پیامد و هزینه‌های پدیده خوردگی

هادی عادل‌خانی[1]

چکیده

تخریب یک سازه یا قطعه به واسطه واکنش با محیط اطراف، خوردگی نام دارد. در مراحل طراحی، ساخت، تولید و بهره‌برداری از یک سازه، پدیده خوردگی به عنوان عاملی مزاحم شناخته می‌شود. در هر یک از این مراحل، پدیده خوردگی اثر خود را بر کارایی و عمر سازه و در نتیجه ایجاد هزینه نمایان می‌سازد. برای حفاظت از خوردگی قطعه‌ها و سازه‌ها هزینه‌های زیادی به صورت مستقیم و غیر مستقیم اختصاص می‌یابد. طبق آمار موجود، زیان ناشی از خوردگی حدود دو تا شش درصد تولید ناخالص ملی هر کشور است. بنابراین آشنایی با این پدیده و روش‌های جلوگیری از آن اهمیت زیادی دارد. در این مقاله ضمن معرفی این پدیدهٔ مخرب به روش‌های مقابله با آن اشاره خواهد شد. همچنین هزینه‌هایی که این پدیده در صنایع مختلف ایجاد می‌کند مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: خوردگی، محیط‌های خورنده، هزینه‌های خوردگی.

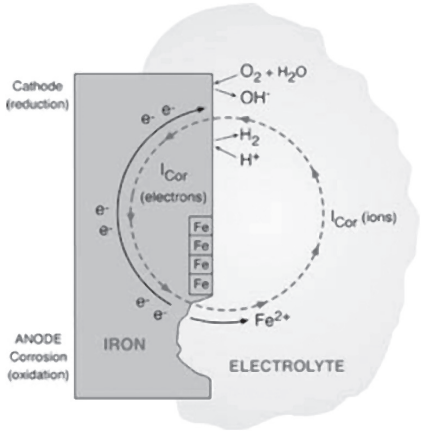
مقدمه

پدیده خوردگی طبق تعریف، واکنش بین یک ماده و محیط اطراف آن است که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد. این پدیده در تمامی مواد (فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها) اتفاق می‌افتد، اما در فلزات فراگیرتر است و اثرات مخرب و ملموس‌تری را به جا می‌گذارد. از این رو هرگاه صحبت از خوردگی می‌شود، خوردگی یک فلز به ذهن متبادر می‌شود. در شکل (۱) نمونه‌هایی از پدیده خوردگی در سازه‌های مختلف به نمایش در آمده است. بر این اساس قابل پیش‌بینی است که پدیده خوردگی موجب از دست رفتن کارایی هر یک از سازه‌ها می‌شود (وب‌سایت انجمن خوردگی ایران).

۱ . استادیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، adelkhani@hotmail.com

شکل ۱- نمونه‌هایی از پدیده خوردگی

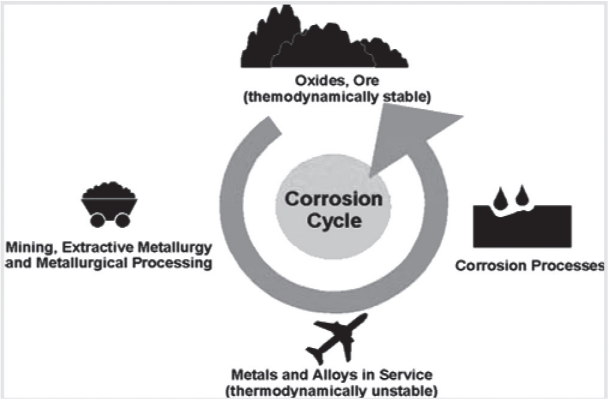
اغلب پدیده خوردگی با تشکیل یک پیل الکتروشیمیایی و انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی اتفاق می‌افتد. واکنش‌های الکتروشیمیایی واکنش‌هایی هستند که در آن نقل و انتقال الکترون صورت می‌گیرد. الکترودها (آند و کاتد)، الکترولیت و مدار خارجی اجزای اصلی تشکیل‌دهنده یک پیل الکتروشیمیایی هستند. الکترودهای آند و کاتد به ترتیب محل انجام واکنش آندی (خوردگی یا انحلال فلز) و انجام واکنش کاتدی (کاهش یا احیاء) هستند. برقراری هدایت الکتریکی از طریق برقکاف (الکترولیت) اتفاق می‌افتد. برقکاف به عنوان محیط خورنده نیز عمل می‌کند. مدار خارجی برقرارکنندهٔ ارتباط و اتصال الکتریکی بین آند و کاتد برای جابه‌جایی الکترون است. در پدیده خوردگی، محل وقوع واکنش‌های آندی و کاتدی می‌تواند به صورت هم‌زمان در سطح یک قطعه اتفاق بیافتد (شکل ۲). در این حالت در یک قسمت از فلز، واکنش کاتدی شامل احیای اکسیژن یا احیای یون هیدروژن (پروتون) اتفاق می‌افتد. در قسمت دیگر فلز، واکنش خوردگی یا همان اکسیداسیون فلز ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$) انجام می‌شود. انتقال الکترون‌ها از طریق بدنه الکترود (فلز) به عنوان مدار خارجی صورت می‌گیرد و هدایت الکتریکی در محلول از طریق برقکاف برقرار شده است (فونتانا، ۱۹۸۵ و Roberge, 1999).



