



ارائه روش نیمه کمی بازرسی بر مبنای ریسک برای ترک خوردن تنش بالگردها

عمران کرمی زرنندی^۱، حمیدرضا تفرشی، شهرام باقری، محمود صمدزاده، دکتر علیرضا فیض بخش

^۱. شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران - پنجا (کارشناسی ارشد انتخاب و شناسایی مواد)

چکیده

تکنولوژی بازرسی بر مبنای ریسک، ابزاری مدیریتی جهت تشخیص و اولویت بندی ریسک‌های مربوط به یک سیستم صنعتی است که بر اساس آن ارائه مجموعه برنامه‌های بازرسی حساب شده، به هنگام، ایمن و قابل اطمینان و با هزینه مالی کمتر امکان پذیر می‌گردد. نظر به روند رو به رشد فرایند بازرسی ریسک، در این پژوهش برای اولین بار مدل نیمه کمی برای بازرسی بر مبنای ریسک در بالگردها در ایران ارائه شده است. ترک خوردن تنش از جمله مکانیزم‌های مهم خوردگی در بالگردها است که بیش از ۱۰٪ یا ۱۵٪ از تخریب بالگردها را شامل می‌شود. بدین منظور در این پژوهش میزان استعداد به ترک خوردگی تنش در انواع مختلف محیط‌های دارای کلر، کاستیک یا هیدروژن و نحوه محاسبه کمی ریسک در هر یک از شرایط مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بازرسی بر مبنای ریسک؛ احتمال وقوع؛ پیامد وقوع؛ ریسک؛ ترک خوردن تنش؛ بالگرد.

مقدمه

بدون شک امروزه توجه روزافزونی نسبت به مقوله ریسک و روش‌های مبتنی بر ریسک جهت تدوین استراتژی‌های بازرسی، نگهداری و مدیریت در صنایع فرآیندی نفت و گاز و صنایع نیروگاهی سراسر جهان و از جمله ایران به وجود آمده است. درک و مدیریت ریسک به یک موضوع مهم اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تبدیل شده است. در واقع، درک ریسک و مدیریت آن اهمیت بیشتری نسبت به کاهش و یا حذف آن پیدا کرده و برخلاف نگرش غلط گذشته مدیران صنعت نسبت به لوکس و بی‌فایده بودن این گونه فعالیت‌ها، استقبال روزافزون آنها برای سرمایه‌گذاری در زمینه مدیریت ریسک و فعالیت‌های مرتبط با آن به امید رسیدن به سوددهی بیشتر، قابل توجه می‌باشد.

تکنولوژی بازرسی بر مبنای ریسک به صاحبان صنعت این توانایی را می‌دهد تا محدوده‌ای از فاکتورهای کلیدی، نظیر در نظر گرفتن سطح قابلیت اعتماد به تجهیزات، و همچنین ایمنی، محیط زیست، و مسائل مالی را در فرآیندهای تصمیم‌گیری خود مدنظر داشته باشند. استفاده از بازرسی بر مبنای ریسک، ابزاری را جهت بهبود مستمر برنامه‌های بازرسی از تجهیزات فراهم نموده و کاهش سیستماتیک ریسک آنها را به دنبال خواهد داشت. همچنین می‌توان از نتایج بازرسی بر مبنای ریسک به عنوان ابزاری جهت برنامه‌ریزی سالانه سازمان‌ها استفاده نمود؛ به گونه‌ای که با استفاده از آن می‌توان منابع و بودجه لازم برای عملکرد تجهیزات در سطوح قابل قبولی از ریسک و کارآیی را مشخص نمود [۱].

بازرسی بر مبنای ریسک (RBI) ابزاری مدیریتی جهت تشخیص و اولویت‌بندی ریسک‌های مربوط به سیستم‌های بالگردها و ارائه برنامه بازرسی بر اساس ریسک‌های محاسبه شده می‌باشد. به طور خلاصه، در تکنیک RBI ابتدا میزان احتمال و پیامد از کارافتادگی قطعات و از حاصل ضرب این دو فاکتور (یعنی احتمال و پیامد) میزان ریسک به دست می‌آید. سپس بر اساس اندازه ریسک به دست آمده، تجهیزات اولویت‌بندی شده و برنامه بازرسی برای آنها تعریف می‌گردد. در این تکنیک، برخلاف برنامه‌های سنتی بازرسی، فاصله زمانی ثابتی برای بازرسی تعریف نمی‌گردد، بلکه هر دستگاه بازه زمانی و برنامه جداگانه‌ای جهت بازرسی دارد [۲].

تلاش‌ها برای اجرای متدولوژی بازرسی ریسک در صنایع هوایی از بخش هواپیمایی آغاز شد، که علت آن نیز آتش سوزی و سقوط در هواپیمای آزمایشی AS-204 در ژانویه ۱۹۶۷ بود که در جریان این آتش سوزی و سقوط ۳ نفر از مسافران کشته شدند. این اتفاق باعث شد تا ناسا ۱ ماه در زمینه تولید محصولات جدید عقب نشینی داشته باشد که این امر شامل از دست دادن حمایت جمعی، هزینه بسیار زیاد برای درگیر نمودن ۱۵۰۰ نفر در جریان تحقیقات بعدی، و هزینه بیش از ۴۱۰ میلیون دلاری ناسا بود. قبل از حادثه هواپیمای آپولو، ناسا تلاش کرده بود تا فعالیت‌های خوب نگهداری برای تامین کیفیت و کمیت قطعات مشخص شود.

پس از آن در سال‌های ۱۹۶۹ برای شاتل‌های هوایی نیز برنامه مدیریت ریسک در نظر گرفته شد که مشخص شد برای فرود یک سفینه در ماه درصد موفقیت کمتر از ۵٪ است. علت این امر کمی بودن بررسی ریسک در آن شاتل بود. با بررسی سوابق ناسا به این موضوع پی می‌بریم که با اتفاق دوباره‌ای در ژانویه ۱۹۸۶ تمرکزهای

زیادی دوباره بر روی مسئله مدیریت ریسک معطوف شد. یک مطالعه ریسک کیفی در ارتش هوایی آمریکا در سال ۱۹۸۶ به بررسی چالش تخریب و احتمال تخریب راکت‌های خشک و محکم پرداختند. مدیران ناسا محاسبات آنان را رد نمودند و ترجیح دادند تا به قضاوت مهندسان خود اطمینان کنند که باعث سقوط ۱ هواپیما در سال ۱۹۸۶ و مرگ عده‌ای شد.

از زمان وقوع حادثه برای هواپیماها از سال ۱۹۹۵ در آمریکا برنامه‌ای برای آنالیز ریسک کمی برای تامین امنیت در زمان طراحی و کارکرد هواپیماهای نظامی طراحی شد. در سازمان هوایی آمریکا تلاش شد تا به منطقه امنیت بالا با انتشار مقالات ریسک SAIC دست یابند. با این نوع مدیریت سازمان هوایی آمریکا توانست کنگره و مجلس را قانع کند تا در این راه هزینه زیادی را برای هواپیماها و سپس بالگردهای نظامی صرف کنند حتی با وجود اینکه هیچ حادثه‌ای در آن مقطع به وجود نیامده باشد. گزارشات نشان می‌دهد که احتمال تخریب به شدت پس از اجرایی شدن برنامه جامع مدیریت ریسک در سازمان هوایی آمریکا کاهش یافته است [۳].

همچنین در زمینه بالگردها نیز در ارتش آمریکا بررسی‌هایی بر روی مدیریت ریسک از سال ۱۹۹۷ انجام شد که در گذر زمان مطالعات و روش‌های مختلفی در این زمینه انجام شد. این تحقیقات و بررسی‌ها در بالگردهای کانادایی از سال ۲۰۰۲ شروع به انجام و پیشرفت نموده است.

در مجموع اهداف کلی از اجرای یک برنامه RBI در سیستم‌های هوایی عبارت‌اند از: حجم کمتر بازرسی و فعالیت‌های تعمیراتی؛ افزایش مدت زمان کارایی؛ بهینه‌سازی هزینه‌های بازرسی، تعمیر و نگهداری؛ کاهش تعداد و مدت زمان توقف‌های برنامه‌ریزی شده و غیر برنامه‌ریزی شده؛ شناسایی پتانسیل‌های خرابی و شکست و در نتیجه کاهش ریسک وقوع حوادث؛ توجه و تمرکز خاص بر روی تجهیزات بحرانی و اولویت‌بندی تجهیزات جهت بازرسی؛ تجزیه و تحلیل ریسک و اثرات ناشی از آن؛ شناسایی پارامترهای فرآیندهای مؤثر بر میزان خوردگی؛ تضمین صحت عملکرد، ایمنی و قابلیت اطمینان و سود اقتصادی بیشتر می‌باشد.

خروجی موردنظر از اجرای فرآیند RBI باید ایجاد پیوندی مناسب بین محاسبات ریسک و بازرسی‌های اثربخش و دیگر فعالیت‌های کاهش‌دهنده ریسک، به منظور مدیریت ریسک‌ها باشد. فرآیند RBI می‌تواند:

الف. تمام قطعات مورد ارزیابی را براساس میزان ریسک طبقه‌بندی کند؛

ب. برای هر بخش از قسمت‌ها یک برنامه بازرسی با جزئیات کامل ارائه دهد، از جمله:

۱. روش (های) بازرسی که باید استفاده شود (مثلاً، چشمی، UT، رادیوگرافی)

۲. محدوده اعمال روش (های) بازرسی (مثلاً، درصدی از کل سطح که باید آزمایش شود و یا یک

موقعیت خاص)

۳. زمان‌بندی بازرسی‌ها/تست‌ها

۴. مدیریت ریسک، که از انجام برنامه بازرسی حاصل می‌شود

ج. هر نوع فعالیت دیگری مربوط به کاهش ریسک را ارائه دهد (مانند تعمیرات، تعویض‌ها و یا به-

روزرسانی و پیشرفته کردن تجهیزات ایمنی)؛

د. سطوح ریسک قابل قبول را بعد از انجام برنامه‌های بازرسی و همچنین دیگر فعالیت‌های مرتبط با کاهش

ریسک، برای همه تجهیزات ارائه دهد.

