هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

آنالیز قابلیت اطمینان کمپرسور گس سیل در کارخانه تولید آهن اسفنجی

علی منظمی[۱]، محمد علی صنیعی منفرد [۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شریف، تهران، ایران،Ali.Monazami@gmail.com

۲- دانشیار مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران،mas_monfared@alzahra.ac.ir

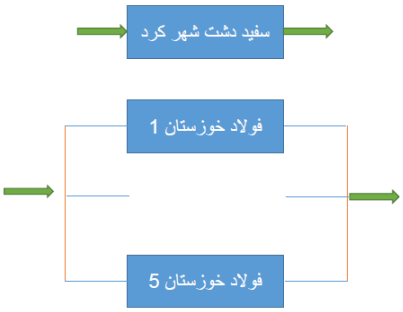
چکیده

در کارخانجات تولید آهن اسفنجی که به روش احیاء مستقیم کار می‌کنند، استفاده از کمپرسورهای مارپیچ به عنوان یکی از انواع کمپرسورهای دوّار بسیار مرسوم است. به محض اینکه این تجهیز از سرویس خارج و عملاً متوقف گردد، لازم است به منظور حفظ ایمنی کارکنان خط تولید و جلوگیری از انتشار گاز CO وH_2، کل کارخانه متوقف شود که این موضوع هزینه و خسارت زیادی را بدنبال خواهد داشت. به همین دلیل، لازم است تجهیز، از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشد تا زمان توقفات را به حداقل برساند. اما بررسی قابلیت اطمینان این تجهیز بدون شناسایی ساختار قطعات آن ممکن نیست. به همین منظور، در این مقاله برای اولین بار آنالیز RBD کمپرسور گس سیل مدل مارپیچ را مدل سازی می کنیم و نشان می دهیم که به کمک این آنالیز می توان طراحی کمپرسور را اصلاح و قابلیت اطمینان کمپرسور را از عدد 0.71 به 0.84 با هزینه معقولی ارتقاء داد.

واژه های کلیدی: آنالیز قابلیت اطمینان، تولید آهن اسفنجی، کمپرسور گس سیل، مدلسازی RBD

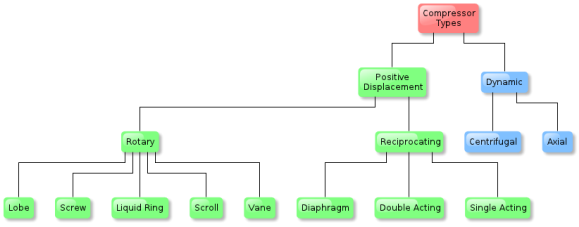
مقدمه

هر کارخانه تولید آهن ا سفنجی متشکل از یک تا چند ماژول ا ست. هر ماژول به طور م ستقل آهن ا سفنجی تولید می کند. بعنوان مثال کارخانه تولید آهن ا سفنجی سفیدد شت (شهرکرد) دارای یک ماژول ا ست، در حالی که کارخانه های فولاد خوزستان و مبارکه متشکل از پنج ماژول هستند. شکل ۱ تک ماژولی یا چند ماژولی بودن کارخانجات مختلف آهن اسفنجی را نشان می دهد.



شکل ۱. تک ماژولی یا چند ماژولی بودن کارخانجات مختلف آهن اسفنجی

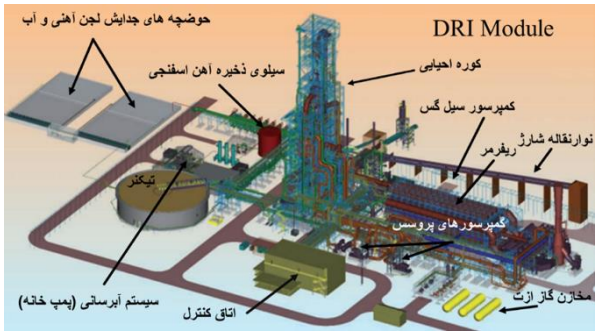
در شکل ۲ انواع کمپرسورها را ملاحظه می‌کنید تا در آن جایگاه کمپرسورهای مارپیچ مورد نظر در مطالعه خود را نشان دهیم.



شکل ۲. تقسیم بندی انواع کمپرسور ها

در شکل ۳ یک ماژول کارخانه تولید آهن اسفنجی که به روش احیای مستقیم کار می کنند (A DRI module) را نشان داده ایم.

[1] Reliability Block Diagram



شکل ۳. تجهیزات یا اجزاء یک ماژول DRI در خط تولید آهن اسفنجی

همان‌طوری که در شکل ۳ دیده می شود معمولاً، در داخل چنین ماژولی تجهیزات یا قطعات زیر قابل شناسایی‌اند:

کوره احیایی[1] ریفرمر[2] کمپرسور گاز فرایند و خنک کننده (مدل لوب یا گریز از مرکز)[3] کمپرسور گس سیل (مدل مارپیچی یا گریز از مرکز)[4] فن هوای ا صلی[5] فن دود کش[6] سیستم آب خنک کننده[7] سیستم حمل مواد[8] و ...

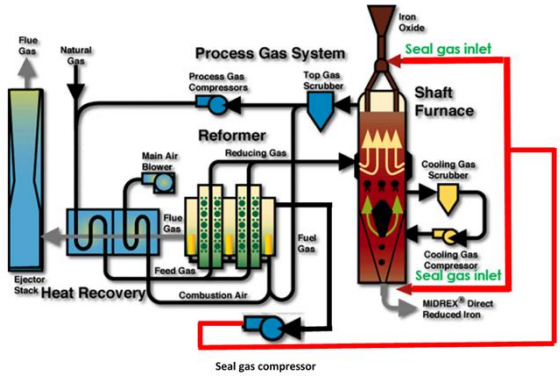
در واقع، وظیفهٔ یک کمپر سور گس سیل این ا ست که با تزریق گاز آب بندی (N_2 و CO_2) به بالا و پایین کوره، فشار مثبت تولید کرده و مانع نشت گاز خطرناک CO وH_2 به بیرون از کوره (محیط) گردد. این دو گاز فوق‌العاده برای کارکنان خط تولید خطرناک هستند و موجب خطرات جدی از جمله آتش سوزی و خفگی می‌گردند. توجه داریم که برای تولید آهن اسفنجی نیازمند تزریق دو گاز CO وH_2 به درون کوره هستیم (در واقع، این عمل وظیفه کمپرسورهای فرایند است). به همین منظور، در سرویس بودن این کمپرسور بسیار مهم است. به عبارتی، قابلیت اطمینان این کمپرسور، حیاتی است.

فرمول ترکیب گاز CO و H_2 جهت تبدیل گندله (اکسید سنگ آهن) به آهن اسفنجی در ادامه آمده است:

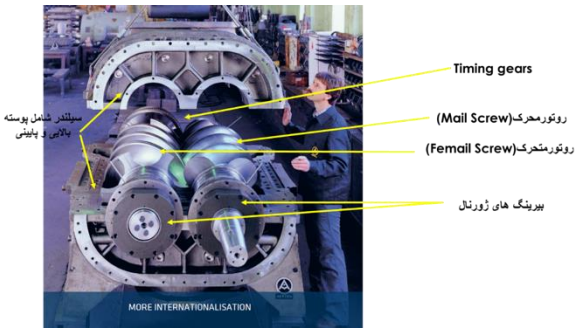
$$Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O \qquad (1)$$

$$Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2 \qquad (2)$$

شکل ۴ تجهیزات یک ماژول DRI در خط تولید آهن اسفنجی را به صورت فلوشیت و شکل ۵ یک کمپرسور مارپیچ را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تجهیزات یک ماژول تولید آهن اسفنجی از جمله کمپرسور گس سیل



شکل ۵. یک مدل کمپرسور Screw

در کارخانه آهن اسفنجی جهت گرم کردن ریفرمر از مخلوط گاز و هوا استفاده می شود و کمپر سور گس سیل مکش خود را از محصول احتراق گاز طبیعی و هوای ریفرمر تأمین می‌کند. تجربه نشان داده است که این احتراق همیشه کامل انجام نمی‌شود و به دلیل به هم خوردن تناسب اندازه گاز و هوا، احتراق ناقص صورت می‌گیرد و کربن زیادی تولید می‌شود. این کربن‌ها هنگام عبور از فیلتر مکش کمپرسور گس سیل، باعث گرفتگی فیلتر شده و در کارکرد کمپرسور اختلال ایجاد می‌کند و

[1] Furnace
[2] Reformer
[3] Process and cooling gas compressor (lobe type or centrifugal)
[4] Seal gas compressor (Screw type or centrifugal)

[5] Main fan
[6] Ejector stack fan
[7] Cooling water system
[8] Material handling

دردسر ساز می‌شود. در تحقیق حاضر قابلیت اطمینان این موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

توجه داریم که کمپرسور گس سیل شامل تجهیزات یا قطعات زیر است: روتور[1] سیلندر[2] بیرینگ های ژورنال[3](غیرتماسی و اصطکاکی)، تایمینگ گیرز[4] مکانیکال سیل[5] کوپلینگ[6] اورینگ[7] و غیره. لازم به ذکر است که هریک از این تجهیزات یا قطعات به جزء بیرینگ ها، در صورت فاصله گرفتن از عملکرد بهینه شان، کارکرد کمپرسور را با مشکل جدی مواجه نمی کنند و می توان تا تصمیم گیری و برنامه ریزی جهت رفع عیب، از کمپرسور به صورت کم بار[8] استفاده کرد و از توقف کل واحد جلوگیری نمود. با این حال در بین این قطعات، فقط خرابی بیرینگ می‌تواند موجب توقف کمپرسورو کل ماژول گردد.

شکل ۶، نمایی از توقف کل واحد تولید آهن را به دلیل تعمیرات اضطراری لازم برای تعویض بیرینگ کمپرسور گس سیل نشان می‌دهد.

شکل ۶. نمایی از موقعیت کمپرسورگس سیل هنگام تعویض بیرینگ در محیط کارخانه

شکل ۷. نحوه تعویض بیرینگ را در یکی از خرابی‌های کارخانه به صورت دقیق‌تر نشان داده‌ایم.

شکل ۸. موقعیت نصب بیرینگ آسیب دیده

[1] Rotor
[2] Cylinder
[3] Journal bearings
[4] Timing gears
[5] Mechanical seal
[6] Coupling
[7] O-ring
[8] Low load

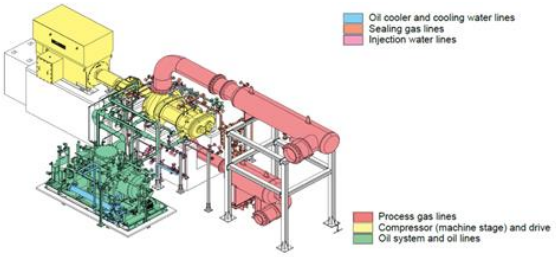
شکل ۹. بیرینگ جدید به همراه محفظه[1]جهت نصب

برای ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات از روش‌های مختلفی استفاده می-شود که یکی از این روش‌ها، RBD است که از طریق آن می‌توان رابطه بین سیستم‌ها، زیرسیستم ها و اجزاء را توصیف نمود و اجزایی را که بر میزان قابلیت اطمینان سیستم تاثیر دارند، شناسایی کرد[1]. در برخی پژوهش‌ها نیز از این روش جهت ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات استفاده شده است[4-1].

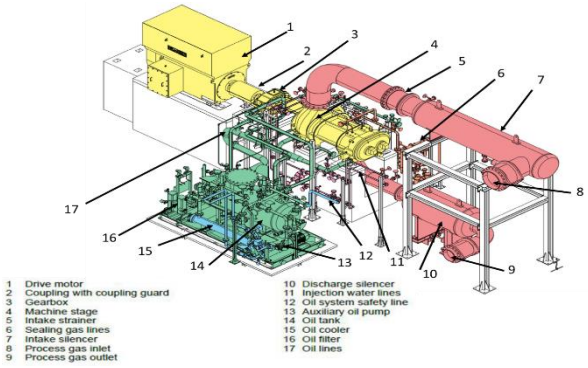
در ادامه، این تحقیق با توجه به آشنایی به‌عمل آمده با تجهیزات فنی، اقدام به مدل‌سازی RBD سیستم کرده و سپس وارد محاسبات عددی قابلیت اطمینان و در نهایت اصلاح طراحی سیستم می‌شود که موضوعات بخش-های بعدی مقاله است.

مدل‌سازی RBD کمپرسور

تجهیزات یا قطعات اصلی یک کمپرسور گس سیل به کمک تفکیک رنگ در شکل ۱۰ نشان داده شده و شکل ۱۱ تجهیزات فرعی هر تجهیز اصلی را با شماره گذاری مناسب شناسایی و آماده ارائه مدل RBD کرده است.

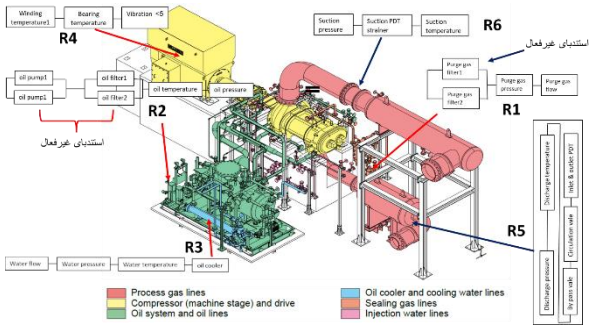


شکل ۱۰. تجهیزات اصلی کمپرسور گس سیل مورد مطالعه



شکل ۱۱. شناسایی و تفکیک تجهیزات فرعی موجود در هر تجهیز اصلی (در کمپرسور گس سیل)

بدین ترتیب، در شکل ۱۰ ساختار RBD را روی تجهیزات فرعی کمپرسور گس سیل نشان داده ایم.

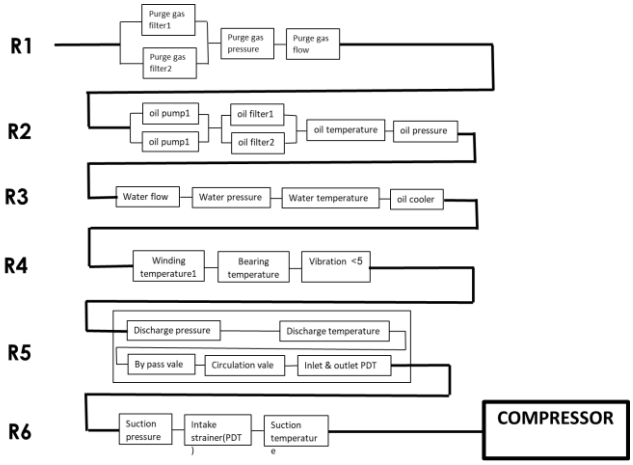


شکل ۱۲. ساختار RBD تجهیزات فرعی هر تجهیز اصلی

اینک می‌توانیم RBD کل سیستم (کمپرسور گس سیل) مورد نظر را مطابق با شکل ۱۲ مدل کنیم که ساختاری اساساً سری با سه بخش موازی دارد. در واقع، بخش‌های موازی شامل فیلترهای گازشستشو[2] پمپ‌های روغن و فیلترهای روغن می‌گردند. استندبای موجود در این سه بخش، از نیاز طراحان سیستم به بالا بردن قابلیت اطمینان این تجهیزات خبر می-دهد. به بیان دیگر، اگر با استندبای اصلاح نمی‌شدند، نقاط ضعف ساختار نمایان می‌شد. با مطالعات جدید و بیشتر در آینده می‌توان نشان داد که آیا تجارب نگهداری و تعمیرات نیز مؤید این نتیجه هست یا خیر.

[1] Housing bearing

[2] Purging gas



شکل ۱۳. ساختار قابلیت اطمینان کمپرسور گس سیل
(Seal Gas Compressor RBD)

ساختار موجود در شکل ۱۳ را می‌توان ساده تر و فشرده‌تر کرد تا به شکل ۱۴ رسید. سپس با استفاده از نرخ‌های شکست گزارش شده در جدول ۱ امکان عددی کردن قابلیت اطمینان را به وجود آورد.

شکل ۱۴. ساختار فشرده قابلیت اطمینان کمپرسور گس سیل

محاسبات نرخ شکست گزارش شده در جدول ۱ براساس داده‌های موجود در آرشیو شرکت‌های فولادی و سوابق تعمیراتی موجود در نمایندگی کمپرسور گس سیل در ایران (شرکت ارزن هواساز پارسیان)، بین سال‌های ۱۳۹۹–۱۳۹۸ در مدت یک سال (۸۰۰۰ ساعت) می‌باشد[5].

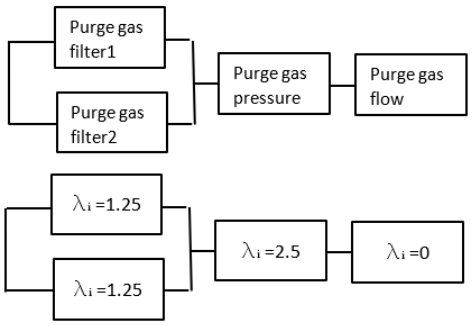
جدول ۱. نرخ خرابی قطعات مکانیکی کمپرسور گس سیل در هر میلیون ساعت کارکرد

Mechanical component	Number of failures	Number of devices	λ_i	R_i=(t=8000)
Purge gas filter	1	100	1.25	0.99
Purge gas pressure	1	50	2.5	0.98
Purge gas flow	0	50	0	1
Oil pump	0	100	0	1
Oil Filter	1	100	1.25	0.99
Oil temperature	0	50	0	1
Oil pressure	0	50	0	1
Water flow	0	50	0	1
Water temperature	3	50	7.5	0.94
Water pressure	0	50	0	1
Winding temperature	0	150	0	1
Bearing temperature	0	400	0	1
Vibration	4	300	1.6	0.987
Suction pressure	0	50	0	1
Suction temperature	0	50	0	1
Differential pressure intake strainer	3	50	7.5	0.94
Discharge pressure	0	200	0	1
Discharge temperature	9	200	5.63	0.956
Bypass valve	2	50	5	0.96
Circulation valve	1	50	2.5	0.98
Differential pressure (suction & discharge)	0	50	0	1
Oil cooler	6	50	15	0.887

Failure per million = (NF/NM)/8000
Number of failure = NF
Number of device in service for 8000 hour = NM

محاسبه عددی قابلیت اطمینان کمپرسور

محاسبه عددی قابلیت اطمینان کمپرسور[6,7] در ادامه آمده است.