شکل ۲- تشکیل یک پیل الکتروشیمیایی در سطح یک قطعه

چرخه خوردگی

معمولاً فلزات در طبیعت به صورت ترکیبات اکسیدی، نیتراتی، کلریدی، سولفاتی و... یافت می‌شوند. به بیان دیگر شکل طبیعی و پایدار فلزات به صورت کاتیونی است. طی فرایند استخراج، با صرف انرژی، فلزات احیا شده (دریافت الکترون) و آمادهٔ استفاده در سازه‌های مختلف می‌شوند. در این حال فلز از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است و تمایل به از دست دادن الکترون (اکسیداسیون) و تبدیل شدن به کاتیون (حالت اولیه موجود در طبیعت) دارد. اکسیداسیون که با از دست رفتن خواص فیزیکی و مکانیکی فلز و ناکارآمد شدن سازه همراه است، همان فرایند خوردگی است. بنابراین خوردگی پدیده‌ای خود به خودی است برای تبدیل فلزات به حالت پایدار خود در طبیعت است. این تحولات در شکل (۳) به صورت چرخه خوردگی به نمایش درآمده است. بر اساس این چرخه، فلزات از لحاظ ترمودینامیکی در جهتی واکنش می‌دهد که به محصولات خوردگی (حالت پایدارتر) تبدیل شوند (فران هوفر، ۱۹۷۴).



شکل ۳- چرخه خوردگی

واکنش‌های کاتدی و آندی در خوردگی

در خوردگی واکنش‌های اکسایش (آندی) و کاهش (کاتدی) بایستی در یک زمان و با سرعت یکسان اتفاق بیافتند. واکنش آندی در اغلب موارد عبارت است از اکسیداسیون فلز که با تولید کاتیون و از بین رفتن ساختار فلزی همراه است (واکنش‌های ۱ الی ۳).

(1) $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$

(2) $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

(3) $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$

بر خلاف واکنش آندی، واکنش‌های کاتدی مختلفی، بر حسب شرایط محیطی، در خوردگی

اتفاق می‌افتد. مهم‌ترین این واکنش‌ها عبارتند از آزاد شدن هیدروژن (واکنش ۴) و احیای اکسیژن (واکنش ۵).

$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2(g)$ (واکنش ۴)

$O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O(l)$ (واکنش ۵)

محیط‌های خورنده

این واکنش‌ها در محیط‌های مختلف اتفاق می‌افتند که آن محیط تحت عنوان محیط خورنده شناخته می‌شوند. هوا (اتمسفرهای روستایی، شهری و صنعتی)، آب (بخار و رطوبت، آب مقطر، آب نمک‌دار و معدنی)، گازها (کلر، آمونیاک، سولفور هیدروژن، دی اکسید گوگرد و گازهای سوختنی)، اسیدهای معدنی (اسید کلریدریک، سولفوریک، و نیتریک)، اسیدهای آلی (اسید استیک و فرمیک)، خاک، حلال‌ها، روغن‌ها و مواد نفتی از جمله محیط‌های خورنده هستند که در آنها خوردگی اتفاق می‌افتد ولی قدرت و میزان خوردگی در آنها متفاوت است. در حالت کلی مواد معدنی خورنده‌تر از مواد آلی هستند. مثلاً خوردگی در صنایع نفت بیشتر در اثر سدیم کلرید، گوگرد، اسید سولفوریک و اسید کلریدریک و آب است تا به واسطه روغن، نفت و بنزین.

طبقه‌بندی انواع خوردگی

دسته‌بندی‌های متنوعی برای انواع خوردگی وجود دارد. در طبقه‌بندی خوردگی بر حسب محیط می‌توان به خوردگی در هوا (اتمسفرهای روستایی، شهری و صنعتی، بخار و رطوبت)، خوردگی در آب (آب مقطر، آب دریا، آب بویلر، آب معدنی و ...)، خوردگی در مایعات (روغن، مواد نفتی و حلال‌ها) خوردگی در محیط‌های گازی، خوردگی در مذاب (فلزات و نمک‌های مذاب) و خوردگی درخاک اشاره کرد. در تقسیم‌بندی خوردگی بر حسب دما، خوردگی دمای پایین و دمای بالا وجود دارد. با توجه به اهمیت و کاربرد وسیع آب، بر حسب حضور و یا نبود آب، خوردگی در محیط تَر و خوردگی در محیط خشک نیز قابل دسته‌بندی است.

در طبقه‌بندی خوردگی بر حسب شکل ظاهری قطعه خورده شده (شکل ۴)، ملاک تغییرات شکل ظاهری قطعه است. شکل ظاهری آن چیزی است که با چشم مسلح و یا غیر مسلح قابل مشاهده است. بر این اساس خوردگی به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود (فونتانا، ۱۹۸۵).

۱- خوردگی یکنواخت[1]

این نوع خوردگی متداول‌ترین نوع خوردگی است که در آن عوامل خوردنده به صورت یکنواخت به سطح سازه حمله می‌کند (شکل ۴-a). در نتیجه سطح سازه به صورت یکنواخت خورده می‌شود و کاهش ضخامت در تمام نقاط نمونه تقریباً یکسان خواهد بود.

1. Uniform Corrosion

۲- خوردگی حفره‌ای [1]

در خوردگی حفره‌ای نقاط کوچکی از سازه خورده می‌شود و سایر نقاط نمونه چندان آسیب نمی‌بینند. در نقاط خورده شده حفره‌هایی ایجاد می‌شود. معمولاً عمق این حفره‌ها برابر یا بیشتر از قطر آنهاست. در صورتی که تعداد حفره‌ها زیاد باشد، احتمال تخریب کامل سازه وجود دارد (شکل b-۴).

۳- خوردگی شکافی یا شیاری [2]

این نوع خوردگی در داخل شکاف‌ها، درزها و شیارهای زیر واشر پیچ، مهره‌ها و میخ‌های پرچ اتفاق می‌افتد. در این شرایط، حجم‌های کوچک از محلول یا مایعات در درون شیار یا درزها محبوس می‌شود و حالت مرده یا ساکن پیدا می‌کند (شکل c-۴).