در این مقاله سعی بر این است تا برای اولین بار، روش نیمه کمی برای آنالیز ریسک و روش‌های بازرسی

مطبوعه برای خوردگی تنشی پیشنهاد داده شود.

تعریف اولیه اصطلاحات و روش کار

ریسک

ریسک در واقع حاصلضرب دو پارامتر احتمال تخریب (POF) در پی آمد تخریب (COF) است.

$$RISK = POF \times COF \quad (1)$$

پی آمد تخریب (COF): پی آمد تخریب دارای تعریف بسیار ساده و روانی است، پی آمد تخریب عبارت

است از اتفاقی که در صورت تخریب از هر یک از قطعات بالگرد رخ می‌دهد. بدین منظور بر اساس نظرات

مهندس خوردگی و مهندس سازه بالگرد این موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد که در صورت وقوع تخریب

آنگاه پیامد آن تخریب برای بالگرد چگونه است. بر اساس نظرات مهندس سازه بالگرد و مهندس خوردگی برای

هر جزء از سازه بالگرد پیامد تخریب هر جزء را از A تا E دسته بندی می‌نمایند. به گونه‌ای که تجهیزات و

اجزایی از بالگرد که وقوع تخریب در آن‌ها دارای خطرات کمتری است سطوح A و B و به ترتیب هر چقدر

وقوع تخریب در تجهیز دارای خطرات بیشتری سطوح پیامد به C، D و E گسترش می‌یابد. این سطوح بر اساس

نظرات مهندس سازه بالگرد و مهندس خوردگی تعیین می‌شود [۴].

احتمال تخریب (POF): احتمال تخریب در واقع توسط محاسباتی که بر روی فاکتور تخریب صورت می‌-

گیرد قابل محاسبه است. محاسبه‌های صورت گرفته بر روی فاکتورهای تخریب بر اساس مدل‌های مختلف

تخریبی در ادامه‌ی این فصل ارائه خواهد شد. بر روی فاکتور تخریب پارامترهای مهمی تاثیرگذار هستند که از

جمله آن‌ها سال، مکانیزم تخریب موثر و بازرسی صورت گرفته بر روی تجهیز و قطعه است. همچنین دو پارامتر

بسیار مهمی که به کاهش احتمال تخریب در گذشته و آینده کمک می‌کنند تاریخ بازرسی و تاثیرات بازرسی

است [۴].

پس از این که در مورد تجهیزات موجود در بالگرد محاسبه میزان استعداد وقوع تخریب و پیامد تخریب

بررسی شد، سطح ریسک در هر جزء توسط ماتریس ریسک (شکل ۱) بررسی و محاسبه می‌شود [۴]. با تعیین

سطح ریسک در هر قطعه، بسته به نظر مدیران، سطحی از ریسک به عنوان سطح معیار پذیرفته می‌شود. و پس از

پذیرش آن سطح ریسک تمامی تجهیزاتی که در قسمت مساوی یا بیشتر از آن سطح ریسک هستند تحت

بازرسی قرار می‌گیرند تا سطح ریسکشان کاهش یابد. لازم به ذکر است که در فرایند بازرسی بر مبنای ریسک تنها پارامتری که با بازرسی قابل تغییر و کاهش است سطح POF احتمال وقوع تخریب است.

فاکتور تخریب

فاکتور تخریب به منظور محاسبه احتمال تخریب بر اساس بازرسی‌های صورت گرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع اصلی فاکتور تخریب محاسبه پیوسته میزان تخریب موجود بر اساس مدت زمان در سرویس بودن قطعات و تاثیر بازرسی است. فاکتورهای تخریبی که در حال حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرند مکانیزم تخریب زیر است [۴].

الف) ترک خوردن تنشی (Stress Corrosion Cracking) - D_f^{SCC}

دسته بندی احتمال تخریب بر اساس فاکتور تخریب کل در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین فاکتور

تخریب ترک خوردگی تنشی، D_{f-gov}^{SCC} - با معادله زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

$$D_{f-gov}^{SCC} = \max[D_f^{caustic}, D_f^{SSC}, D_f^{HIC/SOHIC}, D_f^{CLSCC}] \quad (2)$$

محاسبه فاکتور تخریب ترک خوردن تنشی

معرفی ترک خوردن تنشی

بازرسی از بدنه بالگرد در طی نگهداری روتین همواره شامل جستجو در مورد نشانه‌هایی از ترک خوردگی تنشی (شکل ۲) است. همچنین خوردگی تنشی در حدود ۵ الی ۱۰٪ از خوردگی بدنه بالگرد در تمام دنیا را تشکیل می‌دهد. ترک خوردن تنشی که به نام ترک خوردن ناشی از محیط نیز شناخته می‌شود، توسط ترکیبی از تنش و خوردگی ایجاد می‌شود. تنش اعمال شده بر فلز شاید ناشی از وجود بار خارجی مثل بارهای آیرودینامیک ساختاری و یا تنش داخلی که ناشی از منشا متفاوت در زمان ساخت مثل نورد و یا خمش و یا سرد کنندگی غیر یکنواخت در طی عملیات حرارتی، و ماشین کاری بدون تنش زدایی مناسب است. تنش‌های اضافی داخلی همواره نیروی پیشران برای ترک خوردگی تنشی در اجزای فلزی هستند. منبع پتانسیل دیگر تنش در ساختار بالگردها در سرچفت‌ها است که سفت می‌شود، بنابراین باعث ایجاد ترک خوردگی تنشی در مواد در تماس با سرست‌ها دارد. تخریب با ترک خوردن تنشی می‌تواند در سطح تنشی کمتر از تنش تسلیم فلز رخ دهد [۵].

مثال‌های بسیار زیادی از وقوع ترک خوردن تنشی و سقوط بالگرد در جهان منتشر شده است که از جمله آن می‌توان به سقوط بالگرد نظامی در کره به علت ترک خوردن تنشی بست‌های فولادی موتور در سال ۲۰۰۵ [۶] و یا سقوط بالگرد به علت ترک خوردن تنشی پره دوار بالگرد S-61N در دریای سیاه در سال ۱۹۷۵ که باعث مرگ ۶ نفر شد از جمله حوادث دردناک به وقوع پیوسته به دلیل خوردگی تنشی بوده‌اند [۷].

مشخصه و شرایط برخی از آلیاژهای مهم در بالگرد که در معرض ترک خوردن تنش قرار می‌گیرند در جدول ۲ نشان داده شده است. این جدول مشخصات اساسی از جمله محیط برای وقوع خوردگی تنش را نشان می‌دهد که در ادامه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸].

در ادامه نظر به اهمیت انواع مختلف خوردگی‌های تنش‌های مختلف محاسبه نیمه کمی ریسک برای این نوع خوردگی در محیط‌های مختلف پروازی پرداخته می‌شود و روش‌های بازرسی مربوط به آن نیز توضیح داده خواهد شد.

الف) محاسبات فاکتور تخریب SCC- ترک خوردن ناشی از کاستیک

شرایط وقوع: اگر مواد سازه از جنس فلز باشند و در محیط مقداری کاستیک باشد این نوع خوردگی رخ می‌دهد.

اطلاعات مورد نیاز: اطلاعات اصلی مورد نیاز در دو جدول ۳ و ۴ داده شده است که در جدول ۳ اطلاعات کلی و جدول ۴ نحوه محاسبه ترک خوردن کاستیکی را نشان می‌دهد.

فرضیات اساسی: فرضیه اساسی در تعیین فاکتور تخریب برای ترک خوردن کاستیکی این است که آسیب می‌تواند بر اساس مواد و نوع شرایطی که دارد در محدوده بالا، متوسط یا کم قرار گیرد. بر اساس میزان مستعد بودن یک نمایه شدت برای تعیین استعداد فلز به ترک خوردن کاستیکی در نظر گرفته می‌شود.

محاسبه فاکتور تخریب:

- بررسی: یک فلوچارت از مراحل مورد نیاز برای ترک خوردن کاستیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. در بخش‌های زیر نیز نحوه محاسبه کاملاً توضیح داده می‌شود.
- تأثیر بازرسی: بازرسی‌ها بر اساس انتظار تأثیر که از آن‌ها در جذب خوردگی کاستیکی می‌رود انجام می‌شود. مثال‌هایی از فعالیت‌های بازرسی برای تعیین خوردگی کاستیکی در جدول ۵ نشان داده شده است [۴]. میزان تأثیر هر روش بازرسی تعیین کننده این امر است که دوره بازرسی بعدی چگونه و چه زمانی است.
- محاسبه: فرایند زیر به منظور محاسبه فاکتور تخریب ترک خوردن کاستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

الف) گام اول- تعیین تعداد بازرسی و تأثیر هر بازرسی انجام شده تا کنون.

ب) تعیین عمر در سرویس قطعه از زمانی که بازرسی با تأثیر A، B، C و یا D انجام شده است.

ج) تعیین استعداد ترک خوردن با استفاده از شکل ۳ انجام شده. به یاد داشته باشید که ریسک "بالا" باید به نقاطی که ترک در آن وجود دارد و دیده شده اختصاص یابد.

د) بر اساس استعداد یک فاکتور شدت S_{IT} از جدول ۶ به آن تعلق پذیرد.

ه) تعیین فاکتور تخریب پایه با استفاده از جدول ۷ و اینکه تعداد بازرسی‌ها و تاثیر گذاری آن‌ها چگونه بوده است.