محاسبه R برای ۲ جزء استندبای با نرخ خرابی برابر برای زمان ۸۰۰۰ ساعت:

$$r_{sb} = (1+\lambda t)e^{-\lambda t} \qquad (۳)$$

$$(1 + 0.00000125 \times 8000)e^{0.00000125\times 8000} = 0.99$$

محاسبه R برای ۲ جزء سری با یکدیگر برای ۸۰۰۰ ساعت:

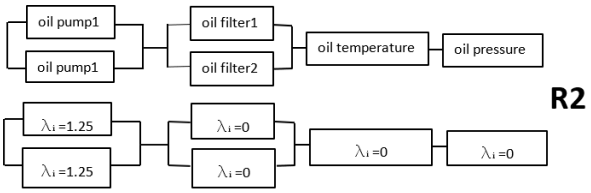
$$r_2 = \Pi e^{-\lambda_i t} \qquad (۴)$$

$$(\, e^{-0.0000025\times 8000}) \times (e^{-0}) = 0.98$$

محاسبه R1 کلی برای همه ۴ جزء برابر است با:

$$R_1 = \Pi e^{-\lambda_i t}$$

$$(r1)(r2) = (0.99995)(0.98) = 0.98$$



R2

محاسبه R برای ۲ جزء استندبای[1] برای زمان ۸۰۰۰ ساعت:

$$r_{sb} = (1+\lambda t)e^{-\lambda t}$$

$$(1 + 0.00000125 \times 8000)e^{0.00000125\times 8000} = 0.99$$

$$r_{sb} = (1+\lambda t)e^{-\lambda t}(1+0)e^{-0\times 8000} = 1$$

محاسبه R برای ۲ جزء سری برای ۸۰۰۰ ساعت:

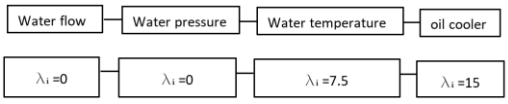
$$r_3 = \Pi e^{-\lambda_i t}$$

$$(\, e^{-0}) \times (e^{-0}) = 1$$

محاسبه R2 کلی برای همه ۶ جزء (سیستم سری):

$$R_2 = \Pi e^{-\lambda t i} = (r1)(r2)(r3) =$$

$$(0.99)(1)(1)(1)(1) = 0.99$$



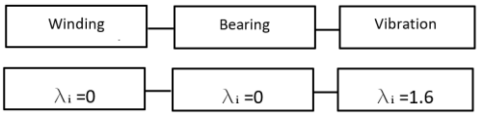
R3

محاسبه R3 برای 4 جزء سری برای ۸۰۰۰ ساعت:

$$R_3 = \Pi e^{-\lambda_i t} =$$

$$(\, e^{-0})(e^{-0})(e^{-0.0000075\times 8000})(e^{-0.000015\times 8000})$$

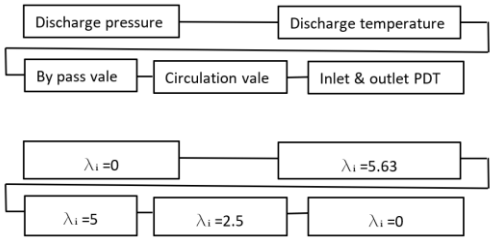
$$(1)(1)(0.942)(0.88) = 0.83$$



R4

محاسبه R4 برای ۳ جزء سری برای ۸۰۰۰ ساعت:

$$R_4 = \Pi e^{-\lambda_i t} = (\, e^{-0})(e^{-0})(e^{-0.0000016x8000})$$
$$= (1)(1)(0.98) = 0.98$$

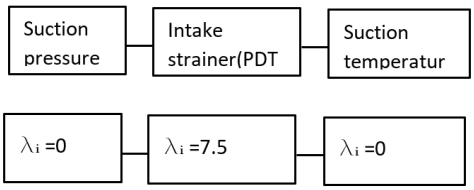


R5

محاسبه R5 برای 5 جزء سری برای ۸۰۰۰ ساعت:

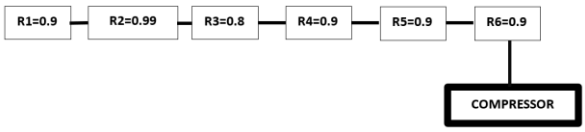
$$R_5 = \Pi e^{-\lambda_i t}$$
$$= (\, e^{-0})(e^{-0.00000563x8000})(e^{-0.000005x8000})$$
$$(e^{-0.0000025x8000})(e^{-0})$$
$$= (1)(0.99)(0.96)(0.98)(1) = 0.94$$

[1] Standby



محاسبه R6 برای ۳ جزء سری برای ۸۰۰۰ ساعت:

$$R_6 = \Pi e^{-\lambda_i t} = (e^{-0})(e^{-0.0000075x8000})(e^{-0}) = (1)(0.942)(1) = 0.94$$

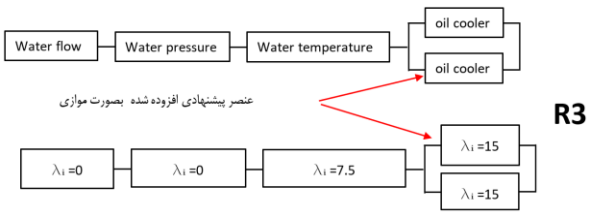


محاسبه R کلی سیستم برای ۸۰۰۰ ساعت:

$$(R1)(R2)(R3)(R4)(R5)(R6) = (0.98).(0.99).(0.83).(0.98).(0.94).(0.94) = 0.71$$

بحث و نتیجه گیری

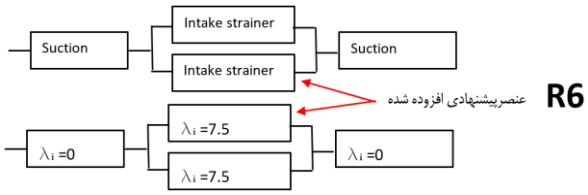
با توجه به نتایج حاصل از محاسبات، برای افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های نت، باید طراحی سیستم اصلاح گردد. به این منظور، اگر بتوان برای ضعیف ترین عنصر در ساختار سری سیستم، یک عنصرموازی یا استندبای قرار داد و با فرض اینکه نرخ خرابی ثابت است، قابلیت اطمینان بهبود یافتهٔ سیستم بدست می‌آید[8,9]. اما دو تجهیز ضعیفی که بتوان به راحتی از نظر تکنیکی برای آن‌ها عنصر موازی یا استندبای در نظر گرفت عبارتنداز: Oil cooler در مجموعه (R3) و Intake strainer (PDT) در مجموعه (R6).



$$r_{par} = 1 - [(1 - e^{-\lambda_i t})(1 - e^{-\lambda_i t})] \qquad (۵)$$

$$1 - [(1 - e^{-0.000015\times8000})(1 - e^{-0.000015\times8000})]$$

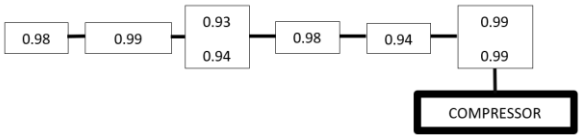
$$Then\ R3 = (1)(1)(0.94)(0.98) = 0.93$$



$$r_{par} = 1 - [(1 - e^{-\lambda_i t})(1 - e^{-\lambda_i t})] = 1 - [(1 - e^{-0.0000075\times8000})(1 - e^{-0.0000075\times8000})] = 0.99$$

$$r_{sb} = (1 + \lambda t)e^{-\lambda t} = (1 + 0.0000075\text{x}8000)e^{-0.0000075x8000} = 0.99$$

در ادامه، محاسبه مجدد قابلیت اطمینان سیستم با افزودن دو عنصر به صورت موازی و استندبای برای عناصر ضعیف تر که از نظر تکنیکی امکان افزودن دارند، آمده است.



محاسبه قابلیت اطمینان با فرض موازی بودن دو عنصر ضعیف:

R=(R1)(R2)(R3)(R4)(R5)(R6)

R= (0.98)(0.99)(0.93)(0.98)(0.94)(0.99)=0.84

محاسبه قابلیت اطمینان با فرض استندبای بودن دو عنصر ضعیف:

R=(R1)(R2)(R3)(R4)(R5)(R6)

R= (0.98)(0.99)(0.94)(0.98)(0.94)(0.99)=0.85

ازآن‌جایی که از نظر تکنیکی امکان استندبای بودن عناصر وجود ندارد به ناچار بایستی به نصب عناصر ضعیف به صورت موازی در کنار یکدیگربسنده کرد. پس از این تغییرات، قابلیت اطمینان سیستم برای ۸۰۰۰ ساعت از ۰,۷۱ به ۰,۸۴ یعنی به اندازه ۱۹٪ افزایش می یابد.

قیمت یک دستگاه کولر به همراه نصب و مواد مورد نیاز تقریباً برابر ۱۵۰ میلیون تومان و ساخت و نصب فیلتر مکش به همراه مواد تقریباً برابر ۱۰۰ میلیون تومان می‌باشد و به ازاء هر ساعت توقف، یک واحد نرمال تولید آهن اسفنجی به صورت متوسط ۱۰۵ تن تولید را از دست خواهد داد. حال اگر قیمت یک کیلو آهن اسفنجی به طور متوسط ۱۰۰۰۰ تومان در نظر گرفته شود (1kg=10,000)، در این صورت، تولید از دست رفته برابر با یک میلیارد و پنجاه میلیون تومان خواهد شد :

$$10{,}000 \times 105{,}000 = 1{,}050{,}000{,}000$$

با توجه به اینکه، هزینه نصب کولر و فیلتر مکش برابر با دویست و پنجاه میلیون تومان است:

$$150{,}000{,}000 + 100{,}000{,}000 = 250{,}000{,}000$$

با افزودن یک کولر به سیستم آب خنک کننده و یک فیلتر مکش به اندازه ۱۹٪ می توان قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داد:

$$250{,}000{,}000 \div 1{,}050{,}000{,}000 = 0.24$$

که از نظر هزینه تولید ازدست رفته در قیاس با هزینه نصب عناصر پیشنهادی، کاملاً به صرفه و اقتصادی خواهد بود.

مطابق با محاسبه فوق، می توان نتیجه گرفت که هزینه اجرای طرح افزودن و تقویت عناصر ضعیف به صورت موازی، ۲۴ درصد ارزش تولید از دست رفته است. همچنین، کاهش عمر تجهیزات در هر راه اندازی را باید به هزینه های تعمیرات اضافه نمود.

فهرست منابع

[1] R.I. Rosihan, H.a.Yuniarto . “Analisis Sistem Reliability dengan Pendekatan Reliability Block Diagram”, Jurnal Teknosains, Vol.9,No.1,pp.1-85, 2019.

[2] H. Budiman, I. Rizki, Y. Whulanza, Pt. Pertamina, S. Sumatra. “Analisa Reliabilitas dan “Simulasi Reliability Block Diagram pada Sistem Straight Run MotorGas Compressor”, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII) Depok*, pp.15–16, October 2014.

[3] ا. م. سیف الدین اصل، ا. فدایی،ک. قنبری، س. زواری. "ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم توربین بادی به روش مدل‌سازی بلوک دیاگرام"، *فصلنامه انرژی -های تجدیدپذیر و نو*، دوره ۹، شماره ۱ – شماره پیاپی ۱۷،صص ۱–۷، ۱۴۰۱.

[4] ش. مهدوی، م.ر. میری لواسانی." ارزیابی قابلیت اطمینان جایگاه سوخت رسانی CNG به روش دیاگرام بلوکی (RBD)"، *فصلنامه پژوهشی سلامت کار ایران*، دوره ۱۱، شماره ۳، صص ۲۹–۲۲، ۱۳۹۳.

[5] شرکت ارزن هواساز پارسیان، آرشیو داده‌ها در شرکت های فولادی و سوابق تعمیراتی موجود در نمایندگی کمپرسور گس سیل در ایران، –۱۳۹۹ ۱۳۹۸.

[6] م.ع. فارسی. *اصول و مبانی مهندسی قابلیت اطمینان*، نشرسیمای دانش؛ ۱۳۹۵.

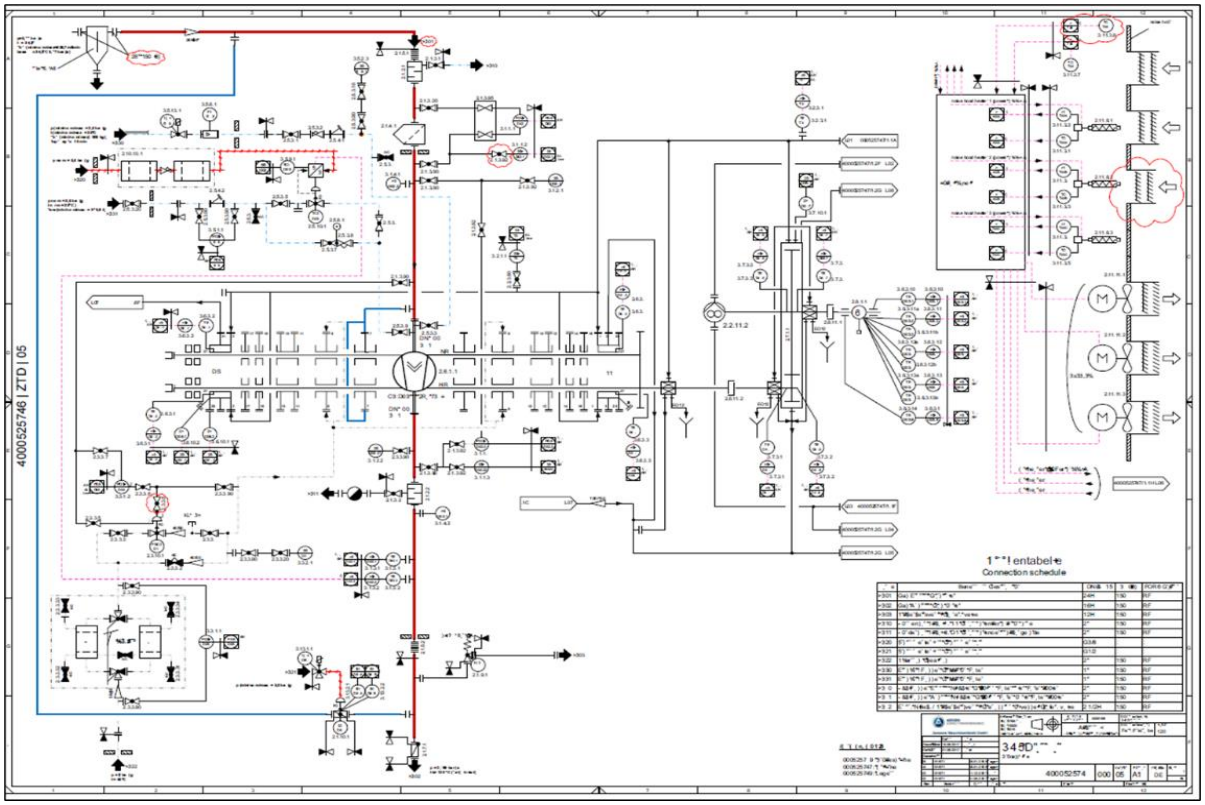
[7] N.W. Sachs, *Practical Plant Failure: A Guide to Understanding Machinery Deterioration and Improving Equipment Reliability*,2nd Edition, CRC Press; 2007.

[8] D.J. Smith, *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers*, Butterworth-Heinemann press; 1993.

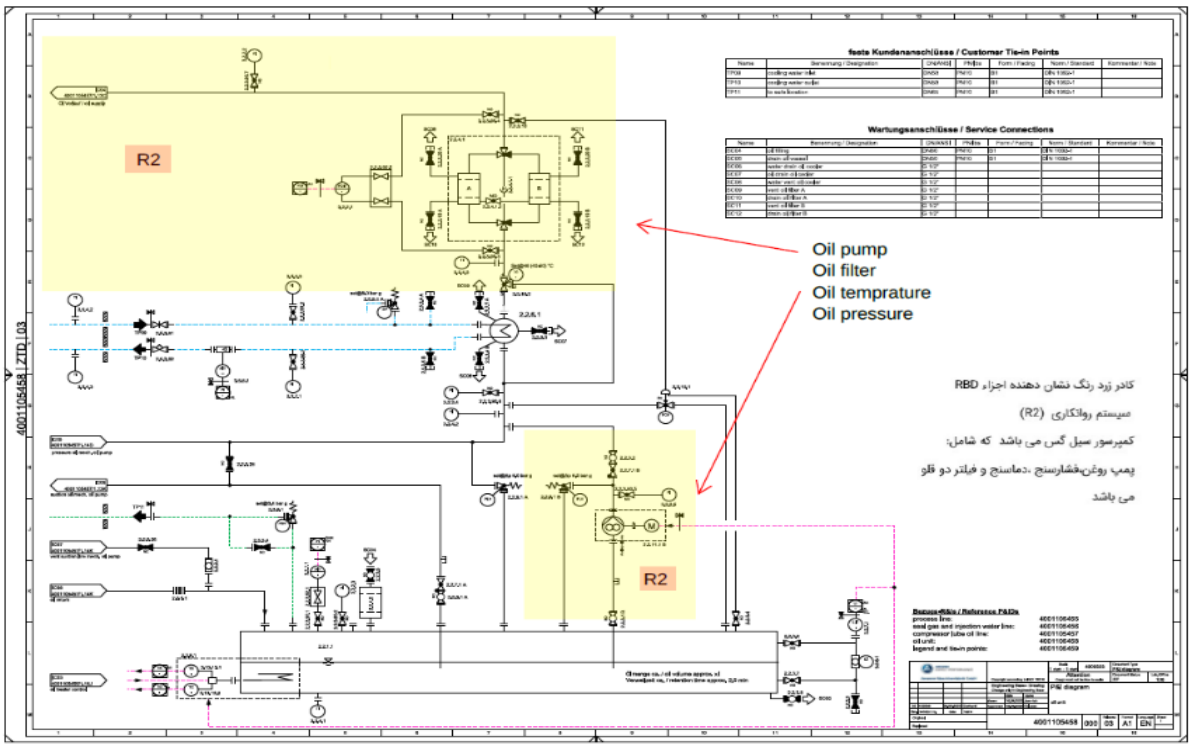
[9] م.ع. صنیعی منفرد. *مجموعه جزوات درسی قابلیت اطمینان*،دانشگاه الزهرا، تهران،۱۴۰۱

پیوست :

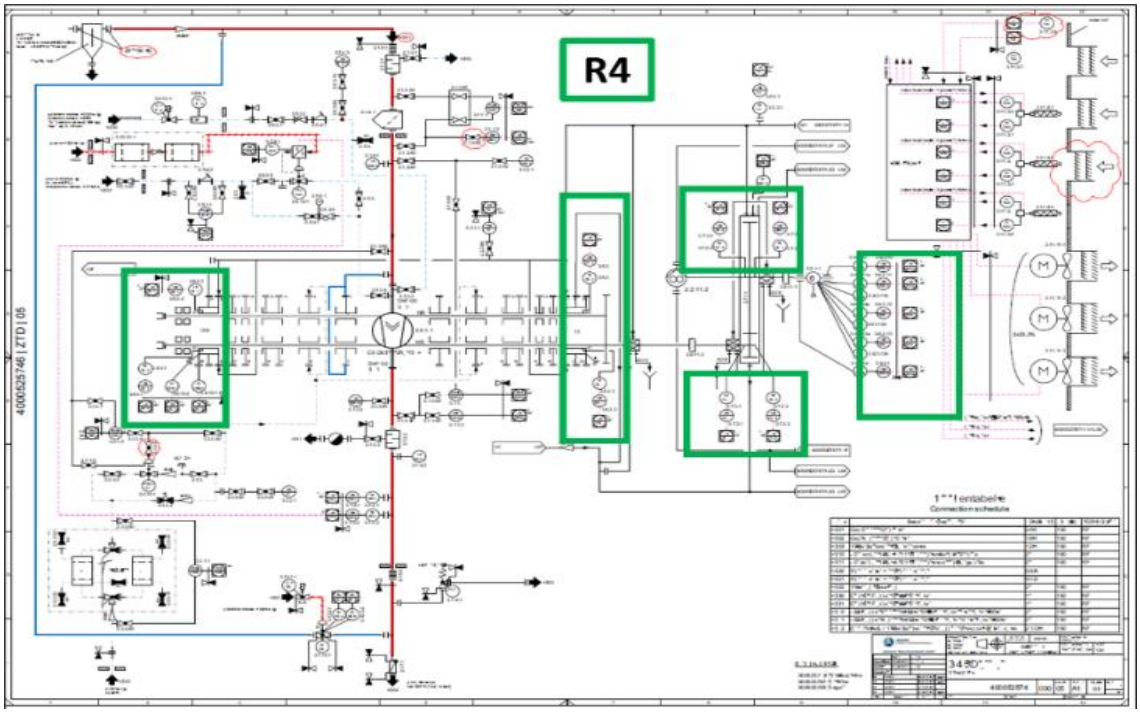
نقشه های P&ID مربوط به کمپرسور گس سیل شامل همه المان های فرآیندی و حفاظتی



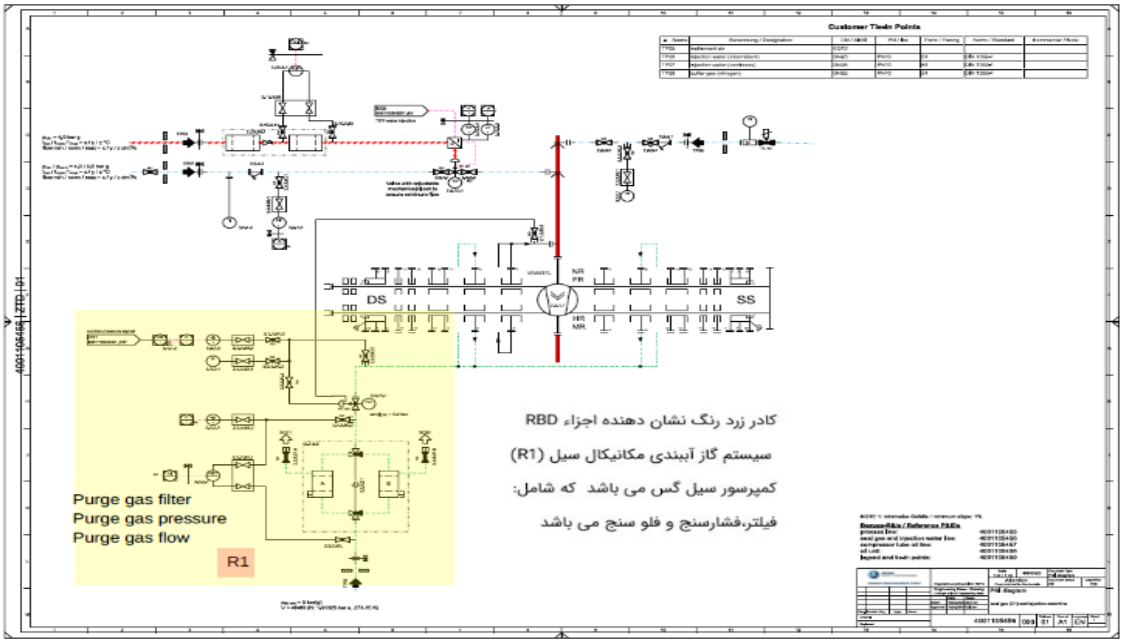
P &ID کلی المانهای حفاظتی و کنترلی سیستم کمپرسور گس سیل شامل الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور



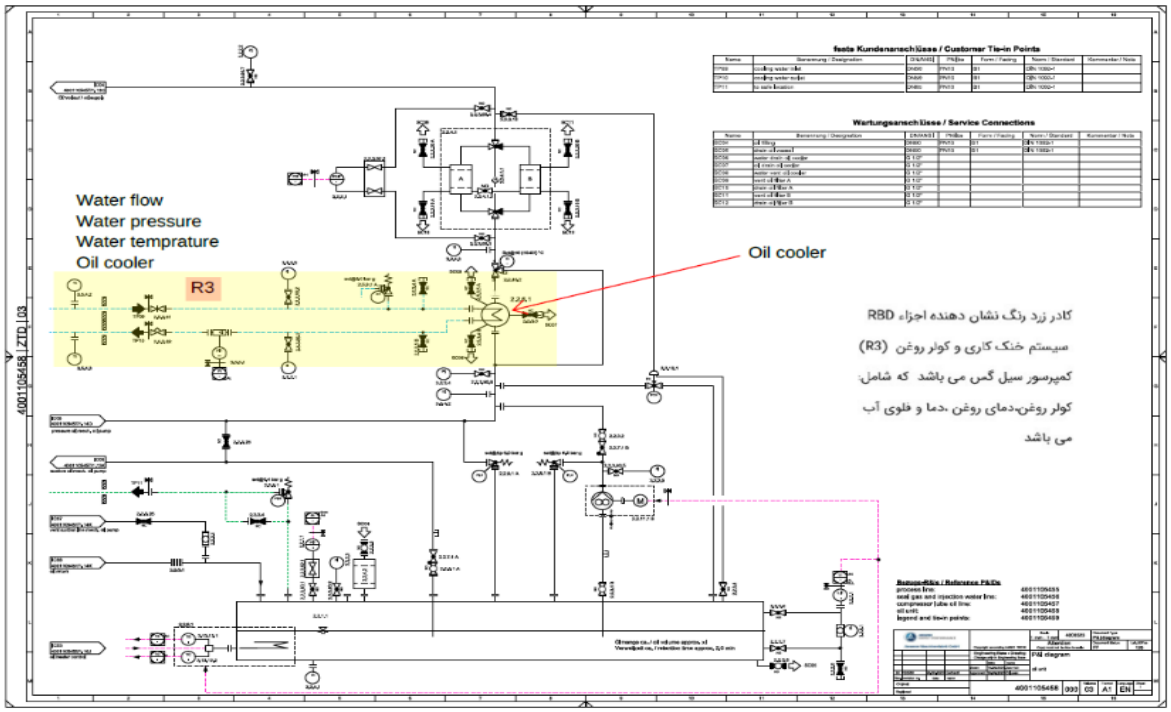
P & ID سیستم روانکاری کمپرسور و گیربکس شامل: فیلترهای روغن،کولر روغن،پمپ روغن و اِلمان های کنترلی و حفاظتی



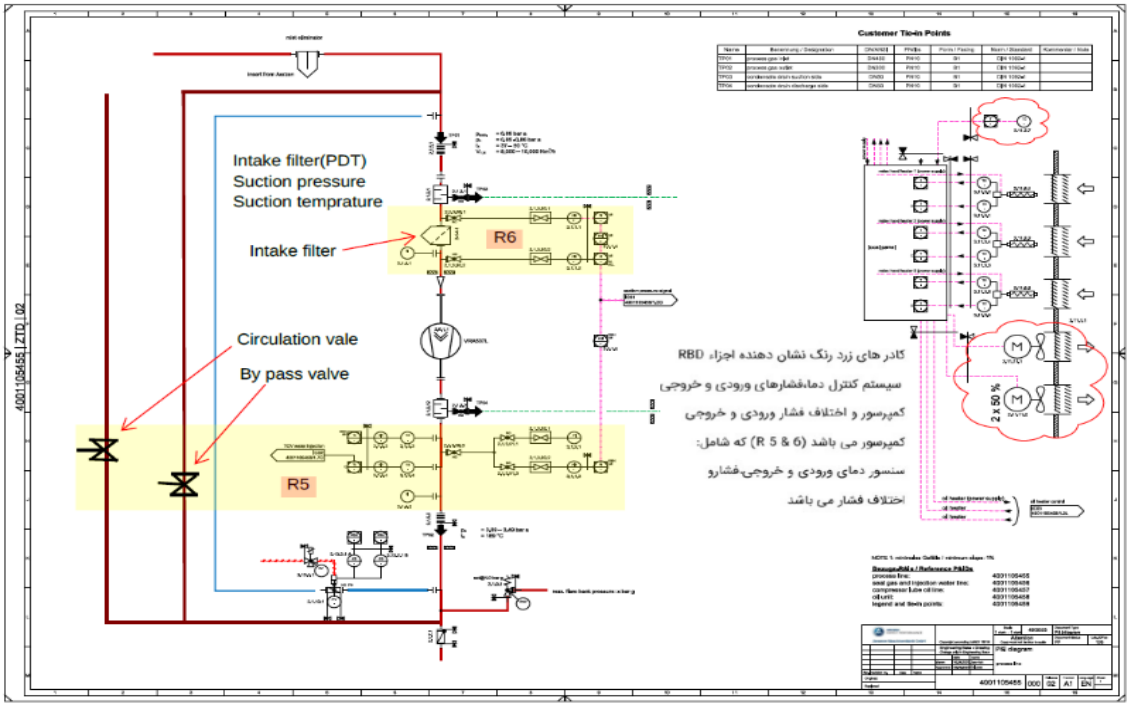
P & ID جهت معرفی اِلمان های حفاظتی و کنترلی دما و ارتعاش در الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور



P & ID المان های حفاظتی و کنترلی سیستم گس سیل مکانیکال سیل کمپرسور شامل: فیلتر و حس‌گرهای دما و فلوی گاز



معرفی المان های مؤثر در P & ID سیستم خنک کننده روغن



P& ID المان های حفاظتی و کنترلی فشار ورودی،فشار خروجی به همراه دماهای آن ها