۴- خوردگی دو فلزی[3]

خوردگی دو فلزی (گالوانیکی) زمانی اتفاق می‌افتد که دو جزء غیر همجنس (دو فلز، آلیاژ و یا دو ماده متفاوت دیگر همانند الیاف کربن و فلز) در حضور یک محلول خورنده در تماس الکتریکی با یکدیگر داشته باشند. در این حال جزء نجیب به عنوان کاتد و جزء فعال به عنوان آند خورده خواهد شد (شکل d-۴).

۵- فرسایش- خوردگی [4]

این نوع خوردگی زمانی اتفاق می‌افتد که سازه در معرض حرکت سیال باشد. با توجه به خورنده بودن سیال و نیز حرکت سیال سطح سازه از بین برود و خورده شود. هم‌زمانی خوردگی و فرسایش (براثر حرکت سیال) باعث تشدید تخریب سازه می‌شود (شکل e-۴).

۶- کاواک‌زائی [5]

در بعضی سازه‌ها (توربین‌ها، پره‌ها و پمپ‌ها) حباب‌هایی در سطح ایجاد می‌شود. هنگام ترکیدن این حباب‌ها، تنش‌های مکانیکی به سطح سازه اعمال می‌شود که موجب از بین رفتن لایه محافظ سطحی می‌شود (شکل f-۴). حال اگر محیط قدرت خورندگی نیز داشته باشد، خسارت کاواک‌زائی ناشی از تأثیر هم‌زمان خوردگی و تنش‌های مکانیکی باعث تخریب سازه می‌شود.

۷- ایجاد ترک ناشی از خوردگی تنشی [6]

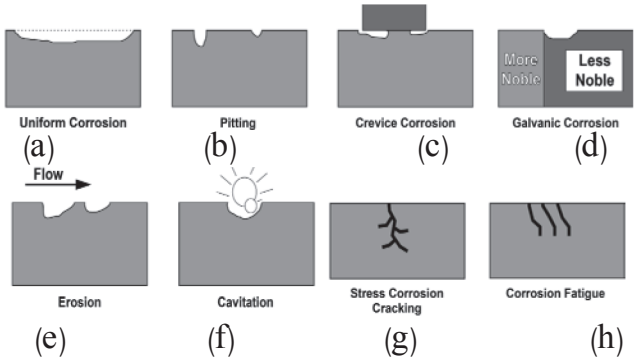
این نوع خوردگی در واقع خوردگی همراه با تنش است. تنش‌های کششی و محیط خورنده هر کدام به تنهایی تأثیراتی در تخریب فلز دارند، اما تجمیع این دو عامل باعث افزایش این تأثیر و

1. Pitting Corrosion
2. Crevice Corrosion
3. Galvanic Corrosion
4. Erosion Corrosion
5. Cavitations
6.Stress Corrosion Cracking (SCC)

تخریب سریع سازه می‌شود. معمولاً ترک‌ها در جهت عمود بر جهت تنش به دو صورت بین دانه‌ای[1] و فرادانه‌ای[2] ایجاد می‌شوند (شکل ۴-g)

۸- خوردگی خستگی [3]

اگر یک سازه فلزی در معرض تنش‌های مکرر و متناوب (کششی و فشاری) قرار گیرد، ترک‌هایی در فلز ایجاد می‌شود. با عبور از حد خستگی، سازه دچار شکستگی می‌شود. حد خستگی یک فلز عبارت است از حداقل تنش لازم برای شکست فلز در اثر تنش‌های متناوب. حال اگر فلز در محیط خورنده قرار گیرد، حد خستگی آن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که این پدیده تحت عنوان خوردگی خستگی شناخته می‌شود (شکل ۴-h).



شکل ۴ - دسته بندی خوردگی از نظر ظاهری

۹- خسارت‌های هیدروژنی [4]

خسارت‌های هیدروژنی، اصطلاحی کلی است که دلالت بر خسارت و آسیب‌های مکانیکی وارد شده به فلز در اثر حضور هیدروژن دارد. در واکنش‌های کاتدی در مراحل اولیه احیای پروتون هیدروژن اتمی تولید می‌شود ($H^+ + e^- \rightarrow Had$). در مراحل بعد گونه‌های Had با یکدیگر ترکیب و گاز هیدروژن تولید می‌شود ($2Had \rightarrow H_2$). بر اثر نفوذ هیدروژن اتمی چهار نوع خسارت‌های هیدروژنی شامل تاول هیدروژنی[5] ، ترد شدن هیدروژنی[6] ، زدایش کربن[7] و حملهٔ هیدروژنی[8] قابل مشاهده است.

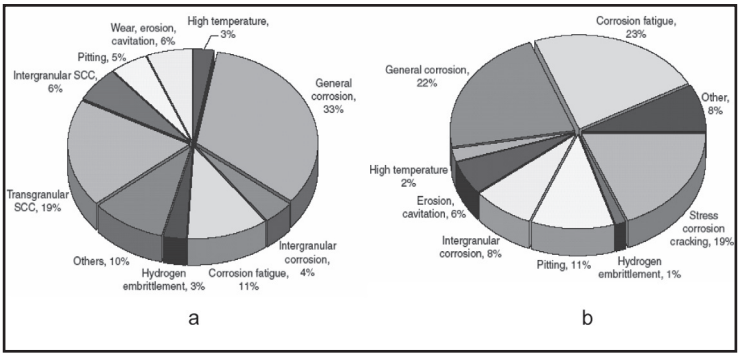
1. Intergranular, IG
2. Transgranular, TG
3. Corrosion Fatigue
4. Hydrogen damage
5. Hydrogen blistering
6. Hydrogen embrittlement
7. Decarburizing
8. Hydrogen attack

۱۰- خوردگی بیولوژیکی[1]

از بین رفتن یا انهدام یک سازه از طریق فرایندهای خوردگی که به طور مستقیم یا غیرمستقیم، نتیجه فعالیت موجوداتی همانند باکتری‌ها وجلبک‌ها باشد در گروه خوردگی بیولوژیکی دسته‌بندی می‌شود. یکی از مهم‌ترین عوامل خوردگی‌های بیولوژیکی باکتری‌های احیاکننده سولفات[2] هستند. این باکتری‌ها با تبدیل سولفات (-SO42) به سولفید (-S2)، موجب تسریع در سرعت خوردگی با گذشت زمان می‌شوند.

