دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد ومتالوژی

بررسی اثر کار سرد بر نرخ خوردگی اتمسفری فولاد ساده کربنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش خوردگی

داوود هرندی زاده نجف آبادی

اساتید راهنما

دکتر احمد ساعتچی

دکتر محمود منیر واقفی

اردیبهشت ماه ۱۳۸۷

با تشکر از:

- اساتید بزرگوار آقایان **دکتر احمد ساعتچی** و **دکتر محمود منیر واقفی** که دانش و تجربه خود را بی‌دریغ شمع راهم نمودند.

- اساتید بزرگوار آقایان **دکتر ابراهیم حشمت دهکردی** و **دکتر محمد علی گلعذار** که زحمت داوری این پروژه را متقبل شدند.

- اداره هواشناسی استان اصفهان برای تامین اطلاعات هواشناسی مورد نیاز .

- اداره هواشناسی استان گلستان برای در اختیار گذاشتن محل آزمایش و تامین اطلاعات مورد نیاز .

- کادر فعال اداری، آزمایشگاهی و کارگاهی دانشکده مواد دانشگاه صنعتی .

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله)
متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان	فهرست
فهرست مطالب	
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	
مقدمه	۲
فصل دوم: مروری بر منابع	
۲-۱- منابع خوردگی	۵
۲-۲- خوردگی اتمسفری چیست؟	۶
۲-۳- تاریخچه خوردگی اتمسفری	۶
۲-٤ هزینه‌های خوردگی اتمسفری	۸
۲-۵- انواع مطالعات خوردگی اتمسفری	۸
۲-۶- طبقه‌بندی اتمسفرهای گوناگون	۹
۲-٦-۲- الگوریتم پیسر لایم	۱۳
۲-۶-۳- استاندارد ISO	۱۴
۲-۷- اطلس‌های خوردگی اتمسفری	۱۸
۲-۸- تئوری خوردگی اتمسفری	۱۹
۲-۸-۱ مراحل تشکیل لایه‌های زنگ آهن در اثر خوردگی اتمسفری	۲۰
۲-۸-۲- مورفولوژی لایه‌های زنگ طبیعی فولاد	۲۱
۲-۸-۳- مکانیزم‌های شیمیایی خوردگی اتمسفری آهن و فولاد	۲۱
۲-۸-۴ سولفات‌ها و سولفیدها	۲۵
۲-۸-۵- کلریدها	۲۸
۲-۸-۶ نیترات‌ها	۲۹
۲-۸-۷ ترکیبات کربن	۲۹
۲-۸-۸ ذرات معلق اتمسفری	۲۹

۲-۸-۹ اثر تابش نور برخوردگی اتمسفری ۲۹
۲-۹- خلاصه ۳۰
۲-۱۰- مدل‌های خوردگی اتمسفری ۳۱
۲-۱۰-۱- مدل‌های آماری ۳۱
۲-۱۰-۲- مدل‌های مکانیزمی فاکتورهای خورندگی ۳۴

فصل سوم: روش انجام آزمون

۳-۱ نمونه‌ها ۳۸
۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها ۳۹
۳-۲-۱-تمیزکاری ۴۰
۳-۲-۲- شماره‌زنی ۴۰
۳-۲-۳- چربی‌زدایی ۴۰
۳-۲-۴- اسیدشویی اولیه نمونه‌های فولادی ۴۰
۳-۲-۵- توزین اولیه ۴۱
۳-۳- ایستگاه‌های آزمایش ۴۱
۳-۴- میزهای آزمایش ۴۴
۳-۵- نصب نمونه‌ها ۴۴
۳-۶- دوره‌های بازرسی ۴۵
۳-۷- آزمون کاهش وزن ۴۶
۳-۸- بررسی توپو گرافی سطحی ۴۶
۳-۹- فازشناسی زنگ آهن ۴۷
۳-۱۰- آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ۴۷
۳-۱۱- آزمون اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی ۴۷
فصل چهارم: نتایج و بحث
۴-۱- طبقه‌بندی میزان خورندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه ۴۸
۴-۲- خوردگی اتمسفری فولاد ساده کربنی ۵۳
۴-۲-۱- اثر شرایط اتمسفری و گذشت زمان بر نرخ خوردگی اتمسفری ۵۵
۴-۲-۲- اثر کار سرد بر نرخ خوردگی اتمسفری ۶۱
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۱
۵-۲- پیشنهادات ۸۳

فصل اول

مقدمه

هزاران سال پیش بشر مواد خام فلزی را از دل زمین بیرون کشید و آنها را به سرنیزه ، ابزار کشاورزی، و ابزار فنی تبدیل کرد. تمامی این وسایل در مجاورت اتمسفر شروع به خورده شدن کردند و هنوز هم خورده می‌شوند. با گسترش صنعت و افزایش آلودگی‌های صنعتی، میزان خوردگی نیز افزایش یافت. هر روز خوردگی خسارات زیادی به جا می گذارد: هادی‌های هوایی، برج‌های انتقال نیرو، پل‌های فلزی، مجسمه‌ها و بناهای تاریخی و...

در جبهه مقابل این فرایند ویرانگر متخصصان و مهندسان خوردگی قرار دارند، استراتژی این افراد برای مقابله با خوردگی شامل بررسی، درک و تحت کنترل درآوردن این پدیده می‌باشد.

با وجود این سابقه طولانی، علم خوردگی اتمسفری- نوعی از خوردگی که در موادی ایجاد می‌شود که در مجاورت اتمسفر قرار دارند- کمتر از یکصد سال عمر دارد. در اوایل دهه ۱۹۲۰ میلادی «ورنون[1]» در انگلستان اولی آزمون‌های سیستماتیک خوردگی را آغاز نمود. از آن زمان تا کنون به غیر از برخی پیچیدگی‌هایی که در ساخت و نصب تجهیزات صورت گرفته، شکل کلی این آزمون‌ها تغییری نکرده است. او نمونه‌ها را تمیز کرده و سپس آنها را در معرض گازهای SO_2 یا CO_2 می گذاشت و یا اینکه نمونه‌ها را در محیط آزاد قرار می‌داد و در نهایت پس از سپری شدن زمان لازم میزان خوردگی آنها در طول دوره زمانی مورد نظر را محاسبه می‌نمود.

کارهای ورنون در حدود ۷۰ سال پیش انجام شد. در آن زمان هایزنبرگ اصل عدم قطعیت فیزیک کوانتوم را مطرح نموده بود، به ندرت درباره شیمی پلیمر فکر می‌شد، نوترون هنوز کشف نشده بود و مارپیچ دوقولوی DNA تا ۳۰

[1] W.H.Vernon

سال بعد هنوز هم شناخته شده نبود. امروز فیزیک کوانتوم یک علم بالغ و جا افتاده است، توجه به جهان درون اتم موجب ابداع بمب اتمی شده است، پلیمرها به مواد رایج زندگی روزمره ما تبدیل شده‌اند، علوم زمین‌شناسی با کشف صفحات یوتکتیکی متحول شده‌اند و متخصصان بیوتکنولوژی موفق به رسم ژنوم انسان شده‌اند، در حالی که آزمایشات ورنون تقریبا به همان شکل باقی مانده‌اند و به همان شکل مورد استفاده گسترده جهانی قرار می‌گیرند. به راستی چه چیز باعث شده است که علم خوردگی اتمسفری چه درحیطه آزمایشگاهی و چه از نظر تئوریکی روندی کند را طی کند در حالی که علوم دیگر در این سالها به صورت جهشی به پیش رفته‌اند؟ یک پاسخ اینست که بقیه علومی که به عنوان نمونه ذکر شدند حیطه عمل تخصصی و مشخصی دارند در حالی که مسائل دخیل در خوردگی اتمسفری بسیار آشفته و گسترده هستند. برای درک فیزیک کوانتوم تنها به اتم، هسته آن و الکترونها نیاز است، در مورد DNA تنها به مولکول‌ها و درک پیچیدگی ارتباط آنها با سلولهای زنده نیاز است امّا برای شناخت خوردگی اتمسفری بایستی یک فاز جامد در حال زوال، یک فاز مایع بسیار نازک با خواص خازنی در حال تغییر و یک فازگازی با ترکیب، فشار و دمای متغییر را به طور همزمان شناسایی نمود در حالیکه امکان پایش مداوم هیچ یک در کل زمان فرایند خوردگی اتمسفری نیز وجود ندارد[۱].

