

مدلسازی درخت رویداد هوشمند و الگوریتم ژنتیک جهت ارزیابی ریسک دیگ بخار در واحد نمک زدایی چشمه خوش (شرکت بهره برداری نفت و گاز غرب)

کاوه شیرزادیان: معاون اداره مهندسی و ساختمان شرکت بهره برداری نفت و گاز غرب
k.shirzadian@gmail.com

چکیده

هدف از این مقاله بدست آوردن مدلی جهت ارزیابی ریسک و بررسی سیستم ایمنی بر اساس لایه های محافظتی مستقل به کار رفته شده در ساختار یک دیگ بخار می باشد. البته این مدلسازی با در نظر گرفتن فاکتورها و عوامل قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات انجام خواهد گرفت. در واقع در این مقاله به ترکیب آنالیز درخت رویداد و الگوریتم ژنتیک برای دست یافتن به مدل یکپارچه ای به منظور رسیدن به هدف ذکر شده خواهیم پرداخت. شناسایی لایه های محافظتی مستقل در ساختار دیگ بخار براساس روش LOPA انجام می گیرد و از الگوریتم ژنتیک به منظور جابه جایی لایه ها برای رسیدن به بهترین ترتیب از آنها به کار برده می شود. در این مقاله مدلی که بدست می آید می تواند طراحی بهینه ای را با در نظرگیری فاکتورهای ذکر شده ارائه دهد. **واژه های کلیدی:** ارزیابی ریسک، ایمنی، لایه های محافظتی مستقل، دیگ بخار، الگوریتم ژنتیک، آنالیز درخت رویداد

۱. مقدمه

صنعت نفت، گاز و پتروشیمی از صنایع ایمنی محور می باشد. در این صنایع انواع دستگاهها، تجهیزات مکانیکی، برقی، ابزار دقیقی، ظروف، دیگ بخار و برجها بکار گرفته می شوند که شرایط کارکرد و در نتیجه شرایط طراحی بسیار متنوعی دارا هستند و جهت طراحی آنها از کدها و استانداردهای مختلفی استفاده می گردد؛ نکته مهم دیگر اینکه حجم و مقدار این مواد خطرناک در دیگ بخار نسبت به سایر تجهیزات واحد ها بسیار زیادتر می باشد [۱] در نتیجه مسائل و نکات ایمنی و توجه به شرایطی غیر از شرایط نرمال فرآیند نیز باید در هنگام طراحی و انتخاب مواد در نظر گرفته شود. در این مدلسازی می خواهیم به معرفی رویکردی با در نظرگیری این مسائل پردازیم. ابتدا مطالعات انجام گرفته در این حوزه را بیان می کنیم.

چیانگ وی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ در مقاله ای به ارائه روش نیمه کیفی LOPA برای تخمین ریسک راکتیو شیمیایی و تعیین احتمالات و توالی های سناریوهای خرابی پرداخته اند. مطالعه موردی انتخاب شده یک هیدروکسی لامین می باشد [۲]. فنگ و همکارانش در مقاله ای به محاسبه و ارزیابی ریسک، روی آنالیز لایه های محافظتی پرداخته اند و در مقاله خود روی کمپرسورهای خنک کننده ی اتیلن تمرکز کرده و برای اندازه گیری و محاسبه ریسک لایه های ایمنی متصل شده به کمپرسور آنالیز درخت رویداد را بکار برده اند [۳]. آرتور داوول در سال ۱۹۹۸ به توضیح در مورد روش LOPA برای مشخص کردن سطح یکپارچگی ایمنی از یک سیستم اندازه گیری ایمنی می پردازد. پس از تعیین لایه های محافظتی مستقل و انجام ارزیابی ریسک، پیشنهاد کاربرد و استفاده از لایه های اضافی برای کاهش ریسک را بررسی می کند [۴]. باستین چاپ، اندرو حله و سایر همکارانشان برای ایمنی صنایع شیمیایی یک روش بسیار پیچیده که طراحی برای ایمنی^۱ (DfS) نامیده می شود معرفی می کند که ترکیبی از روش هایی که در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرد، از جمله LOPA می باشد. در واقع جهت مشخص سازی لایه های ایمنی از روش LOPA استفاده شده است [۵].

^۱ Design for safety

روبرت فیوتریل، ویلیام مرچرلز در مقاله خود در سال ۲۰۰۱ سناریوهای خطر در نظر گرفته شده و روشهای ارزیابی ریسک، را توضیح داده اند و از درخت خطا و درخت رویداد برای اهداف خود استفاده کرده اند [۶]. ژانگ ژاکیان و همکارانش یک مدل درخت رویداد ارائه میدهند که به ارزیابی خطرات شیمیایی و تخمین حوادث می پردازد. در طول این مدلسازی مسائل مهمی مانند مدل سازی تابع هدف، آنالیز غیر اطمینانی و ارزیابی محاسبات در جزییات بحث می شود [۷]. در سال ۱۹۹۸ کاری که از پاپازوگلو و یونیس ارائه شده که پایه و اساس ریاضی از اصول اولیه درخت رویداد را پیشنهاد می کند [۸].

با توجه به مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه و همچنین اهمیت ایمنی و ریسک در دیگ بخار عاملی است که ضرورت انجام این تحقیق را بازگو می کند.

۱.۱. مروری بر آنالیز درخت رویداد و الگوریتم ژنتیک و لایه های محافظتی مستقل

۱.۱.۱. آنالیز درخت رویداد

امروزه نمودارهای درخت به دلایل فراوانی بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله این دلایل، آسان بودن به کار گیری آنها، مدلسازی آسان شبکه، کامپیوتری کردن مدل شبکه و قابلیت بالای نتایج آنها است. از جمله مهمترین تحلیلها که بوسیله نمودارهای درخت انجام می گیرد می توان از دو تحلیل درخت خطا و درخت رویداد نام برد. تکنیک آنالیز درخت رویداد اصولاً در فاز طراحی، توسعه و عملیات اجراء می گردد اما امکان انجام آن در فازهای ساخت، ادغام، تست و ارزیابی نیز وجود دارد. درواقع درخت رویداد عبارت است از یک تکنیک مدلسازی قیاسی که با ایجاد دو شاخه موفقیت و نقص بطور همزمان به ارزیابی علل یک رویداد منفرد می پردازد. این تکنیک پاسخهای سیستم در برابر یک چالش شروع کننده را تشریح کرده و ارزیابی احتمال یک پیامد مطلوب و یا نامطلوب را فراهم می سازد [۹].

۲.۱.۱. لایه های محافظتی مستقل

لایه های محافظتی مستقل^۱ (IPL) یک وسیله، سیستم یا عملکردی می باشند که توانایی ممانعت در برابر نتایج نامطلوب را دارند که بطور مستقل از رویدادهای اولیه و همچنین مستقل از یکدیگر عمل می کنند. تاثیرات و استقلال این لایه ها باید قابل محاسبه و اندازه گیری باشد. اگر همه IPLها درست عمل نکنند نتایج نامطلوب از حادثه اولیه بدنبال خواهد داشت [۱۰، ۱۱، ۱۲] .

IPLها و ترتیب آنها

۱. Process design
۲. Basic Process control Systems
۳. Critical Alarms and Human Intervention
۴. Safety instrumented Function (SIF)
۵. Physical protection (relief valves, rupture discs, etc)
۶. Post release protection (Dikes, Blast Walls, etc.)

۱ . Independent Protection Layers

۷. Plant Emergency Response

۸. Community Emergency Response

این ترتیب از لایه ها بر اساس طبقه بندی ای که در روش آنالیز لایه های محافظتی^۱ (LOPA) انجام گرفته، بدست آمده است. این روش همانطور که در بخش مقدمه ذکر شده برای ارزیابی ریسک و ایمنی تجهیزات در مقالات و تحقیقات علمی مورد استفاده قرار گرفته است.

در کل LOPA تمامی لایه های موجود در یک سیستم و تجهیز را به دو بخش قسمت می کند

۱- لایه های فعال^۲

۲- لایه های منفعل^۳

[۱۰، ۱۱، ۱۲] .

در این مقاله فقط روی لایه های فعال تمرکز شده است.