تاثیرات عوامل محیطی بر خوردگی

همانطور که اشاره شد، خوردگی عبارت است از برهم‌کنش یک ماده با محیط اطراف که نتیجه نهایی آن تخریب سازه است. بر این اساس شرایط محیط از جمله ترکیب الکترولیت، عوامل مکانیکی و دما می‌تواند آثار قابل توجهی بر نوع فرایند خوردگی و اثرات وابسته به آن داشته باشد. در شکل (۵) سهم انواع خوردگی در دو کشور آلمان و آمریکا به نمایش در آمده است. مشاهده می‌شود که شرایط صنعتی- اقلیمی بر سهم هریک از انواع خوردگی نیز تأثیر دارد. بنابراین در یک سازه، عوامل محیطی و چگونگی تأثیر این عوامل بر خوردگی سازه باید به صورت دقیق مشخص شود. اطلاع از آثار این عوامل در پیش‌بینی خوردگی، پیشنهاد روش‌های کاهش خوردگی و خسارت‌های ناشی از آن کمک مؤثر خواهد داشت (وب‌سایت فدارسیون خوردگی اروپا).



شکل ۵ - نحوه توزیع انواع خوردگی در دو کشور (a) آلمان و (b) آمریکا

روش‌های مقابله با خوردگی

در مقابله با خوردگی روش‌های مختلفی وجود دارد که در اینجا به صورت کلی معرفی می‌شوند (زمانیان، ۱۳۷۴).

1. Biological Corrosion
2.Sulfate Reducing Bacteria (SRB)

۱- انتخاب مواد مناسب

با توجه به شرایط محیطی سازه (اسیدی یا قلیایی بودن، مرطوب یا خشک بودن و ...) باید ماده‌ای برای سازه انتخاب شود که دارای حداقل سرعت خوردگی در آن محیط باشد. این روش از مهم‌ترین روش‌های مقابله با خوردگی محسوب می‌شود، اما همیشه امکان‌پذیر نیست، چرا که محدودیت‌هایی در قابلیت، کارایی و خواص مواد وجود دارد (استحکام، قابلیت ریخته‌گری و شکل‌پذیری، خواص حرارتی، الکتریکی، مغناطیسی و ...)، که برای کاربرد مد نظر مناسب باشد.

۲- ایجاد شرایط محیطی مناسب

اگر امکان انتخاب ماده مناسب وجود نداشته باشد، راهکار بعدی برای مقابله با خوردگی تغییر شرایط محیطی (ترکیب الکترولیت یا اتمسفر، اسیدیته محیط، دما و عوامل مکانیکی) است. این روش نیز همانند قبلی با محدودیت‌هایی از نظر شرایط کاربری سازه روبه‌رو است.

۳- استفاده از پوشش‌های مقاوم

پوشش عبارت است از ایجاد یک لایه با ضخامت مشخص بر سطح سازه مورد نظر (به عنوان زیر لایه) به طوری که این لایه توانایی ممانعت و محافظت زیر لایه را در برابر عوامل خورنده داشته باشد. در حالت کلی پوشش‌ها به سه دسته پوشش‌های آلی، پوشش‌های معدنی و پوشش‌های فلزی تقسیم‌بندی می‌شوند. امروزه امکان تهیه پوشش‌هایی که به صورت مخلوطی از این سه نوع هستند بسیار متداول و مرسوم است و تحت عنوان پوشش‌های هیبریدی و یا کامپوزیتی شناخته می‌شود. رنگ‌کاری، آب‌کاری، آندایزینگ، فسفات‌کاری، کرومات‌کاری و لعاب‌کاری و ... از جمله روش‌های معمول و مرسوم برای ایجاد پوشش (معدنی، آلی، فلزی و کامپوزیتی) است.

۴- استفاده از بازدارنده‌ها

بازدارنده‌ها به عنوان موادی شناخته می‌شوند که به مقدار کم به محیط اضافه و موجب کاهش سرعت خوردگی سازه می‌شوند. به بیان دیگر بازدارنده‌ها با تغییر در شرایط محیطی برای عوامل خورنده و سازه، در محافظت خوردگی مشارکت می‌کنند. این روش در محیط بسته همانند سیستم‌های تبادلگر حرارتی[1] به کار می‌رود.

۵- حفاظت کاتدی

در روش حفاظت کاتدی با تشکیل و ایجاد یک پیل الکتروشیمیایی، سازه مورد نظر به عنوان کاتد درمی‌آید و واکنش‌های کاتدی سل در سطح آن انجام می‌شود. تبدیل سازه مورد نظر به کاتد به دو روش اعمال پتانسیل خارجی و یا استفاده از آند فداشونده [2] انجام می‌شود. لوله‌های انتقال نفت و گاز اغلب با این روش محافظت می‌شوند.

1. Heat Exchanger
2. Sacrificial anode

۶- حفاظت آندی

در این روش با تشکیل یک پیل الکتروشیمیایی، سازه مورد نظر به عنوان آند عمل می‌کند. اعمال پتانسیل به آند به گونه‌ای خواهد بود که نمونه در منطقه روئین قرار گیرد. در نتیجه جریان خوردگی و یا سرعت خوردگی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بدیهی است که این روش برای حالتی مناسب است که سازه مورد نظر (الف) قابلیت روئین شدن داشته باشد، (ب) منطقه پتانسیل روئین[1] آن به مقدار کافی گسترده باشد و (ج) منطقه روئین جریان الکتریکی کمی داشته باشد. این روش برای تانکرهای نگهداری اسید (اسید سولفوریک) مناسب است.