دومین پاسخ شاید این باشد که اکثر مطالعات انجام گرفته در زمینه خوردگی اتمسفری به منظور تعیین نرخ خوردگی یک آلیاژ خاص در یک اتمسفرخاص از طریق نصب نمونه هایی ازآلیاژ مورد نظر به مدت معین در محیط، انجام می‌شود. پس پایان این دوره محصولات خوردگی به روش شیمیایی یا الکتروشیمیایی از سطح پاک می‌شوند و میزان کاهش وزن در اثر خوردگی محاسبه می‌شود. زدودن محصولات خوردگی به این روش موجب از دست رفتن اطلاعات ارزشمند و اساسی جهت تعیین مکانیزم خوردگی اتمسفری می‌شود.

سومین دلیل اینست که خوردگی اتمسفری نتوانسته است توجه محققینی که به بررسی‌های بنیادی می‌پردازند را به خود جلب کند. در مقابل طی چند دهه گذشته جهت‌گیری اصلی کارهایی که در حیطه خوردگی انجام شده‌اند بیشتر به شناخت لایه‌های رویین متمایل بوده است. هم شناخت خوردگی اتمسفری و هم شناخت لایه‌های رویین از نظر اقتصادی دارای اهمیّت بالایی هستند. با اینحال تحقیق برروی لایه‌های رویین برای محققان جذابتر بوده است. دلیل این امر نیز واضح است: برپاسازی و استفاده از یک سیستم آزمایشگاهی جهت بررسی لایه‌های رویین بسیار ساده‌تر و عملی‌تر از راه‌اندازی سیستم‌های آزمایشی خوردگی اتمسفری است. پیچیدگی عوامل دخیل در خوردگی اتمسفری باعث شده است که به طور کلی شبیه سازی شرایط واقعی در آزمایشگاه تقریبا غیر ممکن باشد[۱]. با وجود مشکلات یاد شده که در سر راه مطالعات خوردگی اتمسفری قرار دارد، هزینه بالای خوردگی ناشی از این پدیده، نیروی محرکه‌ای است که تحقیقات پر هزینه و گسترده در این حیطه را توجیه می‌کند. گزارش شده است که خوردگی اتمسفری، چه از نظر مقدار و چه از نظر هزینه‌ها، بیش از هر فرایند تخریب دیگر خسارت به بار می‌آورد[۲]. تخمین زده شده است که سالانه نیمی از کل هزینه‌های خوردگی ایالات متحده آمریکا صرف حفاظت از مواد در مقابل خوردگی اتمسفری می‌شود[۳].

تجارب علمی به همراه آزمون‌های میدانی بسیار ثابت کرده است که خوردگی اتمسفری پدیده‌ای است که از محلی به محل دیگر به شدت تغییر می‌کند[٤] . بررسی های گوناگون انجام شده در سراسر دنیا آشکار کرده که نرخ خوردگی اتمسفری تابعی است از جنس فلز مورد آزمون، مختصات جغرافیایی محل آزمون، شرایط آب و هوایی، وجود آلاینده‌ها، وزش باد، وجود ذرات جامد معلق در هوا، دما و بسیاری متغیرهای دیگر. آزمون‌های اتمسفری در محیطهای باز با اهداف گوناگون انجام می‌شوند[۵].

آلیاژسازان سراسر دنیا از آزمون‌های خوردگی اتمسفری برای ارزیابی عملکرد یک آلیاژ جدید در شرایط اتمسفری

گوناگون استفاده می‌کنند. این آزمون‌ها همچنین به طور گسترده‌ای برای ارزیابی عملکرد حفاظتی پوشش‌های فلزی و غیر فلزی نیز به کار می‌روند. سازندگان سازه‌های گوناگونی که قرار است در محیط باز مورد استفاده قرار گیرند، گاهی برای بررسی عملکرد و همچنین تخمین عمر کاری که می‌توان از آنها در محیطهای مختلف انتظار داشت. از اینگونه آزمون‌ها استفاده می‌کنند. گاهی نیز از آزمونهای میدانی اتمسفری برای تعیین میزان خورندگی یک اتمسفر خاص استفاده می‌شود. مشخص شدن و طبقه‌بندی خورندگی اتمسفرهای گوناگون، فواید مختلفی برای صاحبان و طراحان صنایع دارد. به عنوان مثال می‌تواند در انتخاب پوشش یا هر سیستم حفاظتی دیگر، انتخاب مواد برای ساختن یک سازه خاص در اتمسفری مشخص، تدوین برنامه بازرسی سازه‌ها در یک اتمسفر خاص و ... کمک بزرگی باشد و به عنوان یک معیار طراحی به کار رود[٤].

امروزه اکثر کشورهای جهان مبادرت به تعیین میزان خورندگی اتمسفری در سطح کشور خود نموده‌اند و نتایج این ارزیابی‌ها را به صورت اطلس‌های خوردگی اتمسفری تدوین نموده‌اند.

از سوی دیگر تلاش محققین دانشگاهی عموماً برتعیین هر چه دقیق‌تر عوامل موثر بر خوردگی اتمسفری و چگونگی اثر این عوامل بر نرخ خوردگی آلیاژهای مختلف تمرکز یافته است. هرچه که پارامترهای دخیل در این فرایند و نحوه اثر آنها با دقت بیشتری تعیین شود امیدواری‌ها جهت فرمول‌بندی یا حتی شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر پدیده خوردگی اتمسفری افزایش می‌یابد. هر چند که تاکنون عوامل موثر زیادی مشخص شده‌اند امّا نحوه اثر اغلب این موارد ناشناخته بوده و خصوصاً اثر همزمان آنها هنوز به خوبی درک نشده است.

استانداردهای متعددی نیز جهت انواع مطالعات خوردگی اتمسفری تدوین شده‌اند که یکنواختی و مقایسه‌پذیری نتایج تحقیقات انجام شده در جای جای جهان را موجب می‌شوند. مهمترین این استانداردها توسط سازمان جهانی استاندارد (ISO) و (ASTM) طراحی شده‌اند.

با وجود تلاش‌های گسترده جهانی در زمینه خوردگی اتمسفری این موضوع در کشور ما چندان مورد توجه نبوده است. به جز چند مورد پراکنده که به ارزیابی نرخ خوردگی اتمسفری یک آلیاژ خاص در یک محل پرداخته‌اند.

در تحقیق حاضر هدف اصلی ارزیابی اثر کار سرد بر میزان خوردگی اتمسفری فولاد ساده کربنی بوده است. در کنار این موضوع تلاش شده است موضوع خوردگی اتمسفری با ابعاد بسیار گوناگون خود به جامعه علمی کشور معرفی گردد و گامی هر چند کوچک در زمینه کم کردن فاصله ایران با دیگر کشورها در این زمینه مهم برداشته شود.

در فصل اول تلاش خواهد شد تا با مروری بر تحقیقات انجام شده در مورد خوردگی اتمسفری ابتدا تعاریف اولیه مربوط به این پدیده به روشنی بیان شود و تطابق لازم میان برداشت خواننده و منظور محقق از واژگان مورد استفاده، ایجاد شود. در این فصل همچنین روند تکمیل و گسترش تحقیقات این حیطه روشن خواهد شد. تحقیقات و استانداردهای مربوط به خوردگی اتمسفری نیز در این بخش طبقه‌بندی شده و موارد مرتبط با موضوع تحقیق حاضر به صورت مشروح بیان خواهند شد.

در فصل دوم روش انجام آزمون‌ها در تحقیق حاضر بیان خواهد شد. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها، تجهیزات مورد استفاده و نحوه کسب اطلاعات مورد نیاز، همگی در این فصل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در فصل سوم نتایج حاصل از آزمون‌ها ارائه خواهد شد. نمودارها و جداول اولیه حاصل از طبقه‌بندی اولیه نتایج در همین فصل خواهد آمد.

در نهایت فصل چهارم به تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

فصل دوم

مروری بر منابع

۲-۱- منابع خوردگی

خوردگی اتمسفری را می‌توان به صورت تخریب فلزات در اثر قرار گرفتن در اتمسفر و واکنش با اجزاء موجود در فاز گاز تعریف کرد [۱].

گزارش شده است که خوردگی اتمسفری، چه از نظر تناژ و چه از نظر هزینه‌هایش بیش از هر فرایند تخریب دیگر خسارت به بار می‌آورد. تخمین زده شده است که سالانه نیمی از کل هزینه‌های خوردگی ایالات متحده آمریکا صرف حفاظت از مواد در مقابل خوردگی اتمسفری می‌شود [۲].

تجارب علمی به همراه آزمون‌های میدانی بسیار ثابت کرده است که خوردگی اتمسفری پدیده‌ای است که از محلی به محل دیگر به شدت تغییر می‌کند [۳]. بررسی‌های گوناگون انجام شده در سراسر دنیا آشکار کرده است که نرخ خوردگی اتمسفری تابعی است از جنس فلز مورد آزمون، مختصات جغرافیایی محل آزمون، شرایط آب و هوایی، وجود آلاینده‌ها، وزش باد، وجود ذرات جامد معلق در هوا، دما و بسیاری متغیرهای دیگر. در حالی که بسیاری از افراد به خوبی درک می‌کنند که خوردگی اتمسفری در محیطهای خارج از ساختمان به هر حال دیر یا زود ایجاد می‌شود امّا تحقیقات جدیدتر ثابت کرده است که خوردگی اتمسفری در داخل ساختمان نیز ایجاد می‌شود و گاه عواقب شدیدی دارد. آزمون‌های اتمسفری در محیطهای باز با اهداف گوناگون انجام می‌شوند[٤].

آلیاژسازان سراسر دنیا از این آزمون‌ها برای ارزیابی عملکرد یک آلیاژ جدید در شرایط اتمسفری گوناگون استفاده می‌کنند. این آزمون‌ها همچنین به طور گسترده‌ای برای ارزیابی عملکرد حفاظتی پوشش‌های فلزی و غیر فلزی نیز به

کار می‌روند. سازندگان سازه‌های گوناگونی که قرار است در محیط باز مورد استفاده قرار گیرند، گاهی برای بررسی عملکرد و همچنین تخمین عمر کاری که می‌توان از آنها در محیطهای مختلف انتظار داشت. از اینگونه آزمون‌ها استفاده می‌کنند. گاهی نیز از آزمون‌های میدانی اتمسفری برای تعیین میزان خورندگی یک اتمسفر خاص استفاده می‌شود. مشخص شدن و طبقه‌بندی خورندگی اتمسفرهای گوناگون، فواید مختلفی برای صاحبان و طراحان صنایع دارد. به عنوان مثال می‌تواند در انتخاب پوشش یا هر سیستم حفاظتی دیگر، انتخاب مواد برای ساختن یک سازه خاص در اتمسفری مشخص، تدوین برنامه بازرسی سازه‌ها در یک اتمسفر خاص و ... کمک بزرگی باشد و به عنوان یک معیار طراحی به کار رود[۳].

۲-۲- خوردگی اتمسفری چیست؟

خوردگی اتمسفری واکنشی الکتروشیمیایی است که در اثر تماس یک ماده خاص با هوا و ترکیبات موجود در آن ایجاد شده و در نهایت به زوال ماده مورد نظر می‌انجامد. هر چند زوال مواد در اتمسفر تنها محدود به مواد فلزی نیست و سنگ، چوب، رنگ، شیشه و هر ماده دیگری را نیز در بر می‌گیرد امّا اصطلاح خاص "خوردگی اتمسفری" اغلب به فلزات اشاره دارد[۱].

۲-۳- تاریخچه خوردگی اتمسفری

خوردگی اتمسفری را می‌توان قدیمی‌ترین نوع خوردگی دانست که بشر با آ ن آشنا شده است. درست از زمانی که اولین ابزار فلزی به دست انسان ساخته شد این پدیده نقش خود را آشکار ساخت. با گسترش یافتن صنعت و تکنولوژی پدیده خوردگی اتمسفری نیز بیش از پیش اهمیّت یافته است. درسال‌های انقلاب صنعتی تولید هرچه بیشتر ماشین‌آلات صنعتی و رواج احداث سازه‌های عظیم موجب استفاده گسترده از فلزات شد. از سوی دیگر در همین زمان افزایش ناگهانی کارخانه‌ها، تغییر سیستم گرمایشی منازل از سوخت چوب به سوخت‌های فسیلی، اختراع اتومبیل و تغییراتی از این دست موجب افزایش ناگهانی میزان آلاینده‌های اتمسفری و وارد شدن آلاینده‌های جدیدی به اتمسفر شد. افزایش حجم سازه‌های فلزی درمعرض محیط از یکسو و افزایش خورندگی اتمسفری در اثر افزایش نوع و میزان آلاینده‌ها از سوی دیگر، موجب شد تا میزان اثر خوردگی اتمسفری هرچه بیشتر شود. این روند تا آنجا ادامه یافت که امروزه خوردگی اتمسفری چه از نظر حجم مواد و چه از نظر هزینه‌ها بیش از هر پدیده زوال دیگری خسارت به بار می‌آورد. اثر شدید خوردگی اتمسفری بر سازه‌های فلزی در سال‌های انقلاب صنعتی و پس از آن موجب شد تا کارشناسان و مهندسان درسال‌های آغازین قرن بیستم هرچه بیشتر به تلاش در جهت شناخت این پدیده و کنترل آن بپردازند. اولین تلاش‌های سیستماتیک در این خصوص به آزمایشات ورنون در انگلستان بر می‌گردد. او در اوایل دهه ۱۹۲۰ میلادی برای تعیین و مقایسه میزان مقاومت آلیازهای گوناگون آزمون‌هایی را طراحی نمود. روش کلی کار او قرار دادن کوپن‌هایی از آلیاژهای گوناگون در معرض اتمسفر آزاد یا کنترل شده برای زمانی معین و سپس بررسی این کوپن‌ها (خصوصاً اندازه گیری تغییرات وزن آنها) بود. او تلاش کرد تا علاوه بر مقایسه مقاومت مواد گوناگون به تعیین عواملی بپردازد که بر خوردگی اتمسفری تاثیر می‌گذارند. او نخستین کسی بود که اثر رطوبت نسبی بر خوردگی اتمسفری را با آزمایش ثابت نمود و نشان داد که یک حد بحرانی از رطوبت نسبی وجود دارد که با افزایش رطوبت محیط از این حد، نرخ خوردگی به شدت افزایش خواهد یاقت. با وجود فعالیت‌های ارزشمند ورنون و برخی از دیگر دانشمندان موضوع خوردگی اتمسفری تا حدود ۳۰ سال قبل چندان مورد توجه متخصصین و دانشمندان قرار نداشت، چرا که تنوع عوامل موثر بر آن بسیار زیاد بوده و آزمایش‌های عملی جهت

بررسی آن نیز عموماً بسیار زمانبر و پر هزینه هستند و لذا موضوع جذابی برای اکثر محققان نبوده است. امّا در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ اثر خوردگی اتمسفری بر اجزاء الکتریکی مشخص شد. یکی از اولین موارد مشاهد شده در این زمینه مربوط به اختلال در کار تجهیزات الکترونیکی هواپیماهای آمریکایی در جنگ ویتنام بود. این تجهیزات برای کار در آب و هوای حاره طراحی نشده بودند و حفاظت لازم برای جلوگیری از خوردگی در محیطهای مرطوب و دریایی بر روی آنها اعمال نشده بود.

به زودی مشخص شد که حتی ایجاد خسارت خوردگی بسیار ناچیز که تنها با روش‌های بسیار حساس بازرسی قابل تشخیص باشند نیز می‌تواند ضریب اطمینان سیستم‌های الکتریکی و کنترلی را به شدت کاهش دهد.

در دهه ۱۹۸۰ وقوع چند حادثه که نقش خوردگی اتمسفری در آنها غیر قابل انکار بود، موجب جلب توجه ناگهانی صنایع و به دنبال آن محققان به موضوع خوردگی اتمسفری شد. معروف‌ترین و جنجال‌برانگیزترین حادثه از این دست به «حادثه هوایی آلوها» معروف شده است. در سال ۱۹۸۸میلادی یک هواپیمای بویینگ ۷۳۷ متعلق به شرکت هواپیمای آلوها در حالی که در ارتفاع ۷۳۰۰ متری پرواز می‌کرد سقف قسمت مسافران خود را به کلی از دست داد. تصویر این هواپیما پس از فرود را در شکل۱-۱ مشاهده می‌کنید[۱].

شکل ۱-۱- حادثه هوایی آلوها

مطالعات انجام شده نشان داد که علت کنده شدن ناگهانی سقف، از بین رفتن استحکام پرچ‌های بدنه در اثر خوردگی اتمسفری بوده است. به این ترتیب مطالعات خوردگی اتمسفری وارد مرحله جدیدی شد. سازمان‌های استاندارد مختلف اقدام به تکمیل استانداردهای خود در این حیطه نمودند. کمیته فنی ۱۵۶ سازمان جهانی استاندارد (ISO) در اواسط دهه ۱۹۷۰ خوردگی اتمسفری را به عنوان اولویت کاری خود مشخص نمود. حاصل کار این کمیته تدوین استانداردی برای طبقه‌بندی محیطهای خرد و کلان از نظر میزان خورندگی اتمسفری بود. همچنین آزمون‌های میدانی بسیار وسیعی در اکثر کشورهای جهان برای بررسی این پدیده از جوانب گوناگون طراحی و اجرا شد. به علاوه از آنجا که شاخص‌های اتمسفری جنبه جهانی دارند و نمی‌توان آنها را در یک نقطه خاص به طور مجزا مورد بررسی قرار داد لذا پروژه‌های تحقیقاتی بین‌المللی نیز برای بررسی دقیقتر این پدیده اجرا شدند. در این مورد می‌توان به پروژهای زیر اشاره نمود:

ISO CORRAG: این پروژه توسط سازمان بین‌المللی استاندارد طی سال‌های ۱۹۸٦ تا ۱۹۹۸ در ۵۱ ایستگاه در کشورهای اروپایی و آمریکا انجام شد.

ICP Materials: در ۱۹۸۷ آغاز شد. این پروژه برای تعیین عوامل موثر ر خوردگی اتمسفری در ١٤ کشور اروپایی و آمریکای شمالی انجام شد .

MICAT: در ۱۹۸۸ آغاز شد. هدف از اجرای آن تنظیم نقشه خوردگی اتمسفری در کلیه کشورهای آمریکای

جنوبی به علاوه اسپانیا و پرتغال بوده است[٦].

۲-٤- هزینه‌های خوردگی اتمسفری

باید اذعان کرد که محاسبه هزینه‌ها و خسارات ناشی از خوردگی عملا کاری بسیار دشوار و گاه ناممکن است. براورد هزینه ناشی از شکست‌ها و حوادث ایجاد شده در اثر خوردگی در تاسیسات زیرساختی تنها با قبول خطای زیاد امکان پذیر است. این هزینه‌ها شامل خسارت ناشی از تخریب تاسیساتی نظیر پل‌ها، بزرگراهها، راه‌آهن مترو و... و هزینه تعمیر و راه‌اندازی مجدد آنها است. تخمین و براورد هزینه خسارات ناشی از خوردگی اتمسفری بر تجهیزات و سیستم‌های الکترونیکی و تعیین اثر این پدیده برقابلیت اطمینان سیستم‌های امنیتی فرودگاهها، اتومبیل‌ها و صنایع، به مراتب دشوارتر است. علاوه بر اینها نمی‌توان گفت که اثر مخرب خوردگی اتمسفری برتخریب بناهای تاریخی و نمادهای فرهنگی را چگونه بایستی ارزیابی نمود. امروزه با شدت گرفتن تخریب آثار باستانی و فرهنگی در اثر افزایش آلودگی اتمسفری، بارش باران‌ها اسیدی، رسوب ترکیبات اسیدی توسط برف، مه و شبنم بر سطح مجسمه‌ها و دیگر ابنیه تاریخی و عواملی از این دست، نگرانی کشورهای جهان در خصوص خوردگی اتمسفری اینگونه نمادهای فرهنگی شدت گرفته است [۱].

خوردگی یکی از پر هزینه‌ترین فرایندهای تخریب مواد است. بررسی‌های انجام شده توسط EPRI[1] نشان می‌دهد که هزینه‌های مستقیم خوردگی در آمریکا سالانه در حدود ۲۷۶ میلیارد دلار (۳/۱ در صد از درآمد ناخالص ملّی) است. توجه به این نکته ضروری است که بر طبق مطالعات انجام شده سالانه بیش از نیمی از هزینه‌های خوردگی در آمریکا صرف مقابله با خوردگی اتمسفری و خسارات ناشی از آن می‌شود [۳].

۲-۵- انواع مطالعات خوردگی اتمسفری

با توجه به اهمیّت موضوع خوردگی اتمسفری مطالعات انجام شده در این خصوص طیف وسیعی را در بر می‌گیرند. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان این مطالعات را به گروه‌ههای زیر تقسیم نمود:

- تحقیقات جهت تعیین نحوه اثر پارامترهای گوناگون(انواع آلاینده‌ها، دما، اتصال به فلزات غیر مشابه و ...) بر نرخ خوردگی اتمسفری.

- تحقیقات جهت ارزیابی عملکرد یک آلیاژ یا پوشش خاص در برابر شدیدترین شرایط اتمسفری. جهت انجام اینگونه تحقیقات ایستگاه‌های دائمی پایش خوردگی اتمسفری در برخی از حادترین شرایط آب و هوایی تاسیس شده‌اند.

تصویر دو ایستگاه که خصوصاً به این منظور به کار می‌روند و از اعتبار جهانی بهره‌مند هستند را در شکل۲-۲ ملاحظه می‌کنید.

[1] Electrical power research institute

ب الف

شکل ۲-۲- (الف) ایستگاه دائمی بررسی مقاومت خوردگی اتمسفری آلیاژهای گوناگون واقع در اوهایو (ب) ایستگاه دائمی بررسی اثرات محیطی بر روی ورقهای رنگی در آریزونا[۲]

- تحقیقات انجام شده جهت تخمین عمر باقی‌مانده سازه‌های در معرض اتمسفر

-تحقیقات انجام گرفته جهت تعیین میزان خورندگی اتمسفری در یک ناحیه خاص. اینکار اغلب جهت فراهم آوردن اطلاعات لازم برای جانمایی، طراحی و انتخاب مواد هنگام ساخت سازه‌های جدید یا هنگام انجام طرحهای توسعه‌ای کاربرد دارد. همچنین نتایج این آزمون‌ها به عنوان مواد خام لازم برای تخمین عمر باقیمانده تجهیزات تلقی می‌شود.

۲-۶- طبقه‌بندی اتمسفرهای گوناگون

یکی از ویژگی‌های آزمون‌های اتمسفری اینست که شرایط محیطی در کنترل پژوهشگر نیست. چه در آزمون‌های کوتاه مدت و چه در آزمون‌های بلند مدت همواره بایستی انتظار تغییرات مقطعی و شدید شرایط محیطی را داشت. در ضمن علاوه بر شرایط آب و هوایی کلانی که بر اتمسفر یک منطقه حاکم است وجود منابع تولید آلاینده‌ها به صورت موضعی در فواصل دور و نزدیک ایستگاه مورد نظر می‌تواند به شدت بر نتایج تاثیرگذار باشد. در آزمون‌های اتمسفری معمولاً هدف تعیین رفتار آلیاژهای مورد نظر در یک نقطه خاص نیست بلکه انتظار می‌رود که بتوان رفتار آلیاژ در محل ایستگاهها را به دیگر نواحی جغرافیایی، که شرایط اتمسفری یکسانی دارند، تعمیم داد. بنابراین لازم است که شرایط اتمسفری ایستگاه مورد نظر به صورت مناسب پایش شود و عوامل ایجاد خوردگی در آن تعیین شوند.

در صورتی که بتوان اتمسفرهای گوناگون را در قالب گروههای مشخص از نظر پارامترهای موثر در خوردگی اتمسفری طبقه‌بندی نمود، آنگاه می‌توان با پایش شرایط محیطی ایستگاه مورد آزمایش، کلاس خوردگی ایستگاه را تعیین کرد. از آن پس می‌توان رفتار یک آلیاژ در این ایستگاه خاص را به کلیه مکان‌هایی که در همان کلاس خورندگی قرار می‌گیرند، تعمیم داد[۳].

در سال‌های اولیه مطرح شدن خوردگی اتمسفری به عنوان یک اولویت پژوهشی بر طبق آزمون‌های جهانی انجام گرفته، اتمسفرهای گوناگون به صورت کیفی به سه گروه عمده صنعتی، روستایی و دریایی تقسیم می‌شدند.

در اتمسفر روستایی، غلظت یون‌های موجود در هوا پایین بوده و برای تشکیل یک الکترونیک با هدایت الکتریکی خیلی بالا کافی نیست. بنابراین محیطهایی که تحت عنوان"روستایی" طبقه‌بندی می‌شوند دارای نرخ خوردگی پایین یا حداکثر متوسطی هستند. خوردگی در این محیطها اساساً به رطوبت، دما و میزان جذب رطوبت [۲] بستگی دارد [۲, ۷].

[2] moisture retention

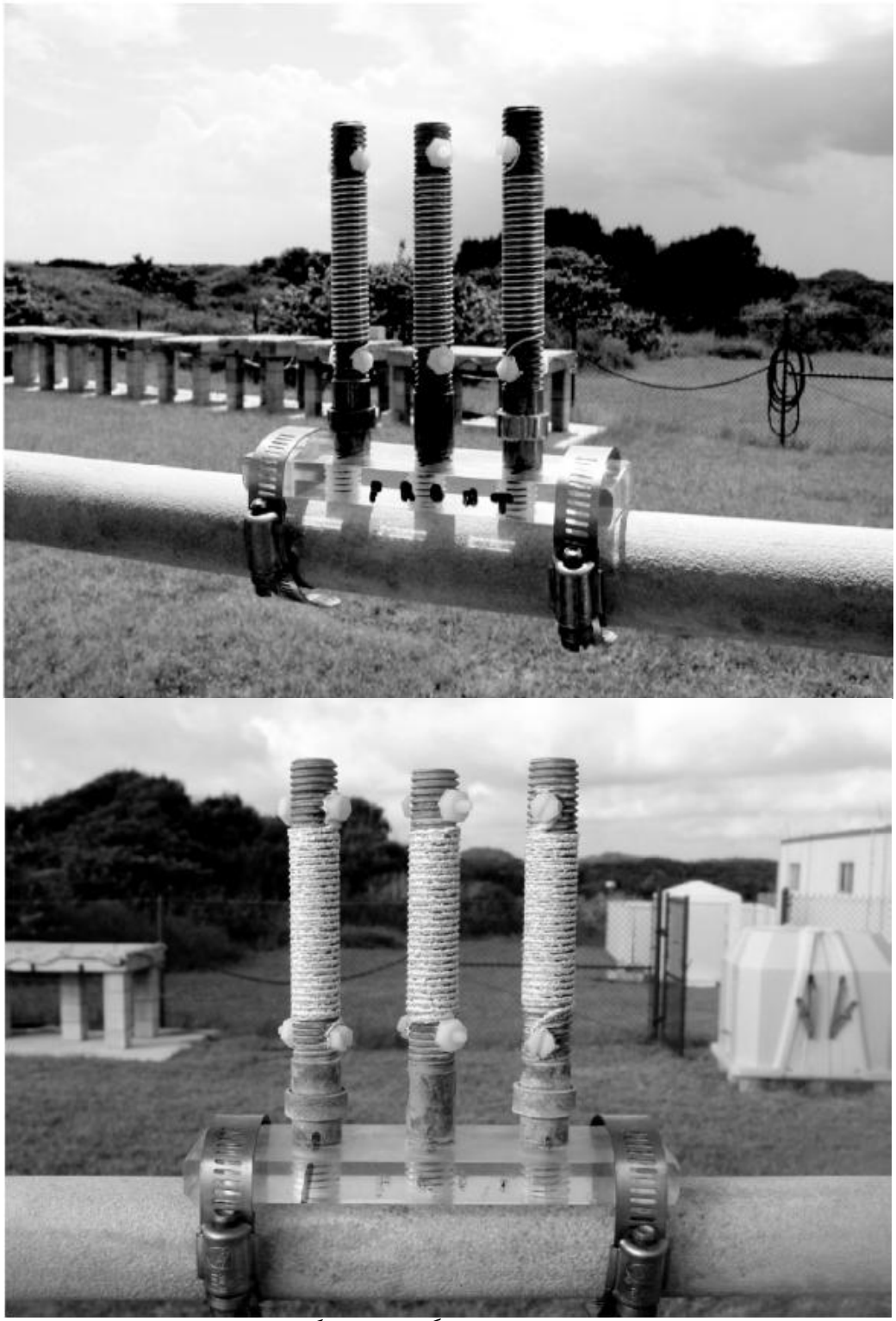
در اتمسفرهای صنعتی هر چند میزان خوردگی باز هم به عوامل یاد شده وابسته است امّا به شدت تحت اثر وجود آلاینده‌های صنعتی نظیر ترکیبات جامد یا گازی سولفیدی و دیگر موادی قرار دارد که با حل شدن در الکترولیت سطحی موجب قوی‌تر شدن الکترولیت شده و سرعت خوردگی را افزایش می‌دهد (عموماً از طریق کاهش PH).
اتمسفرهای دریایی معمولاً خورنده‌ترین محیطها هستند. میزان خورندگی این محیطها تحت اثر یونهای کلرید بوده، شدیداً به میزان رطوبت، دما، زمان خیس بودن سطح (TOW)[۳]، جهت باد و فاصله از ساحل وابسته است[۲].
پس از مدتی چند گروه دیگر نیز به این طبقه‌بندی اضافه شد. به عنوان مثال اتمسفر شهری که شاخص آن وجود مقادیر قابل توجهی " ناکس" (اکسید نیتروژن) و گاهی ذرات فلزات سنگینی چون سرب می‌باشد. یا اتمسفر دریایی صنعتی و ...
با وجود اضافه شدن این گروه‌ها باز هم طبقه بندی فوق الذکر بسیار کیفی بوده و نمی‌تواند برای پیش‌بینی رفتار آلیاژ یا حتی برای تعمیم نتایج آزمون‌های انجام گرفته به اتمسفرهای مشابه به کار رود. به همین دلیل تقریباً در تمام قرن بیستم محققان برای دستیابی به یک سیستم طبقه‌بندی خورندگی اتمسفری تلاش کردند[۷]. در ادامه به تشریح مختصر روش‌هایی که به این منظور ابداع شده‌اند خواهیم پرداخت.

۲-۶-۱- استاندارد ASTM

جزئیات انجام آزمون‌های تعیین میزان خورندگی ایستگاههای گوناگون با استفاده از نمونه‌های سیمی در استاندارد ASTM تحت عنوان آزمون‌های CLIMAT[۴] شناخته می‌شود. این روش آزمون در ابتدا به عنوان روشی برای تعیین میزان خوردگی گالوانیکی رخ داده بین سیم‌های آلومینیمی و مغزی فولادی آنها در هادی‌های هوایی طراحی شده بود، امّا به مرور به روشی کلی برای تعیین خورندگی ایستگاه مورد آزمایش تبدیل شد. ثابت شده است که این روش برای ارزیابی میزان خورندگی اتمسفر داخل انبارهای ذخیره سازی مواد، خوردگی داخل ساختمان، ارزیابی خوردگی گالوانیکی هادی‌های هوایی آلومینیومی با مغزی فولادی و فراهم آوردن اطلاعات کمی خورندگی اتمسفری مفید است.

در این آزمون از یک گروه سه تایی نمونه استاندارد استفاده می‌شود. نمونه‌هایی که در آزمون CLIMAT مورد استفاده قرار می‌گیرند، همگی از یک سیم آلومینیومی گرید ۱۱۰۰ توزین شده تشکیل شده‌اند که به دور هسته‌های متفاوتی پیچیده شده‌اند. یک انتهای سیم‌های آلومینیومی به سر میله‌هایی از جنس فولاد، مس و نایلون متصل شده، سپس محکم به دور آنها پیچانده می‌شود و دوباره در انتهای دیگر میله نیز ثابت می‌شود. شکل۲-۳ یک سیستم کامل از این نوع نمونه را نشان می‌دهد. جزئیات آماده سازی این نمونه‌ها در استاندارد ASTM G116 آورده شده است. داده‌های حاصل از هر کدام از نمونه‌های سیمی برای تعیین یک ایندکس (فهرست) خوردگی اتمسفری به کار می‌رود[۳].

[3] Time of wetness
[4] Classification of industrial and marine atmospheres



شکل ۲-۳- الف. نمونه های آزمون CLIMAT نصب شده در ایستگاه پایش خوردگی اتمسفری واقع در مرکز فضایی کندی، ۳۰ روز پس از نصب ب. همان نمونه‌ها پس از ۶۰ روز از نصب[۲].

نتایج حاصل از نمونه‌های آلومینیم روی نایلون برای تعیین فهرست "خوردگی اتمسفری عمومی" (ACI)، نمونه‌های آلومینیم روی فولاد برای فهرست خورندگی اتمسفرهای دریایی (MCI) و نمونه‌های آلومینیم روی مس برای تعیین فهرست خورندگی اتمسفرهای صنعتی به کار می روند[۳].

نمونه‌های سیمی تهیه شده در محیط قرار می‌گیرند و پس از دوره‌های مشخص (معمولاً ۹۰ روزه) تعدادی از آنها

(بسته به نوع آزمون و نظر پژوهشگر) برداشته شده و توزین ثانویه روی آنها انجام می‌پذیرد. درصد کاهش وزن سیم نشانگر میزان خورندگی اتمسفر مورد مطالعه در آن برهه زمانی خاص خواهد بود.

در استاندارد ASTM طبقه بندی اتمسفرهای گوناگون با روش تشریح شده در بالا انجام می‌گیرد و در نهایت هر اتمسفر در یک طبقه قرار خواهد گرفت. جدول ۲-۱ نشان دهنده طبقه‌بندی خورندگی اتمسفری در چند ایستگاه منتخب بر اساس روش فوق الذکر است.

جدول ۲-۱- نمونه ای از طبقه‌بندی خورندگی اتمسفری بر اساس استانداردASTM[۳]

Location	Season	Corrosivity Values[a]		
		ACI[b]	MCI[b]	ICI[b]
Middletown, OH	Summer	N	N	N
	Winter	N	N	N
	Spring	N	N	N
Kure Beach, NC	Summer	N	M	
250 m lot	Spring	N	M	
	Fall	M	S	
Kure Beach, NC	Summer		S	
25 m lot	Fall		VS	
Voerde, Ger.	Summer	N		M
	Winter	M		VS
	Spring	N		M
Hamburg, Ger.	Winter	M	MS	VS
	Spring	N	N	MS
Antwerp, Bel.	Winter	M		VS
	Spring	N		M
Liege, Bel.	Winter	N		VS
	Spring	N		MS
Dunkerque, Fr.	Winter	N	MS	
Paris, Fr.	Winter	N		S
	Spring	N		M
Goteborg, Sw.	Winter	N	MS	
Largo, Scot.	Winter	M	VS	
	Spring	M	VS	
Jiddah, S. Arabia	Winter	N	N	N
Teheran, Iran	Winter	N		MS
	Spring	N		N
Leeds, U.K.	Spring	M		VS
	Winter	N		VS
London, U.K.	Spring	N	M	
Athens, Greece	Spring	N	N	N

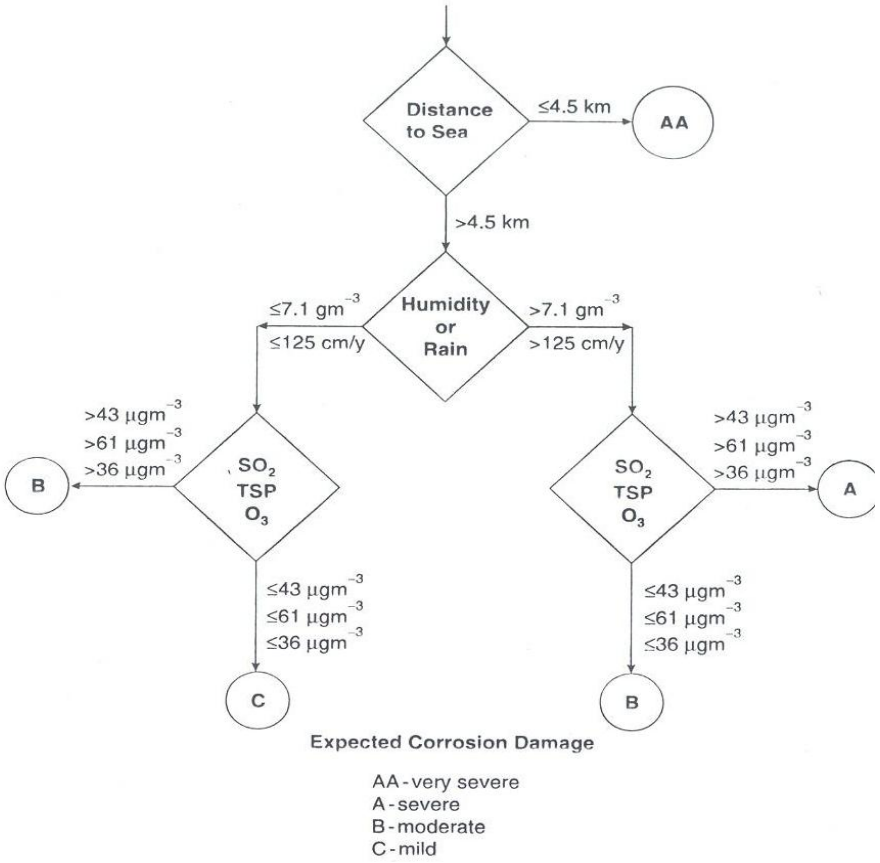
[a]N = negligible; M = moderate; MS = moderately severe; S = severe; VS = very severe.
[b]ACI = Atmospheric Corrosion Index; MCI = Marine Corrosion Index; ICI = Industrial Corrosion Index.

برای آنکه بتوان مشخصات یک اتمسفر را از نظر مقدار خورندگی به طور کامل تعیین نمود لازم است این آزمایش‌ها چندین بار تکرار شوند. خصوصاً که آزمایش تشریح شده تنها سه فصل سال را پوشش می‌دهد. بنابراین برای افزایش صحت آزمون‌ها و نتیجه‌گیری‌ها آزمایش CLIMAT در برخی ایستگاهها دو بار تکرار شده است به گونه‌ای که فصل آغاز آزمون در هر یک متفاوت بوده است[۳].

توضیحات بیشتر در این مورد را می‌توان در استانداردASTMG92 تحت عنوان «راههای ارزیابی خورندگی ایستگاههای آزمون اتمسفری» پیدا نمود.

۲-٦-۲- الگوریتم پیسر لایم[5]

هدف از تدوین این مقیاس خوردگی اتمسفری که بر مبنای اندازه‌گیری پارامترهای اتمسفری قراردارد، مدیریت برنامه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های هواپیمایی بوده است. منظور اصلی اینکار دستیابی به یک الگوریتم براورد خسارات خوردگی (CDA[6]) بود، که بتوان میزان تخریب مواد ناشی از خوردگی اتمسفری در یک محل خاص را با استفاده از آن تخمین زد و راهنمایی برای متخصصان جهت تدوین برنامه تعمیرات و نگهداری باشد. این طبقه‌بندی در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیم، فولاد، تیتانیوم و منیزیم بدون پوشش که در معرض اتمسفر خارج از ساختمان و در سطح زمین قرار داشته باشند، طراحی شده بود. شمایی از این الگوریتم در شکل۲-٤ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در درجه اول فاصله از دریا است که به عنوان معیاری برای تعیین میزان خورندگی به کار رفته است به این صورت که تمامی محل‌هایی که فاصله آنها تا دریا کمتر از ٤/٥ کیلومتر باشد تحت عنوان بسیار خورنده طبقه‌بندی می‌شوند. برای جزئی‌تر کردن این طبقه بندی در مراحل بعدی از دو عامل استفاده می شود که به ترتیب اولویت عبارتند از میزان رطوبت یا بارش باران و میزان عوامل خورنده موجود در اتمسفر مورد نظر. عوامل خورنده‌ای که در این طبقه‌بندی مد نظر قرار گرفتند عبارتند از دی‌اکسید گوگرد، مقدار کل ذرات معلق در اتمسفر(TSP[7]) و اوزون[٦].



شکل ۲-۴- الگوریتم پیسر لایم جهت تخمین نرخ خوردگی بر اساس شرایط محیطی [۶]

[5] PACER LIME
[6] Corrosion Damage Algorithm
[7] Total suspended particles

نتایج حاصل از این الگوریتم در بررسی‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته است و اکنون می‌توان گفت ساده سازی‌های به کار رفته در این الگوریتم نسبتاً منطقی و قابل قبول بوده‌اند. همچنین در یک بررسی جامع بر روی این الگوریتم پیش‌بینی‌های انجام شده توسط این الگوریتم با قرار دادن کوپن‌های استاندارد در ایستگاههای مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفته و تطابق نسبتاً خوبی مشاهده شد. باید گفت که تلاش‌های بعدی برای اصلاح و بهبود کارکرد این الگوریتم نتوانستند تغییر محسوسی در نتایج حاصل، داشته باشند[۶].

۲-۶-۳- استاندارد ISO

تقسیم‌بندی اتمسفرها به دریایی، صنعتی و روستایی که پیشتر به آنها اشاره شده بسیار گسترده هستند و لذا نمی‌توان با استفاده از آنها ویژگی های خاص اتمسفری را حتی در یک مقیاس کلان به دقت مشخص نمود. لازم است که گروههای دیگری نظیر آب و هوایی کویری، حاره، شهری، نیمه صنعتی و دریای- صنعتی نیز به این طبقه‌بندی افزوده شود. امّا حتی با ریزتر کردن تقسیم‌بندی‌های محیطی به گروههای ذکر شده باز هم نمی‌توان از این طبقه‌بندی برای اهدافی چون پیش‌بینی میزان خورندگی یک آلیاژ خاص در یک اتمسفر ویژه استفاده نمود و لذا نیاز است که یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای مشخص کردن میزان خورندگی اتمسفرهای گوناگون تعریف شود.

در اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی کمیته فنی ١٥٦ سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[8] که بر روی خوردگی فلزات و آلیاژها متمرکز شده بود، خوردگی اتمسفری را در صدر اولویت‌های کاری خود قرار داد. در نتیجه مطالعات انجام شده توسط این کمیته یک سیستم طبقه‌بندی جدید توسعه یافته و در قالب ٤ استاندارد توصیف شد مطابق جدول ۲-۲ [٤].

جدول ۲-۲- استانداردهای ایزو برای کلاس بندی خورندگی اتمسفرهای مختلف[۴]

ISO 9223: خوردگی فلزات و آلیاژها- طبقه‌بندی خورندگی اتمسفری
ISO 9224: خوردگی فلزات و آلیاژها- مقادیر راهنما برای میزان خورندگی در گروه‌های مختلف اتمسفری
ISO 9225: خوردگی فلزا ت و آلیاژها- روش‌های اندازه‌گیری مقدار آلاینده‌های اتمسفری
ISO 9226: خوردگی فلزات و آلیاژها- روش‌های تعیین نرخ خوردگی نمونه‌های استاندارد به منظور تعیین میزان خورندگی اتمسفری

این سیستم بر مبنای دو روش بنا شده است. هر دو روش در نهایت منجر به قرار گرفتن محیط مورد نظر در یکی از گروههای پنجگانه‌ای خواهد شد که در این استاندارد برای تعریف میزان خورندگی اتمسفری تعیین شده‌اند. این گروههای پنجگانه و توصیف کیفی آنها از میزان خورندگی را در جدول ۲-۳ مشاهده می کنید.

[8] International Standard Origination

جدول ۲-۳- گروههای پنجگانه مشخص کننده میزان خورندگی محیط و توصیف کیفی آنها[۸]

میزان خوردگی	رده
بسیار کم	C1
کم	C2
متوسط	C3
زیاد	C4
بسیار زیاد	C5

روش اول طبقه‌بندی اتمسفری در این استاندارد شامل قرار دادن نمونه‌های فولاد کربنی، روی، مس و آلومینیوم در ایستگاه مورد مطالعه است. نمونه‌ها به مدت یکسال در معرض محیط قرار خواهند گرفت پس از این زمان نمونه‌ها برداشته شده و میزان کاهش وزن آنها در اثر خوردگی به دست خواهد آمد. نرخ خوردگی با استفاده از روابط ریاضی موجود از روی کاهش وزن محاسبه خواهد شد. با استفاده از نرخ خوردگی حاصل برای آلیاژهای استاندارد یاد شده و مقایسه آن با جداول ارائه شده در این استاندارد می‌توان میزان خورندگی اتمسفری را در محل آزمون تعیین نمود. جدول (۲-٤) نشان دهنده طبقه بندی اتمسفرهای گوناگون با استفاده از میزان کاهش وزن نمونه‌های استاندارد است[۹].

روش دوم به تعیین میزان خورندگی محیط با اندازه‌گیری پارامترهای آب و هوایی می‌پردازد. این روش در برگیرنده تعیین سه کمیت اساسی محیط(مدت زمان خیس بودن سطح، نرخ رسوب SO_2 و نرخ رسوب کلرید) است. مدت زمان خیس بودن سطح با استفاده از اندازه‌گیری رطوبت نسبی و دما تخمین زده می‌شود. این تخمین بر اساس محاسبه درصد زمان‌هایی که رطوبت نسبی[۹] بالاتر از ۸۰٪ و دما بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد بوده به کل مدت زمان قرار داشتن نمونه در محیط، انجام می‌شود. با تعیین شدن زمان خیس بودن سطح می‌توان کلاس TOW محل آزمایش را بر اساس جدول ۲-٤ تعیین نمود[۱۰].

[۱] رطوبت نسبی، نسبت رطوبت موجود در هوا به مقدار رطوبت اشباع در شرایط خاص یک منطقه است

جدول ۲-۴- طبقه بندی اتمسفری با استفاده از میزان کاهش وزن نمونه‌های استاندارد ایزو 9223[۹]

طبقه‌بندی میزان خوردگی	نرخ خوردگی فلزات				
	واحد	**فولاد ساده کربنی**	**روی**	**مس**	**آلومینیم**
C1	$g/(m^2a)$ µm/a	$r_{corr} \leq 10$ $r_{corr} \leq 1.3$	$r_{corr} \leq 0.7$ $r_{corr} \leq 0.1$	$r_{corr} \leq 0.9$ $r_{corr} \leq 0.1$	ناچیز –
C2	$g/(m^2a)$ µm/a	$10 < r_{corr} \leq 200$ $1.3 < r_{corr} \leq 25$	$0.7 < r_{corr} \leq 5$ $0.1 < r_{corr} \leq 0.7$	$0.9 < r_{corr} \leq 5$ $0.1 < r_{corr} \leq 0.6$	$r_{corr} \leq 0.6$ –
C3	$g/(m^2a)$ µm/a	$200 < r_{corr} \leq 400$ $25 < r_{corr} \leq 50$	$5 < r_{corr} \leq 15$ $0.7 < r_{corr} \leq 2.1$	$5 < r_{corr} \leq 12$ $0.6 < r_{corr} \leq 1.3$	$0.6 < r_{corr} \leq 2$ –
C4	$g/(m^2a)$ µm/a	$400 < r_{corr} \leq 650$ $50 < r_{corr} \leq 80$	$15 < r_{corr} \leq 30$ $2.1 < r_{corr} \leq 4.2$	$12 < r_{corr} \leq 25$ $1.3 < r_{corr} \leq 2.8$	$2 < r_{corr} \leq 5$ –
C5	$g/(m^2a)$ µm/a	$650 < r_{corr} \leq 1500$ $80 < r_{corr} \leq 200$	$30 < r_{corr} \leq 80$ $4.2 < r_{corr} \leq 8.4$	$25 < r_{corr} \leq 50$ $2.8 < r_{corr} \leq 5.6$	$5 < r_{corr} \leq 10$ –

جدول ۲-۵- تعیین کلاس TOW در استاندارد ایزو 9223 [۸]

رده	زمان خیس بودن سطح		مثال
	h/a	٪	
t_1	$t \leq 10$	$t \leq 0.1$	اتمسفر داخل ساختمان با درجه حرارت و رطوبت کنترل شده
t_2	$10 < t \leq 250$	$0.1 < t \leq 3$	اتمسفر داخلی ساختمان بدون کنترل شرایط آب و هوایی در مناطق مرطوب
t_3	$250 < t \leq 2500$	$3 < t \leq 30$	اتمسفر خارج از ساختمان در مناطق خشک و سرد یا بسیار گرم
t_4	$2500 < t \leq 5500$	$30 < t \leq 60$	اتمسفر خارج از ساختمان در اکثر آب و هواها بجز مناطق خشک و سرد یا بسیار گرم
t_5	$t < 5500$	$t < 60$	آب و هواهای شرجی

اندازه گیری نرخ رسوب دی اکسید سولفور موجود در هوا را می‌توان توسط شمع یا صفحات سولفیداسیون اندازه‌گیری نمود. این اطلاعات بعداً برای طبقه‌بندی سولفور یا آنطور که مصطلح شده است کلاس P، مطابق جدول ۲-٦ به کار خواهد رفت[۱۰].

جدول ۲-۶- طبقه‌بندی میزان دی اکسید سولفور اتمسفر بر اساس استاندارد ایزو 9223 [۱۰]

رده	غلظت SO_2 $mg/(m^2.d)$	نرخ رسوب SO_2 mg/m^3
P0	$P_c \leq 12$	$P_d \leq 10$
P1	$12 < P_c \leq 40$	$10 < P_d \leq 35$
P2	$40 < P_c \leq 90$	$35 < P_d \leq 80$
P3	$90 < P_c \leq 250$	$80 < P_d \leq 200$

صفحات خشک و یا شمع خیس برای اندازه‌گیری میزان کلر به کار می‌رود و اطلاعات حاصل با استفاده از جدول ۲-۷ طبقه‌بندی کلرید را مشخص خواهد کرد[۱۰].