و) تعیین فاکتور تخریب نهایی با استفاده از رابطه زیر:

$$D_f^{caustic} = D_{fB}^{caustic} (\text{سن})^{1.1} \quad (۳)$$

ب) فاکتور تخریب SCC- ترک خوردن تنش سولفیدی

سختی بالای ماده و حضور H_2S در هوا یا سیال موتور عامل اصلی بروز این نوع خوردگی در بدنه بالگرد و اجزای موتوری آن است.

اطلاعات مورد نیاز: اطلاعات اصلی مورد نیاز برای آنالیز در جدول ۳ داده شده و اطلاعات خاص برای تعیین فاکتور تخریب ترک تنش سولفیدی در جدول ۸ بیان شده است.

فرضیات اساسی: فرضیه اساسی در تعیین فاکتور تخریب برای ترک خوردن تنش سولفیدی این است که آسیب می‌تواند بر اساس مواد و نوع شرایطی که دارد در محدوده بالا، متوسط یا کم قرار گیرد. بر اساس میزان مستعد بودن یک نمایه شدت برای تعیین استعداد فلز به ترک خوردن کاستیکی در نظر گرفته می‌شود [۹].

تعیین فاکتور تخریب:

- بررسی کلی: فلوچارت تعیین فاکتور تخریب برای ترک خوردن تنش سولفیدی در شکل ۴ نشان داده شده است. پاراگراف‌های بعدی اطلاعات بیشتری درباره محاسبات ارائه می‌شود.
 - تاثیر بازرسی: بازرسی‌ها بر اساس تاثیر مورد انتظار از آن‌ها در تعیین ترک‌های تنش سولفیدی دسته بندی شده و به صورت تقریباً صحیح نرخ تخریب را بدست می‌آورند. مثال‌هایی از فعالیت‌های بازرسی قابل انجام در حین سرویس و خارج از سرویس در جدول ۹ نشان داده شده است [۴]. تاثیر گذاری هر بازرسی اجرا شده با بازه زمانی باید با جدول ۹ و تعداد و روش موثرترین بازرسی قابل اجرا برای تعیین فاکتور تخریب مشخصه‌یابی شود. تعداد و روش پراثرترین بازرسی برای تعیین مکانیزم تخریب به کار گرفته می‌شود.
 - تعیین فاکتور تخریب: مراحل زیر برای تعیین فاکتور تخریب خوردگی تنش سولفیدی بر اساس شکل ۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴ و ۱۰].
- الف) تعداد بازرسی‌هایی که تا کنون انجام شده و سطح آن‌ها را همانگونه که پیش از این هم گفته شده است مورد بررسی قرار دهید.
- ب) از زمانی آخرین بازرسی با سطح A، B، C یا D مقدار سن در سرویس بودن قطعه مشخص می‌شود.

ج) شدت و پتانسیل محیط را بر اساس نرخ ورود هیدروژن بر مبنای میزان H_2S موجود در آب یا سیال یا بخار هوای موجود و میزان pH بر اساس جدول ۱۰ بدست آورید. بیاد داشته باشد که سطح بالا برای زمانی است که ترک مشاهده شده باشد.

د) بر اساس شکل ۵ و جدول ۱۱، بر طبق مرحله ۳ و بیشترین عدد سختی جوش و اطلاعاتی که درباره PWHT موجود است استعداد به ترک خوردن را بیابید.

ه) بر اساس مرحله «د» نمایه شدت را از جدول ۱۲ بیابید.

و) فاکتور تخریب پایه برای خوردگی ترک خوردن تنشی ناشی از سولفید با استفاده از جدول ۷ محاسبه شود، D_{fB}^{SSC} ، که این کار بر اساس تعداد و پر بازده ترین بازرسی ای که تاکنون صورت گرفته انجام می شود.

ز) محاسبه فاکتور تخریب نهایی بر اساس مدت زمان در سرویس بودن تجهیز از زمان آخرین بازرسی که همان سال در مرحله ۲ می باشد. در این معادله فرض بر این است که احتمال ترک خوردن با گذشت زمان افزایش یافته که این باعث دور شدن شرایط از شرایط نرمال می شود.

$$D_f^{SSC} = D_{fB}^{SSC} (\text{سن})^{1.1} \quad (4)$$

ج) فاکتور خوردگی SCC- تردی هیدروژنی (HIC-SOHIC)

ترک خوردن ناشی از القای هیدروژن یک ترک داخلی است، و به عنوان یک ترک داخلی تعریف می شود که باعث اتصال بلیسترهای هیدروژنی به یکدیگر درون فلز یا در سطح فلز می شود. تنش خارجی برای تشکیل خوردگی هیدروژنی (HIC) مورد نیاز نمی باشد. نیروی محرکه برای ترک خوردن تنش های بالا در اطراف و شعاع بلیستر (تاول) هیدروژنی است که باعث وارد نمودن فشار داخلی به بلیستر می شود. برهم کنش بین این میدان تنشی بالا باعث ایجاد ترک و توسعه بلیستر در مسیرهای مختلف در فولاد می شود.

فشار تشکیل بلیستر به نرخ نفوذ هیدروژن در فولاد بستگی دارد. منبع هیدروژن در فولاد واکنش با هیدروژن سولفید یا حضور هر گونه هیدروژنی در هنگام پوشش دهی در فولاد است. برای به وقوع پیوستن این نوع تردی وجود رطوبت ضروری است، و به وقوع پیوستن بلیستر مرهون به حرکت هیدروژن است که به دو پارامتر اصلی، به نام های pH و میزان H_2S وابسته است. عموماً فلاکس هیدروژن در فولاد در محدوده pH طبیعی و خنثی بسیار کم است، و با افزایش و کاهش آن میزان فلاکس هیدروژن نیز افزایش می یابد. خوردگی در pH های کم به دلیل حضور H_2S است و در pH های بالا به دلیل وجود یون های بیوسولفید است. مشخص شده است که در صورتی که در محیط ۵۰ ppm از H_2S یا هر ماده هیدروژن دار دیگر با ۵۰ ppm هیدروژن اتمی باشد برای وقوع خوردگی تردی هیدروژنی (HIC) کافی است [۱۱].

بلیسترهای هیدروژن حفره های اتمی پر شده از هیدروژنی هستند که در سطح یا مرکز فلز شکل گرفته اند. بلیسترها معمولاً در فولادهای نورد شده احتمال رخ داد بیشتری دارد. مستعد بودن به بلیستر شدن هیدروژنی به

کیفیت فولاد، و تعداد و اندازه ناخالصی‌های موجود در آن نیز بستگی دارد. با کاهش میزان سولفور احتمال کم کردن حساسیت فولاد به خوردگی هیدروژنی وجود دارد. افزودن کلسیم یا عناصر نادر زمینی که وظیفه کنترل سولفید را دارند.

استعداد فولاد برای بلیسترینگ مستقیماً به میزان سولفور موجود در فولاد وابسته است. این باید مورد توجه قرار گیرد که بلیستر شدن تنها یک مکانیزم تخریب نیست که منجر به ترک خوردن ناشی از القای هیدروژن و نهایتاً تردی هیدروژنی در ماده شود. بلیستر شدن باعث ایجاد حفراتی می‌شود که یکپارچگی مکانیکی را تحت تاثیر قرار داده و مخصوصاً در اطراف نواحی جوش کاری شده می‌تواند باعث ترک خوردن ناشی از القای هیدروژن شود. این نکته بسیار مهمی است که باید در محاسبه استعداد به خوردگی هیدروژنی مدنظر قرار گیرد. نوعی دیگری از خوردگی هیدروژنی نیز وجود دارد که معمولاً در فلز پایه اتفاق می‌افتد و در نزدیکی خط جوش و HAZ که تنش بالا است حساسیت بیشتری دارد که به نام SOHIC نیز معروف است. سطح تنش وارد شده بر روی خوردگی هیدروژنی بسیار موثر است. همچنین گاهی در فرایندهای ساخت قطعات نیز احتمال به وجود آمدن خوردگی هیدروژنی وجود دارد که به پتانسیل هیدروژن دهی محیط وابسته است [۹۴].

شرایط وقوع خوردگی هیدروژنی در مواد فلزی رخ داده و یکی از عوامل مهم حضور هیدروژن در محیط و یا حضور H_2S است.

اطلاعات مورد نیاز: اطلاعات اصلی مورد نیاز برای آنالیز در جدول ۳ داده شده و اطلاعات خاص برای تعیین فاکتور تخریب خوردگی هیدروژنی در جدول ۱۳ بیان شده است.

فرضیات اساسی: فرضیه اساسی در تعیین فاکتور تخریب برای خوردگی هیدروژنی این است که آسیب می‌تواند بر اساس مواد و نوع شرایطی که دارد در محدوده بالا، متوسط یا کم قرار گیرد. بر اساس میزان مستعد بودن یک نمایه شدت برای تعیین استعداد فلز به خوردگی هیدروژنی در نظر گرفته می‌شود.

تعیین فاکتور تخریب:

- بررسی کلی: فلوچارت تعیین فاکتور تخریب برای ترک خوردن تنشی سولفیدی در شکل ۶ نشان داده شده است. پاراگراف‌های بعدی اطلاعات بیشتری درباره محاسبات ارائه می‌شود.
- تاثیر بازرسی: بازرسی‌ها بر اساس تاثیر مورد انتظار از آن‌ها در تعیین نرخ خوردگی هیدروژنی دسته بندی شده و به صورت تقریباً صحیح نرخ تخریب را بدست می‌آورند. مثال‌هایی از فعالیت‌های بازرسی قابل انجام در حین سرویس و خارج از سرویس در جدول ۱۴ نشان داده شده است. تاثیرگذاری هر بازرسی اجرا شده با بازه زمانی باید با جدول ۱۴ و تعداد و روش موثرترین بازرسی قابل اجرا برای تعیین فاکتور تخریب مشخصه یابی شود. تعداد و روش پراثرترین بازرسی برای تعیین مکانیزم تخریب به کار گرفته می‌شود.

- تعیین فاکتور تخریب: مراحل زیر شاید برای تعیین فاکتور تخریب تردی هیدروژنی بر اساس شکل ۶ مورد استفاده قرار گیرند:

الف) تعداد بارسی‌هایی که تا کنون انجام شده و سطح آن‌ها را همانگونه که پیش از این هم گفته شده است مورد بررسی قرار دهید.

ب) از زمانی آخرین بازرسی با سطح A، B، C یا D مقدار سن در سرویس بودن قطعه مشخص می‌شود.

ج) تعیین شدت محیطی (پتانسیل هیدروژن دهی محیط) برای ترک خوردن بر اساس میزان H_2S موجود در آب و pH بر اساس جدول ۱۵. به یاد داشته باشید که سطح بالا برای زمانی است که مطمئنیم ترک وجود دارد. همچنین برای محیط‌های خطرناک سطح را بالا فرض کنید.

د) استعداد به ترک خوردن هیدروژنی را با استفاده از شکل ۶ و جدول ۱۶ بر اساس حساسیت محیط محاسبه شده در مرحله ۳ محاسبه نمایید.

و) بر اساس استعداد مرحله ۴، نمایه شدت SMI را از جدول ۱۶ محاسبه کنید.

ز) با استفاده از جدول ۷ فاکتور تخریب پایه برای ترک خوردن هیدروژنی بر اساس میزان بازرسی و اثرگذاری آن به دست آید.

ح) محاسبه فاکتور تخریب نهایی بر اساس مدت زمان در سرویس بودن تجهیز از زمان آخرین بازرسی که همان سال در مرحله ۲ می‌باشد. در این معادله فرض بر این است که احتمال ترک خوردن با گذشت زمان افزایش یافته که این باعث دور شدن شرایط از شرایط نرمال می‌شود.

$$D_f^{\frac{HIC}{SOHIC}} = D_{fB}^{\frac{HIC}{SOHIC}} (\text{سن})^{1.1} \quad (5)$$

د) فاکتور تخریب SCC (خوردگی تنش‌ی ترکی)-CLSCC

در این قسمت هدف محاسبه فاکتور تخریب برای اجزایی از بالگرد که در معرض ترک خوردن تنش‌ی کلریدی (CLSCC) است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ترک خوردن تنش‌ی کلریدی (CLSCC) نوعی از خوردگی است که در فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای تیتانیوم، منیزیوم و آلومینیوم رخ می‌دهد. استعداد به CLSCC به غلظت یون‌های کلرید، دما و سایر فاکتورهایی که در جدول ۱۷ اشاره شده است بستگی دارد. در نظر داشته باشد که غلظت کلرید در آب می‌تواند بسیار بالاتر از مقداری که در کل ماده اندازه گرفته شده است، باشد. پس غلظت یون کلرید در مایع یا بخار برای ما بسیار مهم است. همچنین معمولاً خوردگی CLSCC در دمای بالای $30^\circ C$ تمایل به رخ دادن دارد [۱۱و۵]. مثال-هایی از منابع مرسوم کلرید در صنایع هوایی به شرح زیر می‌باشند:

- نمک‌های کلریدی احتمالی
- آب باران یا آب کلردار جمع شده بر روی تجهیزات

- کاتالیست‌ها
- آب باقی مانده از شستشوی تجهیزات
-

خوردگی CLSCC عموماً بین دانه‌ای بوده و شدیداً انباشت پذیر است. دسته اصلی فولادهای مستعد به این خوردگی فولادهای زنگ نزن هستند [۴]. اگر تمامی شرایط زیر برقرار باشد آنگاه اجزای بالگرد شدیداً مستعد به خوردگی CLSCC هستند و وضعیت بحرانی حاکم است:

- (الف) جنس مواد غیر از فولاد ساده کربنی مخصوصاً فولاد آستنیتی باشد.
- (ب) اجزایی که در معرض کلرید و آب هستند.
- (ج) دمای کاری آن بالای 38°C باشد [۴].

اطلاعات مورد نیاز: اطلاعات اصلی مورد نیاز برای خوردگی CLSCC در جدول ۳ و ۱۷ نشان داده شده است.

فرضیات اساسی: فرضیه اساسی در تعیین فاکتور تخریب برای CLSCC این است که آسیب می‌تواند بر اساس مواد و نوع شرایطی که دارد در محدوده بالا، متوسط یا کم قرار گیرد. بر اساس میزان مستعد بودن یک نمایه شدت برای تعیین استعداد فلز به CLSCC در نظر گرفته می‌شود.

محاسبه فاکتور تخریب:

- بررسی کلی: فلوچارت تعیین فاکتور تخریب برای CLSCC در شکل ۷ نشان داده شده است. در پاراگرافهای بعدی اطلاعات بیشتری درباره محاسبات ارائه می‌شود.
- تاثیر بازرسی: بازرسی‌ها بر اساس تاثیر مورد انتظار از آنها در تعیین نرخ خوردگی CLSCC دسته بندی شده و به صورت تقریباً صحیح نرخ تخریب را بدست می‌آورند. مثال‌هایی از فعالیت‌های بازرسی قابل انجام در حین سرویس و خارج از سرویس در جدول ۱۸ نشان داده شده است. تاثیرگذاری هر بازرسی اجرا شده با بازه زمانی باید با جدول ۱۸ و تعداد و روش موثرترین بازرسی قابل اجرا برای تعیین فاکتور تخریب مشخصه یابی شود. تعداد و روش پراثرترین بازرسی برای تعیین مکانیزم تخریب به کار گرفته می‌شود.
- محاسبه فاکتور تخریب: برای تعیین و محاسبه فاکتور تخریب CLSCC روند اجرایی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

(الف) تعداد بازرسی‌ها و روند تاثیرگذاری بازرسی برای تمامی بازرسی‌ها حاصل شود.

(ب) بر اساس آخرین زمان بازرسی و سطح بازرسی A، B، C، و D سن تجهیز را در نظر بگیرید.

ج) تعیین استعداد ترک خوردن با استفاده از شکل ۷ و جدول ۱۹ بر اساس دمای کاری و غلظت یون‌های کلر انجام می‌شود. به یاد داشته باشید که مستعد بودن بالا تنها در صورتی که ترک وجود داشته باشد قابل اتلاق است.

د) بر اساس استعداد مرحله ۳، نمایه شدت SVI از جدول ۲۰ به دست می‌آید.

ه) تعیین فاکتور تخریب پایه برای CLSCC، D_{fB}^{CLSCC} ، با استفاده از جدول ۷ بدست می‌آید.

و) محاسبه فاکتور تخریب نهایی بر اساس مدت زمان در سرویس بودن تجهیز از زمان آخرین بازرسی که همان سال در مرحله ۲ می‌باشد. در این معادله فرض بر این است که احتمال ترک خوردن با گذشت زمان افزایش یافته که این باعث دور شدن شرایط از شرایط نرمال می‌شود.

$$D_f^{CLSCC} = D_{fB}^{CLSCC} (\text{سن})^{1.1} \quad (6)$$

نتیجه گیری

نظر به روند رو به رشد فرایند بازرسی ریسک، در این پژوهش برای اولین بار مدل نیمه کمی برای بازرسی بر مبنای ریسک در بالگردها در ایران ارائه شده است. در فرایند بازرسی بر مبنای ریسک (RBI) که تقریباً از سال ۲۰۰۰ میلادی در مناطق مختلف اروپا و آمریکا برای بررسی میزان استعداد تخریب قطعات بالگردها آغاز شده است، بجای بازرسی دائم و همواره از تمامی قطعات بسته به سطح ریسک هر قطعه، بازرسی برای آن قطعات در دوره‌های زمانی مشخص انجام خواهد گرفت. در این پژوهش مدل نیمه کمی که دارای محاسبات روان‌تر و سطح قابل قبولی از پذیرش در دنیا است برای اولین بار برای بررسی ترک خوردن تنشی به کار گرفته شده است. ترک خوردن تنشی از جمله مکانیزم‌های مهم خوردگی در بالگردها است که بیش از ۱۰٪ یا ۱۵٪ از تخریب بالگردها را شامل می‌شود. بر اساس جدیدترین پژوهش‌ها این نوع خوردگی در انواع مختلف محیط‌های دارای کلر، کاستیک یا هیدروژن به وقوع می‌پیوندد. بدین منظور در این پژوهش میزان استعداد به ترک خوردگی تنشی و ریسک اصل از آن با روش‌های جدید مورد بررسی قرار گرفته است.

مراجع

1. Jan W. Gooch John K. Daher, "Electromagnetic Shielding and Corrosion Protection for Aerospace Vehicles", USA, 2007.
2. John Watkinson, "The Art of the Helicopter", Elsevier, UK, 2004.
3. Min Liao, Yan Bombardier and Guillaume Renaud, "Probablistic Risk Analysis For Aircraft Structures With Limited In-service Damages", 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, September 23rd – 28th, 2012, Brisbane, Australia.
4. RECOMMENDED PRACTICE, "Risk-Based Inspection Technology", SECOND EDITION, USA, 2008
5. Adrian P. Mouritz "Introduction to aerospace materials", Woodhead Publishing Limited, 2012.

6. Hong-Chul Lee, Jae-man Choi, Bokwon Lee, Tae-Gu Kim, “Failure analysis of stress corrosion cracking in aircraft bolts”, Engineering Failure Analysis 14 (2007) 209–217.
7. R.J.H. Wanhill, N. Symonds, A. Merati, T. Pasang, S.P. Lynch, “Five helicopter accidents with evidence of material and/or design deficiencies”, Engineering Failure Analysis 35 (2013) 133–146.
8. David Talbot and James Talbot, “Corrosion science and technology”, CRC PRESS series, USA, 2007.
9. Daniel Straub, “Generic Approaches to Risk Based Inspection Planning for Steel”, IBK publisher, GERMANY, 2004.
10. W. Wallace, D.W. Hoepfner and P.V. Kandachar , “AIRCRAFT CORROSION: CAUSES AND CASE HISTORIES”, Advisory Group for Aerospace Research and Development, FRANCE, July 1985
11. Lyuben D. Ivanov, “Reliability based renewal criteria for risk based inspection”, American Bureau of Shipping, 2003.

مجموعه جداول

جدول ۱: دسته بندی احتمال تخریب بر اساس فاکتور تخریب

طبقه بندی احتمال تخریب	
محدوده	طبقه بندی
$D_{f-total} \leq 2$	۱
$2 \leq D_{f-total} \leq 20$	۲
$20 \leq D_{f-total} \leq 100$	۳
$100 \leq D_{f-total} \leq 1000$	۴
$D_{f-total} \geq 1000$	۵

جدول ۲: مشخصات ترک خوردن تشیی در برخی آلیاژهای استفاده شده در بالگرد

ماده	ماده خورنده	مسیر ترک	توضیحات
آلیاژهای آلومینوم	یون Cl^-	مرز دانه‌ها	آلیاژهای پیرسختی شده و آلیاژهای دارای بیش از ۳٪ منیزیوم
فولاد زنگ نزن	یون Cl^-	درون دانه	فولاد زنگ نزن آستنیتی در دمای بالا
فولاد ساده کربنی	یون‌های OH^- یا NO_3^- هیدروژن سولفید	مرز دانه	از عبارات ترک خوردن کاستیکی، سولفیدی گاهی اوقات استفاده می‌شود.
آلیاژهای پر استحکام مثل تیتانیوم و سوپر آلیاژ	یون Cl^- و سولفید	درون دانه	خوردگی سولفیدی و کلریدی

جدول ۳: اطلاعات اساسی برای آنالیز

اطلاعات اساسی	توضیحات
تاریخ شروع	زمانی که قطعه در سرویس قرار گرفته
ضخامت، mm	ضخامت اصلی قطعه زمانی که در سرویس قرار گرفته و یا کمترین ضخامت در زمان ساخت
حد مجاز خوردگی، mm	حد مجاز خوردگی موجود در قطعات در صورت وجود
دمای طراحی کاری	دمای طراحی شده برای انجام کار قطعه در بالگرد
دمای واقعی کاری	دمایی که تجهیز در آن دما در شرایط واقعی کار می‌کند

جدول ۴: اطلاعات مورد نیاز برای تخمین فاکتور تخریب-ترک خوردن تنشی در محیط کاستیک

اطلاعات مورد نیاز	توضیحات
حساسیت (کم، متوسط، زیاد)	حساسیت با نظر مهندسان کار کشته و یا روند کاری این قسمت تعیین می شود
غلظت OH^- در هوا یا آب باران ریخته شده بر تجهیز	تخمین غلظت کاستیک یا OH^- موجود در هوا و یا آب باران احتمالی
حداکثر دمای کاری بالگرد	تخمین حداکثر دمای کاری با در نظر گرفتن گرم شدن های موضعی احتمالی
زمان سپری شده از آخرین بازرسی	از تاریخچه بازرسی برای آخرین بازرسی SCC استفاده کنید
طبقه بندی تاثیر بازرسی	طبقه بندی تاثیر بازرسی که بر روی تجهیز انجام شده
تعداد بازرسی ها	تعداد بازرسی در هر طبقه بندی

جدول ۵: راهنمای تخمین تاثیرات بازرسی برای ترک خوردن تنشی در محیط کاستیک

مثال بازرسی در زمان تعمیرات	مثال بازرسی آنی	طبقه بندی بازرسی	طبقه بندی تاثیر بازرسی
بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک و یا بررسی ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با رادیوگرافی	بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس یا محلول تست نافذ	A	تاثیر شدید
بررسی ۱۰٪ تا ۲۴٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک و یا بررسی ۲۵٪ تا ۴۹٪ از کل سطح با رادیوگرافی	بررسی ۱۰٪ تا ۲۴٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس یا محلول تست نافذ	B	تاثیر معمول
بررسی کمتر از ۱۰٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک و یا بررسی کمتر از ۲۵٪ از کل سطح با رادیوگرافی	بررسی کمتر از ۱۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس یا محلول تست نافذ	C	تاثیر اندک
بازرسی چشمی	بازرسی چشمی	D	تاثیر ضعیف
عدم نیاز به بازرسی	عدم نیاز به بازرسی	E	بدون تاثیر

جدول ۶: تخمین نمایه شدت برای ترک خوردن تنشی

Susceptibility	Severity Index - S_{Tz}
High	5000
Medium	500
Low	50
None	1

جدول ۷: فاکتور آسیب SCC- برای تمامی مکانیزم‌ها

S_{Tz}	Inspection Effectiveness												
	E	1 Inspection				2 Inspections				3 Inspections			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	10	8	3	1	1	6	2	1	1	4	1	1	1
50	50	40	17	5	3	30	10	2	1	20	5	1	1
100	100	80	33	10	5	60	20	4	1	40	10	2	1
500	500	400	170	50	25	300	100	20	5	200	50	8	1
1000	1000	800	330	100	50	600	200	40	10	400	100	16	2
5000	5000	4000	1670	500	250	3000	1000	250	50	2000	500	80	10

S_{Tz}	Inspection Effectiveness												
	E	4 Inspections				5 Inspections				6 Inspections			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	10	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	50	10	2	1	1	5	1	1	1	1	1	1	1
100	100	20	5	1	1	10	2	1	1	5	1	1	1
500	500	100	25	2	1	50	10	1	1	25	5	1	1
1000	1000	200	50	5	1	100	25	2	1	50	10	1	1
5000	5000	1000	250	25	2	500	125	5	1	250	50	2	1

جدول ۸: اطلاعات مورد نیاز برای تخمین فاکتور تخریب - ترک خوردن تنش سولفیدی

اطلاعات مورد نیاز	توضیحات
حساسیت (زیاد، متوسط، اندک)	حساسیت بر اساس پیشنهاد کارشناس و یا با استفاده از روش‌های پیشنهادی تعیین می‌گردد
حضور آب (بله یا خیر)	تعیین نمایید که آیا آب آزاد در مجاورت اجزا وجود دارد. تنها شرایط سرویسی عادی را در نظر بگیرید تمامی شرایط شامل آغاز به کار، پایان دادن به کار، شرایط عملکردی آشفته و
مقدار H_2S محیط	مقدار H_2S موجود در هوا و یا فاز آبی (مانند آب باران) تعیین نمایید.
PH آب یا آب باران	مقدار PH فاز آبی (مانند آب باران) را تعیین نمایید. اگر نتایج تحلیلی درستی در دسترس نیست، پیشنهاد می‌شود این مقدار توسط یک مهندس آگاه و با تجربه تخمین زده شود.
حداکثر سختی برینل	سعی شود گزارشات بر اساس روش سختی برینل باشد و از تکنیک‌هایی با نشانه گذار ظریف مانند ویکرز و نوپ استفاده نگردد. اگر خواننده‌های واقعی در دسترس نبود از حداکثر سختی مجاز شناخته شده از مشخصات تولید استفاده شود.
طول عمر (به سال)	از سوابق بازرسی استفاده شود تا زمان گذشته از آخرین بازرسی SCC محاسبه شود.
طبقه بندی تاثیر بازرسی	طبقه بندی تاثیر که بر روی اجزا انجام شده است.
تعداد بازرسی‌ها	تعداد بازرسی‌ها در هر طبقه بندی تاثیر صورت پذیرفته است.

جدول ۹: راهنمای تعیین تاثیرات بازرسی-ترک خوردن تنشی سولفیدی

طبقه بندی بازرسی	طبقه بندی تاثیر بازرسی	مثال بازرسی آبی	مثال بازرسی در زمان تعمیرات
A	تاثیر شدید	بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس.	بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک در امتداد عرضی و موازی با سطح و یا استفاده از تست نشر صوتی همراه با امواج مافوق صوت برشی پشت هم.
B	تاثیر معمول	بررسی ۱۰٪ تا ۲۴٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس، یا بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی خشک، و یا بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با محلول تست نافذ	بررسی ۱۰٪ تا ۲۴٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک و یا بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با رادیوگرافی
C	تاثیر اندک	بررسی کمتر از ۱۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس، یا بررسی کمتر از ۲۵٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی خشک، و یا با محلول تست نافذ	بررسی کمتر از ۱۰٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک و یا بررسی ۲۰٪ تا ۴۹٪ از کل سطح با رادیوگرافی
D	تاثیر ضعیف	بازرسی چشمی	بررسی کمتر از ۲۰٪ از کل سطح با رادیوگرافی
E	بدون تاثیر	عدم نیاز به بازرسی	عدم نیاز به بازرسی

جدول ۱۰: حساسیت محیطی-ترک خوردن تنشی سولفیدی

PH آب یا آب باران	شدت محیط به عنوان تابعی از مقدار H ₂ S در آب			
	< 50 ppm	50 تا 1000 ppm	1000 تا 10000 ppm	> 10000 ppm
< 5.5	کم	میانه و معتدل	زیاد	زیاد
5.5 تا 7.5	کم	میانه و معتدل	اندک	میانه و معتدل
7.6 تا 8.3	کم	میانه و معتدل	میانه و معتدل	میانه و معتدل
8.4 تا 8.9	کم	میانه و معتدل	میانه و معتدل	زیاد
> 9.0	کم	میانه و معتدل	زیاد	زیاد

جدول ۱۱: حساسیت به SSC- ترک خوردن تنش سولفیدی

حساسیت به SCC به عنوان تابعی از عملیات حرارتی						حساسیت محیط
PWHT حداکثر سختی برینل			پس از جوشکاری حداکثر سختی برینل			
>۲۳۷	۲۰۰-۲۳۷	<۲۰۰	>۲۳۷	۲۰۰-۲۳۷	<۲۰۰	
متوسط	کم	نیست	بالا	متوسط	کم	بالا
کم	نیست	نیست	بالا	متوسط	کم	متوسط
نیست	نیست	نیست	متوسط	کم	کم	کم

جدول ۱۲: تعیین نمایه شدت-ترک خوردن تنش سولفیدی

Susceptibility	Severity Index - S_{VI}
High	100
Medium	10
Low	1
None	1

جدول ۱۳: اطلاعات مورد نیاز برای تخمین فاکتور تخریب- ترک خوردن هیدروژنی (تردی)

اطلاعات مورد نیاز	توضیحات
حساسیت (زیاد، متوسط، اندک)	حساسیت بر اساس پیشنهاد کارشناس و یا با استفاده از روش‌های پیشنهادی تعیین می‌گردد
حضور آب (بله یا خیر)	تعیین نمایید که آیا آب آزاد در مجاورت اجزا وجود دارد. تنها شرایط سرویسی عادی را در نظر بگیرید تمامی شرایط شامل آغاز به کار، پایان دادن به کار، شرایط عملکردی آشفته و
مقدار H_2S محیط	مقدار H_2S موجود در هوا و یا فاز آبی (مانند آب باران) تعیین نمایید.
PH آب یا آب باران	مقدار PH فاز آبی (مانند آب باران) را تعیین نمایید. اگر نتایج تحلیلی درستی در دسترس نیست، پیشنهاد می‌شود این مقدار توسط یک مهندس آگاه و با تجربه تخمین زده شود.
مقدار سولفور در صفحات فولادی	مقدار سولفور فولادی که برای ساخت قطعات و اجزا استفاده شده است را تعیین نمایید. این اطلاعات باید بر روی MTRها در فایل‌های مربوط به تجهیزات وجود داشته باشد.
طول عمر (به سال)	از سوابق بازرسی استفاده شود تا زمان گذشته از آخرین بازرسی SCC محاسبه شود.
طبقه بندی تاثیر بازرسی	طبقه بندی تاثیر که بر روی اجزا انجام شده است.
تعداد بازرسی‌ها	تعداد بازرسی‌ها در هر طبقه بندی تاثیر صورت پذیرفته است.

جدول ۱۴: راهنمای تعیین تاثیر بازرسی - تردی هیدروژنی

طبقه بندی بازرسی	طبقه بندی تاثیر بازرسی	مثال بازرسی آنی	مثال بازرسی در زمان تعمیرات
A	تاثیر شدید	بررسی ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس، بعلاوهی تست آلتراسونیک امواج برشی برای شناسایی ترک‌های زیرسطحی	هیچ
B	تاثیر معمول	بررسی ۲۰٪ تا ۴۹٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس	بررسی ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با تست آلتراسونیک امواج برشی اتوماتیک و یا استفاده از تست نشر صوتی همراه با امواج مافوق صوت برشی پشت هم.
C	تاثیر اندک	بررسی کمتر از ۲۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی فلورسنت خیس، یا بررسی ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با ذرات مغناطیسی خشک، و یا با محلول تست نافذ	بررسی کمتر از ۲۰٪ از کل سطح با تست آلتراسونیک امواج برشی اتوماتیک، و یا بررسی ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با تست آلتراسونیک امواج برشی دستی
D	تاثیر ضعیف	بازرسی چشمی	بررسی کمتر از ۲۰٪ از کل سطح با تست آلتراسونیک امواج برشی دستی
E	بدون تاثیر	عدم نیاز به بازرسی	تست رادیوگرافی

جدول ۱۵: حساسیت به ترک خوردن - تردی هیدروژنی

Environmental Severity	Susceptibility to Cracking as a Function of Steel Sulfur Content					
	High Sulfur Steel (1) > 0.01% S		Low Sulfur Steel (2) 0.002 to 0.01% S		Ultra Low Sulfur (3) < 0.002% S	
	As-Welded	PWHT	As-Welded	PWHT	As-Welded	PWHT
High	High	High	High	Medium	Medium	Low
Moderate	High	Medium	Medium	Low	Low	Low
Low	Medium	Low	Low	Low	Not	Not

- Typically includes A 70, A 201, A 212, A 285, A 515, and most A 516 before about 1990.
- Typically includes early generations of HIC-resistant A 516 in 1980's, with Ca additions.
- Typically includes later generations of HIC-resistant A 516 in 1990's.

جدول ۱۶: تخمین نمایه شدت - ترک خوردن هیدروژنی

Susceptibility	Severity Index - S_{VI}
High	100
Medium	10
Low	1
None	1

جدول ۱۷: اطلاعات مورد نیاز برای تخمین فاکتور تخریب-CLSCC

اطلاعات مورد نیاز	توضیحات
حساسیت (زیاد، متوسط، اندک)	حساسیت بر اساس پیشنهاد کارشناس و یا با استفاده از روش های پیشنهادی تعیین می گردد
غلظت Cl^- (ppm)	مقدار غلظت Cl^- در هوا و یا فاز آبی (مانند آب باران) تعیین نمایند. در صورت نامشخص بودن، مقدار اولیه را بر بیش از 1000ppm قرار دهید
دمای کاری	بیشترین دمای کاری در طی سرویس دهی را تعیین نمایند. (هر دو شرایط طبیعی و غیر طبیعی را در نظر بگیرید)
PH آب یا آب باران	مقدار PH فاز آبی (مانند آب باران) را تعیین نمایند. به طور کلی محلول هایی با PH بالا همراه با مقدار زیاد به اندازه PH اندک همراه با کلریدها مستعد به ترک زایی نیستند.
طول عمر (به سال)	از سوابق بازرسی استفاده شود تا زمان گذشته از آخرین بازرسی SCC محاسبه شود.
طبقه بندی تاثیر بازرسی	طبقه بندی تاثیر که بر روی اجزا انجام شده است.
تعداد بازرسی ها	تعداد بازرسی ها در هر طبقه بندی تاثیر صورت پذیرفته است.

جدول ۱۸: راهنمای تاثیرات بازرسی - CLSCC

طبقه بندی بازرسی	طبقه بندی تاثیر بازرسی	مثال بازرسی آبی	مثال بازرسی در زمان تعمیرات
A	تاثیر شدید	بررسی ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با تست مایعات نافذ.	بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک در امتداد عرضی و موازی با سطح
B	تاثیر معمول	بررسی ۲۵٪ تا ۵۰٪ از کل سطح با تست مایعات نافذ.	بررسی ۱۰٪ تا ۲۴٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک و بررسی ۲۵٪ تا ۱۰۰٪ از کل سطح با رادیوگرافی
C	تاثیر اندک	بررسی کمتر از ۲۵٪ از کل سطح با تست مایعات نافذ.	بررسی کمتر از ۱۰٪ از کل سطح با امواج برشی آلتراسونیک و یا بررسی ۲۰٪ تا ۴۹٪ از کل سطح با رادیوگرافی
D	تاثیر ضعیف	بازرسی چشمی	بازرسی چشمی
E	بدون تاثیر	عدم نیاز به بازرسی	عدم نیاز به بازرسی

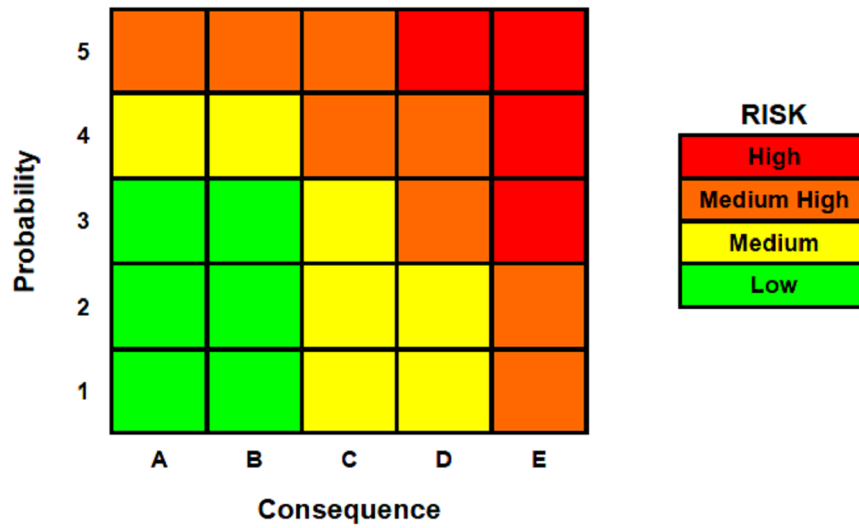
جدول ۱۹: حساسیت به ترک خوردن - CLSCC

pH ≤ 10				
Temperature (°F)	Susceptibility to Cracking as a Function of Chloride ion (ppm)			
	1-10	11-100	101-1000	> 1000
100 – 150	Low	Medium	Medium	High
>150 – 200	Medium	Medium	High	High
>200 – 300	Medium	High	High	High
pH > 10				
Temperature (°F)	Susceptibility to Cracking as a Function of Chloride ion (ppm)			
	1-10	11-100	101-1000	> 1000
< 200	Low	Low	Low	Low
200 – 300	Low	Low	Low	Medium

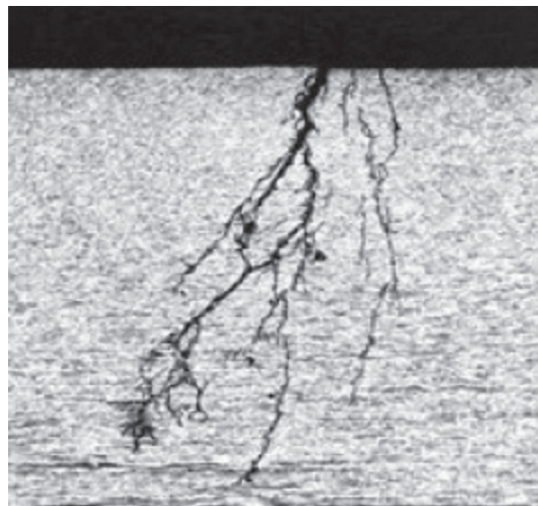
جدول ۲۰: تعیین نمایه تخریب - CLSCC

Susceptibility	Severity Index - S_{VI}
High	5000
Medium	500
Low	50
None	1

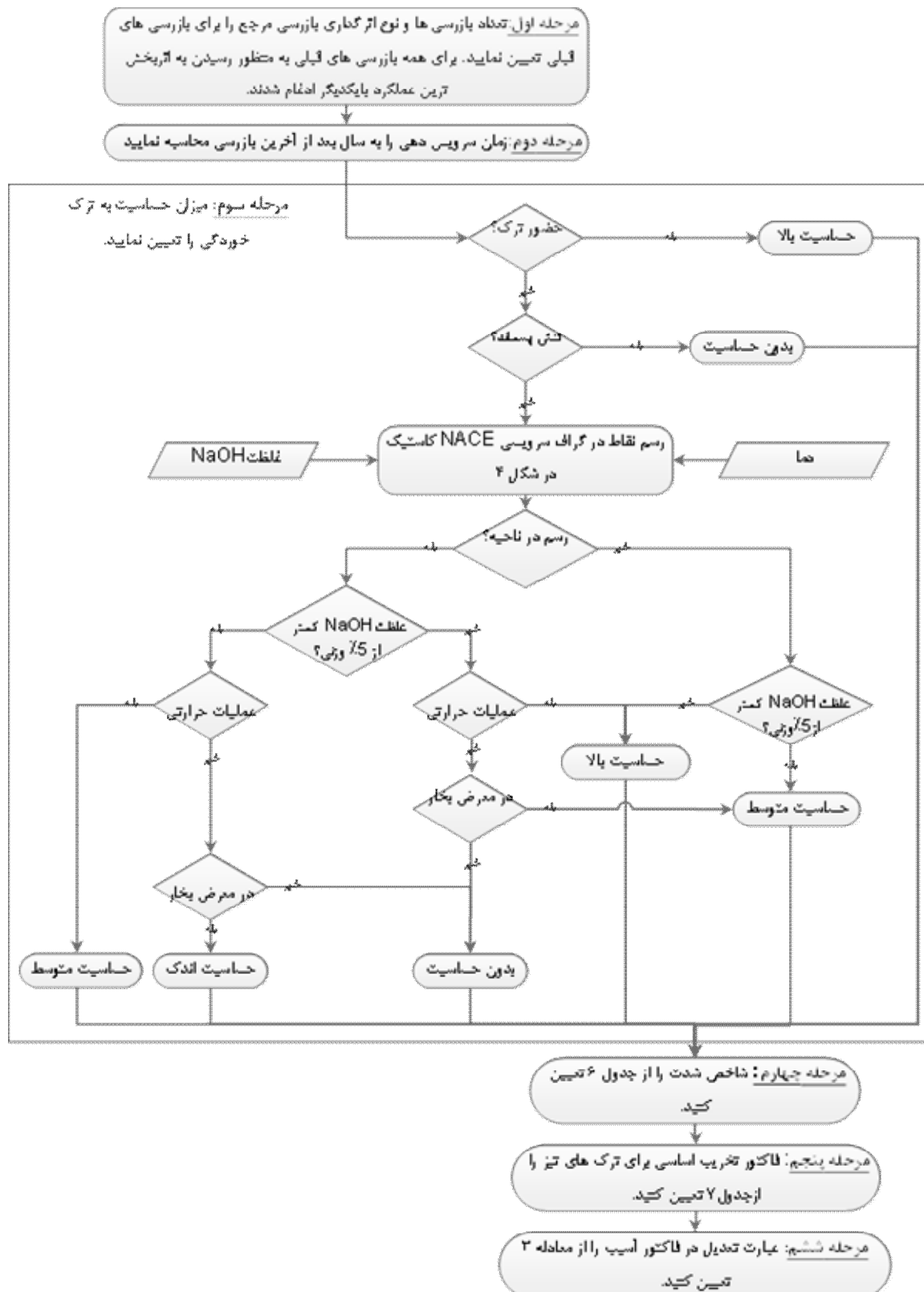
مجموعه اشکال



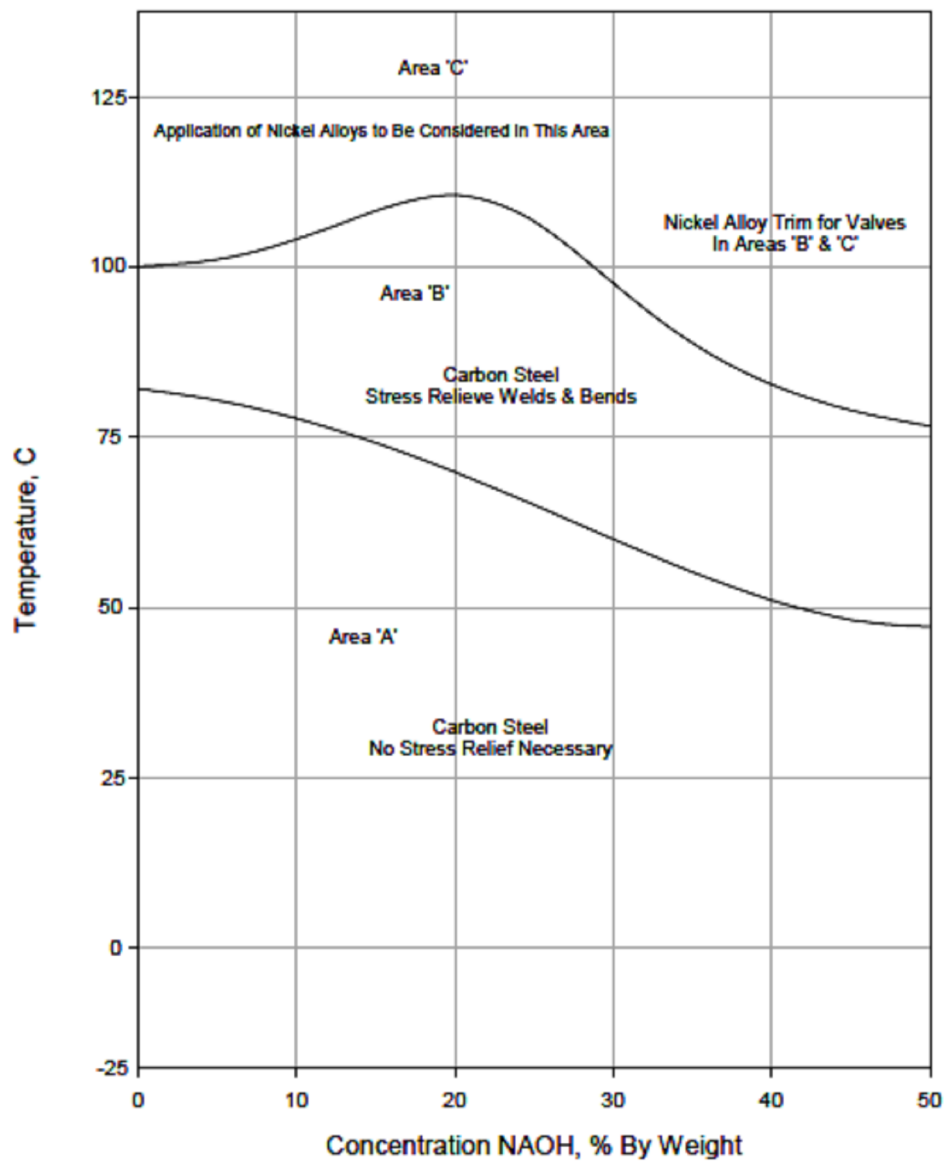
شکل ۱: ماتریس ریسک



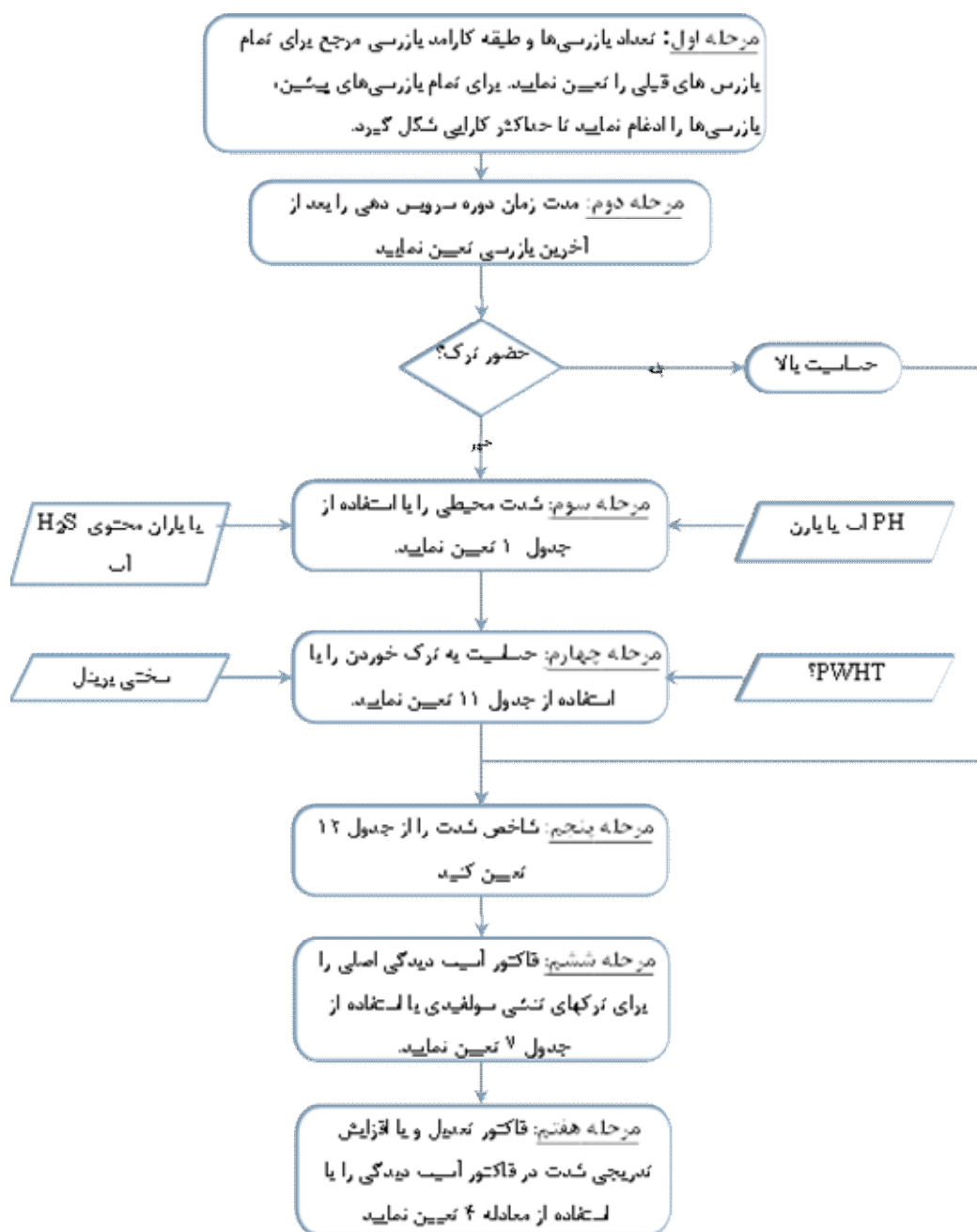
شکل ۲: تصویر سطحی از ترک خوردن تنش.