۷- طراحی مناسب سامانه‌ها

در مواردی طراحی نامناسب سازه به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر خوردگی مطرح است. به عنوان مثال وجود نقاط تیز و یا پیچ‌های تند در لوله‌های انتقال مواد به خوردگی و تشدید آن کمک کند.

هزینه‌های خوردگی

پدیده خوردگی به عنوان عاملی مزاحم در مراحل طراحی، ساخت، تولید و بهره‌برداری از یک سازه، هزینه‌هایی را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین جهت حفاظت از خوردگی هزینه‌ها به صورت مستقیم و غیر مستقیم صرف می‌شود. بخشی دیگر از هزینه‌ها صرف پژوهش در حوزه‌های مربوط به فناوری‌های خوردگی است.

پیامدهای خوردگی

در جدول (۱) پیامدهای پدیده‌ای خوردگی در دو بخش هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم ارائه شده است.

جدول ۱ - پیامد های پدیده خوردگی

هزینه‌های مستقیم	• هزینه تعمیر، نگهداری، جایگزینی و تعویض سازه‌ها؛ • هزینه تهیه و ساخت قطعه‌هایی با مقاومت خوردگی بیشتر؛ • هزینه حفاظت از خوردگی و کاهش سرعت خوردگی با استفاده از روش‌های متداول.
هزینه‌های غیر مستقیم	• هدر رفتن مواد؛ • هدر رفتن انرژی؛ • تخریب محیط زیست؛ • از کار افتادن؛ • خطرهای جانی و کاهش ایمنی؛ • کاهش بازدهی؛ • هدر رفتن محصولات[1] ؛ • آلوده شدن محصولات.

1. Passive

بر اساس آمار منتشر شده، در بخش هزینه‌های مستقیم در کشور آمریکا نزدیک به ۴۰ درصد تولید فولاد، صرف جابه‌جایی قطعه‌های خورده شده می‌شود. همچنین در صنعت نفت این کشور، به ازای هر روز، ۲ میلیون دلار هزینه تعویض سازه‌های زیرزمینی به علت خوردگی است. غالباً هزینه‌های مستقیم خوردگی مورد توجه قرار می‌گیرد و به هزینه‌های غیرمستقیم اقتصادی که این پدیده بر صنایع اعمال می‌کند توجه کمتری می‌شود. به عنوان مثال اگر در یک فرایند تولید، قطعه‌ای دچار خوردگی شود، هزینه مستقیم عبارت است از هزینه تعمیر یا تعویض قطعه در حالی که هزینه‌های غیر مستقیم عبارت است از هزینه تعطیلی خط تولید و موارد مشابه. نکته مهم دیگر اینکه برآورد هزینه‌های اقتصادی غیرمستقیم خوردگی بسیار مشکل و پیچیده‌تر از هزینه‌های مستقیم است. در اینجا به برخی از موارد هزینه‌های غیرمستقیم اشاره می‌شود.

۱- از کار افتادن [۲]

در یک نیروگاه یا راکتور، تعویض یک لوله خورده شده شاید هزینه‌های چند صد دلاری را ایجاد کند که جزء هزینه‌های مستقیم خوردگی محسوب می‌شود. اما اگر تعویض این قطعه مستلزم تعطیل شدن نیروگاه و یا راکتور شود، هزینه غیرمستقیم خوردگی به چند میلیون دلار به ازای هر روز تعطیلی خواهد رسید.

۲- هدر رفتن محصولات [۳]

از دست رفتن نفت، گاز و یا محصولات یک مجتمع به دلیل خوردگی در سیستم نیز جزء هزینه‌های غیر مستقیم خوردگی است. مباحث آلودگی محیط زیست نیز از عوارض این اتفاق خواهد بود.

۳- کاهش بازدهی [۴]

این پیامد به واسطه محصولات خوردگی و ایجاد اختلال در کارکرد یک دستگاه اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال تجمع محصولات خوردگی در تبادلگرهای حرارتی، موجب کاهش بازدهی این تجهیزات می‌شود. یک مثال دیگر کاهش کارایی پمپ‌ها به واسطه خوردگی در پروانه پمپ‌ها است.

۴- آلوده شدن محصولات [۴]

در فرایند تولید و یا انبار یک محصول، اگر خوردگی اتفاق بیافتد می‌تواند آلودگی محصول اتفاق بیافتد. در صنایع غذایی و دارویی این آلودگی از درجه اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. آلوده

1. Loss of Product
2. Shutdown
3. Loss of Product
4. Loss of Efficiency
4. Contamination of Product

شدن آب آشامیدنی به واسطه خوردگی در لوله های انتقال آب و یا آلوده شدن مواد غذایی کنسرو شده به واسطه خوردگی در قوطی‌های بسته‌بندی از جمله این موارد است.

۵- اثرات تخریبی بر محیط زیست

این پیامد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌توان گفت که آن بخش از هزینه‌ها و خسارت‌های خوردگی است که تا حدود زیادی جبران‌ناپذیر است.

۶- خطرهای جانی و کاهش ایمنی

در بخش خطرهای جانی و کاهش ایمنی، می‌توان به موارد متعددی اشاره کرد که خوردگی با تلفات انسانی همراه بوده است. به عنوان مثال، انفجار بوپال هندوستان در سال ۱۹۸۴، به دلیل خوردگی در دیواره تانک متیل سیانات و نشت آب به داخل مخزن است. کاتیون‌های آهن (محصولات خوردگی) به عنوان کاتالیزور عمل کردند که نتیجه آن تسریع در واکنش آب با متیل سیانات، افزایش شدید دما و فشار در درون تانک و در نتیجه انفجار تانک بود. در این حادثه بیش از ۲ هزار نفر کشته شدند و تعداد مجروحان حدود ۴۰۰ هزار نفر تخمین زده می‌شود. در جدول (۲) به مواردی دیگر از این پیامد ها اشاره شده است.

