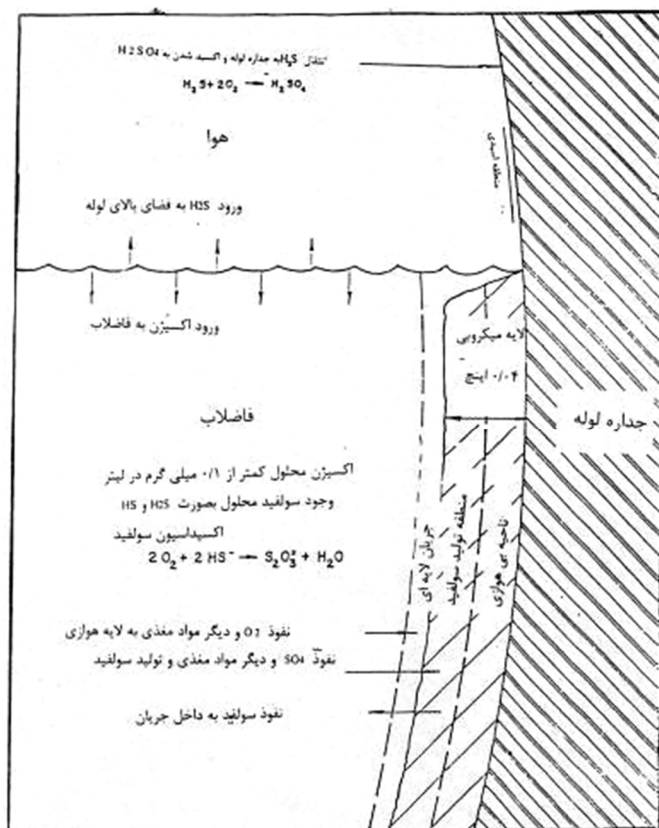


شکل (۲-۱۲) دی سولفو ویربود سولفوریکانس باکتری احیا کننده سولفور (SRB)

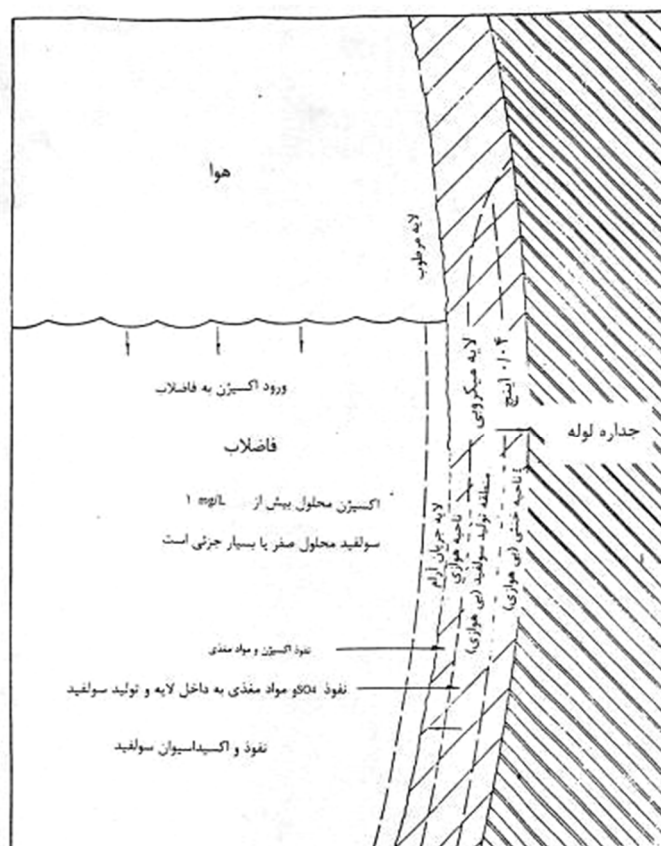
۱۲-۴-۶-۲ مکانیسم تولید سولفید: برای احیاء سولفات به سولفید محیط باید عاری از اکسیژن آزاد یا دیگر عوامل اکسید کننده باشد. جریان فاضلاب در فاضلاب روهای نیمه پر به طور کامل بی هوای نمی باشد، زیرا سطح فاضلاب با اتمسفر در تماس می باشد. اکسیژن جذب شده توسط فاضلاب سریعاً به مصرف رسیده و در فاضلاب روهای بزرگ غلظت آن در حد خیلی کم بوده ولی در عین حال برای جلوگیری از احیاء سولفات کافی می باشد. شرایط بی هوای در لایه بیولوژیکی تشکیل شده روی دیواره بوجود می آید. این لایه محتوی انواع باکتریهای رشته ای و دیگر باکتریهای ژلاتینی می باشند. ضخامت لایه بیولوژیکی حدود ۰/۰۴ اینچ می باشد ولی اگر سرعت جریان فاضلاب زیاد باشد ضخامت آن بیش از ۰/۰۱ اینچ نخواهد بود. اگر مواد ساینده همراه با فاضلاب زیاد باشد. لایه بیولوژیک کلاً همراه فاضلاب شسته می شود. در سرعت های پایین ضخامت لایه بیولوژیکی به $\frac{1}{8}$ اینچ یا بیشتر از آن هم می رسد [۵۱].

اگر در فاضلاب اکسیژن وجود داشته باشد به داخل لایه بیولوژیکی نفوذ کرده ولی باکتریهای هوای سریعاً آن را مصرف می کنند، مگر اینکه غلظت اکسیژن بالا باشد ضخامت لایه هوای کمتر از ۰/۱ اینچ است. در زیر آن لایه بی هوای وجود داشته و تولید سولفید صورت می گیرد. محاسبات انجام گرفته بر روی ضرائب نفوذ، سرعت مشاهده شده تولید سولفید نشان داده که غلظت سولفات، مواد مغذی و مواد آلی در دسترس باکتریهای احیاء کننده سولفات در مساحت خیلی کمی در لایه بیولوژیکی مصرف شده و ضخامت لایه تولید کننده سولفید معمولاً حدود ۰/۰۱ اینچ است. در عمق های بیشتر در لایه بیولوژیکی شرایط بی هوای وجود داشته ولی لایه بیولوژیک به دلیل عدم دسترسی به مواد غذایی غیر فعال بوده و تولید سولفید صورت نمی گیرد. در شکل (۲-۱۳) و (۲-۱۴) فرآیند تولید سولفید در فاضلاب روها نشان داده شده است [۵۳ و ۵۴].

منبع اکسیژن در فاضلاب تعیین کننده این است که لایه هوای و بی هوای از کجا شروع می شود. غلظت اکسیژن در فاضلاب، درجه حرارت و غلظت مواد غذای تعیین کننده این است که اکسیژن چه مقدار در لایه بیولوژیکی نفوذ می کند، اگر منبع تامین اکسیژن بیشتر باشد، ضخامت لایه هوای نیز بیشتر خواهد بود و باکتریهای هوای در منطقه بی هوای وجود داشته و آماده برای اکسید کردن مواد آلی می باشد و به صورت نهفته و غیر فعال در شرایط عدم اکسیژن وجود دارند. محدوده هوای یا غیرهوازی بر روی لایه بیولوژیکی ثابت نبوده و متغیر است [۵۲]. اگر غلظت اکسیژن در فاضلاب به مقدار کم کاهش یابد و به حدود ۰/۱ میلی گرم در لیتر برسد، دیگر اکسیژن کافی به سطح لایه بیولوژیکی برای اکسید کردن تمام سولفید تولید شده نمی رسد، در این حالت سولفید به داخل فاضلاب وارد می شود. غلظت بحران اکسیژن برای جلوگیری از ورود سولفید به داخل فاضلاب معمولاً در حد ۱-۰/۱ میلیگرم در لیتر است که آن بستگی به درجه حرارت و توربلانس فاضلاب دارد. اگر فاضلاب به صورت ثابت بوده یا با سرعت کم حرکت کند، اکسیژن در نزدیکی دیواره لوله کاهش یافته و سولفید از لایه بیولوژیکی به داخل فاضلاب وارد می شود حتی اگر قسمت عمده فاضلاب محتوی چندین میلیگرم در لیتر اکسیژن باشد، اگر جامدات آلی به صورت آهسته در کف لوله به حرکت درآیند و با وجود غلظت زیاد اکسیژن، سولفید به داخل فاضلاب رها می شود [۵۲].



شکل (۱۳-۲) فرآیند تولید سولفید در فاضلاب روهای دارای اکسیژن کمتر از ۰/۱ میلیگرم در لیتر



شکل (۱۴-۲) فرآیند تولید سولفید در فاضلاب روهای دارای اکسیژن بیش از ۱ میلیگرم در لیتر

۱۳-۴-۲ میزان تولید سولفید توسط لایه بیولوژیکی: میزان تولید سولفید توسط لایه بیولوژیکی معمولاً بستگی به میزان مواد واکنش دهنده همچون سولفات و میزان مواد آلی که به باکتریهای احیاء کننده سولفات می رسد، دارد. زمانی که لایه بیولوژیکی محتوی حداکثر تعداد باکتریها بوده و سرعت متابولیکی آنها به دلیل مناسب بودن شرایط بالا باشد، میزان تولید سولفید هم حداکثر است. در مقابل اگر تعداد باکتریها کم باشد یا سرعت متابولیک آنها پایین باشد، مواد واکنش پذیر باید به میزان بیشتری به داخل لایه بیولوژیکی نفوذ کند در نتیجه تولید سولفید پایین است. اگر لایه بیولوژیکی خیلی نازک باشد مواد واکنش پذیر بدون اینکه توسط باکتری ها مصرف شود، به دیواره خود لوله می رسد. اگر میزان مواد آلی زیاد باشد ولی غلظت سولفات کم باشد، تولید سولفید متناسب با غلظت سولفات است و از مقدار مواد آلی مستقل است. از طرف دیگر، اگر غلظت زیاد باشد، میزان تولید سولفید متناسب با مقدار مواد آلی خواهد بود [۲۵].

میزان تولید سولفید توسط لایه بیولوژیکی به شرایط محیطی زیر بستگی دارد:

۱-۱۳-۴-۲ غلظت مواد آلی و مواد مغذی: مواد آلی و مغذی بایستی به داخل لایه بیولوژیکی نفوذ کرده تا به مصرف باکتریهای احیاء کننده سولفات برسد. میزان تولید سولفید بستگی به BOD و غلظت سولفات دارد. مطالعات نشان داده است که میزان تولید سولفید در لایه بیولوژیکی متناسب با BOD و غلظت سولفات است که بصورت $[BOD]^{0.8}$ و $[SO_4]^{0.4}$ متغیر است. عملاً تولید SH_2 در فاضلاب روهای با BOD کمتر از ۵۰ میلیگرم در لیتر مشکوک است [۵۳].

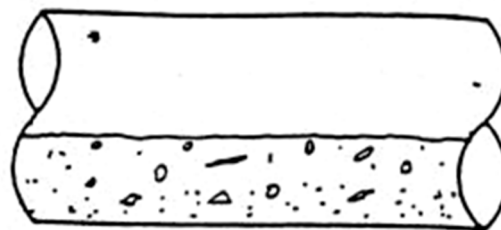
۲-۱۳-۴-۲ غلظت سولفات: سولفات و مواد آلی تقریباً به نسبت ۲ به ۱ توسط باکتریهای احیاء کننده سولفات مصرف می شوند که بستگی به نوع میکروارگانیسم ها دارد. اگر سولفات به مقدار زیاد وجود داشته باشد، تولید سولفید متناسب با غلظت مواد مغذی و مواد آلی می باشد. اگر سولفات فاکتور محدوده کننده باشد، تولید سولفید متناسب با غلظت سولفات است [۵۰].

۳-۱۳-۴-۲ PH: سهم نسبی SH_2 و SH^- بستگی به pH دارد که این مساله از نظر پتانسیل خروج گاز SH_2 به داخل فضای بالای فاضلاب رو دارای اهمیت است. باکتریهای احیاء کننده سولفات نسبت به تغییرات pH مقاوم بوده و توانایی زنده ماندن در pH=5/5-9 را دارا می باشند. اِپتیمم pH برای باکتریهای احیاء کننده سولفات 5/5-8 است [۵۰].

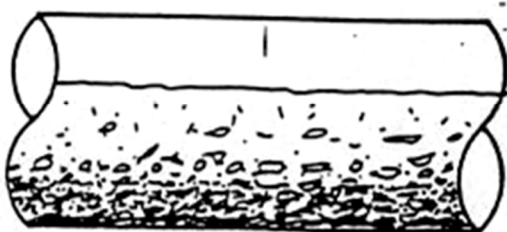
۲-۱۳-۴-۲ سرعت جریان: میزان تولید سولفید مستقیماً با سرعت فاضلاب تغییر نمی کند گرچه کاهش سرعت فاضلاب معمولاً می تواند سبب افزایش ضخامت لایه بیولوژیکی شود ولی با افزایش ضخامت لایه بیولوژیکی سبب افزایش ضخامت قسمت غیر فعال لایه بیولوژیکی روی دیواره لوله می شود و همچنین افزایش ضخامت لایه بیولوژیکی سبب طولانی شدن مسیر نفوذ مواد مغذی به داخل لوله می شود. افزایش سرعت فاضلاب نیز تمایل به کاهش ضخامت لایه بیولوژیکی به واسطه افزایش تنش روی لایه دارد، به هر حال حداقل ضخامتی که سبب مختل شدن تولید سولفید می شود مشخص نشده است. مشاهدات نشان داده که میزان تولید سولفید در یک خط اصلی تحت فشار که سرعت فاضلاب در آن 1/2m/s بوده بطور قابل ملاحظه ای تفاوتی با دیگر خطوط اصلی که دارای سرعت پایین تری بوده اند، نداشته است. زمانی که سرعت فاضلاب کمتر از سرعت خودشویی باشد، رسوب جامدات آبی در کف لوله اتفاق می افتد که این رسوبات ته نشین نشده به عنوان محلی برای تولید H_2S توسط باکتریهای احیاء کننده سولفات عمل می کند. تجمع مواد در فاضلاب روها و تشکیل H_2S با سرعت های مختلف جریان در شکل (۲-۱۵) آمده است [۲۵ و ۵۰].



ب: در سرعت $1/4$ تا 2 فوت بر ثانیه ذرات غیر آلی در ته لوله انباشته می شوند، تشکیل سولفید در این سرعت کم است.



الف: سرعت 2 فوت بر ثانیه جهت انتقال مواد کافی است در این سرعت سولفید تشکیل نمی شود. تشکیل سولفید اغلب هنگامی مشاهده می شود که سرعت خیلی پایین باشد.



د: در سرعت کمتر از 1 فوت بر ثانیه مواد آلی و غیر آلی در ته لوله انباشته شده و به خاطر حرکت کندتر تولید سولفید و مشکلات ناشی از آن بدتر از حالت ج می باشد.



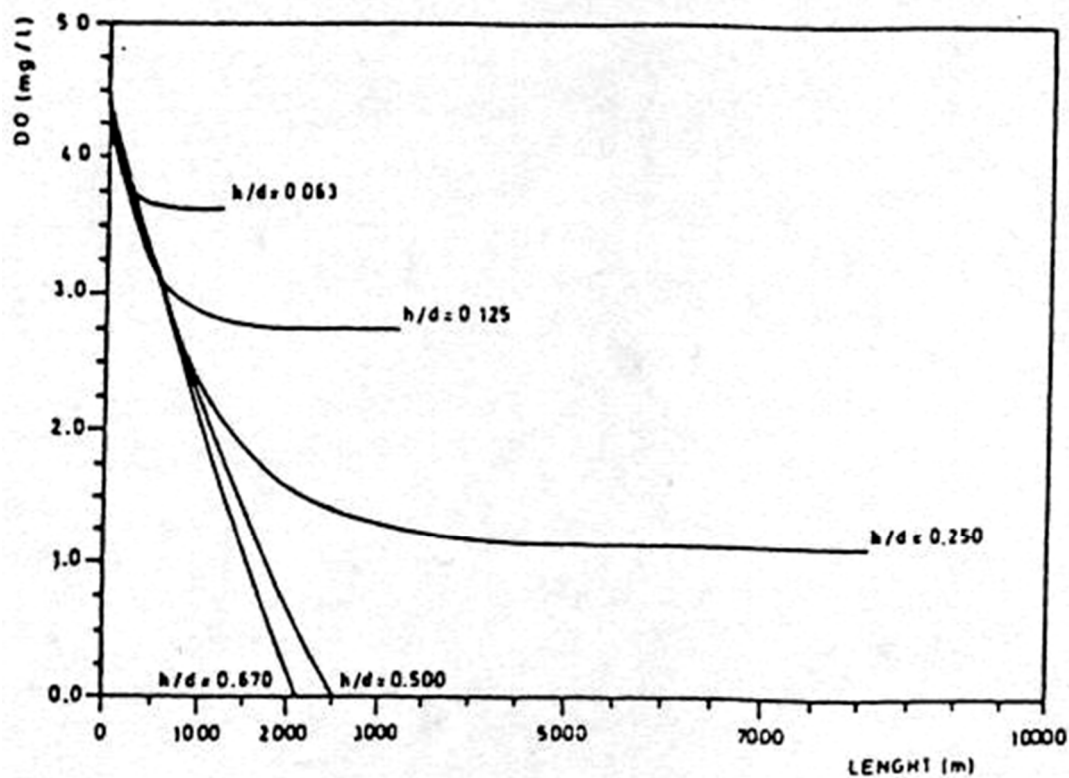
ج: در سرعت $1/4$ تا 1 فوت بر ثانیه مواد غیر آلی ته نشین می شوند و مواد آلی به آرامی در ته لوله حرکت می کنند تولید سولفید هیدروژن افزایش یافته و در فاضلابروها مشکل ایجاد میکند.

شکل (۲-۱۵) تجمع مواد در فاضلاب روها در سرعتهای مختلف جریان

۳-۱۳-۴-۶-۲ زمان ماند: با افزایش زمان ماند، میزان مصرف اکسیژن افزایش یافته و پتانسیل اکسیداسیون احیاء کاهش می یابد و مواد آلی بیشتر محلول می شوند. این شرط برای رشد باکتریهای احیاء کننده سولفات مطلوب است، بنابراین در طراحی سیستم های جمع آوری و تصفیه فاضلاب به حداقل رساندن زمان ماند فعالیت باکتریهای احیاء کننده سولفات را محدود کرده که نتیجه آن کاهش تولید سولفید است [۵۴].

۴-۱۳-۴-۶-۲ مساحت قابل دسترس: فاکتورهایی که برای مساحت قابل دسترس باکتریها برای احیاء سولفات در فاضلاب روها دخالت دارند عبارتند از: میزان جریان، قطر لوله و شیب لوله [۵۶].

۵-۱۳-۴-۶-۲ نسبت h/D در فاضلاب روها: با توجه به تاثیر غلظت اکسیژن محلول در پدیده خوردگی، تغییرات غلظت DO در طول یک فاضلاب رو ثقیل با قطر 300 میلی متر و شیب 0.005 بر اساس مدلی که توسط ماتوس و دی سوزا ارائه شده ترسیم شده است. با توجه به شکل هر اندازه نسبت h/D بزرگتر شود میزان DO در طول شبکه کاهش می یابد [۴۳].



شکل (۲-۱۶) تغییرات غلظت DO در طول یک فاضلاب رو ثقلی با قطر ۳۰۰ میلیمتر و شیب ۰/۰۰۵

۶-۱۳-۴-۲ **درجه رطوبت** : درجه حرارت دارای اثر قابل توجهی روی باکتریهای احیاء کننده سولفات دارد، گزارش شده است که تولید سولفید به ازاء هر یک درجه افزایش، ۷ درصد افزایش می یابد (تا ۳۰ درجه سانتی گراد) که تقریباً به ازاء هر ۱۰ درجه سانتی گراد سرعت واکنش ۲ برابر می شود.

اثر درجه حرارت روی میزان تولید سولفید توسط لایه بیولوژیکی بحث پیچیده است. اصطلاح BOD موثر پارامتری است که بررسی اثرات توام درجه حرارت و BOD را نشان می دهد [۵۰].

$$EBOD = BOD \times 1/07^{T-20}$$

۷-۱۳-۴-۲ **تهویه نامطبوع شبکه** : عدم وجود هوای کافی در شبکه ها باعث انجام شرایط بی هوازی و فعالیت باکتریهای احیاء کننده سولفات و در نتیجه تولید H_2S می شود [۵۰].

۱۴-۴-۴-۲ **پیش بینی تشکیل H_2S در فاضلاب روها** : برای پیش بینی تشکیل H_2S در فاضلاب روها با قطر کمتر از ۶۰۰ میلی متر از رابطه پومروی یا فرمول Z استفاده می شود. این رابطه توسط EPA و ASCE پذیرفته شده است. رابطه پومروی به صورت زیر است:

$$Z = \frac{3[EBOD]}{M^{1/2} Q^{1/3}} \frac{P}{b}$$

Z = نشان دهنده شرایط احتمالی تشکیل سولفید هیدروژن در فاضلاب

BOD=EBOD موثر بر حسب میلی گرم در لیتر

M = شیب فاضلاب رو (m/m)

Q = میزان جریان بر حسب لیتر بر ثانیه

P = محیط خیس شده

b = عرض سطح جریان

مقدار Z نشان دهنده شرایط احتمالی تشکیل سولفید هیدروژن است و بر اساس آن پومروی مدعی شد که می توان شرایط احتمالی سولفید هیدروژن موجود در فاضلاب روها را پیش بینی کرد. جدول زیر مقادیر مختلف Z را برای تشکیل H_2S و پیامدهای حاصل از آن را نشان می دهد.

جدول (۲-۳۱) پیش بینی مقدار Z و شرایط احتمالی آن

مقدار Z	شرایط احتمالی
< 5000	سولفید به ندرت وجود دارد
≈ 7500	تشکیل غلظت های کم سولفید برحسب میلیگرم در لیتر سولفید
≈ 10000	سولفید ممکن است به اندازه کافی برای ایجاد بو و خوردگی تشکیل شود
≈ 15000	اغلب مشکل عمده بو و خوردگی وجود دارد

EBOD₅:

توجه به واکنشهای بیوشیمیایی فاضلاب روهای بهداشتی مورد نیاز است، تا از آزاد شدن گازهای نامطلوب از فاضلاب در این مجاری جلوگیری شود. نگرانی عمده به سولفید هیدروژن مربوط می شود که وقتی اکسید شد، اسید سولفوریک تولید می نماید که باعث خوردگی جداره فاضلاب روها می شود و همچنین این ترکیبات می توانند در غلظت های بالا برای کارگران کشنده باشند. گاز بالقوه خطرناک دیگر متان است که در اینجا از آن صرف نظر می گردد مگر اینکه خطوط فاضلاب دارای مسیری طولانی بوده و در آب و هوای گرم دارای سرعت کم باشد [۵۰]. سولفید هیدروژن در شرایطی که وضعیت بی هوازی در فاضلاب غالب شود به یک مشکل اساسی تبدیل می گردد، این مساله وقتی که نیاز اکسیژن بیوشیمیایی (BOD) در فاضلاب بالا رود، یک امر جدی می شود. بر اساس تحقیقات به عمل آمده BOD فاضلاب شهری در آینده بیش از مقادیر فعلی خواهد بود و این بدان معناست که مفهوم بیوشیمیایی طراحی فاضلاب بهداشتی در اماکنی که سیستم های فاضلاب عاری از سولفید هیدروژن هستند، حتی اگر مسائل مربوط به جلوگیری از آن در طراحی سیستم اصلی در نظر رگفته نشده باشد، مساله مهم تلقی خواهد شد.

بر اساس فرمول پومروی BOD₅ موثر (EBOD₅) به عنوان غلظتی از BOD₅ طی ماکزیمم 6 ساعت جریان روزانه در دمای متوسط سه تا از گرمترین ماههای سال تعریف می شود که از معادله زیر می توان مقدار آنرا محاسبه نمود [۵۴و۵۰].

$$EBOD_5 = BOD_5 * 1.07^{(T-20)}$$

که در این فرمول:

$$EBOD_5 = BOD_5$$

روزانه یک ترکیب نمونه استاندارد در دمای 20°C

T= دمای فاضلاب بر حسب درجه سانتی گراد است.

برای درک، بهتر عوامل تشکیل دهنده فرمول اجزاء آن به بخش هایی تقسیم می شوند که آنها را از لحاظ کمی و کیفی مورد بررسی قرار می دهیم. در فرمول زیر:

$$Z = Z_B \circ Z_H \circ Z_G$$

Z_B مربوط به اثر وضعیت بیولوژی فاضلاب، مربوط به اثر شرایط هیدرولیکی فاضلاب روها و Z_G مربوط به اثر شکل جریان فاضلاب در لوله به حالت پر یا نیمه پر بودن می باشد.

درجه حرارت تاثیر کاملاً مشخص بر عامل Z دارد، اما این اثر در درجه حرارت ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی گراد نسبت به آنچه که انتظار می رود کمتر می باشد. با این حال بروز مشکل خوردگی ناشی از سولفید هیدروژن با درجه حرارت فاضلاب ارتباط مستقیم دارد و درجه حرارت فاضلاب یک عامل قطعی در تشکیل این گاز محسوب می شود. شکل (۲-۱۸)

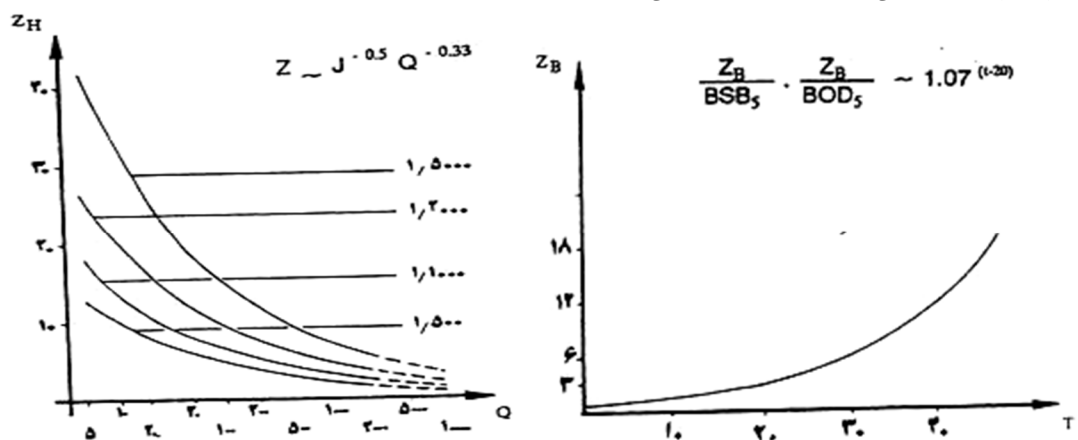
شکل (۲-۱۸) بیانگر مقدار، توزیع و ارتباط میان عوامل موثر بر شرایط هیدرولیکی است و به کمک آن می توان میزان احتمال خوردگی را

$$Z_H = S^{-0.5} \cdot Q^{0.33}$$

تخمین زد.

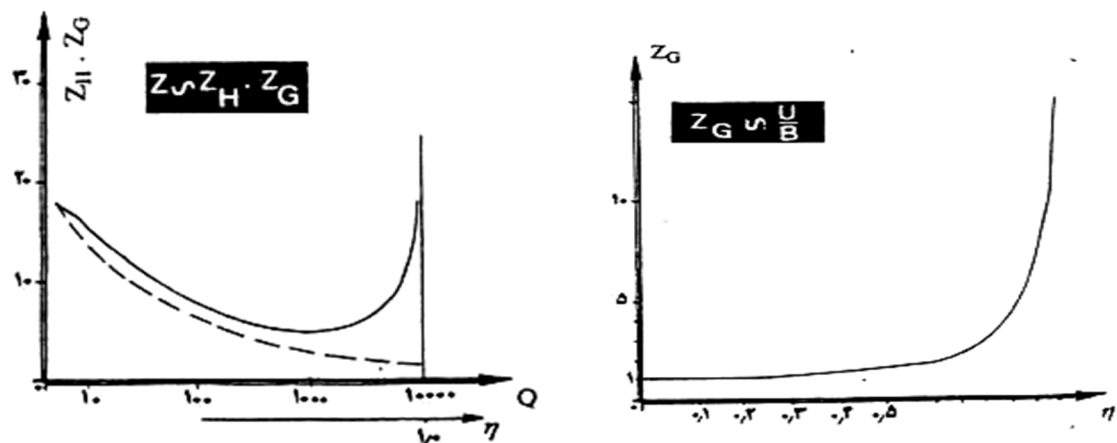
بر طبق این فرمول احتمال وقوع خوردگی توسط سولفید هیدروژن برای فاضلاب روهای با شیب و دبی کم به مراتب بیشتر می باشد. شکل (۲-۲).

(۲۰) نشان می دهد که میزان جریان فاضلاب در لوله در نوسان بوده و عامل Z_G به میزان پر شدن فاضلاب رو $S = \frac{h}{D}$ بستگی دارد. $Z_G = \frac{P}{b}$ بعنوان مثال عامل Z_G نسبت حداکثر شدت جریان را برای فاضلاب رو هنگامی که فاضلاب تقریباً تا تاج لوله را پر کرده باشد نشان می دهد. برای رسیدن به یک دستورالعمل اساسی در نگهداری از شبکه فاضلاب، دو عامل Z_H و Z_G در شکل (۱-۲۳) به صورت یک عامل در نظر گرفته شده است. این نمودار تاثیر مقادیر مختلف Z_H و Z_G را برای فاضلاب رو با شیب $\frac{1}{1000}$ نشان می دهد. بر طبق این مثال و بر اساس فرمول تجربی Z در دو حالت خوردگی ناشی از سولفید هیدروژن دارای بیشترین اثر می باشد، از جمله این موارد می توان به پر بودن لوله و همچنین به حداقل بودن میزان جریان در فاضلاب رو اشاره نمود که در این حالت احتمال وقوع خوردگی بدون در نظر گرفتن وضعیت بهره برداری از شبکه بیشتر می باشد. این وضعیت بخصوص هنگامی نمود می یابد که شبکه جمع آوری فاضلاب فقط بر اساس رشد جمعیت آبی و گسترش منطقه طراحی می گردد و به هنگام شروع بهره برداری، فاضلاب با گذر حجمی و سرعت کم در فاضلاب روها انتقال می یابد، بطوریکه این شرایط موجب از بین رفتن لوله های بتنی در آب و هوای معتدل می گردد [۱۷].



شکل (۲-۱۷) ارتباط بین عامل درجه حرارت فاضلاب و عامل Z_B

شکل (۲-۱۸) تاثیر شیب فاضلاب رو گذر حجمی فاضلاب بر Z_H



شکل (۲-۱۹) رابطه ابعاد هندسی فاضلاب رو Z_G

شکل (۲-۲۰) نمایش تلفیقی تاثیر دو عامل Z_H و Z_G در فاضلاب رو با شیب یک در هزار

۲-۷ شبکه فاضلاب اصفهان، مشکلات و راه حل ها

۲-۷-۱ معرفی شبکه فاضلاب اصفهان

بدلیل بالا بودن سطح اب زیر زمینی و جنس رسی زمین های شهر اصفهان دفع فاضلاب از معضلات بزرگ این شهر محسوب می شده است.

روش سنتی حفر چاهها نفوذی در قدیم و بتبع آن آلوده شدن ابهای زیر زمینی و بدلیل حمل غیر بهداشتی فاضلاب در معابر عمومی و شیوع امراض مختلف در شهر ، باعث درخواست طراحی شبکه فاضلاب توسط مردم اصفهان گردید .



شکل (۲-۲۲) روش سنتی حمل فاضلاب

شکل (۲-۲۱) بالا بودن سطح آب زیر زمینی

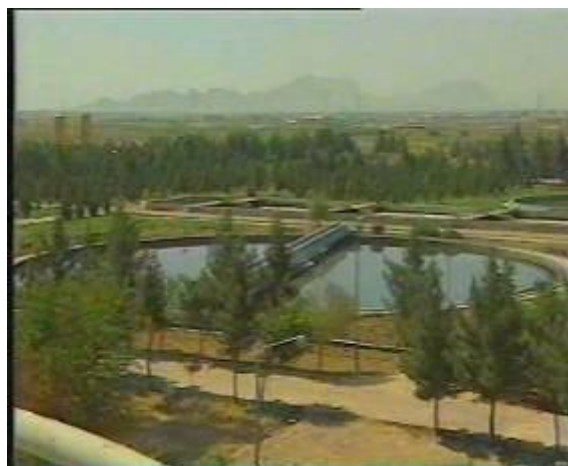
طراحی شبکه فاضلاب در سال ۱۳۳۶ انجام و در خلال سالهای ۱۳۳۷ تا ۱۳۴۰ اولین مرحله شبکه جمع آوری فاضلاب که عمدتاً در مناطق مسکونی و بافت قدیمی قرار داشت با طول ۸۴ کیلومتر اجرا گردید .

با تاسیس شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان در مهرماه ۱۳۴۵ بهره برداری از مرحله اول طرح آغاز و بدنبال آن مطالعه توسعه و تکمیل شبکه در دستور کار قرار گرفت .

بدلیل شرایط توپوگرافی شهر اصفهان و وجود خط العرسهای گذرنده از خیابانهای فروغی ،مدرس و سروش ، ۲ شبکه و ۲ تصفیه خانه مجزا از هم احداث گردید.

این دو تصفیه خانه شامل تصفیه خانه شمال اصفهان که فاضلاب مناطق شمال شهر و تصفیه خانه جنوب که فاضلاب قسمت مرکزی و جنوب شهر را تصفیه می کرد ، می باشد.

ظرفیت تصفیه خانه فاضلاب جنوب ظرفیتی معادل ۹۰۰ هزار نفر و تصفیه خانه فاضلاب شمال ظرفیتی معادل ۴۰۰ هزار نفر را دارا می باشد.



شکل (۲-۲۴) تصفیه خانه شمال اصفهان

شکل (۲-۲۳) تصفیه خانه جنوب اصفهان

به منظور توسعه شبکه فاضلاب شرق اصفهان تصفیه خانه ای با ظرفیت ۱۵۰۰۰۰ نفر در منطقه سگری اصفهان پیش بینی گردیده است .هم اکنون طول شبکه فاضلاب اصفهان ۲۷۵۰ کیلومتر و در حدود ۲۵۰ هزار انشعاب را تحت پوشش دارد که جنس اکثر لوله های آن بتنی با مقاطع دایره ای ، تخم مرغی و فکی می باشد

۲-۷-۲ خوردگی و مشکلات آن :

از جمله دلایل تخریب فاضلابروها پدیده خوردگی می باشد که باعث از بین رفتن تاج لوله و تخریب آن و گرفتگی حاصل از تکه های لوله و خاک ریخته شده در آن می شود .. تخریب و ریزش فاضلاب روها تهدیدی خطرناک برای بهداشت عمومی و گرفتگی خطوط اصلی باعث پس زدگی فاضلاب به داخل منازل شده و باعث تهدید سلامت شهروندان و خسارت به اموال آن ها می گردد. در صورت بروز حادثه ای چنانچه در اولین فرصت اقدامی صورت نپذیرد باعث بروز یک بحران جدی می گردد

۲-۷-۳ یک از حادثه بزرگ در خطوط اصلی فاضلاب اصفهان :

(فرو ریزی سقف فاضلابروی خیابان مشتاق در سال ۱۳۷۵)

این فاضلابرو با مقطع فکی و از جنس بتنی با ابعاد ۱،۵×۲ متر بوده که کلکتور اصلی جهت انتقال فاضلاب جمع آوری شده در جنوب شهر به تصفیه خانه فاضلاب جنوب می باشد. در اثر خوردگی تاج لوله از بین رفته و رد اثر حرکت ماشین آلات ساختمانی شهرداری در حال کار سقف آن فرو ریخته و باعث نشست سطح خیابان و مسدود شدن کلکتور اصلی گردیده است . که با تلاش و سخت کوشی و همیاری سازمان نسبت به باسازی و تعویض قسمتهای تخریب شده اقدام گردید .



شکل (۲-۲۶) ریزش سقف کلکتور اصلی



شکل (۲-۲۵) عملیات بازسازی کلکتور

۲-۷-۴ پیگیری و چاره اندیشی شرکت فاضلاب اصفهان

در پی حوادث پی در پی کارشناسان حوزه معاونت بهره برداری اقدام به بررسی نقشه های شبکه فاضلاب و جمع آوری اطلاعات از حوادث مناطق مختلف شهری و شناسای نقاط بحرانی کرد .

در سال ۱۳۸۰ با خرید دوربین پیشرفته ای از یک شرکت آلمانی اقدام به شناسای و فیلمبرداری از داخل فاضلابرها گردید . در انجام این امر خودروی حامل تجهیزات دوربین در دهانه بالای منهول مستقر و با اتصال کابلی به دوربین آنرا به داخل فاضلابرو هدایت می کنند . دوربین از داخل خودرو توسط صفحه کلید فرمان کنترل و تصاویر بر روی مونیتور قابل رویت می باشد و سپس تصاویر بر روی فیلم ضبط می شود .



شکل (۲-۲۸) نحوه ورود دوربین به شبکه



شکل (۲-۲۷) دوربین فیلمبرداری از داخل شبکه

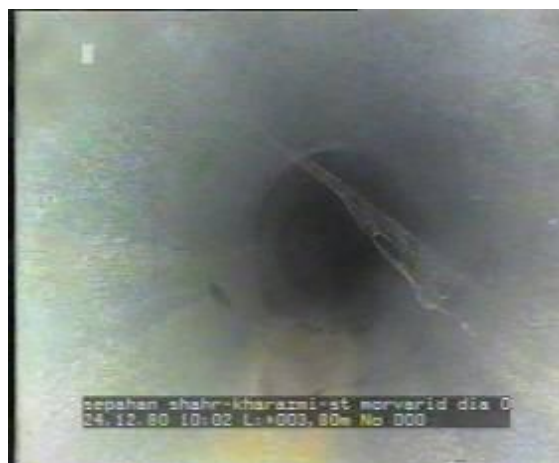
۲-۷-۵ نمونه های از برداشت دوربین در مناطق مختلف استان اصفهان

موقعیت : شهر سپاهان شهر

نمای از لوله اجرا شده که هنوز از آن بهره برداری نشده



شکل (۲-۳۰) لوله اجرا شده که هنوز از آن بهره برداری نگردیده



شکل (۲-۲۹) لوله اجرا شده که هنوز از آن بهره برداری نگردیده

موقعیت : بزرگراه شهید چمران :

مشخصات آدمرو : بتنی با قطر ۲۵۰ میلیمتر، قدمت : ۱۱ سال

میزان تخریب : در معرض تخریب کامل در اثر خوردگی ، نمایان شدن سنگدانه های بتن ، افتادن واشر پلاستیکی بین بندها ، ایجاد حفره های بزرگ در قمت تاج لوله ، ریزش خاک به داخل فاضلابرو ، افتادن تکه های لوله تخریب شده به داخل فاضلابرو



شکل (۲-۳۱) ریزش سقف آدم رو

موقعیت : خیابان شیخ صدوق شمالی (جنوب شهر اصفهان)

مشخصات آدمرو : بتنی با قطر ۲۵۰ میلیمتر ، قدمت : ۲۲ سال

میزان تخریب : گرفتگی شدید در اثر تخلیه فاضلاب چرب یک قناری در بالا دست فاضلابرو ، در معرض تخریب کامل در اثر خوردگی ، نمایان شدن سنگدانه های بتن ، افتادن و اشرفلاستیکی بین بندها ، ایجاد حفره های بزرگ در قمت تاج لوله ، ریزش خاک به داخل فاضلابرو ، افتادن تکه های لوله تخریب شده به داخل فاضلابرو



شکل (۲-۳۲) گرفتگی لوله توسط مواد چربی دار

موقعیت : خیابان میخک در شهرک خانه اصفهان

مشخصات آدمرو : بتنی با قطر ۲۵۰ میلیمتر قدمت : ۲۸ سال

میزان تخریب : تخریب کامل تاج در اثر خوردگی ، نمایان شدن سنگدانه های بتن ، افتادن و اشرفلاستیکی بین بندها ، ایجاد حفره های بزرگ در قمت تاج لوله ، ریزش خاک به داخل فاضلابرو ، افتادن تکه های لوله تخریب شده به داخل فاضلابرو



شکل (۲-۳۳) جدای و اشرف آب بند و تشکیل مانع

موقعیت : خیابان فروغی (بین میادین شهدا و جمهوری با تردد زیاد خودرو)

مشخصات آدمرو : بتنی با قطر ۲۵۰ میلیمتر قدمت : ۲۴ سال

میزان تخریب : در معرض تخریب کامل در اثر خوردگی ، نمایان شدن سنگدانه های بتن ، افتادن و اشرفلاستیکی بین بندها ، ایجاد حفره های بزرگ در قسمت کناری لوله



شکل (۲-۳۴) ایجاد حفره بدلیل خوردگی

۶-۲-۲ مشکلات اجرای :

- وجود جریان ممتد در فاضلابروها و عدم امکان قطع جریان برای مدت کم
- بافت تاریخی و وجود معابر قدیمی با عرض کم
- وجود تاسیسات شهری مختلف از جمله خطوط آب ، گاز ، تلفن در کنار هم
- هزینه های بالای اجرا ، تعمیر و نگهداری شبکه



شکل (۲-۳۵) مشکلات اجرای در بافت قدیمی

شکل (۲-۳۶) وجود تاسیسات مختلف شهری در فاصله کم از یکدیگر

تصاویر برداشت شده توسط دوربین موکد خوردگی شدید در لوله های بتنی موجود در شبکه های فاضلاب اصفهان می باشد . ارائه راهکارهای اساسی جهت پیشگیری ، کنترل و درمان شبکه های فرسوده جهت جلوگیری از بروز حوادث اقتصادی و زیست محیطی ضروری بنظر میرسد . در ادامه روشها و راه کارها مختلف ارایه می گردد .

۸-۲ روشهای پیشگیری از خوردگی بیولوژیکی لوله های بتنی فاضلاب

اساس اغلب روشهای پیشگیری و کنترل این است که از تولید H_2S جلوگیری شود. یا پس از تولید آن قبل از ورود به فضای بالای لوله از بین برده شود. برای جلوگیری از تولید H_2S بایستی از رشد باکتریهای تولید کننده H_2S ممانعت به عمل آید یا از بی هوازی شدن فاضلاب جلوگیری شود. اصولاً چنین اقداماتی نه عملی است و نه اقتصادی، بنابراین همیشه هدف بایستی کاهش پتانسیل ایجاد خوردگی باشد و کاهش میزان خوردگی به یکی از روشهای زیر امکانپذیر است:

- تهیه موثر فاضلاب روها به روش طبیعی یا مصنوعی
- تبدیل H_2S به HS^- و S^{2-}
- اکسیداسیون H_2S قبل از اینکه به اتمسفر لوله وارد شود به کمک مواد اکسید کننده

- استفاده از کاتیونهای فلزی (مثل املاح آهن) برای رسوب دادن سولفید
 - استفاده از نیترات برای جلوگیری از شرایط بی هوازی
 - تزریق هوا به لوله های تحت فشار
 - استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی در مرحله ساخت لوله
 - پاکسازی فاضلاب روها برای جلوگیری از تجمع مواد دانه ای و لجن ها
 - اجتناب از جریان متلاطم فاضلاب بی هوازی برای جلوگیری از وارد شدن بیشتر H_2S به فضای لوله
- در یک برنامه کنترل خوردگی گاهی ممکن است از چند روش بالا به صورت توأم استفاده شود که به شرح مختصری درباره هر کدام اکتفا می کنیم

۱-۸-۲ تهویه شبکه های جمع آوری فاضلاب

سولفید هیدروژن رد سطوح بتنی خشک نمی تواند باعث خوردگی شود، زیرا باکتریهای اکسیدکننده نیازمند به رطوبت می باشند. بنابراین هوادهی مناسب برای به حداقل رساندن جذب و اکسیداسیون سولفید هیدروژن مطلوب است و غلظت سولفید هیدروژن را در اتمسفر لوله کاهش داده و از تجمع غلظت آن پیشگیری می کند.

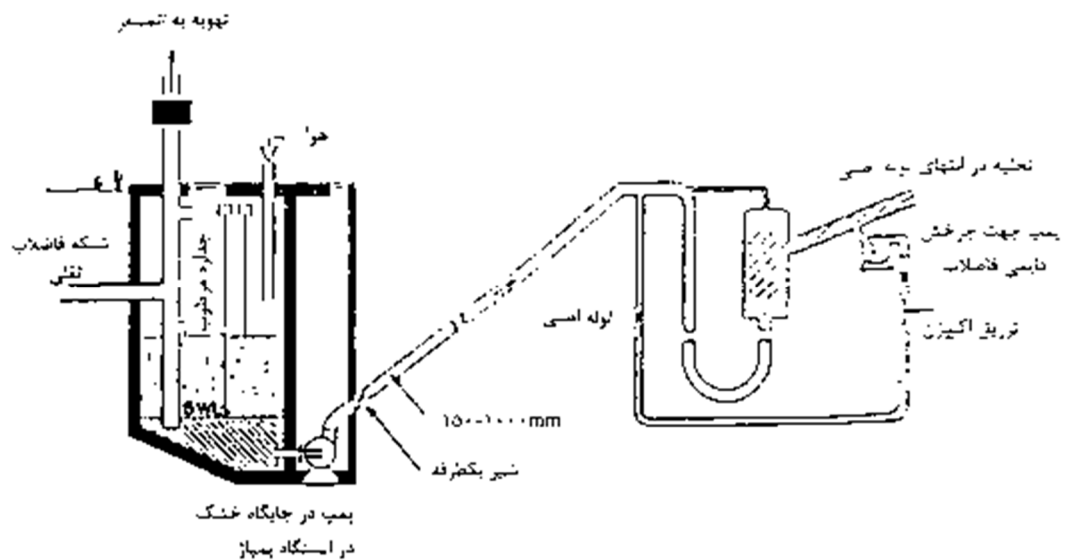
پمپ ها هوادهی احتمالاً فقط برای اقطار خیلی بزرگ اقتصادی است، اما ممکن است در ایستگاههای پمپاژ برای پیشگیری از خوردگی دیواره های تر مورد استفاده قرار گرفته است.

تهویه شبکه های جمع آوری فاضلاب ممکن است به صورت طبیعی یا مصنوعی باشد. تهویه طبیعی از طریق فاکتورهای متعدد از قبیل تغییرات فشار با و متریک هوا، سرعت جریان فاضلاب در لوله، تفاوت وزن مخصوص هوای داخ و خارج لوله، جهت باد و تغییرات حجم فاضلاب در شبانه روز انجام می گیرد و معمولاً ورود و خروج هوا از طریق سوراخهای دریچه آدم روها و لوله هواکش منازل خواهد بود. در مسیرهای طولانی خطوط فاضلاب که تهویه کافی نیست با تقسیم کردن طول خط به قطعات پیش بینی هواکش های ورود و خروج هوا و در نظر گرفتن اختلاف ارتفاع مناسب برای لوله ها هواکش می توان بطور طبیعی تهویه خط لوله را انجام داد.

تهویه مصنوعی یا تحت فشار در شرایطی که با توجه به مشخصات کیفی فاضلاب و وضعیت شبکه تهویه امکان نداشته باشد یا موثر نباشد با پیش بینی دمنده های هوا سرعت جریان هوای بالای سطح فاضلاب را تسریع می کنیم و ضمن تعویض هوای مزبور به میزان یک تا پنج بار در ساعت، بر حسب اهمیت رطوبت زیاد هوای بالای سطح فاضلاب را که ایجاد تعریق می کند و شرایط مناسبی برای خوردندگی به وجود می آورد کاهش می دهد. تهویه از پایین دست خطوط به سمت بالا دست انجام می شود، هوای تهویه شده دارای بو می باشد و نیاز به تجهیزات کنترل بو نظیر بیواسکراپر دارد. تهویه مصنوعی عمدتاً برای قطرهای بزرگ از نظر اقتصادی قابل توجیه است [۵۶].

۲-۸-۲ اکسیژن

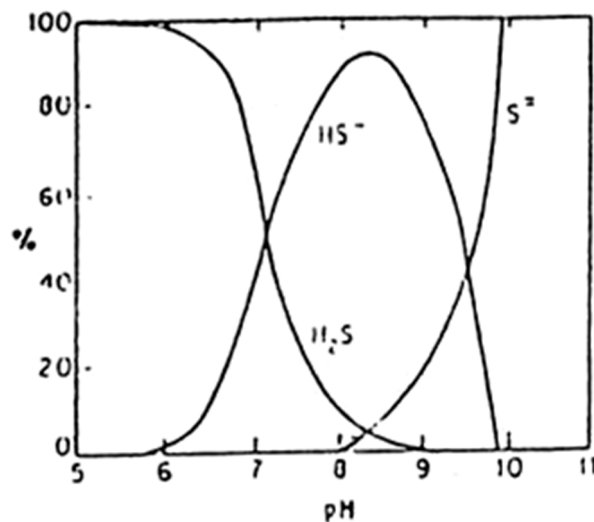
از اکسیژن برای پیشگیری از شرایط بی هوازی در لوله های بالابر استفاده می شود. این اکسید کننده ترکیبات را کاهش می دهد و اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم های موجود در فاضلاب در لایه های سطحی را تهیه می کند. توجیه برای استفاده از اکسیژن این است که غلظت اشباع از اکسیژن حل شده، افزایش یافته و پنج برابر می شود و امکان مشکلات باقیمانده نیتروژن برطرف می شود. شمای زیر توسط بون و اسکلت در سال ۱۹۷۹ طراحی شده است [۵۰و۵۶].



شکل (۲-۳۷) تزریق اکسیژن به لوله بالابری که فاضلاب به صورت منقطع پمپ می شود

۳-۸-۲ کاربرد مواد قلیایی

با افزایش pH فاضلاب که به کمک مواد قلیایی (ترجیحا هیدرواکسید سدیم) صورت می گیرد، نسبت H_2S کاهش می یابد و باعث کاهش خروج گاز H_2S به فضای بالای داخل لوله می شود. افزودن مواد قلیایی به منظور pH تا حدود ۹، هزینه است و کنترل آن مشکل است ولی در مورد خاصی برای لوله های بالابر با قطر کمتر از ۱۵۰ میلی متر که فاضلاب زمان توقف بالایی دارد استفاده می شود. هزینه افزودن مواد قلیایی با هزینه تزریق اکسیژن، کلر زنی و سایر روش های شیمیایی کنترل خوردگی برابری می کند. کاربرد این روش برای خطوط انتقال فاضلاب از شهرک های صنعتی و کارخانجات به شبکه فاضلاب شهری قابل توصیه است. اثر تغییرات pH بر توزیع نسبی H_2S ، HS^- و S^{2-} در شکل زیر آمده است [۲۳ و ۲۵ و ۵۶].



شکل (۲-۳۸) اثرات تغییرات pH بر توزیع نسبی H_2S ، HS^- و S^{2-}

۴-۸-۲ کاربرد مواد اکسید کننده برای اکسید H_2S قبل از ورود به اتمسفر لوله

دلائل اصلی کاربرد مواد اکسید کننده در فاضلاب به منظور زیر بوده است:

- جلوگیری از مساله بو و تعفن به منظور حفظ شرایط زیست محیطی و جلوگیری از ایجاد مزاحمت برای ساکنان منطقه بر اساس قوانین حفاظت محیط زیست
- برای اطمینان از یک محیط کاری سالم در فاضلاب روها و منطبق با مقررات بهداشتی و ایمنی جهت کارکنان شاغل در این بخش
- به منظور حصول اطمینان از اینکه شرایط فاضلاب هیچ اثر نامطلوبی بر روی تصفیه نخواهد داشت
- پیشگیری از خوردگی فاضلاب روها، ساختمان و تجهیزات مربوطه که موضوع اصلی این مطالعه است

مواد شیمیایی اضافه شده به فاضلاب برای کنترل موارد فوق متضمن اکسیداسیون و تغییرات ترکیبات برای یک حالت ثابت و پایدار و به دنبال کاهش بوی نامطبوع، بالابردن پتانسیل اکسیداسیون و احیاء، پیشگیری از تشکیل سولفات ها و نابود ساختن و از بین بردن باکتریها و یا پایین آوردن فعالیت باکتریولوژیکی، به منظور عدم تولید H_2S می باشد. که برای این منظور از مواد اکسید کننده نظیر ترکیبات کلر، پرمنگنات پتاسیم، هیدروژن پراکسید و اوزون استفاده می شود. جدول (۲-۳۲) کاربرد مواد شیمیایی به منظور اهداف مختلف در شبکه جمع آوری فاضلاب آمده است [۱۲۶].

جدول (۲-۳۲) کاربرد مواد شیمیایی در شبکه های جمع آوری

کاربرد	مواد مصرف شده	ملاحظات
کنترل لایه های بیولوژیکی	CL_2 و H_2O_2	کنترل آلک و باکتریهای مولد لایه های بیولوژیکی
کنترل خوردگی H_2S	H_2O_2 و CL_2 و O_3	کنترل خوردگی، تجزیه H_2S در مجاورت فاضلاب
کنترل خوردگی (H_2S)	$FeCl_3$	کنترل یا ترسیب H_2S توسط $FeCl_3$ ایجاد می شود
کنترل بو	H_2O_2 و CL_2 و O_3	مخصوصا در ایستگاههای پمپاژ و فاضلاب روهای طویل و مسطح

مواد اکسید کننده برای کنترل سولفید به دو طریق می تواند عمل کند

۱- واکنش با سولفید موجود در فاضلاب و جلوگیری از خروج SH_2 به فضای داخل لوله که کاربرد مواد شیمیایی برای این هدف به یکی از سه طریق زیر اثر خود را نشان می دهد:

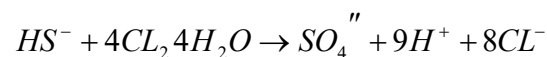
- اکسیداسیون سولفید به سولفات و محصولات حاصل از اکسیداسیون
- تبدیل سولفید به سولفید فلزی بی اثر
- تبدیل به H_2O و HS^-

۲- از بین بردن باکتریهای تولید کننده سولفید یا تغییر شرایط به طوریکه لایه بیولوژیک دیگر توانایی تولید سولفید را نداشته باشد. برای انجام این کار از عوامل اکسید کننده برای افزایش پتانسیل اکسیداسیون و احیاء به حدی که از احیاء سولفات جلوگیری کند یا با اضافه کردن مواد مس که لایه بیولوژیکی را از بین ببرد یا بطور موقت فعالیت باکتریهای تولید کننده سولفید را متوقف کند، می توان استفاده نمود، که به بحث مختصری از این مواد می پردازیم:

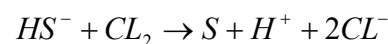
۵-۸-۲ کلرینی

کلر اغلب در فاضلاب روهای اصلی، ایستگاههای پمپاژ و در ابتدای تصفیه خانه ها به کار برده می شود، کلر سبب تخریب هر نوع سولفید موجود در فاضلاب شده و از تجمع سولفید در فاضلاب روهای تحت فشار در جاهایی که تزریق هوا غیرممکن باشد و یا بدون اثر باشد می توان استفاده کرد.

کلر نه تنها با سولفید واکنش می دهد، بلکه با مرکابتانها هم که عامل مهم تولید پودر فاضلاب هستند وارد واکنش می شود. اگر مقدار زیادی کلر به فاضلاب محتوی سولفید اضافه شود، بر طبق واکنش زیر سولفید به سولفات اکسید می شود.



در این واکنش برای اکسید کردن هر قسمت سولفید حدود ۸/۸۷ قسمت وزنی کلر مورد نیاز می باشد. اگر کلر بطور آهسته با اختلاط ملایم به محلول خالص سولفید اضافه شود، سولفید به گوگرد بر طبق رابطه زیر تبدیل می شود:

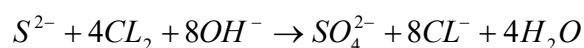


در تست های آزمایشگاهی مقدار کلر لازم برای زدایش سولفید از فاضلاب در حدود ۳-۹ برابر غلظت سولفید بوده است. مشاهدات فاضلاب روها نشان داده است که غلظت کلر لازم از این مقدار هم بیشتر است، زیرا در فاضلاب روها ممکن است مقدار اختلاط به اندازه تست های آزمایشگاهی موثر نباشد.

اضافه نمودن کلر به جریان فاضلاب، فعالیت های بیولوژیکی را کند نموده و مصرف اکسیژن تا زمانی که کلر باقیمانده وجود دارد، متوقف می شود. در طول این مدت به دلیل کاهش فعالیت های بیولوژیکی، ذخیره سازی اکسیژن در فاضلاب بوجود آمده و تولید سولفید را در پایین

دست به تاخیر می اندازد. این اثرات معمولاً بیش از یک مایل در پایین دست پایدار نمی باشد. مگر اینکه غلظت زیادی کلر به فاضلاب اضافه شود. همچنین وجود ۵ میلیگرم در لیتر کلر می تواند مانع تشکیل لایه بیولوژیکی شود. استفاده موثر از کلر نیاز به اختلاط کامل و سریع کلر با فاضلاب دارد. محلول کلر را می توان در حوضچه ای وارد فاضلاب نموده که بطور کامل در فاضلاب حل شود. اگر منهل ریزی در محل باشد کلر را می توان در آن نقطه به فاضلاب اضافه نمود. تزریق کلر در محل هایی که پرش هیدرولیکی نیز وجود دارد مناسب است.

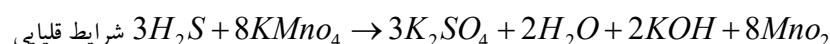
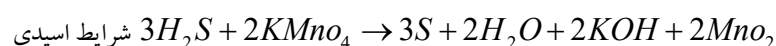
کلرزنی با استفاده از کلر یا هیپوکلریت سدیم و هیپوکلریت کلسیم شاید یکی از قدیمی ترین شکل های کنترل تعفن است. نتایج واکنش کلر با سولفید هیدروژن، اکسیداسیون سولفید با سولفور یا سولفات که بسته به pH انجام می گیرد در pH پایین سولفور کلوئیدی و در pH خیلی بالا سولفات، شرایط در فاضلاب روها به گونه ای می باشد که اکسیداسیون به سولفات منجر می شود.



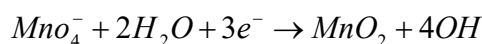
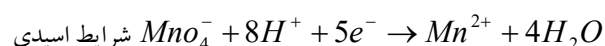
کلر مورد نیاز فاضلاب سینتیک بالا است و نگرانی در مورد اشکال ترکیبات کلرینه بنظر می آید. در استفاده از آن در آینده شبهه ایجاد نموده است [۵۶ و ۵۳ و ۲۵].

۶-۸-۲ پرمنگنات پتاسیم

مزیت پرمنگنات پتاسیم این است که در حالت های اسیدی و قلیایی به عنوان اکسید کننده عمل می کند، بطور کلی pH در فاضلاب تازه خنثی است، مگر اینکه بیش از اندازه تخلیه های غیر مجاز صورت گیرد یا شرای بی هوازی توسعه یابد. پرمنگنات پتاسیم یک ماده اکسید کننده قوی است که بر طبق معادله زیر با H_2S واکنش می دهد.



یا بعبارتی:



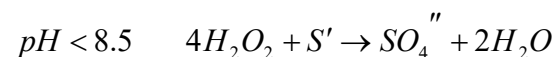
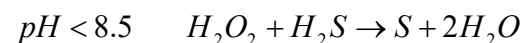
از پرمنگنات پتاسیم در بسیاری از جاها برای کنترل سولفید در سیستم های جمع آوری و ایستگاههای پمپاژ فاضلاب استفاده شده است. در عمل ۶ تا ۷ قسمت $KMnO_4$ برای اکسید کردن هر قسمت سولفید گزارش شده است.

گزارش شده است که پرمنگنات پتاسیم شکل پرهزینه ای از اکسیژن ترکیبی است که این خصوصیت به همراه حمل و نقل و محلول سازی پرهزینه، که از این بابت شبیه نیترات سدیم است و همچنین تحمیل آلودگی منگنز به محیط، فرآیند اکسیداسیون را دچار مشکل می کند [۵۶].

۷-۸-۲ پراکسید هیدروژن

پراکسید هیدروژن به صورت محلولهای تجاری ۳۵، ۵۰ و ۷۰ درصد H_2O_2 بر حسب وزنی موجود می باشد. در حالت pH معمولی که عموماً در فاضلاب روها وجود دارد.

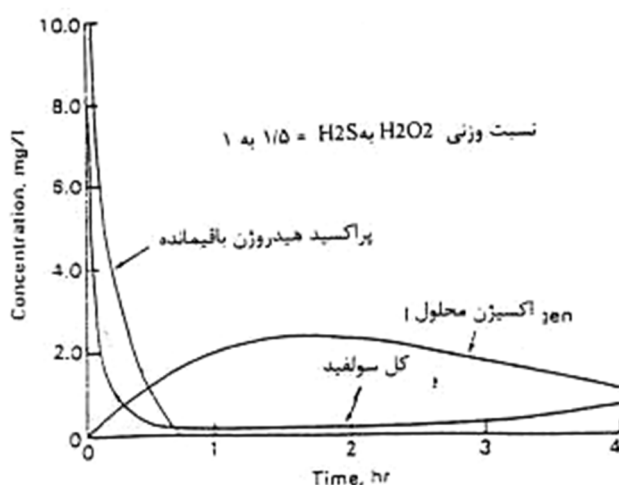
سولفید هیدروژن بعد از ۱۵ تا ۶۰ دقیقه به سولفور عنصری تبدیل می شود. واکنش H_2O_2 به HS_2 خیلی سریع است و معمولاً ۹۰ درصد پراکسید هیدروژن در ۱۵-۱۰ دقیقه اول واکنش می دهد.



در pH کمتر از ۸/۵ در شرایط استوکیومتری یک گرم پراکسید هیدروژن برای اکسید کردن هر گرم H_2S لازم است. در عمل نسبت وزنی بیشتری باید بکار برده شود که بستگی به این دارد که آیا استفاده از آن صرفاً برای اکسید کردن سولفید موجود است یا برای جلوگیری از تشکیل سولفید، که در مورد گزینه دوم، دوز مورد نیاز با توجه به میزان BOD و درجه حرارت و مشخصات هیدرولیکی تغییر می کند. در مقابل افزایش

استفاده از دیگر اکسیدکننده‌ها، استفاده از پراکسید به دلیل هزینه و خطرات حمل و نقل محتمل نیست، نمودار زیر پروفیل واکنش سولفید هیدروژن با فاضلاب را نشان می‌دهد [۵۷ و ۳۹].

شکل (۲-۳۹) - پروفیل واکنش سولفید هیدروژن با فاضلاب



۸-۲ اوزن

اوزن یکی از قویترین اکسیدکننده‌هاست. از اشکالات آن می‌توان به ناپایدار بودن آن، و دیگر اینکه باید در محل مصرف تولید شود، اشاره نمود. همچنین تهیه آن به زحمت و با احتیاط‌های ایمنی همراه است و حفاظت از آن الزامی است چون گازی است شدیداً سمیف در معرض آن قرار گرفتن به مدت طولانی به میزان ۰/۱ پی پی ام ($0/2\text{mg}/\text{m}^3$) در 25°C مخاطره‌انگیز است [۴۴ و ۵۶].

۸-۲-۹ استفاده از کاتیونهای فلزی (مثل املاح آهن) برای رسوب دادن سولفید

نمک‌های آهن نسبتاً ارزان است و برای کاهش میزان سولفید به وسیله ته نشینی سولفیدهای غیرمحلول استفاده شده‌اند. نمک‌های آهن محصولات جانبی دی اکسید تیتانیوم در صنعت می‌باشند. یک مخلوط بهینه و مطلوب از نمک‌های فروس و فریک شامل یک قسمت فروس و دو قسمت فریک بر اساس معادله زیر است:



استفاده از نمک‌های آهن نمی‌تواند به عنوان یک پیشگیری کننده باشد بلکه به عنوان یک اصلاح کننده است. آنها نمی‌توانند سولفید زیر $4\text{mg}/\text{l}$ را کاهش دهند. علاوه بر آن نمک‌های فریک ته نشین می‌شوند و بنابراین پتانسیل ردکس را بالا برده و انتظار است که Eh به بیش از $+80$ میلی‌ولت برسد [۵۶].

۸-۲-۱۰ تزریق هوا به لوله‌های تحت فشار

برای حفاظت لوله‌های تحت فشار که در معرض خوردگی شدید هستند، از این روش به نحو موثری استفاده می‌شود. نمونه آن شهر کوبه در ژاپن است که این روش را بکار گرفته است.

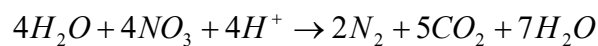
در این مورد قبل از تزریق هوا غلظت Do در نقطه شروع تحت فشار $1-6\text{mg}/\text{l}$ بوده که در انتهای خط به $0/8\text{mg}/\text{l}$ رسیده است. غلظت کل سولفیدها که در ابتدا $0/24\text{mg}/\text{l}$ بوده است در انتهای خط به $0/9-2/5\text{mg}/\text{l}$ رسیده است. پس از تزریق هوا غلظت Do در نقطه پایانی به $1\text{mg}/\text{l}$ رسیده است و هیچگونه افزایش در غلظت سولفیدها در سیستم ایجاد نشده است.

از دیگر روشهای پیشگیری می‌توان به سرعت مناسب در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب به منظور پاکسازی فاضلاب روها برای جلوگیری از تجمع مواد دانه‌ای و لجن‌ها و همچنین استفاده از مواد مقاوم برای ساخت لوله‌ها که در ابتدای فصل به آن اشاره شده است، اشاره نمود. روشهای کنترل خوردگی به تنهایی یا توأم با یکدیگر در یک شبکه جمع‌آوری فاضلاب قابل کاربرد می‌باشد [۵۴ و ۵۵].

۸-۲-۱۱ اضافه نمودن نیترات

بعضی از باکتریها می‌توانند مواد آلی را با استفاده از احیاء رادیکال نیترات اکسید کنند، در این واکنش‌های بیولوژیکی نیتروژن تبدیل به N_2 می‌شود. افزایش نیترات به فاضلاب روها مستقیماً روی بالانس اکسیژن تأثیر نداشته زیرا احیاء نیترات در حضور اکسیژن محلول انجام نمی‌شود.

وجود نیترات در فاضلاب سبب می شود که از احیاء سولفات جلوگیری شود، باکتریهای احیاء کننده نیترات می توانند از نیترات برای اکسید نمودن سولفید، اگر اکسیژن وجود نداشته باشد، استفاده کنند. نیترات در بعضی از جاها برای کنترل سولفید به شکل نیترات کلسیم و نیترات سدیم استفاده شده است، اگر غلظت سولفید در فاضلاب زیاد باشد، مقدار نیترات لازم برای از بین بردن کامل سولفید، حدود ۱۰ پوند نیترات سدیم برای هر پوند سولفید می باشد. اگر غلظت سولفید کم باشد مقدار نیترات سدیم لازم حدود ۲۰-۳۰ پوند برای هر پوند سولفید است. ورود نیترات پتانسیل ردکس را افزایش می دهد و مکانیسم دی نیتریفیکاسیون با آزاد شدن گاز نیتروژن صورت می گیرد، پنج الکترون مورد نیاز است تا اکسیداسیون صورت گرفته و نیتروژن نیترات به نیتروژن گازی تبدیل شود، اینها بوسیله منابع کربن در فاضلاب تهیه می شود. روی هم رفته مقایسه معادله می تواند بصورت زیر نوشته شود:



حضور نیترات، فعالیت گروهای انتخابی باکتریها تحت نام باسیل پسودوموناس شروع شده و نیترات نهایتاً به گاز ازت یا آمونیاک تبدیل خواهد شد. چون نیترات بخوبی در فاضلاب حل می شود. لذا امکان افزودن آن به فاضلاب به مقدار کافی، حتی در فاضلابهای روباز و با زمان ماند طولانی و حرارت بالا نیز هست. افزودن نیترات، فاضلاب را از حالت سپتیک خارج و گروه باکتریهای اکسیداسیون H_2S به سولفات را فعال می کند، نیترات تزریقی به فاضلاب هم مانع سپتیک شدن فاضلاب شد و هم موجب حذف H_2S بوجود آمده خواهد شد. به هر حال از ۶۵ سال پیش دانشمندان مختلفی جهت پیشگیری از تولید H_2S ، استفاده از نیترات را پیشنهاد نموده اند. بر اساس گزارشات دیگری با استفاده از نیترات میزان BOD نیز کاهش خواهد یافت [۵۶و۵۴].

بررسی اثر خوردگی میکروبی و ساختار میکروسکوپی آلیاژها در تنش ترک خوردگی قطعات جوش داده شده فلزات ضد زنگ: این متن یک دید اجمالی از پدیده تنش خوردگی فرو شکست مولکولی (تجزیه) برای ظروف فولادی ضد زنگ دو لایه (دو جداره) و محل های جوش خورده آنها در محیط اقیانوسی و نقش بالقوه فعالیت اهی میکروبی در آسیب رسانی به آنها از طریق SCC ارائه می کند. و همچنین مرور انجام مقاومت خالص در برابر خوردگی و جوش ها و اتصالات آنها و لزوم استفاده از فولاد دو لایه ضد زنگ (DSS به منظور کاستن از مشکلات خوردگی در محیط اقیانوسی).

اعلام شده است که اجرای جوش های فولادی اغلب رضایت بخش نیست و این بحث همچنین نیاز به تحقیقات جدید را برآورد می کند. در این متن همچنین روی آخرین گزارشات بر روی نقش میکروارگانیسم ها در وارد کردن هیدروژن embrittlement و فرسایش ناشی از خوردگی بحث شده است.

الف) مقاومت آلیاژها در برابر خوردگی در کاربرد اقیانوسی:

و گونه های مختلف فولاد ضد زنگ مانند (vیز) و فولاد کربن دار (کریبد آهن) که ضد زنگ است (ε.γ, AISI tapes, 304, 316, 316A) و فولاد ضد زنگ مغناطیسی

(eg AISI tape 340) و فولاد ضد زنگ زود شکن (eg AISI tape 330, 431) و معمولاً به عنوان آلیاژ مقاوم در برابر خوردگی استفاده می شود و فولاد ضد زنگ کربن دار نوعی است که بیشترین کاربرد را در مصالح ساختمانی دارد. اما در کاربرد اقیانوسی فولاد کربن ادر کمتر معمول است به دلیل حساسیت های بالای آن در محیط های کلرید به SCC (ترک و شکاف زود رس در مواد زیر جوشکاری که یک تنش کششی و خورنده باعث آن می شود ولی هیچکدام از عوامل بالا نمیتوانند باعث ضعف شوند)

فولاد ضد زنگ مغناطیسی از نظر مقاومت در برابر شکستگی دارای مقاومت پایین تری نسبت به انواع فولاد کربن دار می باشد به هر حال آنها دارای مقاومت بهتری در برابر SCC هستند. که این فلزات در جدول ۱ ذکر شده اند.

آلیاژهای مختلف Fe-Cr-Ni و با آلیاژهای الحاقی N, Al, Cu, Ti, Mo گسترش داده شده اند. با توجه به مشکلات SCC در محیط های اقیانوسی و در کنار بیشتر کردن مقاومت مواد، به خاطر مسئله اقتصادی کاربرد این آلیاژها در مصالح ساختمانی وجود ندارد.

Table 1. Stress corrosion cracking (SCC) resistant alloys for marine applications.

Alloys	Nominal composition (%)	Properties
JS-777	Fe-20Cr-25Ni-5Mo-3Cu	Pitting resistant
Alloy 600, Alloy 800	Ni-15Cr-8Fe, Fe-21Cr-32Ni	Good Cl ⁻ SCC resistance
Alloy B	Ni-28Mo-5Fe	High resistance to SCC
E-Brite alloys	Fe-26Cr-1MoFe-29Cr-4Mo (2Ni)	Good Cl ⁻ SCC resistance
Alloy 18-8-2(2Si)	Fe-18Cr-8Ni-2Mo (2Si)	Good Cl ⁻ SCC resistance

فولاد ضد زنگ دو لایه (DSS) که در آن غالباً نسبت حجم آهن مغناطیسی به حجم آهن کربن دار در حدود 1:1 است که مقاومت قابل ملاحظه ای را در برابر SCC نشان می دهد.

DSS در محیط های اقیانوسی که در این محیط ها آهن کربن دار از بین می رود در برابر حمله کلرید ها استفاده می شود. برای ز می توان استدلال کرد که ضریب کاربرد آهن مغناطیس در افزایش مقاومت در برابر SCC موثر می باشد و محکم بودن آن به آهن کربن دار برمی گردد. مقاومت بیشتر آهن مغناطیسی در برابر SCC در مقایسه با آهن کربن دار بیشتر است (نیکل دارای انرژی انباشته شده کمی است بنابراین در برابر SCC مقاومت کمتر دارد).

(Fontana&Greene1984)

(Neilsen 1964; Shimodaira *et al*

در حقیقت مقاومت در برابر شکستگی و SCC در DSS

1077)

گزارش شده که به مقدار قابل توجهی بیشتر است از آنها که به تنهایی کربن دار یا مغناطیسی هستند.

Table 2. Duplex stainless steels for marine applications.

Duplex/super-duplex SS	Nominal composition
SAF 2205	Fe-22Cr,6Ni,3Mo, 0.15N,0.03C
SAF2304	Fe-23Cr-4Ni-0.1N-0.03C
3RE60	Fe-18Cr-5Ni-2.7Mo-0.03C
Alloy 329	Fe-25Cr-5Ni-1.5Mo
Ferralium	Fe-25Cr-6Ni-3Mo-2.5Cu-0.17N-0.06C
Super-duplex Zeron 100 (~ S32760)	Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.8W-0.75Cu-0.25N-0.03C

بنابراین انواع مختلف آلیاژ های ضد زنگ دولایه و سوپر دولایه در جدول 2 لیست شده اند که برای سازه های اقیانوسی مختلف تهیه شده اند (Neilsen 1964;Shimodaira *et al* 1977).

در محیط های کلرایدار مقاومت بیشتر در برابر SCC را در DSS

به هر دوی آهن های مغناطیسی و کربن دار مربوط است و همچنین به رفتار الکتروشیمیایی که آسیب پذیری بیشتری در SCC دارد به صورت حفاظت کاتدی بوسیله آهن مغناطیسی محافظت می شود.

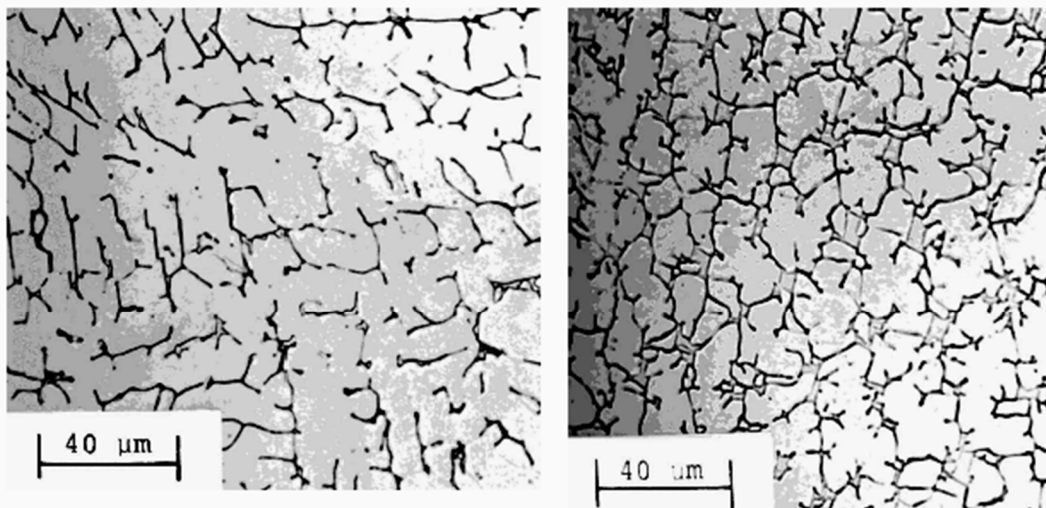


Figure 1. Presence of ferrite (which is the dark phase) and variation in ferrite content in the weld metal of a typical austenitic stainless steel with different Cr-contents, resulting in ferrite vol.% 6 (a), and 16 (b) (nearly continuous ferrite network).

بیشتر کردن مقاومت در برابر کلرید به SCC مربوط می شود. تصویر 1 حضور و دگرگونی را در محتویات مغناطیسی فلز جوش داده در جوش آهن کربن دار نشان می دهد و همچنین باعث دگرگونی در محتویات کروم آن می شود (که مغناطیس آن عنصر عامل مقاوم در برابر تغییر شیمیایی است).

مقاومت SCC برای فولاد ضد زنگ دو لایه در جوشکاری :

مانند بحث آغازین، مقدار فاز مغناطیسی اثر بسیار عمیقی روی مقاومت SCC در فولاد ضد زنگ می گذارد تاثیر محتویات مغناطیسی روی مقاومت SCC جوش آهن کربن دار بسیار خوب و منطقی فهمیده شد. (Balslack 1979; Balslack et al 1979; Gooch 1983; Duquette&Ricker 1986).

و زیر ساخت های فلز و فاز مغناطیسی در مقاومت SCC فلزات ضد زنگ دوبله تاثیر زیادی دارد.

که برای حالت ایتیم برابر 1:1 پیشنهاد شده است Aferrite/austenite

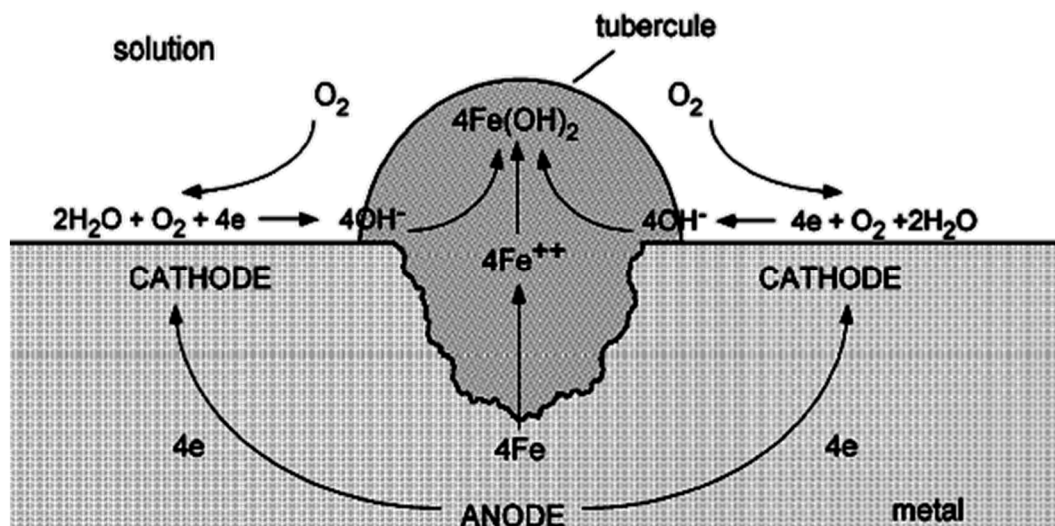
برای انجام عمل صحیح روی فولاد ضد زنگ جوش داده شده، لازم است که نقش محتویات مغناطیسی را در فلزات جوش داده شده و HAZ در SCC فولاد ضد زنگ دو لایه را بدانیم.

در این حالت مغناطیس اضافی درون جوش و HAZ بنا گذاشته می شود. یک سؤال مطرح است که آیا زیر ساخت های جوش فلزی می تواند مناسب کار مهندسان باشد.

خوردگی موثر میکروبی (MIC) فلزات ضد زنگ و قطعات جوش داده شده :

خوردگی موثر میکروبی یا خوردگی توسط موجودات زنده، یک فرآیند الکتریکی-شیمیایی است که شرکت میکروارگانیسم ها در این فرآیند می تواند به آغاز کردن، آسان کردن و شتاب دادن به خوردگی کمک کنند بدون تغییر در طبیعت الکتریکی-شیمیایی. میکروارگانیسم ها می توانند روی فرآیند خوردگی یک پدیده یا ترکیب پدیده ها موثر باشند.

(a) تکه های میکروبی که ته نشین و یا تشکیل کلنی می دهند و یا محصولات بیو خوردگی (خوردگی توسط موجودات زنده) هستند می توانند به شکل بیو فیلم های (Biofilm) ناپیوسته در آیند که شرایط را برای تشکیل یک سلول گالوانیکی جدید فراهم می کنند و یا شرایط در سلول گالوانیکی موجود تغییر می دهند. که در شکل 2 به طور خلاصه نشان داده شده است، (Borenstein 1991; Videla 1996)



(Biofilm) بیو فیلم های SRB به طور کلی در محیط های غیر هوازی رشد می کنند هرچند یکسری موارد از رشد بیوفیلم ها در محیط های هوازی در آب وجود دارد.. (Videla 2000)

(b) فرآیند سوختن ساز میکروارگانیسم ها می تواند غشا و لایه حفاظتی روی آلیاژ را از بین ببرد .
MIC می تواند باعث ایجاد یک سلول گالوانیک یا تغییر دادن شرایط سلول گالوانیک (Newman et al 1986)
و می تواند روی خوردگی محلی خیلی موثر باشد و به طور مختصر باعث ایجاد سوراخ هایی کوچک در سطح شود و این تاثیر ناشی از این است که در آغاز خوردگی یکسری عوامل بحرانی تولید خوردگی در سوراخ ایجاد می شود .

محیط های دریایی برای تعداد زیادی از باکتری ها سمی است . با وجود این مقداری از میکروارگانیسم ها (مختصراً *Vibriobacillus spp*) نه تنها در این محیط های دریایی زندگی می کنند بلکه آنها می توانند درون یون های کلرید زندگی کنند . (Stoecker1995)
مقاومت فلزات ضد زنگ ، در مقابل خوردگی ناشی از شکل گیری یک لایه فیلم اکسیدی فعال روی سطح فلز است که این لایه محکم در این محیط اکسیدی به وجود می آید . محیط اکسیدی برای پشتیبانی لایه اکسیدی لازم و ضروری است و تا اندازه ای اهمیت دارد که در صورت ایجاد خسارت روی لایه باید هرچه زودتر لایه ترمیم شود (خسارت های ناشی از فاکتورهای مکانیکی یا شیمیایی) .

صدمه محلی به لایه های فعال (Passive Films) می تواند باعث ایجاد سوراخ و درز در روی سطح شود و با وجود این باکتری های هوازی می توانند اکسیژن را مصرف کنند و با مصرف اکسیژن در سطح سوراخ ها ، باعث ایجاد شرایط اسیدی می شوند و بنابراین بر سرعت خوردگی می افزایند . برای مثال Pope, Stoecker(1986) ایجاد سوراخ های روی فلزات ضد زنگ در محیط های آبی حاوی کمی کلرید (20 ppm) که نباید این مقدار در حالت عادی باعث ایجاد سوراخ گردد) را به وجود عامل میکروبی در محیط نسبت دادند .

وجود میکروارگانیسم ها می تواند به طور مستقیم روی خوردگی ناشی از وجود کلرید اثر گذاشته و آن را شدت بخشد . به عنوان مثال ابکتری اکسید آهن (iron-oxidising bacteria) در محیط آبی حاوی کلرید ، در تماس با فولاد باشد می تواند کلریدفریک تولید کند که این ماده به عنوان شتاب دهنده در فرآیند سوراخ شدن فولاد است.. (Gooch 1983)

نقش MIC (Microbiologically Influenced Corrosion) مختصراً شامل تاثیر بر سه عامل است :
فلز ، محلول و میکروارگانیسم ها است .. (Videla 1996; Borenstein 1991)
که نقش فلز و خورد ساخت (ساخت اجزا کوچک) فلز ها به طور گسترده مد نظر دانشمندان است. (Videla1996)
بنابراین نقش مراحل متالورژی نظیر تغییر شکل دادن ساختار دانه ای فلز ، در کاهش مقاومت خوردگی میکروبی موثر است . (Borenstein1991)

همچنین تاثیر خورد ساخت در خوردگی میکروبی گزارش شده است . (Borenstein 1988, 1991a, 1991b;Stoecker 1995)
که این گفته در مورد جوش های فلزات ضد زنگ بسیار واضح از طرف گزارش شده است که دو لایه خورد ساخت که در جوشکاری فلزات موجود است و نزدیک ناحیه حرارتی (HAZ) ، قطعات مورد جوشکاری فولاد ضد زنگ استنیت (austenite) قرار دارند بطور ممتاری مورد حمله میکروارگانیسم ها قرار دارند (فریک و استنیت در شکل ۱ نشان داده شده اند) . (Borenstein1991)

Borenstein گزارش داد که خوردگی میکروبی (توسط باکتری های اکسید کننده آهن نظیر *Gallionella* برای لایه اول و لایه های دیگر duplex layer (فریک + استنیت) یکسان است با وجود این از طرف (Videla 1996) گزارش شده است که باکتری های *Gallionella* برای حمله به ساختار جوش ، به طور انتخابی به لایه استنیت حمله می کنند .

در این مورد ممکن است شناخت مقدار فریک در فلزات جوش داده شده یا در ناحیه حرارتی جوشکاری (HAZ) در خوردگی میکروبی مهم باشد. (Borenstein (SinghRaman *et al* 1998) در سال 1998 پیشنهاد کرد که ساختار های حساس ، خیلی بیشتر آمادگی برای خوردگی میکروبی را دارند و در عین حال فلزاتی که این حساسیت را ندارند می توانند در برابر MIC حفاظت شوند .

نقش MIC در تنش ترک خوردگی (SCC) در فلزات ضد زنگ و قطعات جوش داده شده آنها:

آغاز و ایجاد ترک یک مرحله مکانیکی مهمی در تنش ترک خوردگی (SCC) است و با شکل گیری یک سری سوراخ در یک بعد فلزات ضد زنگ ، SCC شکل می گیرد بنابراین آن فاکتور هایی که می توانند باعث واکنش های همگن الکتریکی-شیمیایی در سطح شوند می توانند باعث شکل گیری سوراخ هایی شده و یا می توانند خواص شیمیایی سوراخ (موجود در سطح فلز) موجود را را تغییر داده و نهایتاً می توانند روی SCC تاثیر گذارند و در این رابطه MIC می تواند به افزایش این فرآیند در فلزات ضد زنگ کمک کند که می تواند به عنوان هدف مهمی برای SCC باشد .

Callejas(1993) گزارش داد که آغاز و ایجاد سوراخ در حضور MIC می تواند ایجاد شکاف را راحت تر کند که می تواند باعث پدیده SCC فلزات ضد زنگ ، در پمپ ها شود. (viz., martensitic SS).

Stoeckerker(1995) گزارش داده است که باکتری های آهن (iron-oxidising bacteria) (*Gallionella*) می توانند باعث SCC ترکیبات استنیت در محیط کلر دار شوند .

گزارش هایی از تاثیر میکروارگانیسم ها در پیشرفت شرایط الکتریکی - شیمیایی، برای تولید هیدروژن و توضیح خواص مکانیکی وجود دارد و با توجه به واکنش های زیستی-الکتریکی-شیمیایی می توان مفهوم خوردگی موثر SRB را فهمید که در حضور SRB واکنش بین کاتیون های هیدروژن از زمانی که SRB باعث جدایی جفت های اتم هیدروژن می شود ، را زیاد می کند . بنابراین هیدروژن به عنوان یک کمک کننده به خوردگی موثر SRB است .

فصل سوم: عمق کار گذاری لوله با توجه به خوردگی بیولوژیکی لوله های

شبکه فاضلاب

۱-۳- خوردگی بیولوژیکی

پدیده خوردگی بیولوژیکی اولین بار توسط Garret در سال ۱۸۹۱، هنگامیکه وی بر روی خوردگی کابل های سربی مدفون شده در زیر خاک مطالعه می کرد، گزارش گردید. او اظهار کرد که خوردگی ایجاد شده در کابل های سربی را میتوان به فعالیت های متابولیکی باکتریهای موجود در خاک نسبت داد. در سال ۱۹۳۴ دو نفر بنامهای Von Wolzogen Kuhr و Van der Vlugt گزارشی درمورد خوردگی فلزات آهنی مدفون شده در خاک رس تحت شرایط بی هوازی را ارائه دادند. مطالعات آنها بر روی این موضوع نشان داد که خوردگی توسط فعالیت یک نوع باکتری کاملاً بی هوازی به نام باکتری احیا کننده سولفات رخ داده است از آن سال به بعد مطالعه و تحقیق بر روی این پدیده بیشتر شد و موضوع خوردگی میکروبی بعنوان یک پدیده مهم در علم خوردگی مورد توجه قرار گرفت.

عوامل بیولوژیکی که موجب خوردگی در محیطهای مختلف می شوند به طور خلاصه با ذکر یک یا چند نمونه از آنها در زیر ذکر شده اند .

ارگانیسمهای دخیل در فرآیند خوردگی عبارتند از :

میکروارگانیسمهای پروکاریوتیک

الف) باکتریهای بیهوازی

۱- باکتریهای احیا کننده سولفات (SRB)

Desulfovibrio

۲- باکتریهای احیا کننده تیوسولفات (TRB)

Dethiosulfovibrio

ب) باکتریهای هوازی

۱- باکتریهای اکسید کننده گوگرد

Thiobacillus

۲- باکتریهای اکسید کننده آهن

Gallionella

۳- سایر باکتریها

خوردگی بیولوژیکی خاک

خوردگی بیولوژیکی خاک توسط باکتری ها و قارچهای موجود در خاک ایجاد می شود. در هر ۱۲۰۰ متر مکعب خاک ممکن است تا ۵ تن باکتری وجود داشته باشد که این باکتریها شامل باکتری های مضر نیز می شود. قارچها با تولید اسیدهای آلی از جمله اسید سیتریک و اسید استیک و رشد روی سطوح اجسام و ایجاد محیط مناسب برای سایر میکروارگانیسمها می توانند باعث خوردگی سطوح فلزات شوند. مخلوط خاک بوسیله نسبت شن، ماسه و رس که در خاک موجود هستند مشخص می شود که تغییر نسبت هر کدام می تواند به نوعی در خوردگی خاک موثر باشد. به عنوان مثال خاک رس، دارای دانه هایی ریز و حداقل فضای خالی در بین ذرات است که این امر باعث کاهش حرکت هوا و آب در بین ذرات می شود و شرایط را برای بی هوازی شدن مهیا می کند. دانه های ماسه، اندازه بزرگتری داشته و اجازه عبور هوا را می دهد.

خوردگی لوله های بتونی

دو گروه عمده از باکتریایی که به بتن حمله ور می شوند، باکتریهای احیا کننده سولفات (SRB (Sulfate Reducing Bacteria و باکتریهای اکسید کننده گوگرد (SOB (Sulfur Oxidizing Bacteria هستند. فعالیت باکتریهای SRB منجر به تولید سولفید هیدروژن می گردد که این گاز در مجاورت اکسیژن یا باکتریهای هوازی تبدیل به اسید سولفوریک می گردد. اسید سولفوریک به سیمان پرتلند حمله می کند و با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان تشکیل گچ می دهد و از آنجا که گچ به راحتی از سطح بتن کنده می شود، سازه بتنی بتدریج از هم می پاشد.

خوردگی لوله های فلزی

فلز در محیط آبی با از دست دادن الکترون به یون فلز مثبت دپلاریزه می شود. الکترونهای آزاد شده پروتونهای حاصل از تجزیه آب را به هیدروژن اتمی احیا می کند و هیدروژن اتمی یا ملکولی روی سطح فلز باقی می ماند. باکتریها دائماً لایه هیدروژن را که به طور معمول فلز را در مقابل خوردگی حفاظت می کند از روی سطح فلز به وسیله واکنش سولفات به عنوان گیرنده الکترون بر می دارند نتیجه فرایند تولید گاز H₂S است. سپس سطح فلز در مقابل حمله آب و سولفید آسیب پذیر می شود و تعدادی از یونهای آهن با سولفید واکنش انجام داده و FeS تشکیل می شود. باکتریهای SOB با اکسیداسیون گوگرد، یون هیدروژن آزاد می کنند که منجر به کاهش PH و اسیدی شدن محیط می گردد.

منابع تولید H₂S

خوردگی یکی از مشکلات اساسی در شبکه های جمع آوری فاضلاب در دنیا است که خسارات اقتصادی و اکولوژیکی بزرگی در سراسر جهان به وجود می آورد که بازسازی شبکه را ایجاب نموده است. اساس پدیده خوردگی در شبکه های جمع آوری فاضلاب بر پایه وجود مقادیری از سولفور آلی که از مواد پروتئینی حاصل می شود، سولفور معدنی که ناشی از سولفات آبهای جاری می باشد و همچنین سولفور دیگری به شکل سولفات که از مواد پاک کننده حاصل می شود، استوار است. این مواد در غیاب اکسیژن محلول، به علت فعالیت باکتریهای احیاء کننده سولفات گاز سولفید هیدروژن تولید می نماید که این گاز در اثر تلاطم وارد فضای فوقانی لوله های فاضلاب می شود. وجود رطوبت و اکسیژن برای واکنش اکسیداسیون H₂S توسط باکتریهای اکسید کننده سولفور فراهم می شود و در نتیجه اسید سولفوریک تولید گردیده که این اسید با انحلال کلسیم موجود در بتن سبب خوردگی آن می گردد.

عوامل موثر در خوردگی

امروزه تحقیقات زیادی برای کنترل پدیده خوردگی در کشورهای آلمان، هلند، ژاپن و سایر نقاط جهان در زمینه های مختلف از جمله عوامل مؤثر در خوردگی مانند: PH، رطوبت، (BOD)، سولفات، عوامل هیدرولیکی و بیولوژیکی مدنظر بوده است. Pomeroy در سال ۱۹۷۰ میلادی در زمینه احتمال تشکیل سولفید هیدروژن و پدیده خوردگی تحقیقاتی را انجام داد که عواملی چون BOD یا COD، درجه حرارت، شیب خطوط فاضلاب رو، نسبت h/d و ph، غلظت سولفات و سرعت جریان در آن تأثیر داشتند.

تأثیر عمق بر خوردگی

۱- زمان ماند

۲- درجه حرارت

۳- حلالیت سولفید

۴- مصرف اکسیژن

۱- زمان ماند فاضلاب در مسیر

فاضلاب تازه دارای اکسیژن محلول بوده و شرایط هوازی در آن برقرار است. بنابراین با گذشت زمان یا به عبارتی با افزایش طول مجاری فاضلاب رو، اکسیژن محلول صرف اکسیداسیون مواد آلی شده و شرایطی به سمت استفاده از دیگر ترکیبات اکسیژن دار پیش می رود (حالت بدون اکسیژن) و بعد از آن نیز حالت بی هوازی برقرار است و در واقع با تشکیل گاز سولفید هیدروژن و متعاقب آن اسید سولفوریک باعث انحلال کلسیم موجود در بتن شده و سرانجام پدیده خوردگی رخ می دهد. تولید گاز سولفید هیدروژن در فاضلاب روهای اصلی که زمان ماند فاضلاب در آن ها بیش از ۲۰ تا ۳۰ دقیقه است محتمل تر است.

۲- تأثیر عمق بر درجه حرارت

حرارت نیز اثر مهمی در فعالیت بیولوژیکی باکتری های احیای سولفات دارد. مشاهدات مستقیم در حفاری ها نشان می دهد که دما همواره با افزایش عمق زیاد می شود اگر چه نرخ این افزایش از محلی به محل دیگر تفاوت بسیار دارد.

شیب های گرمایی اندازه گیری شده در پوسته زمین در محدوده بین ۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد در هر کیلومتر قرار گرفته و اغلب از میانگینی برابر با ۳۰ درجه در هر کیلومتر استفاده می شود. از روی شیب گرمایی و رسانایی گرمایی سنگ ها می توان جریان حرارت به طرف سطح را محاسبه نمود. میانگین مقدار جریان حرارتی 1.5×10^{-6} کالری بر سانتی متر مربع بر ثانیه است. این مقدار سالانه برابر با ۵۰ کالری بر سانتی متر مربع می شود. این مطلب تأثیر ناچیز گرمای درون زمین برای تغییر شرایط آب و هوا را نشان می دهد.

با توجه به رابطه مستقیم بین طول، عمق و قطر لوله گذاری با درجه حرارت می توان چنین بیان کرد که به ازای افزایش هر سانتی متر عمق به طور متوسط 3×10^{-3} دما افزایش یافته و با توجه به جریان حرارتی که برابر با 1.5×10^{-6} کالری بر سانتی متر بر ثانیه در سنگها (که این مقدار در بتن و بخصوص فلز بیشتر است) می باشد، هر چه طول لوله گذاری و عمق آن بیشتر شود میزان گرمای دریافتی بیشتر بوده، که این میزان، رابطه مستقیم با قطر لوله دارد. بر اساس این مطلب هر چه عمق، طول و قطر لوله بیشتر باشد گرمای دریافتی فاضلاب بیشتر شده و این نسبت باعث افزایش فعالیتهای بیولوژیکی باکتری های احیا کننده سولفات می شود. تجربه نشان داده است که تولید ترکیبات گوگردی به ازای افزایش هر درجه سانتی گراد به حرارت فاضلاب، حدود ۷ درصد افزایش می یابد.

تأثیر درجه حرارت بر تولید H₂S

$$Z = \frac{3(EBOD) \times P}{S^{\frac{1}{2}} \times Q^{\frac{1}{3}} \times b}$$

$$EBOD = BOD(1.07)^{T-20}$$

T = حرارت فاضلاب به درجه سانتی گراد

Z = پتانسیل تولید SH₂

Q = میزان فاضلاب به لیتر در ثانیه

S = شیب فاضلاب رو به متر در یکصد متر

b = سطح تر شده

P = محیط تر شده

Z = غلظت کمی از H₂S تولید می شود ۷۵۰۰ =

پیدایش H₂S به ندرت انجام می شود ۵۰۰۰

Z = تولید H₂S زیاد است ۱۵۰۰۰ =

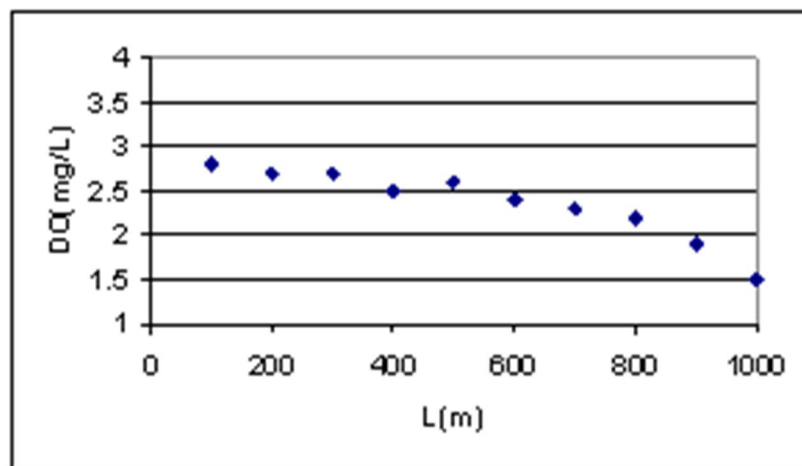
مشکلات بو و خوردگی موجود است ۱۰۰۰۰

۳- رابطه عمق با حلالیت سولفید هیدروژن

با افزایش عمق دما افزایش می یابد. افزایش دما موجب کاهش حلالیت سولفید هیدروژن شده و همچنین سبب کاهش حلالیت اکسیژن محلول فاضلاب گشته و شرایط بی هوازی شدن را برای احیاء سولفات به سولفید فراهم می کند که در نتیجه آن خوردگی افزایش می یابد.

۴- عمق و مصرف اکسیژن

بدیهی است که با افزایش درجه حرارت و BOD5، میزان مصرف اکسیژن نیز باید بیشتر باشد. بنابراین در مناطقی که درجه حرارت بالا است و میزان BOD5 نیز بیشتر است میزان مصرف اکسیژن بالاتر بوده و احتمال خوردگی لوله‌های فاضلاب بیشتر است. بر اساس گزارش متکاف و ادی میزان متوسط درجه حرارت فاضلاب ۱۵/۶ و میزان BOD5 در کشورهایی که مصرف سرانه آب بالاتری دارند به مراتب کمتر گزارش شده است.



تغییرات غلظت DO در خط اصلی شبکه جمع‌آوری فاضلاب صاحبقرانی در شکل نشان داده شده است.

انتخاب لوله

لوله‌های مورد استفاده در صنعت آب و فاضلاب شامل لوله‌های چدنی، فولادی سیمانی (آزبست سیمان و بتنی)، لوله‌های پلاستیکی (پلی اتیلن و PVC)، لوله‌های پلاستیکی دو جداره و لوله‌های فایبرگلاس GRP می‌باشد. طبق بررسی انجام گرفته لوله‌های پلاستیک و فایبرگلاس دارای مقاومت عالی در مقابل خوردگی بوده و دارای عمر طولانی هستند.

برخی راه‌های مقابله با خوردگی میکروبی:

استفاده از مواد مقاوم در مقابل خوردگی، روکشهای محافظ بر روی سطوح فلز، آسترهای روئین، تمیز کردن سطوح، استفاده از روش‌های بازرسی غیر مخرب و استفاده از میکروب کش‌ها از روش‌های معمول مقابله با خوردگی هستند. برخی عوامل مانند غلظت اکسیژن، دما و PH تأثیر بسیاری بر میزان خوردگی میکروبی دارند که کنترل آنها می‌تواند مفید باشد. مثلاً اگر بتوان PH محیط را تا ۱۰ افزایش داد، کاهش خوردگی میکروبی چشمگیر خواهد بود. استفاده از تکنولوژی‌های جدید در مقابله با خوردگی میکروبی نیز رویکردی است که جدیداً به آن توجه شده است. بعنوان مثال بیوتکنولوژی می‌تواند در این زمینه بسیار مؤثر باشد. همچنین با استفاده از نانوتکنولوژی می‌توان به روکش‌هایی دست یافت که محافظت از سطح فلزات را بسیار بهتر از قبل انجام دهد. برای تعیین عمق ابتدا باید شرایط آب و هوایی منطقه بررسی شود. عمق کارگذاری لوله باید با توجه به دمای هوا در فصل گرم، دمای درون زمین و همچنین زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی قرار گیرد. خوردگی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب به خصوص در مناطق گرمسیری خسارات اقتصادی بزرگی به وجود می‌آورد. در مواردی که باید عمق لوله زیاد انتخاب شود، باید از لوله مقاوم در برابر خوردگی و روشهای پیشگیری از خوردگی استفاده کرد. اساس اغلب روشهای پیشگیری و کنترل این است که از تولید H2S جلوگیری شود و یا پس از تولید آن، قبل از ورود به فضای بالای لوله اکسیداسیون انجام گیرد که در این صورت تحت کنترل در خواهد آمد.

کاربرد پوششهای صنعتی در نفوذ ناپذیری بتن واقع در محیط خورنده

در کنار روشهای متداول برای جلوگیری از نفوذ پذیری و خوردگی بتن و آب بند نمودن آن چون استفاده از سیمانهای پوزولان طبیعی و مصنوعی، میکرو سیلیس، حفاظت کاتدی، پوشش آرماتورها با رزین اپوکسی، استفاده از ورقهای محافظ آلایاری، آرماتورهای آلایاری و کامپوزیت و ورقه‌های FRP، کاربرد ژئو سنتتیک‌ها استفاده از پوشش بتنی محافظ و بتن پلیمری، یکی از روشهای مقرون به صرفه و مؤثر استفاده از پوششهای صنعتی است، در این نوشتار به بررسی تأثیر برخی از پوششها در کاهش نفوذ برخی از پوئهای مضر چون کلر و سولفات می‌پردازیم.

بتن در محیطهای خورنده حاوی یون کلر و سولفات به مرور زمان خورده شده و خلل و فرج در آن زیاد می گردد و تصور عمومی بر این است که به دلیل مقاومت بالای آن نیازی به پوشش محافظ ندارد ولی بایستی اذعان داشت که بتن با خواص قلیایی ذاتی در محیط اسیدی به شدت آسیب می بیند و بتن به دلیل شکننده بودن تحت تنشها و ضربات مکانیکی در طی مدت زمان ترک خورده و خرد می شود و زنگ زدگی و خوردگی آرماتورهای بتن در شرایط خورنده محیط به سطوح بتن گسترش می یابد و در میان روشهای فوق الذکر، استفاده از پوششهای صنعتی کارآمد می باشد همواره در ذهن یک مهندس سازه سوالاتی چون ۱- پوشش صنعتی مناسب بایستی چه مشخصاتی داشته باشد؟ ۲- چه نکاتی را در هنگام انتخاب یک پوشش باید مد نظر داشت؟ ۳- چه باید کرد تا پوشش انتخاب شده خواص عالی خود را در طول سالیان حفظ کند؟ مطرح است.

۱- عوامل مؤثر در آسیب بتن مسلح در محیط های خورنده :

۱- استفاده نادرست از سازه (بارگذاری بیش از حد، ضربه، خستگی)

۲- سایش و فرسایش (کف ها، زیرسازی ها، موج گیری ها)

۳- اثرات محیطی (حرارت، رطوبت، کربناسیون)

۴- مواد اولیه ناسازگار (مصالح سنگی قابل انقباض، ساختار مرکب)

۵- شسته شدن (حل شدن با جاری خشی یا قلیایی)

۶- حمله مواد شیمیایی (سولفات ها، اسیدها، اسیدهای آلی، ...)

۷- واکنش قلیایی سنگدانه

۸- خوردگی فولاد

۲-۳- آشنایی با خرابی های شیمیایی ناشی از عوامل محیطی :

۱-۲-۳- خرابی سولفاتی

سولفاتهای محلول چون سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در اغلب نقاط دنیا به طور طبیعی در آب و خاک وجود دارند. معمولاً خاکها یا آبهایی که دارای چنین سولفات هایی هستند، قلیایی نامیده می شوند. کلیه این سولفاتها برای بتن مضرند.

۱-۲-۳- مکانیزم حمله سولفات ها

سولفات ها ترکیبات مختلف سیمان هیدراته شده را مورد حمله قرار می دهند. سولفات های سدیم و پتاسیم با هیدروکسید کلسیم و هیدروآلومینات کلسیم ترکیب می شوند.

فعل و انفعال سولفات سدیم با هیدروکسید کلسیم را می توان به صورت زیر خلاصه کرد

و فعل و انفعال سولفات سدیم با هیدروآلومینات کلسیم بدین صورت است:

محصولات واکنشهای فوق عبارتند از:

۱- گچ که موجب سستی سطح بتن و مقاومت آن شده، به میزان ۱۲۵ درصد حجم مواد جامد را افزایش می دهد

۲- سولفوآلومینات کلسیم که بنام اترینگایت خوانده می شود و باعث افزایش قابل ملاحظه در حجم بتن و در نتیجه ترک و ریزش آن می گردد. میزان افزایش حجم مواد بر اثر این ترکیب به ۲۲۵ درصد می رسد.

سولفات کلسیم فقط با هیدروآلومینات کلسیم واکنش انجام می دهد که در اثر این واکنش دو شکل مختلف هیدروسولفوآلومینات کلسیم تشکیل می شود

منوسولفات با مقدار کم

سولفوآلومینات کلسیم یا اترینگایت به مقدار زیاد

۲-۲-۳- خرابی کلروری

علاوه بر تأثیر کربناسیون، مهمترین عامل زنگ زدگی و خوردگی آرماتور در بتن، وجود یون کلرید در آن است که ممکن است از مصالح آلوده یا مواد افزودنی آغشته به کلر یا در اثر نفوذ منابع خارجی مثل محیط دریا وارد بتن گردد. یونهای کلرید تنها در آب وجود دارند از این رو نفوذ کلرید مشروط به حضور آب در سیستم منفذی بتن می باشد. مکانیسم ورود یون کلرید به داخل بتن یا از طریق سیستم مکنده موئینگی است که آب آلوده به کلر وارد بتن میشود، یا از طریق نفوذ ساده یونها (انتشار) در آب راکد، وارد منافذ بتن می گردد. حالت اول مختص بتن های خشک می باشد و آب وسیله ای است که یون ها را در داخل بتن حمل می کند. در حالت دوم (انتشار) مختص بتن اشباع شده یا نزدیک به اشباع است (بتن مغروق) دربتنی که در چرخه متناوب تر و خشک قرار می گیرد هر دو مکانیسم اجرا می شود و بنابراین تحت چنین شرایطی سرعت افزایش یافته نفوذ یون کلرید وجود دارد.

۱-۲-۳ مکانیزم خرابی کلروری

معمولاً خاصیت قلبایی بالای سیمان پرتلند (PH در حدود ۱۳) منجر به ایجاد لایه محافظ نازک از اکسید فریک Fe_2O_3 بر روی سطح فولاد می گردد و آن را روئین و در مقابل خوردگی بیشتر محافظت می نماید. اگرچه خوردگی کلاً متوقف نمی گردد، ولی آهنگ آن بسیار ناچیز بوده و در حد قابل قبول می باشد، تا زمانیکه این لایه روئین کننده فولاد بر روی سطح آن باقی بماند، بتن محیطی ایده آل برای حفاظت فولاد در مقابل خوردگی می باشد. ترکیباتی چون دی اکسید کربن و یون کلر می توانند باعث تخریب و از بین رفتن این قشر محافظ گردند و میلگردها را در مقابل عوامل تخریبی بدون محافظ بگذارند. تمام کلریدها در بتن بصورت آزاد نیستند و بخشی از یونها با محصولات هیدراتاسیون سیمان پیوند فیزیکی و شیمیایی برقرار می کنند. بنابراین یونهای کلرید در بتن به سه حالت پیوند فیزیکی، شیمیایی و آزاد یافت می شوند محصول هیدراتاسیون و پیوند شیمیایی یون کلر، تمک فریدل می باشد.

۳-۲-۳ مکانیزم خوردگی فولاد

خوردگی فولاد (میلگردها) در بتن یک فرآیند الکتروشیمیایی است.

واکنش آندیک واکنش کاتدیک

در صورتی که $Fe(OH)_3$ محصول اصلی زنگ زدگی میلگرد باشد حجم آن ۴ برابر آهن خورده نشده است و در نتیجه انبساط آن فشار زیادی به اطراف بتن وارد می کند که باعث ترک خوردگی پوشش بتنی اطراف آرماتور می شود و آرماتور بدون محافظ در معرض عوامل محیطی قرار می گیرد. ادامه خوردگی باعث کاهش تدریجی سطح میلگرد می گردد و در صورتی که تعمیرات انجام نشود تخریب و شکستگی ممکن است بطور کامل روی دهد که در این حالت عمر مفید نمونه به اتمام رسیده است. انجام فرایند خوردگی مشروط به حضور آب و اکسیژن می باشد. از این رو انتظار می رود بتنی که کاملاً در آب مغروق است به دلیل کمبود اکسیژن و یا بتنی که در فضای کاملاً خشک (احتمالاً در رطوبت زیر ۴۰ درصد) قرار دارد، خوردگی وجود نداشته باشد.

۲-۲-۲ عوامل موثر در سرعت نفوذ یون کلر

- ۱- تخلخل پوشش بتنی (ساختار منافذ)
- ۲- نوع سیمان و مقدار سیمان (اثر شیمیایی بتن)
- ۳- شرایط محیطی
- ۴- ضخامت پوشش روی آرماتور
- ۵- کربناتی شدن بتن
- ۶- وجود ترک در بتن به علت انقباض و یا مقاومت کم در مقابل یخ زدگی
- ۷- استفاده از تسریع کننده های کلروری با درصد بالا در بتن، غلظت یون کلر در اطراف آرماتور را افزایش می دهد.

۴-۳-۳ کربناسیون

هوای معمولی دارای ۰/۳ درصد گاز دی اکسید کربن CO_2 است که در صورت نفوذ CO_2 به داخل بتن، بین هیدروکسید موجود در بتن و CO_2 واکنش شیمیایی انجام می گردد و کربناتها تشکیل می شوند

۱-۴-۲ عوامل موثر در میزان کربناسیون

۱- شرایط محیطی ۲- تخلخل پوشش بتن ۳- مقدار سیمان و تاثیر سیمانهای پوزولانی

۳-۳ عوامل داخلی مؤثر بر خرابیهای بتن

۳-۳-۱ نفوذ پذیری بتن

۱-۳-۳ عوامل مؤثر در نفوذ پذیری بتن

۱- نسبت آب به سیمان ۲- تخلخل بتن ۳- درجه هیدراتاسیون ۴- خواص سیمان

۵- اثر دما : با افزایش دما میزان نفوذ پذیری افزایش می یابد.

۳-۳-۲ واکنش قلیایی سنگدانه ها

برای واکنش قلیایی سنگدانه ها باید ۱- اجزای فعال و واکنش زا در سنگدانه باشد ۲- قلیایی کافی (K_2O , Na_2O) در بتن

وجود داشته باشد ۳- رطوبت کافی

مکانیزم واکنش قلیایی - کربناتی

مکانیزم واکنش قلیایی - سیلیسی

۳-۳ فساد مصالح (وجود بیش از حد املاح در مصالح تشکیل دهنده بتن)

۳-۴ آب مصرفی

۳-۵ کیفیت و نوع سنگدانه

۴- عوامل خارجی مؤثر بر خرابیهای بتن (عوامل فیزیکی و مکانیکی)

۱-۴-۱ سایش ، فرسایش و خلأزایی (کاویتاسیون)

مقاومت سایشی بتن رابطه مستقیمی با مقاومت فشاری و نسبت معکوس با نسبت آب به سیمان دارد همچنین این مقاومت به دانه بندی و جنس سنگدانه ها بستگی دارد آب انداختگی و تشکیل دوغاب سخت سده در منجر به ایجاد سطح شکننده و ضعیف در مقابل سایش در بتن می گردد که با تاخیر در عملیات پرداخت و ماله کشی بتن و ایجاد خلأ یا مکش در بتن می توان مقاومت سایشی بتن را افزایش داد . کاویتاسیون بر اثر تغییر ناگهانی در سرعت ، جهت آب و افت فشار منجر به حفره بر اثر پدیده خلأزایی می گردد به عبارت دیگر هر زمان که فشار در نقطه ای از مایع به دلیل بی نظمی در سطح جریان به حد فشار بخار کم شود، حبابهایی در مایع جاری تشکیل می گردد ، این حبابها با مایع به سمت پایین دست جریان حرکت کرده و به هنگام ورود به منطقه ای پر فشار با ضربه می ترکند ، ترکهای مکرر حبابها در نزدیکی سطح بتن سبب کنده شدن و ایجاد چاله هایی در آن خواهد شد.

۲-۴ تاثیر هوای سرد و یخ زدگی

۳-۴ خرابی ناشی از نمکها و شوره زدگی : بلورهای نمک در نزدیکی سطح بتن ایجاد می گردد رشد بلورها مانند یخ زدگی منجر به تنشهای انبساطی شده و پوسته های خمیر سیمان و سنگدانه های ریز از بتن جدا می شود سولفات منیزیم در مقایسه با سایر نمکها خطرناکتر بوده و منجر به بلوری شدن نمک در سطح بتن و گاهی اوقات به داخل بتن از طریق منافذ موئینه نفوذ کرده و حجم زیادی را تخریب می کند با توضیحات فوق الذکر با اعمال یک پوشش با دوام و مناسب می توان جلوی خرابیهای داخلی و خارجی بتن را گرفت از طرفی مکانیزم خرابی سولفاتی ، کلروی، کربناتی را کنترل کرد.

۳-۵ اهمیت آماده سازی سطح :

تقریباً ۹۵ درصد اهمیت یک پوشش به کیفیت زیرسازی سطح و ۵ درصد باقیمانده به نوع پوشش و روش کاربرد آن مربوط می شود.

۱-۵-۳ دلایل آماده سازی سطح :

۱- اطمینان از چسبندگی مناسب رنگ به سطح ۲- افزایش چسبندگی به علت افزایش سطح و افزایش گروههای فعال سطح در واحد سانتیمتر مربع ۳- اطمینان از اینکه واکنش بین رنگ و سطح در اثر حضور یونهای فعال نظیر کلریدها و سولفاتها شکسته و تخریب نشود که با توجه به خورنده بودن محیط توجه بیشتری می طلبد

در کاربرد پوششها ۳ انتخاب بسیار مهم وجود دارد

- ۱- انتخاب نوع روش زیر سازی ۲- انتخاب نوع آستری ۳- انتخاب نوع پوشش یا رویه رنگ

۲-۵-۳ روشهای آماده سازی سطح

۱- روشهای مکانیکی: نظیر فشار بخار مایع (بخار آب تحت فشار) و سایندگی های تحت فشار (سند بلاست)، هوای متراکم، فشار مستقیم و ثقل، سایش با ورقه های سمباده کاغذی و فلزی و ابزارهای دستی چون برس سیمی، کاردک کم عرض^۲ قلم چکش^۳ جلقی چکش لبه تیز^۴ در این تحقیق با فرز ناهمواریهای سطح بتن تا حد امکان اصلاح شده است. ابزارهای الکتریکی (ضربه ای-چرخشی) پاشیدن آب تحت فشار (واتر جت) و استفاده از سود برای واکنش با سولفات و کلرید سطحی و تشکیل نمک و شستشو با آب

مکانیسم پاشیدن ساینده ها

- ۱- جریان هوای متراکم ۲- نیروی چرخ دوار (نیروی گریز از مرکز)

عوامل تعیین کننده در میزان فشار

- ۱- انرژی ذرات ساینده پرتاب شده ۲- زاویه برخورد ساینده با سطح کار

- ۳- سختی سطح کار ۴- سختی ساینده

مکانیسم فشار مستقیم

در صنعت ۳ سیستم ابزار مختلف وجود دارد

- ۱- سیستم معمولی پاشیدن ساینده خشک ۲- سیستم پاشیدن در خلأ ۳- سیستم پاشیدن ساینده مرطوب

عوامل مؤثر در انتخاب ساینده مناسب

۱- اندازه ۲- شکل ۳- ترکیب شیمیایی ۴- PH ۵- درصد رطوبات موجود ۶- درصد روغن موجود ۷- رنگ ۸- ثبات وزن در اثر حرارت ۹- وزن مخصوص ۱۰- قابلیت تهیه ۱۱- قیمت ۱۲- سختی

سایندگی ها به ۲ دسته ۱- معدنی (طبیعی) ۲- سربار فلز تقسیم می کنیم. تقسیم بندی سایندگی ها براساس درصد بلور سیکا انجمن می گردد که از طیف سنجی مادون قرمز بدست می آید.

۲- روشهای شیمیایی: حلال شویی، اسید شویی، قلیا شویی (مثل هیدروکسید سدیم)، شستشو با محلولهای الکترولیتی، استفاده از رنگ برها و ترکیبات تشکیل دهنده کمپلکس آلی فلزات روشهای حلال شویی: مالیدن حلال از طریق پارچه یا برس - اسپری - غوطه وری سطح کار قابل حمل در حوضچه یا تانک حلال - روغن زدایی با بخار حلال اسید شویی از طریق اسید سولفوریک، کلریدریک، نیتریک، فلوئوریدریک و فسفریک

در ۳ مرحله انجام می شود ۱- آماده سازی قبل از اسید شویی ۲- شستشو با اسید ۳- شستشوی سطح تمیز شده پس از اسید شویی رنگبرها به ۲ دسته ۱- آلی (مثل متیل کلراید) ۲- معدنی تقسیم می شوند. در فرمولاسیون رنگبرها ۱- مواد فعال کننده سطحی جهت کاهش سطحی مایع ۲- الکل ها جهت نفوذ در لایه رنگ و تورم و جداسازی آن از سطح ۳- اسید گلوکونات و یا نمکهای آن جهت جدا شدن رنگ از سطح (آب، الکلهو گلیکول اتر) وجود دارد

۳- تمیزکاری انرژی

۱- با استفاده از انرژی حرارتی شعله ۲- استفاده از امواج ماورا صوت ۳- استفاده از لامپ ۴- استفاده از اشعه لیزر ۵- استفاده

از پلاسمای گاز گرم ۶- استفاده از جت اسفنجی

۶- استفاده از آستری پس از تمیز کاری سطح

۱- واش پرایمر ۲- فسفات کردن شامل فسفات روی و فسفات آهن ۳- کروماته کردن

خواص آستریهای کارگاهی

• ایجاد چسبندگی خوب در سطح فلز

• مقاومت لازم و کافی در مقابل خوردگی قلز

• زمان خشک شدن کوتاه

• مقاومت در مقابل ضربه و ترک خوردگی

• مقاومت در برابر سایش

• قابلیت پرکنندگی حفره ها

• چسبندگی به پوشش بعدی

۷- بخشهای مختلف تشکیل دهنده یک پوشش

۱- رزینها

۲- رنگدانه و پرکننده

- واقعی

- حفاظتی نظیر پودر روی و فسفات (Zinc Rich)

- با اثر خاص

۳- مواد افزودنی و اصلاح کننده

- رقیق کننده ها

- نرم کننده ها

- شتاب دهنده ها

- بهبود دهنده های سطحی

شامل رقیق کننده، نرم کننده، شتاب دهنده و بهبود دهنده سطحی و ...

۴- بتونه (ماستیک)

۵- حلال

مایعات شیمیایی فراری هستند که برای رقیق کردن رزین به آن افزوده می شود و در انتخاب حلال مناسب بایستی به ۱- قدرت

حلالیت ۲- سرعت تبخیر ۳- نقطه جوش ۴- نقطه اشتعال و قابلیت شعله وری ۵- سمیت آن توجه داشت

طبقه بندی حلالها ۱- ترپنها ۲- هیدروکربنها (نفتیک مثل وایت اسپریت، آلیفاتیک و آروماتیک مثل تولوئن و ترکیات آن نظیر

تولوئن دی ایزو سیانات TDI، تری نیترو تولوئن TNT، زایلن و منومر استایرن (وینیل بنزن)) ۳- حلالهای اکسیژندار (الکلها)

هیدروکسیل) مثل متانول، اتانول، بوتانول، گلیکولها و گلیسرولها و ...، اترها، کتونها مثل استون، استرها ۴- نیتروپارافین ها ۵-

حلالهای کلر دار: خواص آنها عبارت است از ۱- وزن مخصوص بالا ۲- قابلیت اشتعال کم ۳- بوی خاص ۴- خواص بیهوش

کننده و سمیت زیاد ۵- قدرت حلالیت زیاد

۶- هاردنر (سخت کننده)

برای اصلاح برخی از خواص رزین از هاردنر استفاده می شود به عنوان مثل برای رزین اپوکسی از پلی آمین، پلی آمید، استر،

وینیل و کولتار (از مشتقات قطران)

۷-انواع رزین

- طبیعی: به صورت خام در طبیعت یافت می شود صمغ و شیره درختان، رزینهای فسیلی می باشد یکی از آنها رزین کولتار است که از قطران بدست می آید و برای اصلاح و بهبود مقاومت و نفوذ ناپذیری رزین اپوکسی و پلی اورتان بکار میرود.

- مصنوعی (ستتری)

الف- آلکیدی: از پلی ال، پلی اسید و اسید چرب (روغن) تشکیل شده

پلی ال الکل با بیش از دو هیدروکسیل (مثل گلیسرین) و پلی اسید، اسید آلی با دو یا چند عامل کربوکسیل یا انیدرید (مثل انیدرید فتالیک) تشکیل شده است

روغنهای ۳ دسته ۱- خشک شونده (مثل روغن برزک و ماهی) ۲- نیمه خشک شونده (مثل سویا و تال) ۳- غیر خشک شونده (مثل نارگیل، کرچک و پنبه دانه) تقسیم بندی می شوند

- کلرو کائوچو: کائوچو در طبیعت نئوپرن یا ایزوپرن با فرمول کلی پلیمری با زنجیره فتر مانند که خاصیت ارتجاعی دارد

ب- اپوکسی نوعی رزین ترموست (گرماسخت) می باشد. و آزمایشات پلی آمین می باشد

بیس فنول A: از واکنش فنول و استون بدست می آید.

بیس فنول F: از واکنش تراکمی فنول یا کروزل با فرمالدئید بدست می آید

اپوکسی نووالاک: با افزایش زنجیره بیس فنول F تشکیل می شود

اپوکسی آلیفاتیک: از پلی ال های خطی (آلیفاتیک) به واسطه با ویسکوزیته پایین به عنوان رقیق کننده فعال برای سیستم اپوکسی بدون حلال کاربرد دارد

اپوکسی سیکلو آلیفاتیک و هتروسیکلیک

فنوکسی: در زنجیره خود بجای ۲ گروه اپوکسی انتهایی فنول دارد.

واکنش با عوامل شیمیایی و ایجاد تغییرات در رزین اپوکسی

واکنش با انیدرید پلی کربوکسیلیک اسید، اسید چرب و پلی فنول

ایجاد شبکه ۳ بعدی و عرضی (Cross Link) با آمین ها از طریق اضافه کردن هاردنر (سخت کننده) پلی آمین به رزین، کتیمین

(واکنش یک کتون با پلی آمین)، رزول و آمینوپلاست، پلی ایزو سیانات و پلی سیلوکسان و کاتالیزور (آنیونی یا کاتیونی)

نسبت اختلاط رزین و هاردنر در اپوکسی ۲ جزئی براساس عدد پاپوکسی و آمین اکسید تعیین می شود که برای داشتن پیوند

مناسب رعایت نسبت اختلاط براساس دستورالعمل کارخانه های سازنده حایز اهمیت است نسبت اختلاط در Pot life (گیرش

اولیه) پس از ۵ دقیقه واکنش گرمازا (شبیه به واکنش سیمان با آب در بتن) حالت ژل و فیلم سخت ایجاد می گردد، تأثیر دارد

کاربرد پوششهای اپوکسی

- پرایمر بتن اپوکسی

- بتونه اپوکسی (درزگیر) - ترکهای مومین بتن را پر می کند

- ملات و گروت اپوکسی

- رنگ اپوکسی با حلال

- رنگ اپوکسی بدون حلال

- ورنی اپوکسی

- چسب اپوکسی

- روکشهای اپوکسی

- پوششهای منعطف اپوکسی :

- مقاومت در برابر نفوذ آب

- مقاومت در برابر یخ زدگی

- چسبندگی خوب به سطح بتن

- انعطاف پذیری عالی

- پوششهای ضد لغزندگی اپوکسی : روی سطح آن سیلیس ریخته می شود

پوشش اپوکسی با الیاف شیشه

پ- پلی اورتان

اجزا تشکیل دهنده : جز اول ایزو سیانات ها مثل تولوئن دی ایزو سیانات (TDI) ، دی فنیل متان دی ایزو سیانات (MDI) ، هگزا

متیل دی ایزو سیانات (HDI) جز دوم ترکیبات دارای گروه عاملی OH جز سوم حلالها

طبقه بندی : پلی اورتان اصلاح شده با روغن (آلکید اورتان)

پلی اورتان هایی که با رطوبت هوا خشک می شوند ، پلی اورتانهای کوره ای

پلی اورتان دو جزئی با کاتالیزور و پلی اورتان دو جزئی با پلی ال

ت- اتیل سیلیکات

روش ۱- تولید بچ به بچ ۲- تولید پیوسته

ث- سیلیکونی

خواص : مقاومت حرارتی بسیار عالی ، مقاومت خوب در برابر شوکهای حرارتی ، بسیار خوب در برابر عوامل خوردنده محیط ،

کاهش میزان مصزف حلال در رنگ ، خشک شدن سریع ، کاربرد آسان ، مقاومت بسیار خوب در برابر نورخورشید و رطوبت

محیط ، هماهنگی از نظر سختی و انعطاف رزین با سطح

ج- وینیلی

کوپلیمر وینیل کلراید و وینیل ایزو بوتیل اتر

پلی وینیل استات

پلی وینیل بوتیرال

چ- اکریلیک

اکریلیک ترموپلاست

اکریلیک ترموست

اکریل آمید

اکریلیک امولسیون

ح- پلی استر

پلی استر اشباع

پلی استر غیر اشباع

- آمینو

اوره فرم آلدئید

ملامین فرمالدئید

خ-نیترو سلولز

برای نصب کاشی ضد اسید از رزین پلی استر ، رنگدانه فلزی کبالت ، پرکننده میکروسیلیس برای نفوذناپذیری پوشش ایزوکیل به عنوان ماستیک یا بتونه ، هاردنر پروکسی و در نهایت کاشی ضد اسید (Anti Acid Tile) استفاده شده است.

برخی از پوششهای صنعتی کاربردی عبارتند از پوشش اکریلیکی [2] پوشش آلکیدی^۲، پوشش قیری^۳، پوششهای اپوکسی شامل کولتار^۴، پوشش اصلاح شده با پلی آمید^۵ و پلی آمین^۶، پوشش وینیل و استر اپوکسی^۷، پوشش پلی استر^۸، پوشش پلی اورتان^۹، پوشش سیلیکون^{۱۰}، پوشش وینیل^{۱۱} و ...

زیرسازی سطحی که قرار بود پوشش گردد با فرز به حد کافی هموار گردید و پس از مالیدن پوشش با رولر و ترکیب و تختلاط رزین با حلال پوشش را در ۲ و ۳ لایه روی سطح کشیده و بایستی به زمان اجرا و Pot Life توجه گردد. در نهایت به به بررسی عملکرد پوشش با آزمایشات شیمیایی می پردازیم.

خصوصیات پوشش کولتار اپوکسی ۱- چسبندگی عالی به سطح ۲- مقاومت عالی در برابر آب ۳- مقاومت سایشی ۴- سختی و نفوذ پذیری بالا

موارد مصرف : به عنوان لایه محافظ در برابر نفوذ آب ، رطوبت در زیر خاک و آب دریا استفاده می شود. از قطران در آن استفاده شده و سطح را کاملاً عایق و مانع از نفوذ عوامل خوردنده می گردد.

۱- لوله ها و مخازن مدفون در خاک

۲- سازه ها و اسکلت‌های صنعتی و غوطه ور در آب

۳- کارخانجات پتروشیمی و ایستگاههای تصفیه آب

۴- ایستگاههای تصفیه فاضلاب و پوشش داخلی لوله های بتنی مسیر فاضلاب

۵- پوشش داخلی مخزن تعادل کشتی

خصوصیات پرایمر دو جزئی پوشش اپوکسی پلی آمید

۱- چسبندگی عالی به سطح ۲-مقاومت عالی در برابر مواد شیمیایی و آب ۳- ایجاد فیلمی با انعطاف پذیری خوب ۴- مقاومت

سایش بالا ۵- خشک شدن سریع و تحمل ضربه عالی

موارد مصرف : در مناطقی که شرایط خوردگی در آنها بسیار شدید نمی باشد به عنوان لایه میانی بر روی پرایمرها ضد خوردگی قوی استفاده می شود.

۱- پالایشگاه ها و نیروگاه ها ۲- سکوها و تأسیسات حفاری

۳- تجهیزات و تأسیسات فلزی در مناطق صنعتی و دریایی در بالای خط آبخور

خصوصیات پوشش پلی اورتان بدون حلال با انعطاف پذیری بالا

این پوشش دو جزئی (Two Components) متشکل از پلی ایزوسیانات^۲ و پلی ال^۳ می باشد. دارای پرایمر (آستری) بی رنگ بوده و دارای ۲ لایه Top Coat زیتونی رنگ می باشد ضخامت لایه پوشش ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میکرون می باشد.

مقاوم در برابر اسیدها ، آب دریا و آب مقطر

۱- مقاوم در برابر پرتوهای رادیو اکتیو

۲- مقاومت سایش و مقاومت مکانیکی بالا

۳- چسبندگی عالی به سطوح

۴- مقاوم در برابر شوکهای حرارتی

۵- قابلیت ترمیم آسان

موارد مصرف: به عنوان پوشش محافظ خوردگی در دامنه وسیعی از بسترها با جنس متفاوت استفاده می شود

۱- تأسیسات نیروگاههای حرارتی

۲- لوله و خطوط انتقال (داخل و خارج)

۳- تانکها و مخازن فلزی

۴- تانکها و مخازن بتنی (داخل و خارج)

۵- قابل استفاده در محیطهای غوطه ور در گاز

۶- قابل استفاده در محیطهای غوطه ور در آب

۷- پلهای شنی و فلزی

۸- استخرهای شنا و ذخیره آب

۹- ژاکتها و تجهیزات مورد استفاده در محیطهای دریایی

۱۰- پوششهای سطوح در تماس با مواد غذایی (داخل و خارج)

۱۱- کفپوش سازه های فلزی و بتنی

۱۲- درزگیرها و پوششهای مقاوم در برابر ضربه و سایش

۱۳- پشت بامها و شیروانی ها و بالکن ها و ...

خصوصیات لایه رویه اپوکسی بدون حلال

۱- مقاومت بسیار عالی در برابر آب ۲- سختی بالا ۳- چسبندگی عالی به سطح

۴- مقاومت مکانیکی بالا ۵- مقاومت سایشی بالا

موارد مصرف: ازاین پوشش به عنوان لایه رویه برای تجهیزات به دور از تابش مستقیم خورشید (UV)

۱- مخازن آب آشامیدنی ۲- مخازن نگهداری روغنها و چربیها ۳- محیطهای در تماس با مواد شیمیایی

۱- بلوک نمونه یا شاهد (بدون پوشش) ۲- کلیه پوششها ۳- پوشش پلی اورتان (۳۰۰۰-۵۰۰۰ میکرون ضخامت) ۴- پوشش کولتار

اپوکسی بدون حلال (۴۰۰-۸۰۰ میکرون ضخامت) ۵- پوشش کولتار اپوکسی با حلال (۴۰۰-۸۰۰ میکرون ضخامت) ۶- پوشش

اپوکسی پلی آمین (دارای پرایمر کرم رنگ و دو لایه نهایی با فام آبی)

بررسی کیفیت بتن مجاری مدفون با دوام در برابر خوردگی میلگردها

برای مشخص کردن بتن با دوام در برابر خوردگی میلگردها روشهای مختلفی ارائه شده است که هر آزمایش و روش پیشنهادی به

پارامتر معینی توجه دارد. آزمایشهای بسیار ساده تا بسیار مشکل و پرهزینه در این مجموعه قرار دارد و معمولاً آزمایشهای دقیق تر

و معتبر تر پرهزینه و زمان برمی باشند. دست اندرکاران همواره بدنبال آزمایشهای ساده، کم هزینه و سریع هستند هر چند از دقت

کمتری ممکنست برخوردار باشند.

معمولاً آزمایشهایی معتبر تلقی می گردند که مستقیماً به مسئله خوردگی میلگردها می پردازند. آزمایشهای غیر مستقیم همواره غیر معتبر تر

تلقی میشوند ولی کاربرد آنها در دنیا رواج زیادی دارد.

آزمایشهای زیر از جمله این موارد است و در هر بررسی باید مشخص کرد که از کدام آزمایش زیر بهره گرفته ایم.

آزمایش جذب آب حجمی اولیه (کوتاه مدت) و نهائی (دراز مدت) بتن BS1881 و ASTM C 642

آزمایش جذب آب سطحی (ISAT) بتن BS 1881

آزمایش جذب آب موئینه بتن RILEM

آزمایش مقاومت الکتریکی بتن

آزمایش نیم پیل (پتانسیل خوردگی) ASTM C 876

آزمایش پتانسیل و شدت خوردگی G 109 () بروش گالوانیک

آزمایش شدت خوردگی بروش گالوپالاس

آزمایش درجه نفوذ یون کلر بتن AASHTOT259

آزمایش تعیین عمق نفوذ یون کلر در بتن

۱۰ - آزمایش تعیین پروفیل یون کلر و ضریب نفوذ آن

C114 و C1218 و ASTM C1152

۱۱ - آزمایش شاخص الکتریکی توانائی بتن برای مقابله با نفوذ یون کلر ASTM 1202

هرچند عنوان برخی استانداردها و یا شماره آن در بالا ذکر شده است اما این آزمایشها ممکن است با تغییرات اندک و یا زیاد در استانداردهای دیگر نیز انجام شود که نتیجه آن الزاما" مشابه به استانداردهای دیگر نیست و از مفهوم واحد برخوردار نمی باشند.

□ آزمایش جذب آب حجمی اولیه کوتاه مدت و دراز مدت :

انواع آزمایش جذب آب حجمی وجود دارد. شکل و ابعاد نمونه، طرز خشک کردن (دما و مدت)، نحوه قرارگیری در آب، دمای آب (معمولی و جوشان)، مدت قرار گرفتن در آب و نحوه گزارش نتیجه از موارد اختلاف استانداردهای مختلف می باشد. بسیاری از استانداردها برای کنترل کیفیت قطعات بتنی پیش ساخته از این آزمایش استفاده می نمایند. مکعبی $10 \times 10 \times 10$ و استوانه ای کوچک به قطر $7.5/10$ سانتی متر از اشکال و ابعاد رایج است. دمای خشک کردن نمونه ها از 40 تا 110 درجه متغیر می باشد. مدت خشک کردن از 24 ساعت (دمای 110 تا 14 روز (دمای 40 تا 50)) پیش بینی شده است. در برخی استانداردها نحوه خاصی برای قرارگیری در آب و ارتفاع آب روی نمونه در نظر گرفته اند. دمای آب از 20 تا جوشانیدن آب منظور می شود. مدت قرارگیری در آب قرائت های مربوط به 10 دقیقه، 30 و 60 دقیقه تا بیش از 24 روز می باشد. در اکثر استانداردها تعریف جذب آب حجمی نسبت وزن آب جذب شده به وزن نمونه خشک اولیه است. لازم به ذکر است اگر بخواهیم این ویژگی را در بتن های سبک با بتن معمولی مقایسه کنیم بهتر است نسبت حجم آب جذب شده به حجم نمونه را مد نظر قرار دهیم، بهر حال مقایسه نتایج جذب آب حاصله از آزمایش طبق استانداردهای مختلف کاملاً گمراه کننده است. برخی کتب، بتن ها را از نظر میزان جذب آب طبقه بندی می نمایند. بطور مثال گفته می شود جذب آب اولیه مربوط به 30 دقیقه طبق BS1881 بهتر است کمتر از 2 درصد باشد تا بتنی با دوام داشته باشیم. معمولاً گفته می شود جذب آب کوتاه مدت برای کنترل دوام بتن معتبر تر است زیرا خصوصیات سطحی بتن را به نمایش می گذارد.

□ جذب آب سطحی :

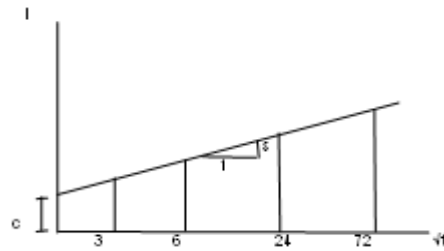
این آزمایش عمدتاً در انگلیس کاربرد دارد و جذب یک جهته را در روی نمونه خاص در منطقه محدود اندازه گیری می نمایند. نوع خشک کردن اولیه بتن، زمان و وسایل مربوطه در این استاندارد مشخص شده است. این آزمایش عملاً در ایران کاربرد کمی دارد.

□ جذب آب موئینه بتن :

بسیاری معتقدند مکانیسم جذب آب بتن در مناطق مرطوب، جـ.....ذرو مد و پاشش آب یا شالوده های واقع در منطقه خشک و بالای سطح آب با مکانیسم جذب موئینه شباهت دارد. Rilem آزمایش جذب آب موئینه را بر روی نمونه های مکعبی 10 سانتی متری بصورت زیر توصیه میشود.

نمونه ها در دمای 40 تا 50 در آون خشک می شوند، سپس چنان در بالای سطح آب قرار می گیرد که 5 میلی متر آن داخل آب باشد. در زمانهای مختلف و ترجیحاً پس از 3 ، 6 و 24 و 72 ساعت وزن نمونه اندازه گیری و وزن آب جذب شده تعیین می شود. سپس وزن آب (حجم آب) بر سطح نمونه (حدود 100 cm^2) تقسیم می گردد تا ارتفاع معادل آب جذب شده بدست آید. (ا بر حسب میلیمتر)

$$i = c + s\sqrt{t}$$



C ثابت جذب موئینه و S ضریب جذب موئینه است. این مقادیر از برازاندن خطی بر نقاط بدست آمده در صفحه مختصات $(i - \sqrt{t})$ بدست می آید.

هر کدام از این پارامترها دارای مفهوم خاصی است ولی S اهمیت بیشتری دارد و آهنگ جذب را نشان می دهد و هر چه کمتر باشد بهتر است. در انتهای آزمایش گاه نمونه را شکسته و ارتفاع واقعی جذب آب را بطور متوسط بدست می آورند و برای این منظور در آب ماده رنگی (مانند لاجورد) می ریزند. ارتفاع زیاد موئینه نشانه خوبی برای بتن نیست. در واقع بتن هائی که خلل و فرج ریزی دارند ممکنست ارتفاع موئینه زیادی داشته باشند و این نکته مهمی است که معمولاً در مفهوم نفوذ پذیری در برابر آب، خلل و فرج ریزتر مطلوب تر تلقی می شوند.

□ آزمایش مقاومت الکتریکی بتن:

خوردگی پدیده الکترو شیمیائی است. عملاً میلگرد بصورت آندو بتن کاتد می شود و یک جریان الکتریکی بین میلگرد و سطح بتن بوجود می آید. مسلماً در این حالت تحرک یون ها را شاهد هستیم. هر چه این حرکت بیشتر و سهل تر انجام شود به مفهوم آنست که مقاومت در برابر تحرک یونی کمتر است و با هدایت الکتریکی بتن بیشتر می باشد. بنابراین باید گفت یکی از راههای ساده آزمایش دوام بتن، تعیین مقاومت ویژه الکتریکی آن می باشد. مقاومت الکتریکی بتن نیز مانند مقاومت هر جسم مرکب دیگر تابع اجزاء آن و ارتباط اجزاء با یکدیگر است. مقاومت الکتریکی سنگدانه ها و خمیر-----سیمان سخت شده و نسبت مقدار هر یک در بتن و همچنین کیفیت وجه مشترک (ناحیه انتقالی) و مصرف افزودنیهای پودری معدنی تأثیر زیادی در مقاومت الکتریکی بتن دارد. وجود رطوبت و اشباع مقاومت الکتریکی را کم می کند. وجود ترکهای ریز که با آب پر شود به شدت مقاومت الکتریکی را کاهش می دهد. حتی اگر بجای آب از محلول آب نمک یا آب دریا استفاده کنیم افت شدیدی در مقاومت الکتریکی مشاهده خواهیم نمود. بنابراین سعی می شود مقاومت الکتریکی بتن های اشباع با آب نمک یا آب دریا اندازه گیری شود. اندازه گیری مقاومت الکتریکی ساده است. کافی است دو صفحه برنجی یا مسی را کاملاً در تماس با سطح نمونه بتن قرار دهیم و با یک اهم متر مخصوص، مقاومت الکتریکی را بدست آوریم. اما این مقاومت الکتریکی باید بدون توجه به اثر ابعاد گزارش شود یعنی باید مقاومت ویژه الکتریکی تعیین و اعلام گردد تا بتوان آنرا با سایر بتن ها مقایسه نمود. برای این منظور از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\rho_c \quad \text{مقاومت ویژه الکتریکی بتن بر حسب اهم متر} \quad R \quad \text{مقاومت الکتریکی قرائت شده از دستگاه}$$

$$A \quad \text{سطح نمونه (سطح تماس صفحه برنجی با بتن)} \quad L \quad \text{فاصله بین دو صفحه تماس (طول نمونه)}$$

$$\rho_c = \frac{R.A}{L} (\Pi.m)$$

اعتقاد بر آن است که هر چه مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر باشد بتن با دوام تر و مطلوب تری داریم.

مقاومت ویژه الکتریکی $(\Pi.m)$ بتن اشباع نوع بتن از نظر دوام در برابر خوردگی

بیشتر از ۲۰۰ عالی

۲۰۰-۱۲۰ خوب

۱۲۰-۵۰ متوسط

کمتر از ۵۰ ضعیف

برای اتصال مناسب صفحه برنجی با بتن معمولاً لایه نازکی از خمیر سیمان نسبتاً شل را بکار می برند و صفحه را با فشار به خمیر سیمان و سطح بتن چسبانیده و اندازه گیری را به انجام می رسانند. میتوان گفت هیچ آزمایشی به سادگی و اعتبار این آزمایش برای تعیین کیفیت بتن بویژه از نظر تحرک یون کلر و OH در داخل بتن نمی باشد. اما جالب است بدانیم این آزمایش هنوز دارای دستورالعمل استاندارد نیست. هم چنین اختلاف نظر علماء بتن برای اندازه گیری R (مقاومت اهمی) و Z (مقاومت ظاهری با در نظر گرفتن اثر القائی و خازنی) بحث

برانگیز است. برخی اعتقاد دارند کافی است R را بسادگی اندازه گیری کنیم و برخی معتقدند که در بتن اثر خازنی وجود دارد و باید وسایلی را بکار برد که بتواند Z را مشخص نماید (بوژه در بتن های میکروسیلیس دار)، برخی نیز معتقدند که تفاوت چندانی بین Z و R عملاً وجود ندارد. امید است در آینده بتوان برای کنترل دوام بتن از این آزمایش سریع و کم هزینه استفاده نمود و باید دانست الزاماً مقاومت فشاری بیشتر به معنای مقاومت ویژه الکتریکی نمی باشد. بتن های حاوی میکروسیلیس بسته به میزان میکروسیلیس، مقاومت الکتریکی ۳ تا ۱۰ برابر مقاومت الکتریکی بتن مشابه ولی بدون میکروسیلیس را دارا است در حالیکه مقاومت فشاری بتن ممکنست فقط ۵ تا ۱۵ درصد افزایش یابد. البته باید گفت اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی بتن سخت شده داخل قطعه کار دشواری است. اگر میلگرد و بتن را مانند یک مدار برقی در نظر بگیریم اختلاف پتانسیل، مقاومت و شدت جریان در آن وجود دارد. بدیهی است هر چه مقاومت الکتریکی بیشتر شود شدت جریان کمتر می گردد و شدت خوردگی نیز کم می شود. ضمن اینکه مقاومت الکتریکی بیشتر، آغاز خوردگی را به تأخیر می اندازد. برخی اعتقاد دارند باید مقاومت الکتریکی بتن سطحی (پوشش روی میلگرد) را اندازه گیری کرد که منطقی بنظر می رسد.

□ آزمایش نیم پیل (Half Cell) :

همانگونه که گفته شد واقعاً یک جریان الکتریکی در بتن مسلح وجود دارد. پس باید بتوان آن را اندازه گیری نمود. اگر یک سر سیم را به میلگرد وصل کنیم و سر دیگر سیم را به کمک یک الکتروده به سطح بتن مرطوب بچسبانیم و در این فاصله ولت متری را قرار دهیم، اختلاف پتانسیل را بر صفحه دستگاه مشاهده می نماییم که در حدود چند ده تا چند صد میلی ولت است. بسته به نوع الکتروده مصرفی، ولتاژ قرائت شده متفاوت خواهد بود و قابل تبدیل به یکدیگر می باشند، آزمایش نیم پیل دارای دستور العمل استاندارد برای کارگاه می باشد اما دستور استاندارد آزمایشگاهی ندارد. در کارگاه ASTM الکتروده مس - سولفات مس را توصیه کرده است و در آزمایشگاه معمولاً از الکتروده کالومل اشباع استفاده میشود.

ASTM . C876 شروع فعالیت خوردگی را به صورت احتمالی و بشرح ذیل مشخص کرده است.

احتمال شروع فعالیت خوردگی اختلاف پتانسیل V با الکتروده مس - سولفات مس (mv)

بیش از ۹۰ درصد $V > 350$

حدود ۵۰ درصد $200 > V > 350$

کمتر از ۱۰ درصد $V > 200$

در این آزمایش باید میلگردها بصورت متصل تداوم داشته باشند و قطع در آنها باعث اختلال در نتایج می گردد. باید دانست که این آزمایش فقط اختلاف پتانسیل موجود را به دست می دهد که پتانسیل خوردگی نام دارد و به هیچ وجه آهنگ خوردگی یا میزان خوردگی میلگرد را به نمایش نمی گذارد. در آزمایشهای آزمایشگاهی معمولاً میلگردی را داخل یک استوانه بتنی قرار می دهند و بخش عمده ای از بتن را در داخل آب دریا یا آب نمک (با غلظت های متفاوت) می گذارند و یک سر سیم را به میلگرد خارج از آب و الکتروده داخل آب دریا یا آب نمک قرار می دهند و ولتاژ را قرائت می کنند.

این آزمایش مستقیماً کیفیت بتن را بدست نمی دهد فقط می توان کیفیت بتن را در مقایسه با یکدیگر ارزیابی کرد و نشان داد کدام نمونه زودتر و کدام یک دیرتر فعالیت خوردگی را آغاز می نمایند. آزمایش نیم پیل و ارقام ذکر شده فقط برای میلگردهای بدون پوشش (گالوانیزه، اپوکسی و...) کاربرد و مفهوم دارند و برای میلگردهای پوشش دار و صنعت متفاوت خواهد بود.

□ آزمایش پتانسیل و شدت خوردگی گالوانیکی (ASTM G109) :

هر چند دستور آزمایشگاهی فوق بصورت استاندارد برای تعیین تأثیر افزودنیها بر خوردگی میلگرد ارائه شده است اما این آزمایش را با تغییرات خالص می توان برای تعیین کیفیت دوام بتن نیز بخوبی بکار برد.

در یک منشور بتنی دو ردیف میلگرد در بالا و پائین قرار داده می شود که سر و ته آنها ماریچ شده است و بین آنها یک مقاومت ۱۰۰ اهمی قرار دارد. در بالای منشور یک حوضچه چسبانیده میشود و داخل آن با آب نمک (غلظت ۳ درصد و بیشتر) می ریزیم. نفوذ آب نمک باعث آند شدن میلگرد فوقانی و کاتد شدن میلگرد تحتانی می شود و خوردگی گالوانیکی رخ می دهد.

بین دو میلگرد میتوان اختلاف پتانسیل و مقاومت الکتریکی را بدست آورد (با وجود مقاومت ۱۰۰ اهمی یا بدون آن) همچنین می توان اختلاف پتانسیل و مقاومت الکتریکی بین حوضچه و میلگرد فوقانی (بدون مقاومت ۱۰۰ اهمی) و

مانند آن اختلاف پتانسیل و مقاومت الکتریکی بین حوضچه و میلگرد تحتانی را تعیین نمود. برای این کار از الکتروکالومل اشباع در داخل حوضچه استفاده می گردد. ضمن اینکه هر اندازه گیری حاوی مفهوم خاصی است اما دستور استاندارد ASTM G109 فقط در هر زمان شدت جریان عبوری بین میلگردها را با توجه به وجود مقاومت ۱۰۰ اهمی بر حسب $A \mu$ بدست می آورد (از تقسیم اختلاف پتانسیل به مقاومت) و سپس مقدار کل جریان را بر حسب کولن با عنایت به رابطه زیر بدست می آید. از تقسیم شدت جریان به سطح جانبی میلگرد نیز شدت خوردگی بر حسب $\mu A / Cm^2$ حاصل می شود. بالا بودن شدت خوردگی و همچنین کل جریان می تواند نشان دهنده کیفیت پائین بتن باشد.

آزمایش G_{109} در اصل از یک بتن فاقد ریز دانه بهره می گیرد که بسیار نفوذ پذیر است (مانند آبکش سوراخ می باشد) و لذا اطراف نمونه با اپوکسی اندود میگردد. در حالیکه در آزمایش تغییر یافته، بتن مورد نظر طبق طرح اختلاط پروژه ساخته میشود و میتوان از اپوکسی برای اندود کردن سطوح جانبی بهره گرفت و یا بدون اپوکسی آزمایش را به انجام رساند. بهرحال این آزمایش قابلیت های زیادی را برای به نمایش گذاردن کیفیت بتن در امر خوردگی دارد و تفسیر نتایج آن هم جالب و مشکل می باشد.

□ آزمایش پتانسیل و شدت خوردگی به روش گالواپالسن :

در این آزمایش نیز نمونه هائی شبیه به آزمایش نیم پیل تهیه میشود و یا میتوان در محل کارگاه بر روی قطعات موجود این آزمایش را انجام داد. ضمن تعیین اختلاف پتانسیل خوردگی، افزایش های جزئی در پتانسیل ایجاد شده و شدت جریان مربوطه اندازه گیری میشود. در این آزمایش مقاومت الکتریکی نیز بدست می آید و با توجه به روابط موجود شدت خوردگی (آهنگ خوردگی) میلگردها تعیین می گردد. این آزمایش بسیار مهم و معتبر می باشد اما انجام آن مشکل و نتیجه گیری از آن نیاز به تبحر و تخصص دارد.

□ آزمایش تعیین عمق نفوذ یون کلر :

در این آزمایش نمونه هائی که در معرض یون کلر بوده اند (آزمایشگاهی یا کارگاهی) را بریده و مقطع را در معرض پاشش محلول نیتрат نقره قرار میدهند. پس از مدتی محل حاوی یون کلر سفید شیری شده و با گذشت زمان سیاه میشود و میتوان عمق نفوذ یون کلر را با دقت کمتر از ۰/۲ میلی متر اندازه گیری نمود. مسلماً در این آزمایش باید نمونه های اولیه تقریباً فاقد یون کلر باشند و یا میزان آن از آستانه حساسیت عملکرد محلول نیترات نقره کمتر باشد یا بتوان نفوذ یون کلر را مشاهده نمود. در این آزمایش مقادیر یون کلر در بتن بدست نمی آید. پروفیل یون کلر و ضریب نفوذ آن نیز قابل تعیین نیست.

□ آزمایش تعیین پروفیل یون کلر و تعیین ضریب نفوذ :

این آزمایش یکی از مهمترین و مشکل ترین آزمایشهای موجود است که به تعیین پروفیل یون کلر و ضریب نفوذ آن می انجامد. وقتی نمونه ای در آزمایشگاه یا محل و همچنین قطعه بتنی در محل در معرض یون کلر بویژه در مدت طولانی قرار گیرد میتوان این آزمایش را با دقت خوب انجام داد. برای این منظور در زمان معین و مورد نظر، پودر نمونه بتنی که مربوط به عمق معینی است تهیه شده و مقدار یون کلر موجود در بتن طبق ASTM C114 تعیین میشود. برای تهیه پودر بتن و آماده سازی آن از دستور ASTM C1152 (یون کلر محلول در اسید) و یا ASTM C1218 (یون کلر محلول در آب) استفاده میشود. در این آزمایش از روش پتانسیو متری برای تیتراژ کردن با محلول نیترات نقره استفاده میشود. این روش بسیار دقیق است و تا کنون روش دیگری با این دقت ابداع نشده است.

معمولاً نتیجه این آزمایش بصورت درصد یون کلر در بتن و یا درصد یون کلر بتن نسبت به وزن سیمان گزارش میگردد. محدودیت یون کلر در بتن اولیه و یا گزارش یون کلر بتن قدیمی، بصورت درصد نسبت به وزن سیمان بیان میشود و باید مشخص گردد طبق کدام روش (محلول در اسید یا محلول در آب) انجام شده است. براساس نتیجه حاصله، پروفیل یون کلر رسم میگردد. محور افقی عمق نمونه (متوسط) و محور قائم درصد یون کلر است. با توجه به نتایج حاصله و میزان یون کلر اولیه در بتن طبق قانون دوم Fick، میتوان ضریب نفوذپذیری (انتشار) بتن در برابر یون کلر را بدست آورد (Diffusivity Coefficient). این ضریب با دیفانسیون L^2/T بیان میشود. حل معادلات مربوط به قانون دوم فیک با تقریب ها و روش های خاص انجام میشود که نتایج متفاوتی را بدست میدهد. افزایش ضریب انتشار نشانه نفوذپذیری بیشتری بتن در برابر یون کلر است.

□ آزمایش درجه نفوذ (مقاومت) بتن در برابر یون کلر :

طبق AASHTO T259 که یکی از قدیمی ترین روشهای آزمایش مربوط به نفوذ یون کلر می باشد صرفاً مقاومت و درجه نفوذ در برابر یون کلر بدست می آید و نمیتواند معیار کمی برای عمر مفید بهره برداری از قطعه را ارائه دهد. نمونه های بتن چهار دال به ابعاد 30.5×30.5 میلی متر و ضخامت ۷۶ میلی متر است در این روش بالای نمونه های بتنی پس از ۲۸ روز (یا هر سن مورد نظر) در حدود ۳ میلی متر سائیده شده و یک حوضچه کوچک روی آن قرار می گیرد. نمونه ها ۱۴ روز در محیط مرطوب نگهداری و ۱۴ روز خشک شده است و سن ۲۸ روزه دارند. در حوضچه محلول نمک طعام ۳ درصد ریخته و ۹۰ روز در آن می ماند. پس از ۹۰ روز، دال ها خشک شده و نمک روی آن پاک میشود. از دالها سه نمونه بایستی از عمقهای ۱/۶ تا ۱۳ میلی متر و ۱۳ تا ۲۵ میلی متر تهیه شود و طبق AASHTO T260 مقدار یون کلر آن بدست آید. مقدار متوسط یون کلر در هر عمق مورد نظر باید تعیین شود. (قبل از نفوذ یون کلر و پس از آن) اختلاف این دو باید محاسبه شود. مقدار متوسط یون کلر جذب شده و حداکثر آن باید گزارش گردد.

□ آزمایش شاخص الکتریکی قابلیت مقابله بتن در برابر نفوذ یون کلر :

در آزمایش ASTM C1202 مقدار جریان الکتریکی عبوری از استوانه ها با مغزه های بتنی به قطر ۱۰۲ میلی متر و ضخامت ۵۱ میلی متر در مدت ۶ ساعت با اختلاف پتانسیل ثابت ۶۰ ولت (جریان مستقیم) بدست می آید. یک نمونه در محلول نمک طعام و دیگری در سود روز آمد قرار دارد. مقدار کل جریان برحسب کولمب نمایانگر مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر است و بصورت زیر طبقه بندی میشود. همانگونه که دیده میشود آزمایشهای متعددی برای کنترل دوام بتن بویژه در برابر یون کلر ابداع شده است که بخشی از آنها که در ایران رایج تر می باشد از نظر گذشت. آزمایشهای دیگری نیز در کشورهای مختلف دنیا مانند ژاپن و کشورهای اسکاندیناوی وجود دارد و هنوز این آزمایشها در مراحل گسترش و توسعه هستند. از جمله مشکلات کار این است که هنوز ارتباط دقیقی بین نتایج آزمایشها و بحث خوردگی بدست نیامده است تا بتوان عمر قطعه را تعیین کرد. ضریب نفوذ یون کلر و یا آزمایشهای شدت خوردگی از همه آزمایشها کاربردی تر هستند و میتوان بر اساس آنها عمر را تخمین زد.

با این حال خوردگی نیاز به سه عنصر یون کلر، رطوبت و اکسیژن دارد و وجود هر کدام به تنهایی نمیتواند خوردگی در میلگرد بتن بوجود آورد. برخی معتقدند قلیائیت بتن نیز در شروع خوردگی مؤثر است که منطقی بنظر میرسد بنابراین با نتایجی که از این آزمایشها بدست می آید نمیتوان دقیقاً دوام را تخمین زد. توصیه میشود تا پیشرفت علمی بیشتر در این زمینه از ضوابط آئین نامه ای استفاده گردد. سعی شده است نرم افزارهایی برای تخمین عمر سازه های بتن مسلح تهیه شود که در آنها اطلاعات جغرافیایی و محیطی وجود دارد و با دادن اطلاعاتی در مورد قطعه، میلگرد و بتن موجود (خصوصیات بتن شامل نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، عیار سیمان و افزودنی ها) بتوان عمر سازه را حدس زد. در ایران نیز اقداماتی برای تهیه این نرم افزار با توجه به شرایط محیطی موجود و اطلاعات دیگر محلی و داده های لازم در حال انجام است و سعی میشود نقایص نرم افزارهای قبلی اصلاح گردد.

تخریب بتن، آماده سازی محل تعمیر و میلگردها، مواد و روشهای تعمیر

در تعمیر بتنی که در اثر خوردگی تخریب شده است باید اصول خاصی رعایت گردد تا مشکلات قبلی بزودی گریبانگیر قطعه نشود. برای این منظور باید به نظارت زیر توجه گردد:

کنترل وسعت خرابی با بررسیهای نظری کارگاهی و انجام آزمایشهای ساده

تعیین وسایل تخریب و روش کار

تعیین محدوده خرابی و شیار زنی برای مشخص کردن محدوده

هندسه تخریب عمق تخریب

بررسی میلگردها و تصمیم گیری در مورد گسترش تخریب

زنگ زدائی و اصلاح میلگردها و تقویت و جایگزینی میلگردها

آماده سازی سطح بتن و میلگردها و اعمال پوشش های لازم، اشباع کردن و ...

مواد تعمیری و کاربرد آنها

- روشهای تعمیر و بکار گیری آنها

□ کنترل وسعت خرابی (بررسیهای نظری و آزمایشی) :

با توجه به بازدیدهای انجام شده و احتمالاً برخی آزمایشهای ساده میتوان به وسعت تقریبی خرابی پی برد. متأسفانه هنوز روشی برای تعیین محل‌هایی که میلگرد آنها بطور قابل توجهی زنگ زده اند وجود ندارد. نشانه های زنگ زدائی زیاد، لکه، ترک خوردگی، طبله کردن و ریختن بتن می باشد. با آزمایش ساده نیم پیل میتوان پتانسیل خوردگی را بدست آورد اما میزان زنگ زدگی و آسیب نمایش داده نمیشود. با زدن چکش اشمیت یا چکش معمولی و با توجه به نتیجه یا صدای حاصله نیز میتوان تا حدودی وضعیت بحرانی را آشکار کرد. متأسفانه اشکال رایج عمده در تعمیر سازه های بتنی مشخص نبودن دقیق منطقه و محدوده تعمیرات و گاه ممکنست وسعت تخریب و تعمیر چندین برابر تخمین اولیه گردد.

□ تعیین وسایل تخریب و روش آن :

با توجه به وسعت تخریب، نوع بتن و مشکلات تخریبی آن، انبوهی میلگردها و موقت قرار گیری قطعه و همچنین محدودیت های زمانی و هزینه ای نوع وسیله تخریب و روش کار مشخص میگردد.

گاه لازم است سرعت زیادی در تخریب بخرج نداد زیرا در صورت عدم امکان تعمیر، مجاورت بتن و میلگرد با عناصر مضر ممکنست در طولانی مدت مشکلات جدیدی را بوجود آورد.

امروزه استفاده از وسایل مختلفی امکان پذیر است: قلم (چکش) بادی، برقی، اره های اصطکاکی، جهت آب و برش با آب از جمله وسایل رایج است که از همه آنها میتوان برش با آب (جهت آب) را بهتر و مناسب تر دانست. بهرحال وسعت کار و محدودیت های موجود فوق الذکر تعیین کننده نوع وسایل می باشد. برخی چکش ها ممکنست در مناطق مجاور آسیب هائی را ایجاد کند که باید وسایل با قدرت مناسب را انتخاب نمود. اره های اصطکاکی عمدتاً برای برش های خطی بکار میرود.

□ تعیین محدوده خرابی و شیار زنی :

برای اینکه محدوده کار تخریب روشن شود گاه علائمی را بکار می برند. بهترین روش علامت زنی بصورت شیار زنی در محدوده مورد نظر است. شیار زنی به عمق ۱ تا ۲ سانتی متر بدین منظور معمول است میتواند هندسه مناسب تخریب را در سطح و عمق بوجود آورد. بهرحال گاه در طول عملیات تخریب ممکنست این محدوده را وسعت بخشیم و گسترش دهیم و بهتر است مجدداً محدوده جدید را شیار زنی کنیم.

□ هندسه تخریب :

توصیه میشود از شکلهای هندسی مشخص برای محدوده تخریب استفاده شود. مربع، مستطیل و ترکیبی از مربع و مستطیل در کنار هم میتواند بهترین اشکال باشد. البته شکل دایره و چند ضلعی منظم نیز توصیه میشود. بهرحال اشکال نا منظم با دوره های بی نظم ابدأ توصیه نمی گردد. کناره و لبه منطقه تخریب (تعمیر) باید گونیا باشد و این حالت ۱ تا ۲ سانتی متر در عمق ادامه یابد و لبه نباید پرکلاغی تلقی گردد زیرا دوام مناسبی برا پس از تعمیر نخواهیم داشت.

□ عمق تخریب :

مشکلی بزرگ در تعمیر اینگونه سازه ها تعیین عمق تخریب است. مسلماً عمق تخریب تا پشت میلگردها خواهد بود. نمیتوان تخریب را تا رسیدن به سطح میلگردها انجام داد زیرا لازمست میلگردها را تمیز و اصلاح نمود بنابراین باید تخریب را تا پشت میلگردها ادامه داد. عمق تخریب باید تا حدی انجام شود که به منطقه ای با یون کلر کم برسیم. رسیدن به یون کلر کمتر از حد آستانه خوردگی قطعی است اما حد قابل قبول تابع سیاست های تعمیرات اگر حد آستانه خوردگی را ۰/۳۵ درصد و حداقل یون کلر بتن اولیه تازه را ۰/۱۵ درصد در نظر بگیریم بهرحال حد قابل قبول در بین این دو عدد قرار دارد و هر چند به ۰/۱۵ درصد نزدیک شود عمر تعمیر و میلگرد بیشتر خواهد شد اما ممکنست هزینه ها را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد و یا عمر بخش های تعمیر نشده بمراتب کمتر از عمر مناطق تعمیر شده باشد که منطقی بنظر نمیرسد.

بهترین راه تهیه نمونه از عمق های مختلف و تعیین یون کلر می باشد تا تصمیم گیری در مورد عمق تخریب میسر گردد. وقتی تا پشت میلگرد تخریب را ادامه می دهیم بایستی امکان قرار گیری بتن در اطراف میلگرد را فراهم کنیم. به این منظور حداقل فاصله میلگرد تا بتن بایستی از حداکثر اندازه سنگدانه مصرفی بزرگتر باشد. برخی توصیه می کنند در این مورد بهتر است این فاصله بمراتب بزرگتر از حداکثر اندازه سنگدانه مصرفی و در حدود ۳ سانتی متر باشد.

□ بررسی میلگردها و اتخاذ تصمیم در مورد گسترش تخریب :

پس از تخریب و رسیدن به میلگردها باید کارشناس خبره، میزان خوردگی را بررسی کند و وقتی در محدوده تخریب زنگ زدگی زیادی مشاهده می شود و این زنگ زدگی در منطقه سالم نیز تداوم دارد بایستی منطقه تخریب را گسترش داد تا به میلگرد سالم و تقریباً بدون زنگ زدگی رسید. وقتی زنگ زدگی با ناخن پاک نشود به میلگرد سالم نرسد باید آنرا تمیز کرد و لازمست که بتن روی آن برداشته شود.

□ زنگ زدائی، اصلاح میلگردها، تقویت و جایگزینی :

میلگردها معمولاً در محل با سندپلاست یا گریت پلاست باید تمیز شود. در این حالت باید پشت میلگردها تمیز شود زنگ زدائی با برس سیمی دستی یا برقی معمولاً کارآمد نیست و فقط در مناطق بسیار محدود و برای زنگ کم کاربرد دارد. اگر لازم باشد باید میلگردها تقویت شود. بکارگیری میلگردهای تقویتی امری رایج و معمول است. این کار با توجه به کاهش ضخامت میلگردها عملی میشود. معمولاً اگر کاهش سطح میلگردها بیش از ۱۵ درصد باشد تقویت توصیه میشود (برخی کاهش قطر ۱۵ درصد را نیازمند تقویت می دانند). گاه میلگردها به شدت زنگ زده اند و در این حالت توصیه میشود با میلگردهای جدید جایگزین شوند. تأمین پوشش طولی میلگردها (Overlap) مشکل است و اغلب از وصله های جوشی یا مکانیکی میتواند

استفاده شود. وقتی از زنگ زدائی میلگرد بهره می گیریم بهتر است هیچگونه رنگی بر روی میلگرد باقی نماند و کاملاً تمیز شوند.

□ آماده سازی سطح بتن و پوشش میلگردها :

مقصود از آماده سازی سطح بتن و پوشش میلگردها آنست که بتوانند اتصال بتن با بتن و بتن با میلگرد را تأمین نمایند و مانع نفوذ بیشتر و خوردگی شوند. آماده سازی سطح بتن معمولاً با زبر کردن آن و رسانیدن به حالت اشباع با سطح خشک حاصل میگردد. اغلب اوقات تخریب، سطح زبر و خشنی را فراهم می کند بهر حال این سطح نباید پستی و بلندی خیلی زیادی داشته باشد اما ضمن اینکه ضخامت تعمیر نسبتاً ثابتی را فراهم می نماید باید کاملاً زبر و خشن باشد و ترجیحاً شنها از سطح بر واحد اضافه شوند.

بتن قدیمی (پایه) نباید آب بتن جدید (ماده تعمیری) را بمکد زیرا باعث جمع شدگی شدیدتر شده و پیوند دو بتن ضعیف می گردد. بنابراین لازمست بتن پایه بصورت SSD درآید. آب اضافی در روی سطح بتن به نحوی که دست را خیس و مرطوب کند نامطلوب است و باعث ضعف اتصال و پیوستگی دو بتن می شود. برای ایجاد پیوستگی و چسبندگی بهتر دو بتن جدید و قدیم گاه از برخی پلیمرها و لاتکس ها بر روی بتن پایه (قدیمی) استفاده می شود. یک لایه نازک از این مواد قبل از ریختن بتن تعمیری جدید بر روی بتن قدیمی مالیده یا پاشیده می شود. از جمله مواد رایج لاتکس آکریلیکی (Acrylic Latex) می باشد و قبل از خشک شدن کامل آن بتن جدید باید ریخته شود.

سطح میلگردها پس از تمیز کاری و زنگ زدائی، گاه لازمست با آب شیرین شسته شده و سریعاً با هوای فشرده خشک گردد و در صورت لزوم با پوشش های خاصی نظیر اپوکسی پوشیده شود. بهر حال توصیه میشود در تعمیر سازه از اپوکسی معمولی مخصوص میلگردها استفاده نشود و اپوکسی غنی شده با روی بکار رود تا سطح میلگرد عایق الکتریکی نشود، زیرا در غیر اینصورت میلگردهای بخش تعمیر نشده دچار خوردگی بسیار سریعتر می گردد.

□ مواد تعمیری :

اصل مهم در انتخاب مواد تعمیری شباهت آن از نظر خواص با بتن اصلی است معمولاً این اصل به نوعی برآورده میشود اما باید سعی کرد حتی الامکان رعایت گردد. مشکل بزرگ در رعایت این مورد آن است که اگر بتن اصلی قدیمی مناسب و مطلوب بود ممکن بود این خرابی ها حاصل نشود. ضعف مقاومت، ضعف دوام و بالا بودن نفوذپذیری باعث این خرابی شده است پس چگونه میتوان بتن مشابه را بکار برد. بنابراین دچار یک پارادوکس هستیم که با تدبیر مناسب آن را حل کنیم. شباهت در سنگدانه، شباهت در سیمان میتواند کمک مؤثری باشد. نزدیک بودن مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی از جمله نکات مهم است، گاه دیده می شود نفوذ پذیری بسیار کم در منطقه تعمیر شده، باعث خوردگی سریع میلگردهای منطقه مجاور میشود و این نکته مهم کار تعمیر را با مشکل مواجه می کند و اجتناب ناپذیر بنظر می رسد.

← انواع مواد تعمیری بصورت جایگزین بتن تخریب شده عبارتند از :

الف - بتن یا ملات سیمانی ب- بتن یا ملات سیمانی اصلاح شده با پلیمر ج - مواد پلیمری (که در این حالت اقتصادی و فنی نیست) بنظر میرسد معمولاً بتن یا ملات سیمانی ارجحیت داشته باشد و از نظر خواص مشابهت بیشتری با بتن اصل پایه را فراهم نماید. بکار گیری سیمان در حد متوسط (معمولاً ۳۷۵ تا ۴۰۰ کیلو) از نظر جمع شدگی کاملاً مناسب بنظر میرسد. نسبت آب به سیمان با توجه به موقعیت قطع و محل از نظر خوردگی به حداکثر ۰/۴ یا ۰/۴۵ محدود شود. معمولاً اگر از روش بتن ریزی جایگزین استفاده شود سعی میگردد از اسلامپ بالائی برخوردار باشیم (پیش از ۱۰ سانتی متر). اسلامپ زیاد جمع شدگی نشست خمیری را بوجود می آورد لذا ضمن اینکه تأمین

نسبت آب به سیمان فوق الذکر مشکل بوده و اسلامپ زیاد نیز با آب قابل تأمین نیست همواره نیاز به مواد روان کننده یا فوق روان کننده داریم. معمولاً هنگامیکه تعمیر در محدوده بسته ای انجام میشود بتن باید از جمع شدگی ناچیز و یا انبساط جزئی برخوردار باشد. به این دلیل لازمست از مواد منبسط کننده (انبساط زا) در مواردی که حساسیت وجود دارد استفاده نمائیم تا درگیری بهتری بین لبه های کناری بتن تعمیری و بتن پایه قدیمی ایجاد شود. برای سهولت در ریختن و تراکم بتن و کاهش نفوذپذیری آن از حداکثر اندازه سنگدانه نسبتاً کم و بافت دانه بندی ریزتری نسبت به بتن اصلی بهره می گیریم که به ابعاد و حجم منطقه تعمیری و وضعیت میلگردها بستگی دارد.

اگر بخواهیم ملات یا بتن را با مواد پلیمری اصلاح کنیم معمولاً از لاتکس آکریلیکی به میزان ۱۰ تا ۲۰ درصد وزن سیمان استفاده می نمائیم. گاه بجای ریختن معمولی بتن از روش دستی تعمیر استفاده می نمایند در این حالت ملات سفت بکار میرود و با فشار در محل مورد نظر قرار می گیرد. بهر حال این روش محدودیتهای خاص خود را دارد و تأمین روانی مورد نظر با نسبت آب به سیمان مطلوب و سیمان کمتر ممکن می باشد.

□ روشهای تعمیر و جایگزینی بتن:

بهر حال باید بتنی را در محل تخریب شده جایگزین نمائیم. روشهای این جایگزینی عبارتند از:

الف- تعمیر و جایگزینی بتن یا ملات با دست Patch Method

که در مناطق بسیار محدود بکار میرود. ضخامت نیز معمولاً به حدود ۵ سانت محدود میشود و کمتر مورد استفاده است. تعمیر سطوحی مانند زیر دال یا تیر با این روش ساده تر است.

ب- روش بتن ریزی سنتی معمولی (ثقلی) Conventional or Gravity Method

این روش کاربرد وسیعی دارد. برای سطوح بالائی تیر و دال، وجوه کناری تیرها، سطوح دیوار و ستون و حتی قسمت تحتانی تیر یا دال کاربرد دارد. معمولاً در این روش نیاز به اسلامپ زیادی داریم که گاه از بتن های آبکی با اسلامپ بیش از ۲۰ سانتی متر استفاده میشود. بهر حال در این روش باید بنحوی عمل نمائیم که از پر شدن قالب یا محل تعمیر مطمئن شویم و خروج هوا از بتن نیز میسر باشد و آب انداختن بتن عملاً حذف گردد (بوژه در سطوح زیر تیر یا دال) گاه این نوع بتن را در عمق یا زیر آب با لوله ترمی (tremie) می ریزیم تا جداسدگی پیش نیاید.

ج: روش بتن پاشی Shotcrete

در تعمیر سطوحی با وسعت زیاد و ضخامت کمتر از ۱۵ سانتی متر استفاده از روش بتن پاشی توصیه میشود بوژه در تعمیر سطوح زیرین دال یا تعمیر کاربرد آن مطلوبتر است. در بتن پاشی دو روش تر و خشک را داریم. در تعمیر سازه هایی که در مناطق خورنده قرار دارند و یکنواختی و نفوذناپذیری بیشتر مطلوب است باید از روش تر استفاده نمائیم.

مشکل بزرگ در بتن پاشی، برگشت و ریپاند مصالح و بتن می باشد که باید با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه، اسلامپ مناسب (۵ تا ۸ سانتی متر)، عیار سیمان بالاتر و چسبندگی بیشتر، بافت دانه بندی ریزتر، عمود گرفتن سر لوله، فاصله مناسب سر لوله از سطح در تأمین فشار هوای مناسب و غیره، میزان برگشت مصالح را به حداقل رسانید.

د: روش بتن ریزی با سنگدانه پیش آکنده (Preplaced Aggregate Concrete):

در این روش ابتدا سنگدانه درشت تک اندازه را در قالب ریخته و سپس از درون لوله هایی که درون سنگدانه قرار گرفته است ملات ریز دانه ای را به داخل سنگدانه های درشت پیش آکنده تزریق می نمائیم تا بتن مناسب حاصل گردد.

بتن پیش آکنده از جمع شدگی ناچیزی برخوردار است و عیار سیمان مصرفی آن نیز کم می باشد. تأمین نسبت آب به سیمان کم، نفوذناپذیری مطلوب و مقاومت زیاد با این روش کاملاً میسر است. همگنی بتن و عدم جداسدگی از ویژگیهای این نوع بتن ریزی است. حداکثر اندازه سنگدانه به $\frac{1}{5}$ حداقل بعد قطعه محدود می شود و حداکثر اندازه ماسه ملات باید به حدود $\frac{1}{10}$ حداقل اندازه اسمی سنگدانه درشت محدود گردد.

ملات مصرفی بسیار پر عیار بوده و همچنین شل و آبکی می باشد و معمولاً از مواد پوزولانی مناسب و روان کننده ها در ملات استفاده میشود ضمن اینکه به کند گیر کننده ها نیز احتیاج مبرمی داریم.

هـ: بتن ریزی با بتن مکیده (Vacuum Proiossed Con):

در این روش که امروزه از آن در عملیات تعمیر بتن استفاده چندانی بعمل نمی آید . بتن نسبتاً شل را در محل مورد نظر (بویژه سطوح فوقانی دال ، کف و سر ریز سدها یا کف تونل های آب بر و غیره) ریخته و سپس با اعمال یک مکش از طریق فرش خلا ، بخشی از آب بتن را مکیده و نسبت آب به سیمان را کاهش می دهیم . این عمل مقاومت و دوام بتن تعمیری را بهبود می بخشد و نفوذپذیری آن بویژه در قسمت های سطحی کاهش می یابد .

در پایان متذکر میشود که در بتن ریزی جایگزینی نباید از بتن در مرحله گیرش استفاده نمود . جداشدگی یکی از روش های بتن ریزی در کشور ماست که نباید در بتن جایگزین بوجود آید . اختلاف دمای بتن پایه و تعمیری در هنگام ریختن نباید زیاد باشد و حداکثر آن از ۵ تا ۱۰ درجه مشخص شده است . کار تراکم باید بخوبی انجام شود . همچنین باید عمل آوری مناسب صورت گیرد دمای بتن نباید از ۳۰ درجه سانتی گراد در هنگام ریختن تجاوز نماید و از ۱۰ درجه سانتی گراد کمتر نشود .

منابع و مآخذ

- ۱- بازسازی شبکه های فاضلاب ، دکتر سید حسین میرمحمد صادقی ، انتشارات رنگینه
- ۲- مشکلات خوردگی و بو در تاسیسات فاضلابی و خوردگی و رسوب در تاسیسات آبی، مهندس مرتضی حسینیان
- ۳- اصول ژئوشیمی ، درایان میسون - کارلتون ب . مر ، برگردان : دکتر فرید مر - مهندس علی اصغر شرفی، انتشارات دانشگاه شیراز
- ۴- آقایی شلمانی، میثم. (۱۳۸۵). بررسی رفتار شریانهای حیاتی مدفون در خاک (لوله های فاضلاب) به هنگام زلزله. پایان نامه کارشناسی ارشد . اصفهان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
- ۵- منزوی ، محمد تقی . (۱۳۷۹) . جمع آوری فاضلاب . تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- ۶- دفتر امور فنی تدوین معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله . (۱۳۸۴). نشریه ۳۰۳. تهران: سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

- ۷- گروه نویسندگان. (۱۳۸۰) . مهندسی خطوط انتقال آب . تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- ۸- محمودی، ستار. (۱۳۸۵). ضرورت ایمن سازی تجهیزات آب و فاضلاب. www.moe.org.ir

مکانیک شکست و خستگی در سازه های فولادی

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد سازه ، eman.elyasian@gmail.com

خستگی نوعی از تخریب است که هنگامی مشاهده میشود که نیروی اعمالی دینامیک است و مقادیر بردار نیروی (مقدار و جهت و راستا) اعمالی با گذشت زمان عوض می شود، تخریب قطعه در تنش هایی کمتر از تنش تسلیم و استحکام کششی می شکند. تخریب بعد از تعداد نوسانات طولانی نیروی اعمالی صورت می گیرد و بنابراین ممکن است مدت زمانی طول بکشد تا قطعه بشکند شکست از طریق پدیده خستگی مانند شکست ترد است و قطعه قبل از شکست تغییر شکل قابل مشاهده زیادی نشان نمی دهد و شکست از طریق خستگی با جوانه زنی و رشد ترک همراه است و سطح مقطع شکست عمود بر تنش اعمالی است تنش اعمالی می تواند به صورت کشش - خمش یا پیچش یا مجموعه ای از آنهاست. اما مقدار تنش اعمالی (مقدار - جهت و راستا) با گذشت زمان تغییر می کند و تنش ها به صورت سیکل های تکرار شونده (مرتب یا نامنظم) بر جسم اعمال می شود

۱- استحکام خستگی Fatigue Strength

تنشی که در یک تعداد دور مشخص باعث شکست قطعه از طریق خستگی می شود

۲- عمر خستگی : fatigue Life

تعداد دوری که قطعه در یک تنش مشخص می زند تا از طریق خستگی دچار تخریب شود مکانیزم خستگی شامل سه مرحله است

۱- نرم شدن سیکلی

۲- جوانه زنی ترک

۳- رشد و گسترش ترک

جوانه زنی ترک از مکان های تمرکز تنش نظیر سوراخ ها - گوشه های تیز- ترک های سطحی و مانند آنها شروع می شود. در صورت عدم وجود این عوامل ترک های اولیه حین اعمال بار های سیکلی به وجود می آید. اما طبیعت تکرار شونده بار های اعمالی باعث می شود تغییرات (مثلا تغییر شکل پلاستیک) در مکان هایی خاص (مثلا نزدیکی ناخالصی های درونی) متمرکز شود و با تجمع تغییرات در این نواحی ترک اولیه ایجاد می شود. این ترک اولیه در هر سیکل مقداری رشد می کند و در نهایت پس از رسیدن به طول بحرانی ترک رشد می کند.

عوامل موثر بر عمر خستگی

۱- تنش متوسط اعمالی (افزایش تنش متوسط اعمالی باعث کاهش عمر خستگی می شود)

۲- عوامل طراحی (وجود نقاطی که باعث تمرکز تنش شود عمر خستگی را کاهش می دهد).

۳- عملیات سطحی (ترک هایی که روی سطح ایجاد می شود باعث کاهش عمر خستگی می شود.

انجام پالیش روی سطح باعث افزایش عمر خستگی می شود. ایجاد تنش های فشاری بر روی سطح باعث می شود که از پیش روی ترک های روی سطح جلوگیری شده و عمر خستگی را زیاد می کند، یکی از راه های ایجاد تنش فشاری در سطح قطعه پرتاب گلوله به سطح است. برخورد گلوله به سطح باعث تغییر شکل پلاستیک در نواحی نزدیک سطح می شود. این تنش های فشاری باعث جلوگیری از پیش روی سطح شده و عمر خستگی را زیاد می کند. به این عملیات Shot peen گفته می شود). استحکام خستگی با کاهش دما زیاد می شود

محل های جوانه زنی ترک خستگی عوامل موثر جوانه زنی ترک

❖ دامنه بارگذاری

❖ دما

۱- نوارهای لغزشی خستگی

❖ محیط

۲- مرز دانه ها

❖ وجود فاق ها (محل های تمرکز تنش)

❖ سطح قطعه

۳- آخال های سطحی

شکستهایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می دهند شکستهای خستگی نامیده میشوند شکستها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می دهند هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی سستی بیشتر متداول است و عامل حداقل ۹۰ درصد شکستهای ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی باشد بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن رخ می دهد. خستگی به صورت

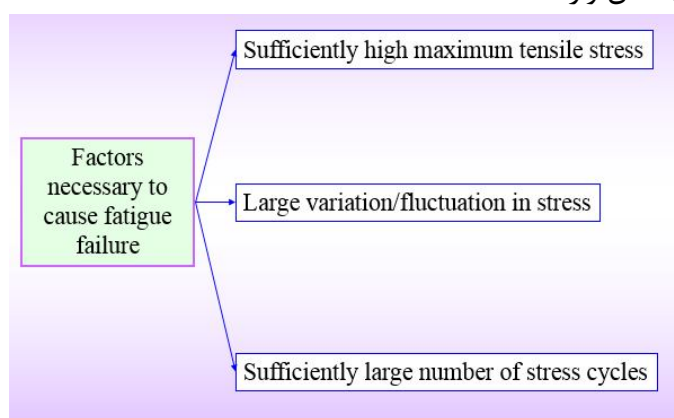
شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچگونه تغییر شکل نا خالص در شکست نتیجه میشود. معمولاً سطح شکست در مقیاس میکروسکوپی بر جهت تنش کششی اصلی عمود است. معمولاً سطح شکست خستگی از ظاهر سطح شکست تشخیص داده میشود، که از یک ناحیه هموار حاصل از عمل سایش با اشاعه ترک در مقطع و یک ناحیه ناهموار که در هنگام عدم تحمل بار توسط مقطع، در قطعه به صورت نرم شکسته شده است تشکیل می شود. غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می شود، که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می کند.

سه عامل عمده برای وقوع شکست خستگی ضروری هستند. این عوامل عبارتند از :

(۱) تنش کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد

(۲) تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده

(۳) زیاد بودن چرخه های تنش وارده



علاوه بر این متغیرهای دیگری مانند تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی، تنشهای باقیمانده و تنشهای مرکب هم وجود دارند که شرایط را برای ایجاد خستگی تقویت می کنند

۱. **شروع ترک :** شامل ایجاد اولیه عیب خستگی که با عملیات تابانیدن مناسب برطرف می شود.

۲. **رشد ترک نوار لغزش :** عبارت است از عمیق شدن ترک اولیه روی صفحات با تنش برشی زیاد، این مرحله غالباً رشد ترک مرحله ۱ نامیده می شود

۳. **شکست ترک روی صفحاتی با تنش کششی زیاد :** عبارت است از رشد یک ترک معین در جهت عمده بر تنش کششی حداکثر. این مرحله معمولاً رشد ترک مرحله ۲ نامیده می شود.

۴. **شکست نرم نهایی :** هنگامی رخ می دهد که طول ترک به اندازه کافی برسد، طوری که سطح مقطع باقیمانده نتواند بار وارده را تحمل کند.

- Stress concentration
- Corrosion
- Temperature
- Microstructure
- Residual stress
- Stress state

معمولا ترکهای خستگی در یک سطح آزاد شروع می شوند . در موارد نادری که ترکهای خستگی از قسمت داخلی شروع می شوند، همیشه مرزی ، مانند حد فاصلی که لایه سطحی کربوره شده و فلز اصلی ، باید وجود داشته باشد. عملا تمام شکستهای خستگی از سطح شروع می شوند. در بسیاری از انواع متداول بارگذاری ،مانند خمش و پیچش،تنش حداکثر در سطح رخ می دهد ،طوری که شروع شکست از آن مکان منطقی جلوه می کند . اما در بارگذاری محوری، شکست خستگی تقریبا همیشه از سطح شروع می شود

خواص خستگی فلزات کاملا به ساختار حساس است، استحکام خستگی با کاهش دما زیاد می شود.

حد خستگی فولادهای ریخته شده و کار شده تقریبا ۵۰ درصد استحکام نهایی کشش است . نسبت حد خستگی به استحکام کششی نسبت خستگی نامیده می شود. نسبت خستگی فلزات غیر آهنی مانند نیکل ،مس و منیزیم در حدود ۳۵درصد خواهد بود.کنش همزمان تنش چرخه ای و حمله شیمیایی به خستگی خوردگی موسوم است. حمله خورنده بدون حضور تنش غالبا در سطوح فلزی حفره ایجاد می کند . حفره ها مانند شیار عمل کرده و استحکام خستگی را کاهش می دهند. اما وقتی حمله خورنده همزمان با بار گذاری خستگی رخ دهد ، کاهش آشکاری در خواص خستگی نتیجه می شود که از کاهش خواصی که در اثر خوردگی قبلی سطح به وجود می آید ،بیشتر است . هنگامی که خوردگی و خستگی همزمان واقع شوند ،حمله شیمیایی سرعت اشاعه ترک خستگی را به شدت تسریع می کند.بنابراین فولاد زنگ نزن ،برنز یا آلیاژ مس _ بریلیم، احتمالا بهتر از فولاد عملیات حرارتی عمل خواهند کرد. حفاظت از فلز در برابر تماس با محیط خورنده توسط روکشهای فلزی و غیر فلزی موثر است، به شرط آنکه روکش در اثر کرنش چرخه ای پاره نشود. روکشهای روی و کادمیم بر فولاد و روکشهای آلومینیوم آلکالاد در بسیاری کاربردهای خستگی موثر هستند

تشکیل تنشهای باقیمانده فشاری سطح از باز شدن شیارهای سطحی و وارد شدن ماده خورنده جلوگیری می کنند . به ویژه نیتride کردن در مبارزه با خستگی موثر است و ساچمه زنی در شرایط خاص با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است

عوامل موثر در خستگی

عوامل زیر در تعیین حد تحمل و یا کاهش آن نقش دارد:

- ۱- دامنه تنش متناوب
- ۲- تعداد دفعات اعمال تنش (تعداد سیکل تنش N)
- ۳- سرعت اعمال تغییرات تنش
- ۴- شیارها و خراشها و تغییرات ضخامت و جوشها و دیگر ناپیوستگی ها مقاومت در مقابل خستگی را کاهش می دهد

۵- مقدار بالای اکسیژن در آب و یا در دماهای بالا میزان تحمل خستگی کاهش می یابد

۶- عواملی مثل کم شدن سطح مقطع و ارتعاش و..... تاثیر زیادی در کاهش حد خستگی دارند.

روشهای پیشگیری یا کنترل خستگی

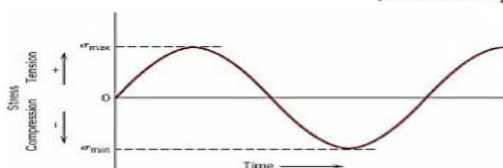
برای حذف یا کاهش ترکهای ناشی از خستگی کارهای زیر را می توان انجام داد:

۱- کنترل تنش های نوسانی: کم کردن و یا حذف بهره برداری نوسانی و طولانی کردن زمانهای راه اندازی و خواباندن

۲- کنترل عوامل محیطی: کاهش اکسیداسیون زیرا همانطور که در بالا اشاره شد افزایش اکسیژن سبب کاهش حد تحمل خستگی می شود. همچنین با کنترل PH نیز می توان میزان خستگی را کاهش داد طراحی مجدد قطعه: اگر قطعه ها دائما دچار خستگی می گردد و با تعویض آن نیز باز هم دچار خستگی می گردد باید برای آن منطقه متریال قطعه را عوض کنیم

انواع بارگذاری های تناوبی

۱- سیکل کاملاً برگشتی (alternating stress (fully reverse))

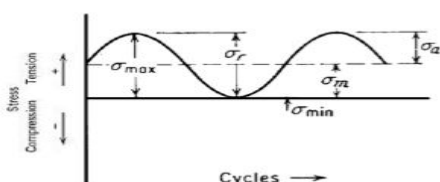


$$\sigma_m = 0$$

$$R = -1$$

$$A = \infty$$

۲- سیکل متغیر تکراری (repeated stress (pulsating tension))



$$\sigma_{\min} = 0$$

$$\sigma_m = 0.5\sigma_{\max} = 0.5\Delta\sigma$$

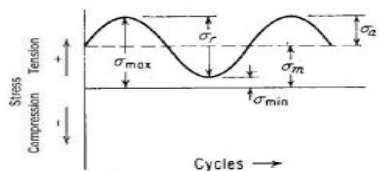
$$R = 0$$

$$\sigma_{\max} = \Delta\sigma$$

$$\sigma_m = \sigma_a$$

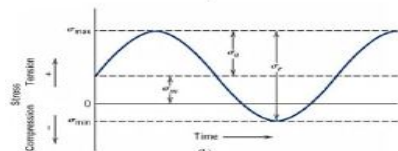
$$A = 1$$

۳- سیکل متغیر موجی از نوع کششی (fluctuating tension)

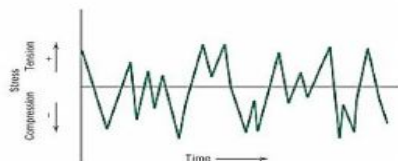


$$0 < R < 1$$

۴- سیکل متغیر موجی (fluctuating)



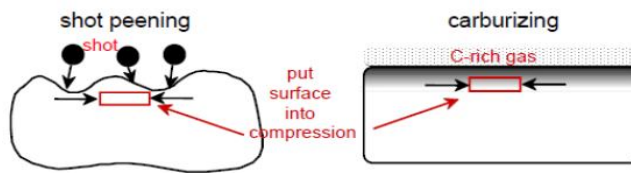
۵- بارگذاری بدون نظم مشخص



❖ زبری سطح (Roughness)

❖ کربن دهی و دکربوره شدن سطحی (Carburizing and Decarburizing)

❖ ساچمه زنی (Shot peening)



❖ نورد کردن سطحی (Surface Rolling)

❖ سایر روش‌های سخت کردن سطحی

❖ پوشش‌های سطحی

❖ تنش پسماند (Residual stress)

اندازه قطعه

درجه حرارت

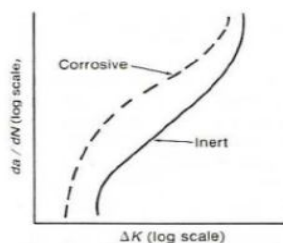
فرکانس

Under stressing/coaxing/ rest period

اثر فاق (شیار) یا مکان تمرکز تنش

❖ خستگی خوردگی (Corrosion Fatigue): خستگی تحت تاثیر محیط خورنده که مکانیزم مستقلی نسبت

به خستگی و خوردگی دارد را خستگی خوردگی گویند.



❖ خستگی گرمایی (Thermal fatigue): تغییرات تنش در اثر تغییرات دما بوجود می‌آید

$$\Delta\sigma = E\alpha\Delta T$$

اثر عوامل موثر بر خستگی

عوامل متالورژیکی

❖ ترکیب آلیاژ (عناصر محلول جامد و رسوبات)

❖ ریزساختار

❖ اندازه دانه

❖ انرژی نقص در چیده شدن

❖ همگن بودن ساختار

❖ ناخالصی‌ها

عوامل مختلف موثر در خستگی مواد

- ۱- تاثیرات مقاومت و شکل پذیری
- ۲- اندازه ناحیه پلاستیک
- ۳- رفتار مواد سازه ای
- ۴- دامنه بارهای متغیر و تعداد چرخه های بارگذاری و بار برداری
- ۵- تاثیرات محیطی و شرایط سطح
- ۶- نوسانات بارگذاری و تنش و ترکیبات آنها
- ۷- حداکثر تنش زیر مقاومت تسلیم
- ۸- تنشهای رفت و برگشتی
- ۹- تمرکز تنش و نرخ تنش
- ۱۰- تنشهای پسماند
- ۱۱- کار سرد
- ۱۲- خوردگی و خزش
- ۱۳- تغییرات حرارتی
- ۱۴- ناخالصی متالوژیکی مواد
- ۱۵- ساختار متالوژیکی مواد
- ۱۶- عدم استحکام کششی

روشهای بررسی خستگی

- ۱- روش طول عمر تنش STRESS-LIFE METHOD
- ۲- روش طول عمر کرنش STRAIN-LIFE METHOD
- ۳- روش مکانیک شکست کشسان خطی LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS METHOD
- ۴- روش گسترش ترک CRACK PROPOGATION METHOD
- ۵- روش ارتعاشات VIBRATION FATIGUE

دلایل شکست ناشی از خستگی در سازه های فولادی

۱. عدم استحکام کششی مناسب ماده استفاده شده در سیکل های بارگذاری و باربرداری وارد
۲. تناوب بالا در میزان و نرخ تنش وارده به المان
۳. بالا بودن تعداد چرخه های بارگذاری و باربرداری بر قطعه
۴. تمرکز تنش در نقاط و یا سطوح المان
۵. تغییرات شدید دما که ناشی از گرادیان های حرارتی بالا باشند
۶. ناخالصی در ساختار متالوژیکی مواد
۷. ساختار متالوژیکی مواد و نوع عمل آوری
۸. تنش های پسماند موجود در المان ناشی از ساخت و نصب

مراجع

1-The Fatigue Module of ANSYS Mechanical

2- Assessment of Existing Steel Structures:Recommendations for Estimation ofRemaining Fatigue Life

3- Mechanisms of fatigue crack growth – a critical digest of theoretical developments

۴- دکتر قدیمی چرمهینی ، دکتر مجید جباری، خستگی و شکست در جامدات

5-Fatigue design according to EN-1993-1-9

6-Fatigue testing and analysis, theory and practice-Elsevier 2005

7- Design Against Fatigue Failure

8-Fatigue Design and reliability- Elsevier

9-Fatigue life analysis of welded structures 2006

Fracture mechanics and fatigue in steel structures

Fatigue is one of failure mode that will be happened when dynamic force induce to the structures and value, direction of force vector will be changed during the time.

Section fracture will be occurred before yield stress or ultimate strength. Fracture will be formed after a lot of long oscillations in force cycles so it will be takes some time for section failure because of brittle fracture by fatigue phenomenon. There is no sign of large deformations through section and fracture has sign of crack growth