۳.۱.۱. الگوریتم ژنتیک

به طور کلی انتخاب و طراحی بهینه در بسیاری از مسائل علمی و فنی باعث تولید بهترین محصول یا جواب ممکن در یک شرایط خاص می شود. ایده اصلی الگوریتم های تکاملی^۴ در سال ۱۹۶۰ توسط Rechenberg مطرح گردید. الگوریتم های ژنتیک که منشعب از این نوع الگوریتم ها است، در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم های بهینه سازی و بر اساس ساختار ژنها و کروموزوم ها است که توسط پروفیسور Holland در دانشگاه میشیگان (۱۹۷۵) مطرح شد و پس از جمعی از دانشجویانش مثل Ann Arbor و Goldberg توسعه یافت. تا به امروز کتابهای متعددی توسط افرادی چون Miclalewicz- Goldberg-Davis در این زمینه به رشته تحریر در آمده است (۱۹۸۹). بیشترین استفاده از الگوریتم ژنتیک در توانایی آن برای استفاده اطلاعات تجمعی درباره ی فضای جستجوی ناشناخته اولیه برای حرکت به سمت جستجوهای بعدی در فضاهای سودمند و نتیجه بخش می باشد [۱۳-۱۶].

اصولا برای استفاده از GA باید سه مفهوم مهم زیر مشخص شود:

۱. تابع هدف^۵ یا تابع هزینه

۲. فضای ژنتیک^۶

۳. عملگر های GA

دیگ بخار نمونه ای انتخاب شده جهت مدلسازی دیگ بخار شرکت نفت و گاز غرب منطقه چشمه خوش است.

۲. متدولوژی

هدف نهایی مساله بهینه سازی سیستم ایمنی بر اساس لایه های محافظتی به کار گرفته شده در ساختار یک دیگ بخار با در نظر گرفتن معیارهای هزینه و ریسک می باشد. با توجه به ساختار دیگ بخار و چگونگی ترکیب لایه

۱ . Layer Of Protection Analysis

۲ . Active Layers

۳ . Passive Layers

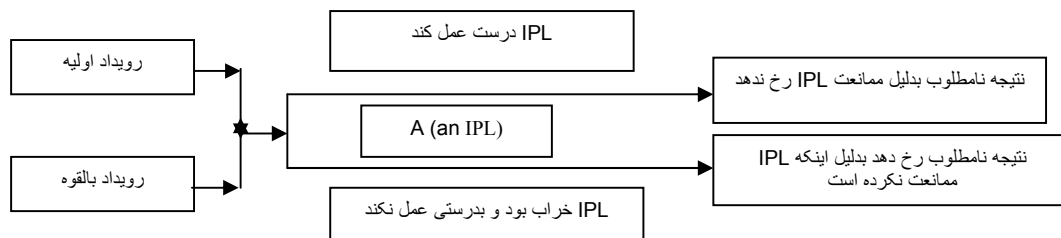
۴ . Evolutionary

۵ . Objective Function

۶ . Genetic Representation

های محافظتی مستقل در ساختار آن و برای دست یافتن به بهترین ترکیب از این لایه ها نیازمند جستجو در فضای جواب با ویژگی های خاص می باشیم. در واقع نیازمند بکارگیری الگوریتم ها و روش های جستجوی تصادفی می باشیم که با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک، توانایی جستجوی فضای جواب خیلی زیاد را دارد، این الگوریتم را برای جستجوی تصادفی در مساله بیان شده مورد استفاده قرار داده ایم.

به دلیل اینکه ساخت دستی درخت رویداد بسیار وقت گیر و پرهزینه می باشد و احتمال خطا در آن زیاد است؛ در این مقاله روش شبیه سازی و مدلسازی کامپیوتری را برای تحلیل درخت رویداد مورد استفاده قرار می دهیم. در واقع عملکرد درخت رویداد پس از تعیین لایه ها به صورت بیان شده در شکل ۱ بدین ترتیب که پس از وقوع حادثه ی اولیه IPL شروع به فعالیت می کند و بر اساس احتمال عملکرد درست آن، حادثه متوقف شده در غیر این صورت نتایج ناخوشایند از حادثه رخ می دهد.



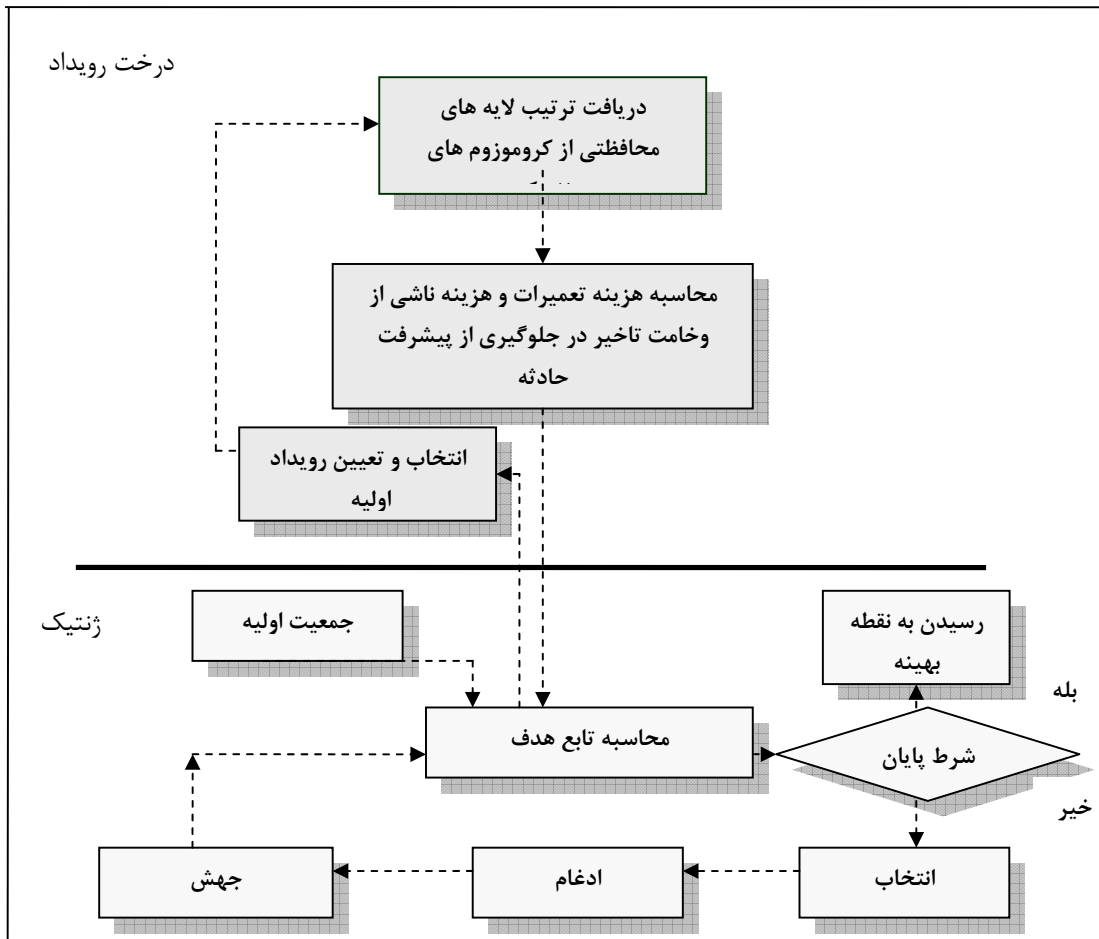
شکل ۱: تاثیر لایه محافظتی در رخداد یا عدم رخداد نتیجه نامطلوب

بر این اساس که معادل متغیرهای مساله شاخه های درخت را تعریف نموده و بر اساس مساله ای که تعریف خواهیم کرد، تابع هدف را برای آن شکل ۱ می دهیم. از ضرب توالی های مختلف شاخه ها به جواب پایانی مقدار تابع مشخص شده خواهیم رسید.

۲.۱. الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی برای این مساله به شکل زیر بوده که بیانگر تعامل و چگونگی ارتباط بین الگوریتم ژنتیک و درخت رویداد می باشد.

در واقع با ایجاد تعامل بین مدل الگوریتم ژنتیک و مدلی که برای درخت رویداد پیشنهاد می شود، می توان به ترکیبی از بهترین ترتیب از لایه ها رسید. فلوچارت زیر به طور واضح تعامل بیان شده را بازگو می کند.



شکل ۲: الگوریتم پیشنهادی

همانطور که در فلوجارت نشان داده شده، نقطه تعامل بین الگوریتم ژنتیک و مدل درخت رویداد در محاسبه مقدار تابع هدف ژنتیک می باشد؛ بدین ترتیب که ابتدا اطلاعات از الگوریتم ژنتیک به صورت متغیرهای این الگوریتم به درخت رویداد فرستاده شده و در مدل درخت رویداد مقدار تابع هدف یا به عبارت بهتر مقدار تابع هزینه محاسبه می شود.

برای ساخت و تشکیل مدل این الگوریتم در دو جهت باید گام برداشت، اولاً تعیین لایه ها و ترتیب آنها سپس محاسبه ی هزینه نگهداری و تعمیرات و هزینه ی ناشی از تاخیر به دلیل درست عمل نکردن لایه ها و پیشرفت حادثه و رویداد اولیه.

۲.۲. مشخصات، عملگرها و چگونگی عملکرد الگوریتم پیشنهاد شده

الگوریتم ژنتیکی که برای این مساله پیشنهاد می شود، یک ژنتیک گسسته می باشد. در این مدل ژنتیک نیازی به باینری کردن ژنها نمی باشد و فضای جواب ژنتیک در واقع جایگشتهای مختلف این لایه ها بوده است. ابتدا می بایست هویت ژنهای کروموزوم ها را مشخص نماییم؛ ژنهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در این مساله هر کدام نقش یک لایه محافظتی را دارند، درواقع تعداد ژنهای کروموزوم ها برابر با تعداد لایه های محافظتی تعریف شده برای تجهیز یا سیستم، می باشد. این لایه ها هر کدام ویژگی ها و خصوصیات مربوط به خود را دارا می باشند. کروموزوم های مختلف ترتیبات متفاوت از لایه ها را ارائه می دهند، که این عمل با جایگشت لایه ها بدست می آید. این کروموزوم ها با این ترتیبات مختلف، ورودی های درخت رویداد می باشند. هر شاخه از درخت رویداد نماینده یک ژن کروموزوم و یا در واقع همان لایه محافظتی معادل را دارا می باشد، از ویژگی های این لایه ها نرخ خرابی، میانگین زمان خرابی، نفر- ساعت نگهداری و تعمیرات می باشد که در این مدل به آنها نیاز خواهیم داشت.

۳.۲. تعیین تابع هدف و متغیرهای مساله

تابع هدف الگوریتم ژنتیک مینیمم سازی هزینه می باشد.

$$Fitness\ function = MIN \sum Cost \quad (1)$$

متغیرهای مساله

تعدادهای لایه های محافظتی X

متغیرهای هدف در این مساله متغیرهای هزینه بوده که شامل

هزینه های ناشی از نفر- ساعت نگهداری و تعمیرات دیگ بخار CM

هزینه های ناشی از تاخیر در جلوگیری از پیشرفت حادثه با در نظرگیری زمان CS ^۲

$$Cost = \sum CM + CS \quad (2) \quad \text{می باشد.}$$

نفر- ساعت مورد نیاز جهت نگهداری و تعمیرات دیگ بخار در حالت خرابی مشخص در نظر گرفته شده

M

ویژگی ها و خصوصیات لایه های محافظتی که همان ژنهای کروموزوم های ژنتیک را تشکیل می دهند، به عنوان متغیرها و پارامترهای ورودی درخت رویداد می باشند.

نرخ خرابی لایه های محافظتی $\lambda_i \quad i = 1, \dots, x$

میانگین زمان خرابی لایه ها $MTTF_i \quad i = 1, \dots, x$

^۱. Maintenance and Repair Cost

^۲. Severity Cost

مقدار تابع هدف برای هر کروموزوم جمعیت الگوریتم ژنتیک با استفاده از مدل درخت رویداد بدست می آید. احتمال عملکرد درست لایه ها $R(t)$ زمانی که تابع چگالی خرابی آنها دارای توزیع نمائی با آهنگ λ باشد.

نفر - ساعت نگهداری و تعمیرات برای هر لایه محافظتی

$$(3) Re_i = R_i \times M \times t \times K$$

K هزینه هر نفر - ساعت تعمیرات به ازای واحد زمانی

S هزینه وخامت تاخیر به ازای هر واحد زمانی

$Q_i(t)$ احتمال در دسترس نبودن لایه

$$Cost = \sum CM + CS$$

مدل نهایی هزینه

۴.۲. شروع الگوریتم ژنتیک

برای شروع مدل الگوریتم ژنتیک می بایست جمعیت اولیه تصادفی را تولید نمود که در این مساله جمعیت تصادفی را با استفاده از تابع تصادفی جایگشت تولید می کنیم. در برنامه ای که در نرم افزار MATLAB نوشته شده از تابع $Randper(x)$ برای تولید جمعیت تصادفی اولیه استفاده شده است، که متغیر X در واقع تعداد ژنهای کروموزوم ها می باشد و با تکرار این تابع به تعداد اندازه جمعیت، جمعیت تصادفی اولیه را تولید می کنیم.

۵.۲. محاسبه تابع هدف و مدلسازی درخت رویداد

همانطور که در قسمت قبل بیان شد برای بدست آوردن تابع هدف الگوریتم ژنتیک و رسیدن به هزینه های ناشی از نگهداری و تعمیرات دیگ بخار و همچنین هزینه ناشی از وخامت پیشرفت رویدادها نیاز به بکارگیری تحلیل و آنالیز درخت رویداد می باشد. در واقع ما در این مساله نیاز به دستیابی قابلیت اطمینان لایه ها داریم، که با استفاده از آن بتوانیم، به این نتایج احتمالی جلوگیری از رویدادها و پیشرفت حوادث در تجهیزات مختلف برسیم. فرض می کنیم که تابع چگالی احتمال خرابی همه لایه ها نمائی با میانگین λ_i باشد، بنابراین با استفاده از نرخ خرابی لایه ها که در بالا عنوان شده است به راحتی می توان به مقادیر قابلیت اطمینان (احتمال موفقیت) و همچنین احتمال خرابی (شکست) لایه ها دست یافت.

معادل با تعداد لایه ها، تعداد شاخه های درخت رویداد را تعریف می کنیم و احتمال عملکرد درست لایه ها و همچنین احتمال خرابی و عملکرد نادرست آنها را بر اساس واحد زمانی در نظر گرفته شده، محاسبه می کنیم. پس از محاسبه تابع هدف، کروموزوم های والد بر اساس تکنیک های انتخابی که در این مساله تکنیک چرخ رولت به کار گرفته می شود و با توجه به نرخ انتخاب اقدام به انتخاب کروموزوم های والد می شود و کروموزوم های والد برای انجام عمل ادغام وارد مرحله بعدی از الگوریتم ژنتیک می شوند.

۶.۲. ادغام پیشنهادی^۱

در الگوریتم های ژنتیک معمولی ادغام به طرق مختلف از جمله ادغام تک نقطه ای یا دو نقطه ای و غیره صورت می گیرد ولی در مساله حاضر به دلیل اینکه ما خواهان آن هستیم که بهترین کروموزوم ها با توجه به ویژگی های لایه ها تولید شوند و یا به عبارتی بهترین ترتیب از لایه ها به عنوان فرزند ایجاد شوند؛ در عملیات ادغام، یک عملگر

^۱. Proposed crossover

ادغام ابتکاری پیشنهاد شده است که در واقع در این عملیات ویژگی های منحصر به فرد لایه ها مد نظر می باشد. بر اساس مطالعات انجام گرفته سعی نموده ایم ویژگی ای را مدنظر قرار دهیم که پس از هر تکرار الگوریتم ژنتیک فرزندان تولید شده، بهتر و مناسبتر باشد که معیار بهتر بودن کروموزوم ها در واقع رسیدن به هزینه ی پایینتر می باشد. با توجه به اینکه در مدل درخت رویداد هر لایه ای که دارای میانگین زمان خرابی بیشتری باشد برای شناسایی رویداد و جلوگیری از پیشرفت آن قابل اطمینان تر بوده و با احتمال بیشتری به شناسایی رویداد و جلوگیری از پیشرفت آن می پردازد. اساس عملگر ادغام را داشتن میانگین زمان خرابی بیشتر قرار داده ایم به این صورت که اگر فرض کنیم یک تجهیز یا سیستم دارای ۱۰ لایه محافظتی باشد، یعنی هر کروموزوم از جمعیت دارای ۱۰ ژن می باشد و اگر ترتیب ژنهای کروموزوم های والد به صورت شکل ۳ باشد، ژنهای کروموزوم های والد با هم مقایسه شده، در واقع لایه هایی که در جایگاه اول قرار دارند با هم قیاس می شوند؛ که کدامیک دارای میانگین زمان خرابی (MTTF) بیشتری هستند؛ ژنی که دارای میانگین زمان بین خرابی بیشتر است به والد اول انتقال یافته و به همین ترتیب ژنهای بعدی مقایسه می شوند.

والد ۱									
۳	۴	۶	۵	۱	۸	۷	۱۰	۲	۹
والد ۲									
۵	۳	۷	۱۰	۲	۹	۶	۴	۸	۱
فرزند ۱									
۳	۴	۷	۵	۱	۸	۶	۱۰	۲	۹
فرزند ۲									
۵	۳	۶	۱۰	۲	۹	۷	۴	۸	۱

شکل ۳: کروموزوم های والد و فرزندان

فرض کنید دو کروموزوم شکل ۳ جهت انجام عملیات ادغام انتخاب شده باشند همانطور که دیده می شود، از ژن های اول کروموزوم ها شروع کرده و مقایسه انجام می گیرد تا زمانی که به ژنی برسیم که مقدار میانگین زمان خرابی آن در کروموزوم دوم بیشتر از کروموزوم اول باشد در اینجا لایه ۷ که در ژن سوم کروموزوم والد دوم قرار دارد دارای میانگین زمان خرابی بیشتری باشد، نسبت به لایه ۶ که در کروموزوم سوم والد اول قرار دارد؛ بدین ترتیب ژنهای سوم دو کروموزوم جا به جا می شوند و بدلیل اینکه لایه ۷ در کروموزوم سوم قرار داشته و نمی توانیم با توجه به ساختار و طراحی سیستم و تجهیز در کل کروموزوم اول جستجو کرده و مکان لایه ۷ (لایه تکراری) را پیدا می کند و ژن معادل آن در کروموزوم بعدی مشخص می شود و یک جابه جایی هم نیز در آنجا اتفاق می افتد در واقع زمانی ژنهای کروموزوم ها جا به جا می شوند که ژنها و لایه های معادل و برابر آنها نیز جا به جا شوند و در واقع بدین ترتیب از وجود لایه تکراری جلوگیری می شود.

بدین ترتیب ژن ها یا به عبارت دیگر لایه هایی که دارای میانگین نرخ خرابی بیشتری هستند به سمت ژنهای ابتدایی کروموزوم های انتخابی سوق داده شده که نتیجه آن رسیدن به هزینه پایینتر با توجه به تاثیر زمان در وخامت حادثه و رویداد می باشد و بدین ترتیب احتمال اینکه حادثه توسط ژنها (لایه های) اول شناسایی شود، بیشتر شده و کاهش هزینه را به دنبال دارد و جمعیت و نسل بهتری از نسل اول تولید می شود.

۷.۲. جهش

پس از عمل ادغام نوبت به عملیات جهش می باشد که با توجه به نرخ جهش تعداد کروموزوم هایی که می بایست جهش روی آن انجام گیرد مشخص شده؛ سپس به صورت تصادفی کروموزوم ها انتخاب شده و جهش انجام می گیرد، بدین ترتیب عملیات جهش صورت گرفته و دو ژن از کروموزوم انتخاب شده و با یکدیگر جا به جا می شوند.



شکل ۴: عملیات جهش

۸.۲. پایان الگوریتم

تا زمانی که شرط پایان و توقف الگوریتم برقرار شود و به بهترین جواب ممکن در فضای جواب برسیم، الگوریتم را ادامه می دهیم که شرط پایان بسته به نوع مساله می تواند متفاوت تعریف شود. در این مساله شرط پایان را دست یافتن به جواب یکسان پس از تعداد تکرار مشخص قرار می دهیم.

۳. پیاده سازی مدل بروی دیگ بخار و نتایج اجرای آن

در این تحقیق به بررسی یک حالت خرابی دیگ بخار مطابق با الگوریتم توضیح داده شده خواهیم پرداخت. اطلاعات و داده های هند بوک OREDA^۱ ویرایش ۴ مورد استفاده قرار خواهد گرفت [۱۹]. (پیوست ۱). در هندبوک OREDA تمامی حوادث اولیه که برای یک دیگ بخار احتمال اتفاق آنها می رود مشخص شده و حالتهای خرابی که این حوادث نشان می دهند ذکر شده البته مدل را می توان برای حالات خرابی مختلف توسعه داد. در این مقاله روی حالت خرابی (AIR (Abnormal Instrument Reading) تمرکز شده است. لیست کلیه ی حالتهای خرابی برای یک دیگ بخار در OREDA مشخص شده است.

List of failure modes

AIR	Abnormal instrument reading
ELU	External leakage-Utility medium
SER	Minor in-service problems
OTH	Other
PDE	Parameter deviation
PLU	Plugged/Choked
STD	Structural deficiency
UNK	Unknown

با در نظرگیری روش LOPA، تقسیم بندی ای که در مورد لایه های محافظتی مستقل انجام داده است؛ برای دیگ بخار نمونه ای ۱۲ لایه محافظتی فعال شناسایی شده است که به صورت زیر می باشند:

۱- فیوزها و قطع کننده های جریان، رله های آشکار کننده خطای زمین رله های توازن بار، رله های افت ولتاژ و... که در سیستم برق دیگ بخار نیز حفاظت های لازم را صورت می دهند.(F)

۲- سنسور فشار که جهت اندازه گیری افت فشار مسیر سوخت بکار برده می شود (Pfuel)

۳- سنسور فشار که جهت اندازه گیری افت فشار مسیر هوا که بکار برده می شود (PAir)

^۱ . Offshore Reliability. Data Handbook

- ۴- سنسور جریان که جهت اندازه گیری قطع شدن جریان عبوری مسیر سوخت می باشد (Ffuel)
 ۵- سنسور جریان که جهت اندازه گیری قطع شدن جریان عبوری مسیر هوا می باشد (FAir)
 ۶- سنسور جریان که جهت اندازه گیری قطع شدن جریان عبوری مسیر آب خوراک می باشد. (FWater)
 ۷- سنسور ارتفاع که پایین آمدن و بالا آمدن بیش از حد سطح آب درون دیگ بخار با آن اندازه گیری می شود. (LWater)
 ۸- سنسور هدایت سنج که بالا آمدن بیش از حد رسانی آب ورودی با آن اندازه گیری می شود. (C)
 ۹- سنسور فشار که جهت بالا آمدن بیش از حد فشار بخار خروجی از دیگ بخار بکار برده می شود. (PSteam)
 ۱۰- سنسور دما که بالا بودن دمای بخار خروجی از دیگ بخار با آن اندازه گیری می شود. (TSteam)
 ۱۱- سوئیچ عدم سرکشی به دیگ بخار طی ۲۴ ساعت گذشته (S)
 ۱۲- شیر اطمینان که فشار هدر بخار را محافظت می کند. (Val)
 سایر تجهیزات و مولفه با توجه به خصوصیات که دارا هستند، نمی توانند در دسته بندی گروههای لایه های محافظتی مستقل قرار بگیرند.

با توجه به منبع اطلاعاتی OREDA و دسته بندی ای که در آن در مورد اجزاء و مولفه های دیگ بخار، انجام گرفته هر یک از این لایه هایی که در قسمت قبل بیان شدند، بر اساس نحوه عملکردشان در یک گروه و دسته قرار می گیرند. جدول زیر ماهیت اجزاء را بر اساس شرح وظایف آنها مشخص نموده ایم.

نام اجزاء	شرح وظایف	نقش اجزاء به عنوان IPL در LOPA	ماهیت اجزاء
F	فیوزها و قطع کننده های جریان و... که در سیستم برق دیگ بخار نیز حفاظت های لازم را صورت می دهند.	IPL۱	Cabling & Junction Boxes
Pfuel & PAir	سنسور فشار که جهت اندازه گیری افت فشار مسیر سوخت بکار برده می شود. سنسور فشار که جهت اندازه گیری افت فشار مسیر هوا که بکار برده می شود.	IPL۲ & IPL۳	Control Unit
Fair & FWater & Ffuel	سنسور جریان که جهت اندازه گیری قطع شدن جریان عبوری مسیر سوخت می باشد. سنسور جریان که جهت اندازه گیری قطع شدن جریان عبوری مسیر هوا می باشد. سنسور جریان که جهت اندازه گیری قطع شدن جریان عبوری مسیر آب خوراک می باشد.	IPL۴ & IPL۵ & IPL۶	Internal power supply
LWater	سنسور ارتفاع که پایین آمدن و بالا آمدن بیش از حد سطح آب درون دیگ بخار با آن اندازه گیری می شود.	IPL۷	Instrument Level
C	سنسور هدایت سنج که بالا آمدن بیش از حد رسانی آب ورودی با آن اندازه گیری می شود. (C)	IPL۸	Instruments
PSteam	سنسور فشار که جهت بالا آمدن بیش از حد فشار بخار خروجی از دیگ بخار بکار برده می شود.	IPL۹	Instrument pressure

Tteam	سنسور دما که بالا بودن دمای بخار خروجی از دیگ بخار با آن اندازه گیری می شود. (TSteam)	IPL۱۰	Instrument temperature
S	سوئیچ عدم سرکشی به دیگ بخار طی ۲۴ ساعت گذشته.	IPL۱۱	Monitoring
Val	شیر اطمینان که فشار هدر بخار را محافظت می کند.	IPL۱۲	Valves

جدول ۱: ماهیت مولفه (لایه ها) بر اساس عملکردشان

نرخ خرابی هر یک از لایه های تعریف شده در حالت خرابی AIR مطابق OREDA به صورت زیر می باشد.

$$\lambda (AIR) = 0,24,1,31,1,25,2,05,0,98,0,24,0,48,0,72,6,33,0,75,1,35,1,69$$

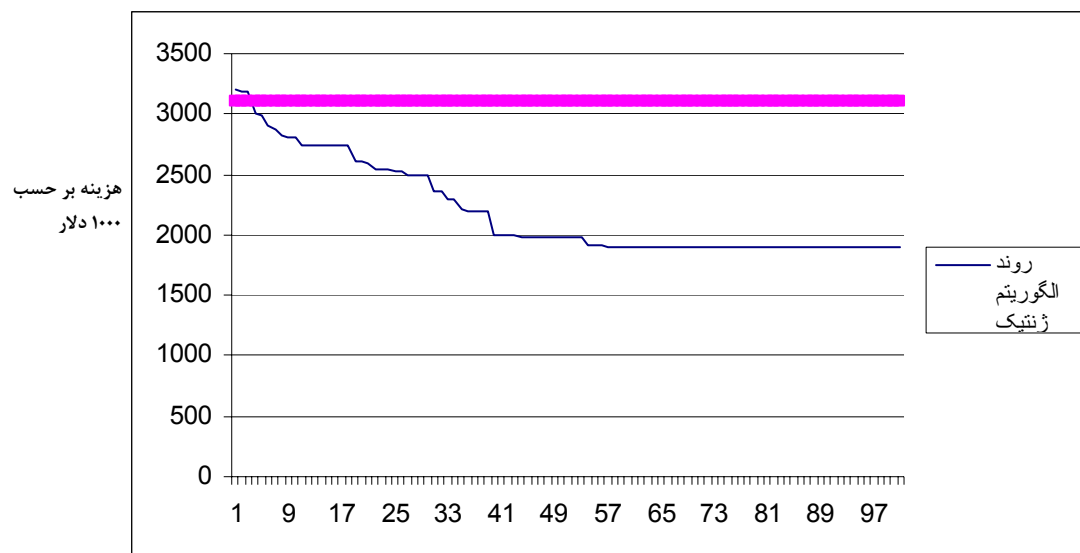
نرخ خرابی کل لایه ها در تمامی حالت‌های خرابی

$$\lambda = 0,9,1,91,1,85,3,03,1,24,0,9,0,99,1,20,7,30,1,89,1,96,2,02$$

ترتیبی که این لایه ها در طراحی اولیه و مطابق ASME Section VIII دارند ۹ ۴ ۱۲ ۱۱ ۲ ۱۰ ۳ ۵ ۸ ۷ ۶ ۱ و مقدار هزینه برای آن ۳۱۰۴ می باشد.

در شکل زیر همگرایی الگوریتم ژنتیک به سمت مقدار هزینه ۱۹۰۶,۹ مشاهده می شود که می توان مقدار این هزینه را با

هزینه ناشی از طراحی اولیه دیگ بخار مقایسه نمود. که کاهش حدود ۱۲ درصد در میزان هزینه را مشاهده می کنیم.



تکرار ژنتیک

شکل ۵: تفاوت بین هزینه های الگوریتم ژنتیک و هزینه ناشی از طراحی اولیه

۴. آنالیز حساسیت پارامترهای ژنتیک

جدول آنالیز حساسیت پارامترهای ژنتیک به صورت زیر است که با تغییر نرخ انتخاب بین بازه $[0.5 - 0.8]$ و نرخ جهش در بازه $[0.05 - 0.2]$ بدست آمده است.

Selection rate= ۰,۵

Mutation rate	Best Fitness
۰,۰۵	۱۹۰۶,۹
۰,۱	۱۹۲۰,۴
۰,۱۵	۲۰۱۰,۹
۰,۲	۲۲۵۰,۸

Selection rate= ۰,۶

Mutation rate	Best Fitness
۰,۰۵	۱۹۱۳,۴
۰,۱	۱۹۹۰,۱
۰,۱۵	۲۶۱۹,۹
۰,۲	۲۸۱۷,۸

Selection rate= ۰,۷

Mutation rate	Best Fitness
۰,۰۵	۱۹۸۰
۰,۱	۲۰۱۲,۱
۰,۱۵	۲۸۰۲,۸
۰,۲	۲۹۱۳

Selection rate= ۰,۸

Mutation rate	Best Fitness
۰,۰۵	۲۰۱۷,۶
۰,۱	۲۲۱۶
۰,۱۵	۲۸۸۸,۹
۰,۲	۳۲۰۰

جدول ۲: آنالیز حساسیت پارامترهای نرخ انتخاب و نرخ جهش

نتایج این آنالیز نشان دهنده حساسیت نتیجه حاصل از ژنتیک به مقدار پارامترهای آن می باشد.

بهترین پاسخ حاصل از این آنالیز حساسیت نرخ انتخاب ۰,۵ و نرخ جهش ۰,۰۵ است که دارای کمترین میزان

هزینه بوده که برای این مدل ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به اهمیت تجهیزات نفتی و ریسک در آنها به معرفی مدلی جهت ارزیابی ایمنی و ریسک یک دیگ بخار پرداخته شد. مدل ساخته شده روی لایه های محافظتی مستقل که در ساختار آن دیگ بخار طراحی شده، تمرکز می کند. در این مدل سعی شده، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و درخت رویداد بهترین ترکیب از این لایه ها را در اختیار طراحان و مهندسان این تجهیزات قرار دهد. فاکتور انتخاب بهترین ترکیب هزینه های ناشی از نگهداری و تعمیرات و همچنین هزینه ی ناشی از وخامت تعویق از جلوگیری از پیشرفت حادثه و رویداد اولیه می باشد. برای رسیدن به بهترین ترکیب از لایه ها و به دلیل اینکه مدل ژنتیک به سوی جمعیت و کروموزوم های بهتر گرایش پیدا کند، عملگر ادغام (تقاطعی) که برای این مساله پیشنهاد شده بر پایه میانگین زمان خرابی استوار شده است، در پایان چون طراحی این دیگ بخار بر اساس ASME section VIII صورت گرفته است به

مقایسه نتیجه به دست آمده از مدل (۱۹۰۶,۹) و از طراحی اولیه (۳۱۰۴) بدست می آید که کاهش ۱۲ درصد در میزان هزینه نشان دهنده مناسب بودن و بهینه بودن ترتیب لایه ها بر اساس آنچه که از مدل بدست آمده، می باشد.

با بکارگیری مدلسازی که در این مقاله انجام گرفته است، مهندسان و طراحان می توانند به بررسی ایمنی و ارزیابی ریسک تجهیزات و سیستم ها بپردازند تا به بهترین طراحی با در نظرگیری عوامل ایمنی و ریسک دست یابند.

منابع و مراجع

۱. نجمی.محمد، (۱۳۸۴) نقش مدیریت ایمنی در توسعه عمر تجهیزات تحت فشار پالایشگاه ها، صنایع پتروشیمی و شیمیایی اولین همایش ملی مهندسی ایمنی و مدیریت HSE
۲. WEI .C., WILLIAMJ& SAMMANNAN. M. (۲۰۰۸) Layer Of Protection analysis for reactive chemical risk assessment. Hazardous Materials.
۳. FANG. J., Mannan\ S. M., Ford. D.& A.SUMMERS., (۲۰۰۶) VALUE AT RISK PERSPECTIVE ON LAYERS OF PROTECTION ANALYSIS..
۴. ARTHUR. M. & DOWELL (۱۹۹۸) Layer of protection analysis for determining safety integrity level. ISA Transactions ۳۷ P۱۵۵-۱۶۵
۵. SCHUPP.BA, HALE.AN, PASMAN.HA, LEMKOVITZ.BS & GOOSSENS.LO (۲۰۰۶) Design support for the systematic integration of risk reduction into early chemical process design. Safety Science,
۶. MELCHERS.RE & FEUTRILL.WR. (۲۰۰۱) Risk assessment of LPG automotive refuelling facilities. Surveying and Environmental Engineering.
۷. ZHAOQIAN. ZH, CH. WU, TAO. XI, BEIKE, Z & LI, A. (۲۰۰۴) Chemical hazards assessing and accidents estimation by event tree modeling. Safety Science and Technology Proceedings.
۸. IOANNISA. & PAPAZOGLU (۱۹۹۸) Mathematical foundations of event tree. Reliability engineering & System Safety.
۹. JOOCHEOL., K. (۲۰۰۶) Event tree based sampling. Computers & Operations Research.
۱۰. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers (۲۰۰۱) "Layer Of Protection Analysis" SIMPLIFIED PROCESS RISK ASSESSMENT" ۳ Park Avenue New York, New York ۱۰۰۱۶-۵۹۹۱ API (۱۹۹۲) Inspection of Pressure Vessels, RECOMMENDED PRACTICE ۵۷۲.
۱۱. CCPS (۱۹۹۲) Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, New York, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety.
۱۲. CCPS (۱۹۹۸) Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, New York, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety.
۱۳. SUMMERS, A. (۲۰۰۳) Introduction to layers of protection analysis. Hazardous Materials, ۱۰۴(۱-۳). ۱۶۳-۱۶۸
۱۴. GOLDBERG, D. E. (۱۹۸۹) Genetic Algorithm in Search and Optimization, New York, Addison-Wesley.
۱۵. DAVIS. L (۱۹۹۱) Hand Book of Genetic Algorithms, New York:, Van Nostrand Reinhold.
۱۶. علیرضا. مهدی، (۱۳۸۷) مقدمه ای بر الگوریتم ژنتیک و کاربردهای آن زانیس تهران
۱۷. DEB.K,(۲۰۰۵) Optimization for engineering design department of mechanical engineering. Indian institute of technology kanpur new delhi

۱۸. Offshore Reliability. Data Handbook ۴th Edition published by: OREDA Participant,(۲۰۰۲)by the OREDA companies <http://www.sintef.no/oreda/handbok/>
۱۹. ASME (۱۹۹۵) Boiler , Pressure Vessels with Overpressure Protection by System Design,, The ۱۹۹۵ Boiler Pressure Vessel code. New York: American Society Of Mechanical Engineers.

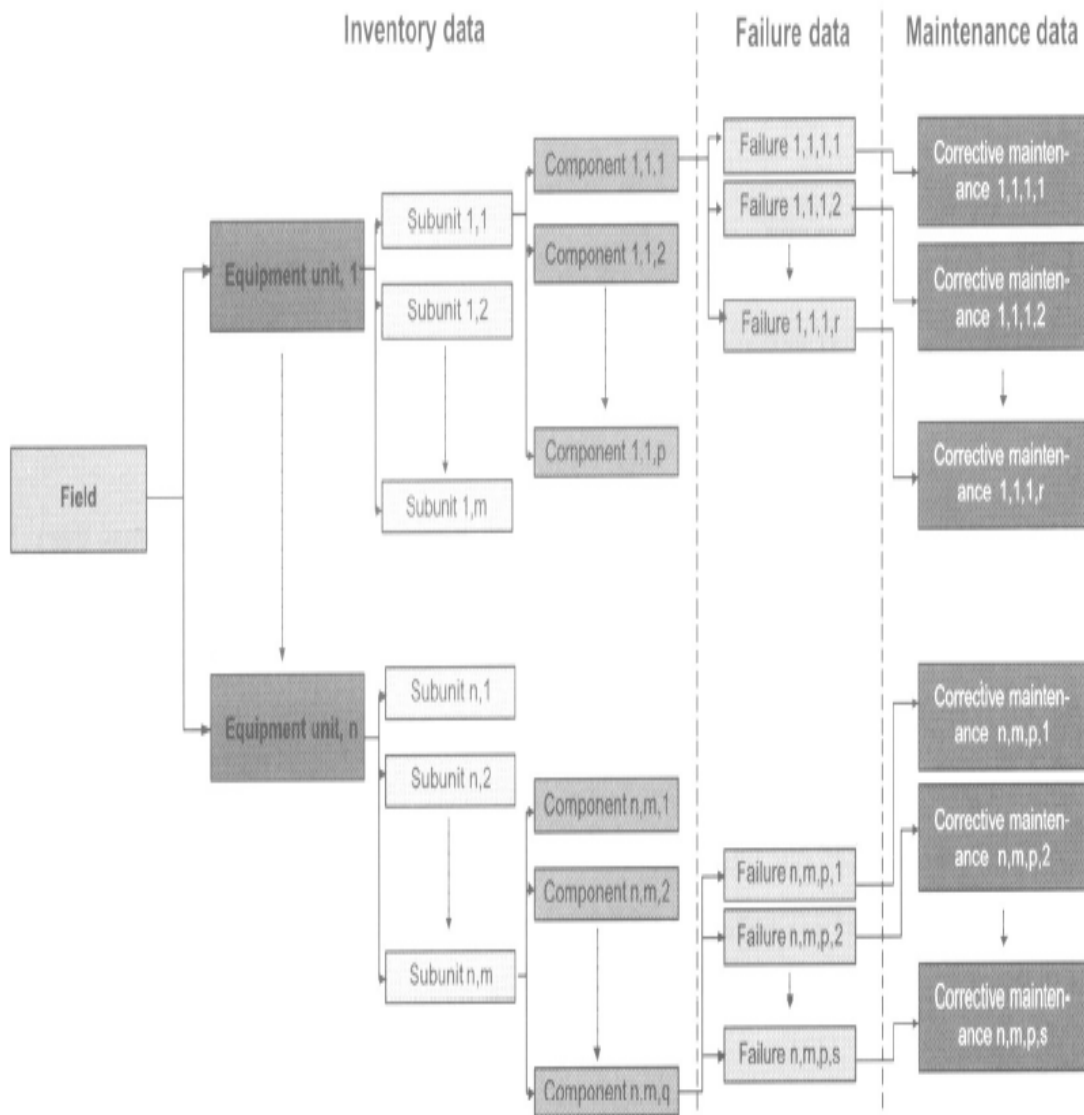


Figure 3 - System hierarchy

The failures and corrective maintenance actions are as shown in Figure 3 linked to the component where they occurred.

Heaters and Boilers

Inventory description

The boundary definition is shown in Figure 19 and corresponding subdivision in Maintainable Items in Table 14.

The boundary definition applies to hydrocarbon (HC) fired heaters and (re)boilers supplying energy to heat or boil a medium. The energy may be supplied through combustion of hydrocarbons, through supply of a high temperature medium (e.g. steam) or by electricity.

The heater and boiler components will typically include a vessel/shell in which the heating process is performed. For heaters and HC-fired boilers, a burner device and exhaust system are included. Unlike most boilers, the heaters contain a tube coil through which the medium to be heated is flowing.

For HC fired heaters and boilers, the fuel control valve is inside the equipment boundary, while fuel conditioning equipment (e.g. scrubbers) and ESD/PSD valves are outside the boundary.

Inlet, outlet, pressure relief and drain valves are specifically excluded. Valves and instruments included are those locally mounted and/or which form a pressure boundary (e.g. block valves, calibration valves, and local indicators/gauges).

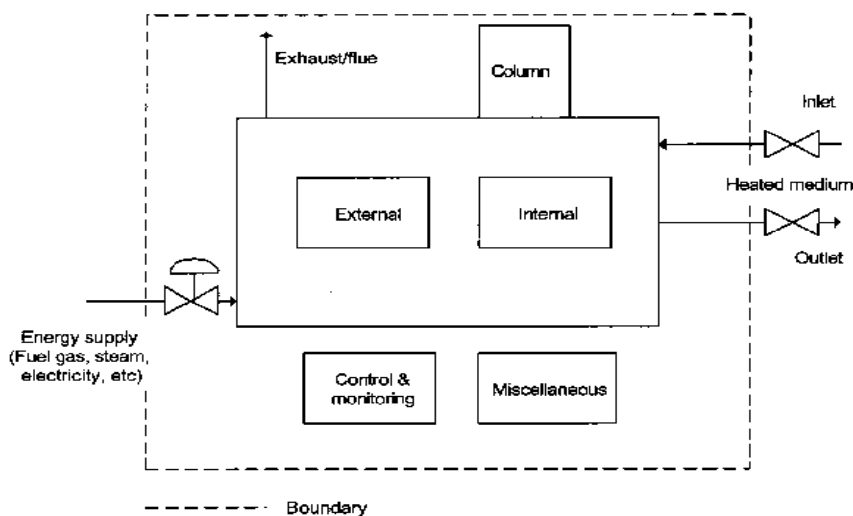


Figure 19-Heaters and boilers, Boundary Definition

Table 14 Heaters and Boilers, Subdivision in Maintainable Items

HEATERS AND BOILERS				
Column	Control & monitoring	External	Internal	Miscellaneous
<ul style="list-style-type: none"> • Body/shell • Packing • Reflux coil/ condenser 	<ul style="list-style-type: none"> • Actuating device • Cabling & junction boxes • Control unit • Instruments • Internal power supply • Monitoring • Valves 	<ul style="list-style-type: none"> • Body/shell • Piping • Support • Valves 	<ul style="list-style-type: none"> • Body/shell • Burner • Exhaust stack • Fire tube • Support • Tube coil 	<ul style="list-style-type: none"> • Fan

(For all subunits the MIs "Unknown" and "Subunit" are included.)

List of failure modes

AIR	Abnormal instrument reading
ELP	External leakage - Process medium
ELU	External leakage - Utility medium
IHT	Insufficient heat transfer
INL	Internal leakage
SER	Minor in-service problems
OTH	Other
OHE	Overheating
PDE	Parameter deviation
PLU	Plugged/Choked
STD	Structural deficiency

OREDA-2002

489

OREDA-2002

Taxonomy no 3.3		Item Mechanical Equipment Heaters and boilers								
Population 9	Installations 6	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)					No of demands			
		Calendar time * 0.2505		Operational time † 0.2262			Active rep.hrs	Repair (manhours)		
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)						Active rep.hrs	Repair (manhours)	
		Lower	Mean	Upper	SD	n/t	Min		Mean	Max
Critical	13* 13†	8.07	47.31	113.47	34.08	51.90	14.0	1.0	22.4	41.0
Abnormal instrument reading	4* 4†	0.02	12.34	50.67	19.21	15.97	12.4	13.0	24.8	41.0
Insufficient heat transfer	3* 3†	0.00	11.48	52.32	20.85	11.98	2.8	1.0	2.8	4.0
Overheating	1* 1†	0.00	3.94	19.57	8.32	3.99	37.5	35.0	35.0	35.0
Parameter deviation	2* 2†	0.00	6.50	28.42	11.10	7.98	20.5	41.0	41.0	41.0
Structural deficiency	3* 3†	1.11	12.77	35.44	11.52	11.98	16.0	19.0	22.0	25.0
Degraded	92* 92†	0.00	316.53	1669.39	757.82	367.28	12.7	0.5	22.3	813.0
External leakage - Utility medium	2* 2†	1.67	8.35	19.25	5.65	7.98	98.8	2.0	196.5	391.0
Insufficient heat transfer	87* 87†	0.00	296.51	1606.25	746.82	347.32	10.8	0.5	18.4	813.0
Internal leakage	1* 1†	0.25	4.11	12.04	3.99	3.99	-	-	-	-
Parameter deviation	1* 1†	0.00	4.50	23.05	9.98	4.42	9.5	19.0	19.0	19.0
Plugged/Choked	1* 1†	0.00	3.87	15.91	6.04	4.42	8.0	8.0	8.0	8.0
Incipient	53* 53†	3.17	191.23	600.46	214.53	211.59	5.7	0.5	9.4	113.0
Abnormal instrument reading	18* 18†	4.81	73.99	215.09	71.17	71.86	5.8	0.5	9.6	44.0
External leakage - Process medium	2* 2†	0.03	7.88	30.45	11.25	7.98	2.5	2.0	2.5	3.0
External leakage - Utility medium	1* 1†	0.00	3.94	19.57	8.32	3.99	4.5	9.0	9.0	9.0
Minor in-service problems	17* 17†	0.03	62.13	266.14	102.91	67.87	7.1	1.5	11.2	113.0
Other	14* 14†	13.05	51.42	110.57	30.99	55.89	2.6	1.0	4.2	7.0
Overheating	1* 1†	0.00	3.51	14.58	5.55	3.99	28.5	57.0	57.0	57.0
Unknown	1* 1†	0.00	8.46	39.70	16.17	3.99	-	12.0	12.0	12.0
Abnormal instrument reading	1* 1†	0.00	8.46	39.70	16.17	3.99	-	12.0	12.0	12.0
Comments										

(cont.)

Taxonomy no 3.3		Item Mechanical Equipment Heaters and boilers								
Population 9	Installations 6	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)					No of demands			
		Calendar time * 0.2505		Operational time † 0.2262						
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)					Active rep.hrs	Repair (manhours)		
		Lower	Mean	Upper	SD	n/t		Min	Mean	Max
All modes	159* 158†	0.12 0.13	555.60 704.23	2469.51 3141.33	973.80 1240.98	634.76 703.02	10.5	0.5	18.0	813.0
Comments										

Maintainable item versus failure mode, to be continued**Item: Heaters and boilers**

	AIR	ELP	ELU	IHT	INL	OHE
Actuating device	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
Body/shell	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Burner(s)	0.63	0.63	0.63	6.29	0.00	0.00
Cabling & junction boxes	2.52	0.00	0.00	6.60	0.00	0.63
Control unit	0.63	0.00	0.00	0.94	0.00	0.00
Instrument, flame	0.00	0.00	0.00	35.53	0.00	0.00
Instrument, flow	0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
Instrument, general	1.89	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
Instrument, level	1.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Instrument, pressure	1.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Instrument, temperature	2.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
Internal power supply	0.63	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00
Monitoring	0.63	0.00	0.00	0.31	0.00	0.00
Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Piping	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00
Subunit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Support	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tube coil	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00
Unknown	0.63	0.00	0.00	3.77	0.00	0.00
Valves	0.00	0.00	0.63	0.63	0.00	0.00
Total	14.47	1.26	1.89	56.60	0.63	1.26

The figures are percentages of the total failure rate for the actual maintainable item/failure mode combination.

Maintainable item versus failure mode, continued
Item: Heaters and boilers

	OTH	PDE	PLU	SCR	STD	Sum
Actuating device	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
Body/shell	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.63
Burner(s)	0.63	0.00	0.00	1.89	0.00	10.69
Cabling & junction boxes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.75
Control unit	0.00	0.00	0.00	1.26	0.00	2.83
Instrument, flame	0.00	0.00	0.00	1.26	0.00	36.79
Instrument, flow	0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	2.52
Instrument, general	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	3.14
Instrument, level	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.89
Instrument, pressure	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.89
Instrument, temperature	0.00	1.26	0.00	0.63	0.00	5.03
Internal power supply	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.89
Monitoring	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94
Other	3.14	0.00	0.00	0.63	1.26	5.03
Piping	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	1.26
Subunit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.63
Support	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.63
Tube coil	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
Unknown	1.89	0.00	0.63	1.26	0.00	8.18
Valves	2.52	0.00	0.00	1.26	0.00	5.03
Total	8.81	1.89	0.63	10.69	1.89	100.0

The figures are percentages of the total failure rate for the actual maintainable item/failure mode combination.

Failure descriptor versus failure mode, to be continued

Item: Heaters and boilers

	AIR	ELP	ELU	IHT	INL	OHE
Blockage/plugged	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Breakage	0.00	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00
Cavitation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Clearance/ alignment failure	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Contamination	0.00	0.00	0.00	5.66	0.00	0.00
Control failure	1.26	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00
Corrosion	0.63	0.63	0.00	2.52	0.00	0.00
Deformation	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
Electrical failure - general	1.89	0.00	0.00	1.89	0.00	0.63
Faulty signal/indication/alarm	2.52	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
Instrument failure - general	2.52	0.00	0.63	33.96	0.00	0.63
Leakage	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00	0.00
Looseness	0.00	0.63	0.00	0.63	0.00	0.00
Material failure - general	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00
Mechanical Failure - general	0.00	0.00	0.00	4.40	0.00	0.00
Misc. external influences	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Miscellaneous - general	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
No power/ voltage	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
No signal/indication/alarm	2.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Open circuit	0.00	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00
Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Out of adjustment	1.26	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
Short circuiting	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sticking	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
Unknown	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00
Total	14.47	1.26	1.89	56.60	0.63	1.26

The figures are percentages of the total failure rate for the actual failure descriptor/failure mode combination.

Failure descriptor versus failure mode, continued
Item: Heaters and boilers

	OTH	PDE	PLU	SER	STD	Sum
Blockage/plugged	0.63	0.00	0.00	0.63	0.00	1.26
Breakage	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	2.52
Cavitation	0.00	0.00	0.00	0.63	0.63	1.26
Clearance/ alignment failure	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.63
Contamination	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.66
Control failure	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	3.14
Corrosion	0.63	0.00	0.00	1.26	0.00	5.66
Deformation	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	1.26
Electrical failure - general	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.40
Faulty signal/indication/alarm	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	3.77
Instrument failure - general	1.89	1.26	0.00	2.52	0.00	43.40
Leakage	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	1.89
Looseness	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	1.89
Material failure - general	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
Mechanical Failure - general	0.63	0.00	0.00	0.63	1.26	6.92
Misc. external influences	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
Miscellaneous - general	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26
No power/ voltage	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26
No signal/indication/alarm	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	3.14
Open circuit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26
Other	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
Out of adjustment	0.00	0.00	0.00	2.52	0.00	4.40
Short circuiting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
Sticking	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26
Unknown	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26
Total	8.81	1.89	0.63	10.69	1.89	100.0

The figures are percentages of the total failure rate for the actual failure descriptor/failure mode combination.

```

% Setup the GA
global pop

npar=۱۲; % # optimization variables
Nt=npar; % # columns in population matrix
%
% -----
% Stopping criteria
maxit=۱۰۰; % max number of iterations
%
% -----
% GA parameters
popsize=۲۰; % set population size
mutrate=۰,۰۵; % set mutation rate
selection=۰,۵; % fraction of population kept
keep=floor(selection*popsize); % #population members that survive
M=ceil((popsize-keep)/۲); % number of matings
odds=۱;
for ii=۲:keep
    odds=[odds ii*ones(۱,ii)];
end
Nodds=length(odds);
%
% -----
% Create the initial population
iga=۰; % generation counter initialized
for iz=۱:popsize
    pop(iz,:)=randperm(npar); % random population
end
pop
cost=feval('mm',pop); % calculates population cost using ff
[cost,ind]=sort(cost); % min cost in element ۱
pop=pop(ind,:); % sort population with lowest cost first
minc(۱)=min(cost); % minc contains min of population
meanc(۱)=mean(cost); % meanc contains mean of population
pop ۱=pop
%
% -----
% Iterate through generations
while iga<maxit
    iga=iga+۱; % increments generation counter
%
% -----
% Pair and mate
R=[۰,۹۶۱,۹۱۶۱,۸۵۳,۰۳۶۱,۲۴۶۰,۹۶۰,۹۹۶۱,۲۰۶۷,۳۰۶۱,۸۹۶۱,۹۶۶۲,۰۲]; %total failure
rates
y=[۰,۲۴۶۱,۳۱۶۱,۲۵۶۲,۰۵۶۰,۹۸۶۰,۲۴۶۰,۴۸۶۰,۷۲۶۶,۳۳۶۰,۷۵۶۱,۳۵۶۱,۶۹]; % for AIR
failure mode
mutrate=۰,۰۵;
tt=۰;
M=ceil((popsize-keep)/۲); % number of matings
prob=flipud([۱:keep]'/sum([۱:keep])); % weights chromosomes based upon position
in list
odds=[۰ cumsum(prob(۱:keep))]; % probability distribution function

```

```

pick\=rand(\,M);           % mate #\
pick\=rand(\,M);           % mate #\
% ma and pa contain the indicies of the chromosomes that will mate
ic=\;
while ic<=M
  for id=\:keep+\
    if pick\ (ic)<=odds(id) & pick\ (ic)>odds(id-\)
      ma(ic)=id-\;
    end % if
    if pick\ (ic)<=odds(id) & pick\ (ic)>odds(id-\)
      pa(ic)=id-\;
    end % if
  end % id
  ic=ic+\;
end % while
ma;
pa;
%
% Performs mating using crossover
%ix=\:\:keep;% index of mate #\
for io=\:M
  for i=\:npar
    h=pop(ma(io),i);
    g=pop(pa(io),i);
    MTTF\=\ /y(h);
    MTTF\=\ /y(g);
    if MTTF\ < MTTF\
      q=h;
      h=g;
      g=q;
    end% end if
    xi(io,i)=h;
    yi(io,i)=g;
  end% end for

  for we=\:npar
    for qr=\:npar
      if qr~we
        if xi(io,we)==xi(io,qr)
          for qw=\:npar
            if yi(io,we)~xi(io,qw)
              tt=tt+\;
            end
          end
        end
        if tt==\
          ss=xi(io,we);
          xi(io,we)=yi(io,we);
          yi(io,we)=ss;
        else
          ss=xi(io,qr);

```

```

        xi(io,qr)=yi(io,qr);
        yi(io,qr)=ss;
    end% end if

    tt=0;
    end%if
end%for

    end%if
end%if
end% end for
cost=feval('mm',pop); % calculates population cost using ff
[cost,ind]=sort(cost); % min cost in element 1
pop=pop(ind,:); % sort population with lowest cost first
for po=1:M
    ee=xi(po,:);
    rr= yi(po,:);
    for ix=1:keep
        for p=1:npar
            pop(keep+ix,p)=ee(p);
            pop(keep+ix+1,p)=rr(p);
        end%end for
        ix=ix+2;
    end
end
pop;
% Mutate the population

mutrate=0.05;
nmut=ceil(popsi* npar* mutrate);
for ic = 1:nmut
    row1=ceil(rand*(popsi-1))+1;
    col1=ceil(rand*npar);
    col2=ceil(rand*npar);
    temp=pop(row1,col1);
    pop(row1,col1)=pop(row1,col2);
    pop(row1,col2)=temp;
    im(ic)=row1;
end

%
% Sort the costs and associated parameters
part=pop; costt=cost;
[cost,ind]=sort(cost);
pop=pop(ind,:);

%
% Do statistics
minc(iga)=min(cost);
meanc(iga)=mean(cost);

```



```
if (O(z)~=0)
    f=O(z)/100;
    w(z+1)=w(z).*(f.*(e.^((-f).*t)));
    k=(w(z+1).*t)+k;
    h=U(z)/100;
    d=MM(z);
    v=d.*((1-(h.*(e.^((-h).*t))))).*(1-(f.*(e.^((-f).*t)))))+v;

end%end if
t=t-1;
end%end for

dist(i)=(o.*k)+(1.*v); %sev(i)+Repair(i)
k=0;
v=0;
end% end for
dist
end%% Create figure
figure\ = figure;
x=1:100;
plot(x,r,'b';x,z,'b');
```