جدول ۲ – پیامدهای زیست محیطی خوردگی

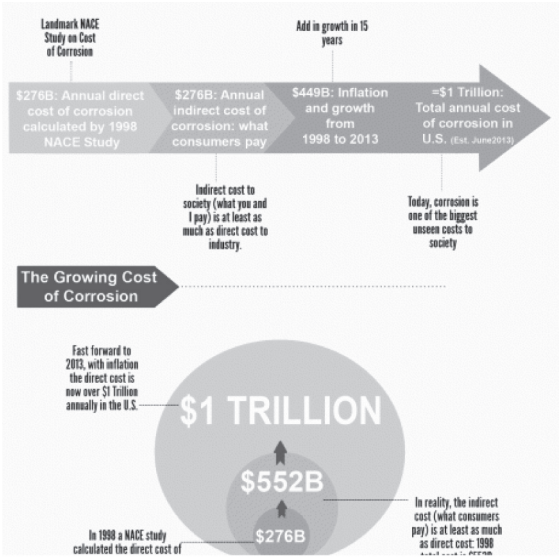
Year	Place	Accident	Probable reason	Results
1967	USA	Sinking of *River Queen* ship	Pitting corrosion of the ship's bottom	Sinking
1970	North Sea	Platform collapse	Stress corrosion cracking (SCC)	Huge life and material loss
?	Ohio River (USA)	Collapse of the bridge "Silver Bridge"	SCC	Huge life and material loss
1985	Switzerland	Collapse of the 200-ton concrete ceiling of an indoor swimming pool	SCC type corrosion in stainless steel bars holding the ceiling, due to existing chlorine ions	12 people died, some others injured
1996	Mexico	Fire and explosion	Petrol leaking from a valve on a 1,300m^3 storage tank caught fire, causing the tank to explode	Four people died and 16 injured. The Red Cross attended to 950 people and 10,000 were evacuated. It took two days to bring the fire under control
1997	Canada	Spill of over 35,000 litres of oil in one night	A leak in a damaged pipeline owned by Mobil oil	Large scale environmental pollution
1997	Russia	Leakage of over 1,200 tons of oil	Leakage from a ruptured pipeline	About 400 tons of the oil spilled into the River Volga. A dam was built in a tributary of the river to prevent further pollution

۷- هزینه خوردگی در کشورهای مختلف

بر اساس آمار منتشر شده در سال ۱۹۹۸، در آمریکا هزینه مستقیم سالانه خوردگی حدود ۳/۱ درصد درآمد ناخالص ملی[1] و در حدود ۲۷۶ میلیارد دلار بوده است. در همین حال هزینه‌های غیر مستقیم خوردگی نیز نزدیک به ۲۷۶ میلیارد دلار تخمین زده شده است که در نتیجه هزینه‌های

1. GNP

کل خوردگی برابر با ۵۵۲ میلیارد دلار برآورد شده است (شکل ۶). اگر این نکته را در نظر بگیریم که هر جایی که یک سازه (فلزی و یا مواد دیگر) مورد استفاده قرار گیرد، خوردگی اتفاق می‌افتد، هزینه‌های خوردگی چندان غیر منتظره نخواهند بود. پیش‌بینی شده که هزینه‌های کل خوردگی در سال ۲۰۱۳، در کشور آمریکا به حدود ۱۰۰۰ میلیارد دلار خواهد رسید که حدود ۶/۱ درصد تولید ناخالص ملی این کشور است (وب‌سایت انجمن بین‌المللی مهندسان خوردگی آمریکا).



شکل ۶– هزینه های خوردگی در کشور آمریکا

در جدول (۳) هزینه‌های مستقیم خوردگی برای چند کشور ارائه شده است. بر اساس این اطلاعات، در کشورهای مختلف هزینه‌های خوردگی بین ۱/۵ الی ۵/۲ درصد درآمد ناخالص ملی تغییر می‌کند. آگاهی از هزینه‌های هنگفت خوردگی و صرفه‌جویی در این هزینه‌ها موجب به‌کارگیری صحیح فناوری‌های موجود و کاهش هزینه‌ها می‌شود. از این رو، بسیاری از مشکلات خوردگی در نتیجه فقدان آگاهی از مدیریت خوردگی و مسئولیت‌پذیری اشخاص در تبادل عملیات، بازرسی، تعمیر و نگهداشت سیستم مهندسی است.

جدول ۳– هزینه‌های مستقیم خوردگی در چند کشور

Country	Year	Direct economic loss
USA	1949	5.5 ($ billion)
	1966	10 ($ billion)
	1967	8 ($ billion)
	1975	70 ($ billion)
	1979	70-82 ($ billion)
	1988	200 ± 30% ($ billion)
	1994	300 ($ billion)
Germany	1968-1969	19 (DM billion)
	1978	45 (DM billion)
	1988	85 (DM billion)
	1994	117 (DM billion)
Canada	1979	10 ($ billion)
Australia	1973	470 (A$ million)
UK	1971	1,365 (£ million)
India	1970s	1 ($ million)
Pakistan	1970s	5 ($ million)
Israel	1970s	1.5 ($ million)
Egypt	1970s	1 ($ million)
Japan	1970s	3 ($ million)
Iran	1970s	Min. Approx. 10 ($ million)
	1373[a]	Min. Approx. 5,000 (Rls billion)
	1375[b]	Min. Approx. 9,000 (Rls billion)[c]