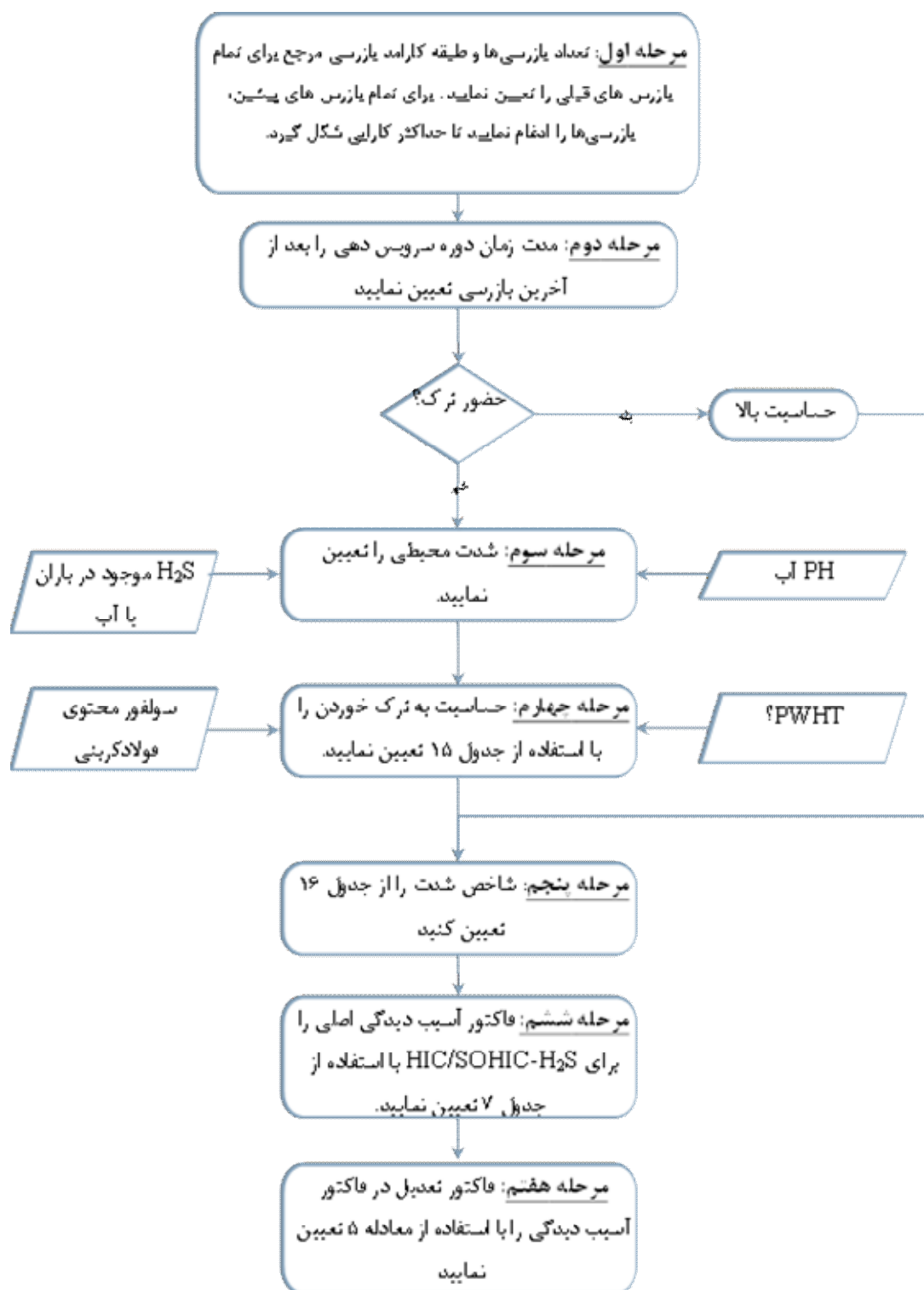
شکل ۳: تعیین فاکتور تخریب ترک خوردن تششی در محیط کاستیک.



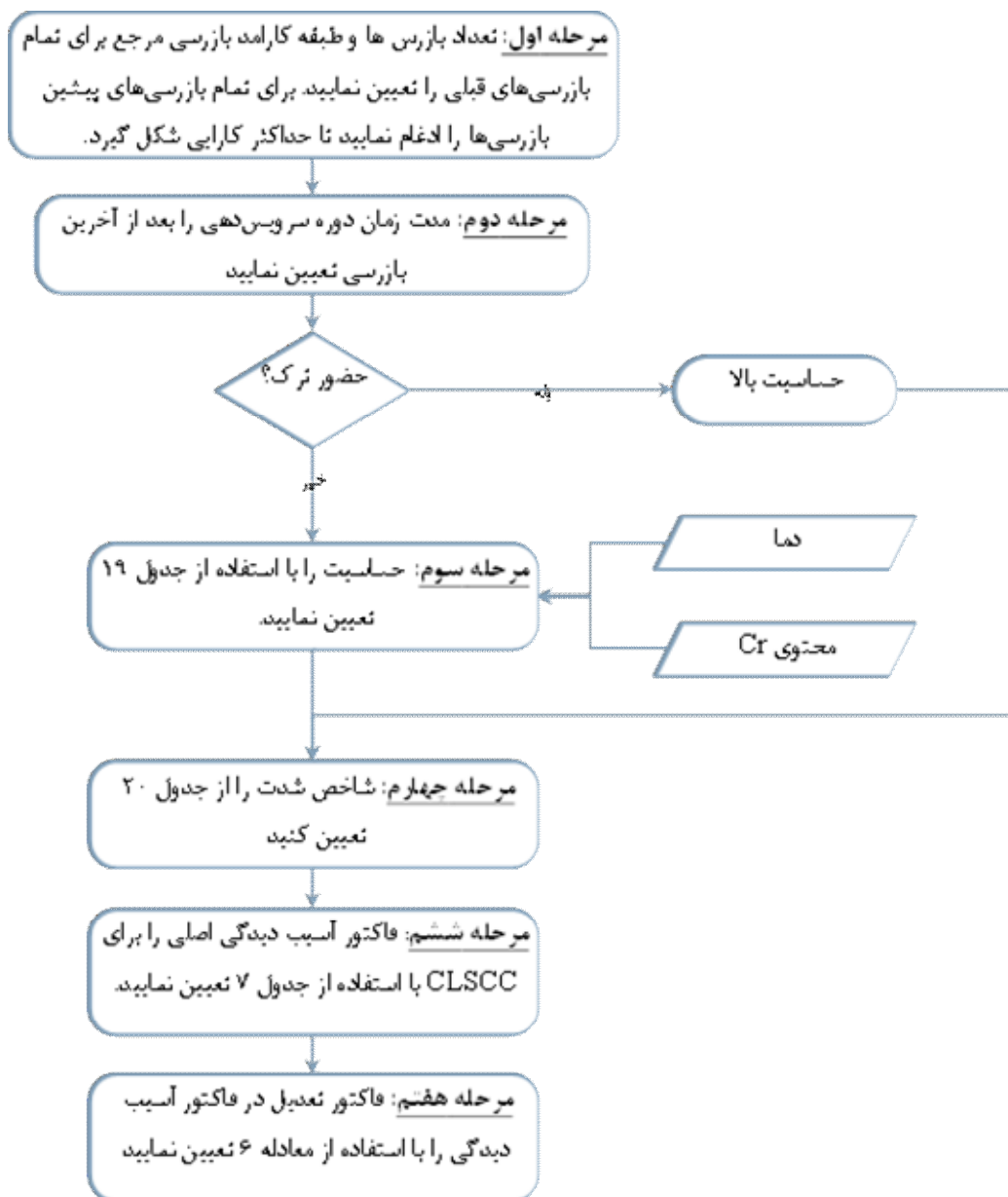
شکل ۴: حساسیت به ترک خوردن کاستیکی در فلزات



شکل ۵: تعیین فاکتور تخریب ترک خوردن تنشی سولفیدی



شکل ۶: تخمین فاکتور تخریب آسیب هیدروژنی



شکل ۷: تعیین فاکتور تخریب CLSCC.