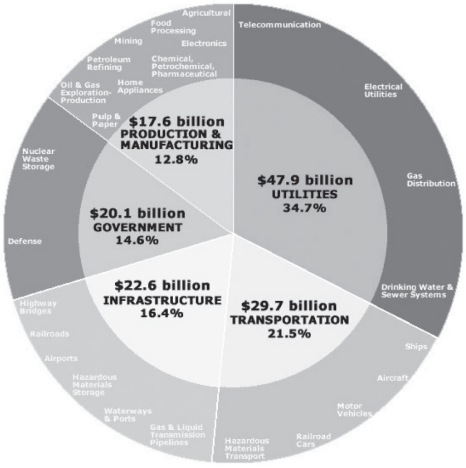
در ایران نیز پدیده خوردگی خسارت‌های قابل توجهی را در صنایع گوناگون به وجود آورده است. تخمین‌ها برای هزینه مستقیم خوردگی در ایران بیش از ۵ درصد درآمد ناخالص ملی در کشور است. متأسفانه آمار رسمی راجع به هزینه‌های خوردگی در ایران هنوز ارائه نشده است و آمار ارائه شده در جدول (۲) برای ایران، به صورت تقریبی و غیر رسمی است. بر این اساس زیان اقتصادی مستقیم ناشی از خوردگی در ایران در سال ۱۳۷۳، حدود ۵۰۰۰ میلیارد ریال، در سال ۱۳۷۵، حدود ۹۰۰۰ میلیارد ریال و در سال ۱۳۷۹، حدود ۲۷۵۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است (Javaherdashti, 2000).

هزینه خوردگی در صنایع مختلف

آنچه که مسلم است خوردگی در همه جا اتفاق می‌افتد، اما می‌توان در یک دسته‌بندی بر حسب نوع صنعت، نیز خوردگی در صنایع مختلف را دنبال کرد. خوردگی در صنایعی مانند نفت، تولید برق و الکتریسیته، کارخانه‌ها و صنایع سنگین تولیدی (ذوب آهن، فولادسازی و غیره)، حمل و نقل ، آب و فاضلاب، صنایع نظامی و سایر صنایع وجود دارد. در کشور آمریکا برای ارزیابی هزینه‌های خوردگی، بخش صنعت به ۵ بخش اصلی شامل بخش‌های زیر بنایی[۱] ، عمومی[۲] ، حمل و نقل[۳] ، تولید و ساخت[۴] و حاکمیتی[۵] تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۷). بر اساس آمار منتشر شده، هزینه

1.Infrastructure
2.Utilities
3. Transportation
4. Production and manufacturing
5. Government

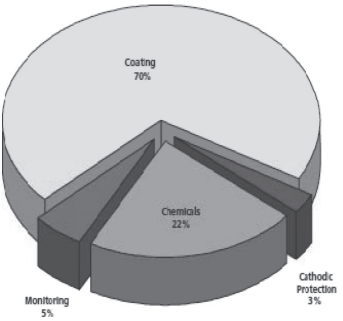
مستقیم این بخش‌ها برابر با ۱۳۷/۹ میلیارد دلار در سال است و سهم هر بخش در شکل (۷) به نمایش در آمده است. در ادامه به هزینه‌های خوردگی در بعضی از این صنایع به صورت مختصر اشاره خواهد شد (Koch, 2002).



شکل ۷– هزینه خوردگی در بخش‌های مختلف صنعتی در کشور آمریکا

هزینه خوردگی در صنعت نفت

صنعت نفت شامل بخش‌های مختلفی همچون اکتشاف، استخراج، پالایش و انتقال فراورده‌های نفتی (نفت، گاز و مواد پتروشیمی) است. در هر یک از این بخش‌ها و فراورده‌ها بحث خوردگی و مشکلات ناشی از آن اهمیت زیادی دارد. به عنوان مثال در بخش استخراج و حفاری این موارد اهمیت زیادی دارند؛ تجهیزات حفاری، لوله‌های سطحی، مخازن تحت فشار و تانک‌های ذخیره نفت و گاز تحت خوردگی داخلی با نفت و آبی که شامل CO_2 و H_2S هستند. بر حسب نوع نفت خام نیز میزان خوردگی متفاوت است. به عنوان مثال از حالت بسیار خورنده (نفت ایران) تا میزان خورندگی کمتر (نفت برنت) می‌توان نام برد. در این بخش هزینه‌های مستقیم خوردگی شامل پوشش‌ها، حفاظت کاتدی، بازدارنده‌ها و همچنین ردیابی خوردگی است. در شکل (۸) نحوه توزیع این هزینه‌ها در صنایع مرتبط با صنعت نفت فلات قاره به نمایش در آمده است. مشاهده می‌شود که بخش عمده‌ای از هزینه‌ها برای ایجاد پوشش‌های محافظ در مقابل خوردگی است.



شکل ۸– نحوه توزیع هزینه‌های مستقیم خوردگی در تولید نفت از مناطق فلات قاره در بازه زمانی ۱۹۹۸-۲۰۰۱

با توجه به اهمیت و جایگاه صنعت نفت در ایران مباحث خوردگی در این صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین به دلیل استقرار اکثر پایگاه‌های این صنعت (شامل تجهیزات ثابت مانند پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی اسلکه‌های نفتی و سکوها و تجهیزات متحرک مثل نفتکش‌ها) در محیط‌های مرطوب (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) و یا اتمسفرهای صنعتی میزان خوردگی در این صنعت و در نتیجه هزینه‌های ناشی از آن قابل توجه است. به عنوان مثال در بخش پالایش، یک پالایشگاه دارای بیش از ۳ هزار مخزن عملیاتی (با شکل و عملکرد متفاوت) و حدود ۳۲۰۰ کیلومتر خطوط لوله است که در هر کدام بحث خوردگی مطرح است. بر اساس آمار غیررسمی، با هزینه‌های خوردگی در پالایشگاه‌های ایران هر ۲ سال یک‌بار می‌توان یک پالایشگاه جدید ساخت.

هزینه خوردگی در بخش خدمات عمومی

هزینه‌های جزئی در بخش صنایع عمومی یا خدماتی در شکل (۹) به نمایش درآمده است. بر اساس این نمودار مشخص است که در سیستم آب آشامیدنی هزینه‌های خوردگی بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است. تجهیزات و لوله‌های مورد استفاده در این صنعت در تماس با آب و خاک هستند که هر دو محیطی خورنده به حساب می‌آیند. هزینه‌های خوردگی در این بخش صنعت به سه بخش زیر تقسیم‌بندی می‌شود.

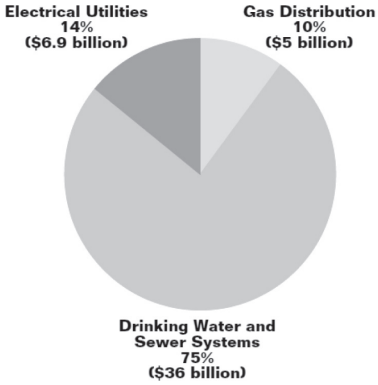
۱– هزینه جایگزینی سازه‌های فرسوده (تعویض لوله‌ها، تانک‌ها و قطعه‌های مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌ها)؛

۲– هزینه‌های پیشگیری و حفاظت؛

۳– هزینه‌های هدر رفتن آب (به خاطر شکست لوله، تانک و سایر قطعه‌ها).

حدود ۵۰ درصد هزینه‌هایی که برای تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری در سیستم آب‌رسانی کشور

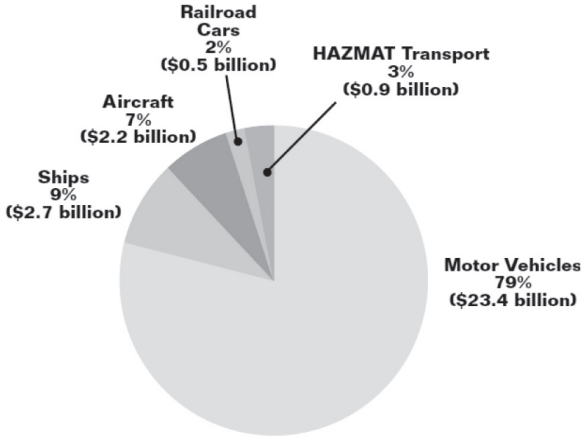
صرف می‌شود ناشی از هزینه‌های خوردگی است. بر اساس آمار، در آمریکا حدود ۱۵ درصد آب تصفیه شده هدر می‌رود و این رقم در ایران حدود ۳۰ درصد است.



شکل ۹ – هزینه‌های زیرمجموعه‌های بخش صنایع عمومی یا خدماتی

هزینه خوردگی در صنعت حمل و نقل

مطالعات نشان می‌دهد که در آمریکا هزینه خوردگی در صنعت حمل و نقل (مانند اتومبیل، کشتی، راه‌آهن، هواپیما و غیره)، ۲۱/۵ درصد کل هزینه‌ها است. نحوه توزیع این هزینه‌ها در شکل (۱۰) به نمایش درآمده است.



شکل ۱۰ – هزینه‌های خوردگی در بخش حمل و نقل

نتیجه‌گیری

پدیده خوردگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر صنایع و در نتیجه اقتصاد کشورها دارد. این هزینه‌ها در حوزه‌هایی مانند سازه‌های زیربنایی، حمل و نقل، صنایع و تولید نمایان می‌شود. با اطلاع از پدیده

خوردگی، هزینه و خسارت‌های مرتبط با آن می‌توان در انتخاب یک راهبرد مناسب بر اساس اصول زیر اقدام کرد:

۱- آموزش و آشنایی با پدیده خوردگی و پیامدهای آن؛

۲- ارتقای روش‌های طراحی و استفاده از روش‌های طراحی پیشرفته به منظور مدیریت بهتر خوردگی؛

۳- به کارگیری صحیح فناوری و ارتقای فناوری‌های موجود به منظور کاهش خوردگی و پیامدهای آن؛

۴- تهیه و تدوین خط‌مشی، آیین‌نامه‌ها، استانداردها و شیوه‌های مدیریتی برای کاهش خوردگی و پیامدهای آن.

با شناخت علت و نوع خوردگی و رعایت ضوابط و اصول مربوط، امکان کاهش خسارت‌های خوردگی تا حدود ۷۰ درصد وجود دارد. به عنوان مثال ارتش آمریکا در سال ۲۰۰۱، اعلام کرد که هزینه‌های خوردگی در ارتش از ۱۰ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۰ به ۸ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۱، کاهش پیدا کرده است. این کاهش هزینه با وجود توسعه صنایع مرتبط طی این یک سال بوده است.

منابع

زمانیان، ر. (۱۳۷۴). *خوردگی و روش‌های کنترل آن*. تهران: دانشگاه تهران.

فران، ه. و. (۱۹۷۴). *اصول خوردگی*، گروه مهندسی متالورژی، تهران: جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف.

فونتانا، م. (۱۹۸۵). *مهندسی خوردگی*. مترجم احمد ساعتچی. اصفهان: جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان.

انجمن بین‌المللی مهندسان خوردگی آمریکا [homepage] ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۳ [online] <www.nace.org> [۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۳].

انجمن خوردگی ایران [homepage] ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۳ [online] <www.ica.ir> [۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۳].

فدارسیون خوردگی اروپا [homepage] ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۳ [online] < www.efcweb.org> [۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۳].

Javaherdashti R. (2000). How Corrosion Affects Industry and Life, Anti-Corrosion Methods and Materials, 47, 30 – 34

Koch G. H., et al. (2002). Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States, NACE, Publication No. FHWA-RD-01-156

Roberge Pierre R. (1999). Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill