





دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه برق - کنترل

جلوگیری از سرجهای کاذب کمپرسور با تشخیص خطای حسگرها

دانشجو: سیدمهدی علوی نیا

استاد راهنما:

دکتر محمدعلی صدرنیا

اساتید مشاور:

دکتر محمدجواد خسروجردی

دکتر محمدمهدی فاتح

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

خرداد ماه 1393



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره ۱۲

باسمه تعالی

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

شماره: ۱۱۷۴/ت.س.
تاریخ: ۹۳/۳/۳۱
ویرایش: —

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم محمد علی محمدی دانشجوی دکتری رشته فلسفه به شماره دانشجویی ۸۹۱۷۹۸۵ ورودی سال ۸۹ در تاریخ ۹۳/۳/۲۹ از رساله خود با عنوان:

جلوگیری از سرجهای کاذب کمپرسور با تشخیص خطای حسگرها

دفاع و با اخذ نمره ۱۶.۷۷۵ به درجه: خوب نائل گردید.

- | | |
|--|--|
| ☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ | ☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ |
| ☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ | ☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد |
| ☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد | |

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
	دکتر محمد علی صدرنیا	استاد/ اساتید راهنما	استاد	
	دکتر محمد علی فاتح	مشاور / مشاورین	استاد	
	دکتر محمد پرواز	مشاور / مشاورین	دانشیار	
	دکتر ناصر دین	استاد مدعو داخلی / خارجی	استاد	
	دکتر علی رضا الفی	استاد مدعو داخلی / خارجی	استاد	
	دکتر امیر کریمی	استاد مدعو داخلی / خارجی	استاد	
	دکتر حسن مکی زاده	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استاد	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

تاریخ و امضاء:

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

۹۳/۴/۴

تقديم به گوهر پنهان بقیع

تقديم به نوگل پرپر دشت نینوا

تشکر و قدردانی:

الحمد ا... رب العالمین، از اساتید بزرگوارم جناب آقایان دکتر محمدعلی صدرنیا، دکتر محمدجواد خسروجردی و پرفسور محمدمهدی فاتح که در پیشبرد این رساله دکتری نقش بسزایی داشتند تشکر می‌نمایم. همچنین جا دارد از حمایت و پشتگرمی همسر گرامیم سرکار خانم دکتر کرمانی نیز کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. جناب آقای دکتر خیری مدیر گروه ریاضی کاربردی دانشکده ریاضی دانشگاه تبریز، اینجانب را از نظر مباحث ریاضی، یاری نمودند و لذا از ایشان نیز قدردانی می‌نمایم. دوستان عزیزم جناب آقایان امیر حسن‌نیا دانشجوی دکتری دانشگاه شاهرود و مهندس علی شلال‌بندان از شرکت ملی گاز ایران در طول دوره تحصیل از هیچ کمکی برای من دریغ نفرمودند. جناب آقایان مهندس محمد عزیزیان، مهندس ستار شربیانی و مهندس یعقوب نهاوند همواره در طول اجرای رساله دکتری از دیدگاه صنعتی کمک شایانی به اینجانب نمودند. لذا لازم است که از این دوستان نیز تشکر ویژه‌ای داشته باشم.

سید مهدی علوی‌نیا

تعهد نامه

اینجانب **سید مهدی علوی نیا** دانشجوی دوره دکتری رشته **برق - کنترل** دانشکده **مهندسی برق** و **رباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **جلوگیری از سرجهای کاذب کمپرسور با تشخیص خطای حسگرها** تحت راهنمایی **دکتر محمدعلی صدرنیا** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

سیدمهدی علوی نیا

خرداد ماه 1393

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

هدف از این رساله ارایه راهکاری جدید جهت جلوگیری از سرجهای کاذب در کمپرسورهای گاز شبکه انتقال گاز طبیعی می‌باشد. این راهکار نوین براساس روشهای تشخیص عیب مبتنی بر داده و مدل می‌باشد و سیستم طراحی شده با استفاده از ایده حسگرهای مجازی به جبران عیب حسگرها می‌پردازد که ایده مذکور در دسته سیستم‌های کنترل تحمل پذیر عیب فعال طبقه بندی می‌شود.

در این راستا برای ارایه روشهای تشخیص عیب مبتنی بر داده از شبکه های عصبی معمولی، شبکه های عصبی دینامیکی مقاوم مبتنی بر مد لغزشی و رگرسیون بردارهای پشتیبان استفاده گردیده است. و در روش تشخیص عیب مبتنی بر مدل، از رهیافت جبری استفاده می‌شود. این رهیافت مبتنی بر مفاهیم هندسه محاسباتی و ابزارهای ریاضی محض مانند پایه‌های گروبنر، تئوریهای بوخبرگر و حذف می‌باشد. در نهایت با شبیه سازی های نرم افزاری نشان داده می‌شود که چگونه روشهای تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر عیب مذکور می‌تواند کارایی لازم و موثر در راستای جلوگیری از وقوع سرجهای کاذب در کمپرسور گاز ایفا نمایند. لازم به توضیح است که مدل استفاده شده برای طراحی سیستم های تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر عیب در کمپرسور گاز، مدل غیر خطی مور-گریتز است.

کلمات کلیدی: کمپرسور گاز، پدیده سرج، سیستم تشخیص عیب، سیستم کنترل تحمل‌پذیر

عیب

مقالات مستخرج از پایان نامه:

1- S. M. Alavinia, M. A. Sadrnia, M. J. Khosrowjerdi, M. M. Fateh, "*Stable and Efficient Operation of Gas Compressor with Improving of Surge Detection System*", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, Vol 136, Issue 10, Oct 2014, DOI:10.1115/1.4027371, ISI, [Impact Factor: 0.82](#).

2- سید مهدی علوی نیا، محمدعلی صدرنیا، محمدجواد خسروجردی، محمد مهدی فاتح، "طراحی سیستم کنترل تحمل پذیر عیب مبتنی بر حسگر مجازی جهت تعیین دقیق نقطه سرج در کمپرسور های صنعتی"، مجله مکانیک سازه ها و شاره ها، دانشگاه صنعتی شاهرود، دوره 2، سال 93، ISC

3- S. M. Alavinia, M. A. Sadrnia, M. J. Khosrowjerdi, M. M. Fateh, "*Robust Fault Detection to Determine Compressor Surge Point Via Dynamic Neural Network-Based Subspace Identification Technique*", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, August 2014, Vol. 136 , Issue, 8, Feb 2014, DOI: 10.1115/1.4026610, [ISI](#), [Impact Factor: 0.82](#).

4- S. M. Alavinia, M. A. Sadrnia, M. J. Khosrowjerdi, M. M. Fateh, "*Surge Detection in Gas Compressor via Fault Diagnosis*", Intelligent Control and Automation, Accpted, 2014, [Web of Science \(WOS\)](#), [Impact Factor: 0.2](#).

5- S. M. Alavinia, M. J. Khosrowjerdi, M. A. Sadrnia, H, Kheiri, M. M. Fateh, "*An Algebraic Approach to Fault Detection for Surge Avoidance in Turbo Compressor*", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, Accpted, 2014, [ISI](#), [Impact Factor: 0.82](#).

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	1
مقدمه:	3
1-1 اهداف و انگیزه‌ها	3
2-1 مروری بر مفاهیم و تشخیص عیب	7
4-1 مروری بر تحقیقات قبلی	11
5-1 کارها و نوآوریهای ساله	14
6-1 مطالب مطرح در فصول بعدی رساله	17
فصل دوم: آشنایی با شبکه انتقال گاز طبیعی و کمپرسور	21
مقدمه	23
1-2 شبکه انتقال گاز طبیعی	23
2-2 مقدمه‌ای بر کمپرسورها	30
3-2 مدل‌سازی کمپرسورها	32
4-2 پدیده سرج و روش‌های کنترل آن در کمپرسور سانتریفیوژ	38
1-4-2 معرفی پدیده سرج در کمپرسور سانتریفیوژ	38
2-4-2 سیکل سرج	40
3-4-2 عوامل سرج	41
4-4-2 نتایج سرج	41
5-4-2 مشخصه‌های سرج	42
6-4-2 سیستم کنترل سرج در کمپرسور	42

44	5-2 نتیجه‌گیری
45	فصل سوم: مروری بر مفاهیم اولیه و سیستم تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور
47	مقدمه
47	3-1 مفاهیم اساسی
47	3-1-1 عیب و ویژگی‌های آن
50	3-1-2 خرابی یا شکست
51	3-1-3 عملکرد بد
56	3-2 سیستم‌های تشخیص عیب و تشخیص خرابی در حسگرها
63	3-3 سیستم تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور
66	3-4 نتیجه‌گیری:
67	فصل چهارم: روشهای تشخیص عیب حسگرها مبتنی بر داده
69	مقدمه
69	4-1 سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی
72	4-1-1 نتایج شبیه‌سازی طراحی سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی
87	4-2 سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی دینامیکی
87	4-2-1 شبکه‌های عصبی دینامیکی مبتنی بر مد لغزشی
92	تعریف (4-1) شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم
92	قضیه (4-1) مولد ماند با شبکه‌های عصبی دینامیکی مبتنی بر مد لغزشی
95	4-2-2 روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا
97	4-2-3 واحد ارزیابی مانده
98	4-2-4 نتایج شبیه‌سازی طراحی سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی دینامیکی

107.....	3-4: سیستم تشخیص عیب با رگرسیون بردارهای پشتیبان
109.....	1-3-4 قضیه تشخیص عیب با SVR
116.....	2-3-4 نتایج شبیه‌سازی طراحی سیستم تشخیص عیب با رگرسیون بردارهای پشتیبان
120.....	4-4 نتیجه‌گیری:
121.....	فصل پنجم: رهیافت جبری مبتنی بر مدل برای سیستم تشخیص عیب
123.....	مقدمه
123.....	1-5 مفاهیم اساسی در هندسه محاسباتی
123.....	1-1-5 تک جمله‌ای و چند جمله‌ای:
123.....	2-1-5 تعریف ایده‌آل
124.....	3-1-5 چند جمله‌ای پیشرو
124.....	4-1-5 ترتیب تک جمله‌ای:
127.....	5-1-5 ایده‌آل تک جمله‌ای
128.....	6-1-5 پایه‌های گروبنر
128.....	7-1-5 تعریف چند جمله‌ای‌های S
128.....	8-1-5 تعریف کوچکترین مضرب مشترک
131.....	9-1-5 پایه‌های گروبنر مینیمال
133.....	2-5 ارایه یک رهیافت جبری جدید برای تشخیص عیب
135.....	3-5 کاربرد روش جبر محاسباتی جهت تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور
140.....	4-5 نتایج شبیه‌سازی
141.....	5-5 مقایسه رهیافت‌های مبتنی بر داده و مبتنی بر مدل
142.....	6-5 نتیجه‌گیری

145.....	فصل ششم: سیستم کنترل تحمل پذیر عیب حسگرهای کمپرسور
147.....	مقدمه
147.....	1-6 رهیافت های سیستم کنترل تحمل پذیر عیب
150.....	2-6 نتایج شبیه سازی
155.....	3-6 نتیجه گیری:
157.....	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
161.....	مراجع

اختصارات

PID:	Proportional, Integral, Differential
LNG:	Liquid Natural Gas
LPG:	Liquefied Petroleum Gas
RAM:	Reliability, Availability, Maintainability
DIN:	Deutsches Institut für Normung
IFAC:	The International Federation of Automatic Control
FD:	Fault Detection
FI:	Fault Isolation
FTC:	Fault Tolerant Control
AFTC:	Active Fault Tolerant Control
PFTC:	Passive Fault Tolerant Control
PCA:	Principle Component Analysis
PWA:	Piecewise Affine
DME:	Dimethyl Ether
GG:	Gas Generator
PT:	Power Turbine
SISO:	Single Input Single Output
IS:	Intrinsic Safety
FDII:	Fault Detection, Isolation and Identification
SIL:	Safety Integrated Level
A:	Additive Fault
AR:	Additive Ramp Fault
SVM:	Support Vector
SVR:	Support Vector Regression
LT:	Leading Term
LM:	Leading Monomial
LC:	Leading Coefficient
LCM:	Lowest Common Multiple

	فهرست اشکال	
6	منحنی مشخصه کمپرسور	شکل (1-1)
10	شماتیک روند تشخیص عیب به روش پشتیبان تحلیلی	شکل (2-1)
26	نمای شماتیک تاسیسات تقویت فشار گاز	شکل (1-2)
27	شکل شماتیک یک دستگاه توربو کمپرسور در تاسیسات تقویت فشار گاز	شکل (2-2)
32	طرح واره وادار کننده و پخشگر در کمپرسور سانتیفیوژ	شکل (3-2)
34	مدل مور گریترز کمپرسور	شکل (4-2)
39	منحنی عملکرد کمپرسور سانتریفیوژ	شکل (5-2)
40	سیکل سرج روی منحنی مشخصه کمپرسور	شکل (6-2)
43	سیستم کنترل سرج کمپرسور با استفاده از شیر پاد سرج	شکل (7-2)
49	(a) عیب ناگهانی (b) عیب نرم (c) عیب متناوب	شکل (1-3)
49	(a) عیب جمع شونده (b) عیب ضرب شونده	شکل (2-3)
51	گسترش عیب و یا عملکرد بد از یک عیب	شکل (3-3)
53	یک حسگر ساده وزن	شکل (4-3)
54	حسگر با عیب بایاس ثابت	شکل (5-3)
54	حسگر با عیب $m=0.8$	شکل (6-3)
55	حسگر با خرابی $m=0.0, a=0$	شکل (7-3)
55	حسگر با خرابی $m=0.0, a=2$	شکل (8-3)
56	حسگر با عیب $m=0.4, a=3$	شکل (9-3)
64	الگوریتم ساده روش تست محدوده	شکل (10-3)
73	سیستم کنترل حلقه بسته کمپرسور با کنترلر کلاسیک PI	شکل (1-4)
76	بلوک دیاگرام تولید مانده	شکل (2-4)
80	حالت بدون عیب حسگرهای جریان، فشار و سرعت	شکل (3-4)
82	حالت قطعی حسگرهای جریان، فشار و سرعت	شکل (4-4)
83	حالت Freez حسگر جریان (b)، بدون عیب فشار (c) و قطعی حسگر سرعت (d)	شکل (5-4)
85	حالت عیب جمعی و ضربی حسگرهای جریان، فشار و سرعت	شکل (6-4)
91	شبکه عصبی دینامیکی	شکل (7-4)
92	شمای تخمین حالت مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی	شکل (8-4)
99	بلوک دیاگرام کلی سیستم تشخیص عیب	شکل (9-4)
99	سازگاری خروجی سرعت واقعی و مدل خطی مستخرج از روش شناسایی	شکل (10-4)
100	خطای میانگین مربعی	شکل (11-4)
101	خروجی سرعت کمپرسور و شبکه عصبی دینامیکی	شکل (12-4)
101	خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی	شکل (13-4)
102	خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی و عیب تجمعی	شکل (14-4)
102	سیگنال مانده با عیب تجمعی	شکل (15-4)

103	سیگنال مانده و حدود آستانه	شکل (4-16)
104	سیگنال مانده، خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی با با قطع شدن حسگر	شکل (4-17)
105	سیگنال مانده، خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی با وجود عیب در حسگر	شکل (4-18)
106	نقش سیستم تشخیص عیب در تصحیح نقطه کار کمپرسور	شکل (4-19)
108	تفکیک کننده های مختلف	شکل (4-20)
109	داده های حسگرهای سالم و عیب دار	شکل (4-21)
110	تابع جریمه وپنیک	شکل (4-22)
116	منحنی نسبت فشار کمپرسور نسبت به جریان	شکل (4-23)
117	منحنی نسبت فشار کمپرسور نسبت به سرعت و جریان کمپرسور	شکل (4-24)
118	منحنی نسبت فشار کمپرسور به همراه منحنی هموار	شکل (4-25)
120	سیستم تشخیص عیب در تشخیص نقطه کار صحیح کمپرسور	شکل (4-26)
133	شماتیک تشخیص عیب با رهیافت مبتنی بر مدل	شکل (5-1)
141	مانده حالت بدون عیب	شکل (5-2)
141	عیب حسگر متغیر Φ در لحظه 26	شکل (5-3)
141	a- حالت بدون عیب b- رخداد عیب در حسگر متغیر سرعت در لحظه 163	شکل (5-4)
141	تاثیر سیستم تشخیص عیب در تعیین دقیق نقطه کار کمپرسور	شکل (5-5)
149	بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل پذیر عیب به روش AFTC تطبیقی	شکل (6-1)
150	بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل پذیر عیب به روش حسگرهای مجازی	شکل (6-2)
151	بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل پذیر عیب با تشخیص عیب مبتنی بر داده رانده	شکل (6-3)
152	سیگنال مانده، خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی با وجود عیب در حسگر	شکل (6-4)
152	خروجی سرعت سالم، عیب دار و جبران شده حسگر	شکل (6-5)
153	بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل پذیر عیب با تشخیص عیب مبتنی بر مدل	شکل (6-6)
154	سیگنال مانده، با رهیافت مبتنی بر مدل با وجود عیب در حسگر	شکل (6-7)
154	خروجی حسگر سرعت عیب دار و جبران شده حسگر	شکل (6-8)
155	تاثیر سیستم تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر عیب در تعیین دقیق نقطه کار کمپرسور	شکل (6-9)

فهرست جداول

36	پارمترهای مدل مور-گریتز	جدول (1-2)
52	مثالهایی از عیب، خرابی و عملکرد بد	جدول (1-3)
77	حالت‌های مختلف فرضی عیب	جدول (1-4)
79	نتایج شبیه‌سازی تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور	جدول (2-4)
117	عیب‌های اعمالی به متغیر فشار کمپرسور	جدول (3-4)
119	نتایج سیستم تشخیص عیب	جدول (4-4)

فصل اول:

مقدمه

مقدمه

بروز عیب¹ در هر سیستم مهندسی امری غیر قابل اجتناب است. رویداد عیب در حسگرهای جریان، سرعت، فشار ورودی و فشار خروجی کمپرسورهای گاز منجر به بروز سرج²های کاذب می‌شود که عدم تشخیص و کنترل به موقع آن می‌تواند صدمات زیادی به دستگاه وارد نماید. روش پشتیبان سخت‌افزاری و افزایش تعداد عناصر اندازه‌گیری سیستم با کیفیت و قابلیت اطمینان بالا، ابتدایی‌ترین روش، برای جلوگیری از سرج‌های کاذب کمپرسورهای گاز است. ولی این روش خود منجر به افزایش شدید هزینه‌ها و وزن کل سیستم می‌شود. لذا تحقیق درباره نحوه به کارگیری شیوه‌های مدرن تشخیص به موقع عیب و جبران آن موضوع اصلی رساله است. در این فصل علاوه بر بیان انگیزه و هدف از طرح رساله، مروری بر تاریخچه کارهای قبلی شده و رئوس مطالب فصول بعدی نیز بیان می‌شود.

1-1 اهداف و انگیزه‌ها

کمپرسورها³ در صنایع بالادستی و میان‌دستی نفت و گاز، در استخراج، پالایش و فرآوری و انتقال محصولات گازی دارای جایگاه ممتازی هستند. در حال حاضر، علیرغم ظهور تکنولوژی‌های جدید همچون "گاز طبیعی مایع"⁴ و "گاز مایع"⁵ و غیره در زمینه انتقال گاز، خطوط لوله و تاسیسات تقویت فشار گاز همچنان نقش کلیدی خود را در تامین گاز مصرفی جهان حفظ نموده‌اند. خط لوله انتقال گاز روسیه به کشورهای اروپایی به طول چندین هزار کیلومتر، نمونه بارزی از انتقال گاز به کمک خط لوله و دستگاه‌های توربوکمپرسوری است. در کشور ما نیز، نزدیک به 200 دستگاه

¹ Fault

² Surge

⁴ Liquid Natural Gas(LNG)

⁵ Liquefied Petroleum Gas(LPG)

³ در ادامه رساله کمپرسور گاز را به اختصار کمپرسور می‌نامیم

کمپرسور فقط در بخش انتقال گاز وجود دارد که همگی آنها وارداتی بوده و در فناوری سیستم‌های کنترل آنها نیز وابسته هستیم.

در حال حاضر چهار مسیر انتقال گاز از مبادی تولید در جنوب به سمت مراکز مصرف در شمال و مرکز کشور وجود دارد. در این مسیر طولانی بالغ بر 25000 کیلومتر خطوط انتقال پرفشار، در فواصل 120 تا 130 کیلومتری مراکزی به نام تاسیسات تقویت فشار گاز وجود دارند که وظیفه آنها افزایش فشار گاز، جهت تامین نیروی لازم برای انتقال حجم وسیعی از گاز در خطوط لوله فولادی است. در اغلب نقاط مسیر، قطر لوله‌ها 48 تا 56 اینچ (معادل 140 سانتی‌متر) می‌باشد و گاز با فشار و حجم بسیار بالایی در حد 1000 psi^1 ، از پالایشگاه‌های گاز پارس جنوبی و عسلویه تا مراکز مصرف منتقل می‌شود. در طول این مسیر، گاز مورد نیاز مصارف خانگی، تجاری، خدماتی، کارخانجات صنعتی، سوخت نیروگاه‌های برق و خوراک پالایشگاه‌ها تامین می‌گردد و مابقی از طریق پایانه‌های صادراتی به کشورهای همسایه همچون ترکیه صادر می‌شود.² حال با در نظر گرفتن این حجم وسیع از مصارف گاز، اگر جریان مداوم انتقال گاز و پایداری آن دچار مشکل شود کل مشترکان با قطعی گاز مواجه خواهند شد و علاوه بر ضررهای هنگفت اقتصادی، اگر این قطعی گاز در فصل سرما رخ دهد حتی می‌تواند منجر به صدمات جانی نیز بشود. لذا بالا بردن ضریب پایداری شبکه انتقال گاز و تامین پیوسته گاز برای مصرف مشترکان همواره از دغدغه‌های مسئولین ذیربط می‌باشد.

عملکرد درست و جلوگیری از توقف‌های احتمالی کمپرسورها، نه تنها موجب بهره‌برداری حداکثری از آنها می‌شود بلکه به دلیل داشتن نقش اساسی در زنجیره تولید و توزیع، باعث افزایش راندمان کل صنایع گاز، پالایشگاهی و پتروشیمی می‌گردد. بروز عیب در کمپرسورها نیز مانند هر دستگاه دیگر امری طبیعی است. در برخی از مواقع، عیب در کمپرسور موجب توقف اضطراری³

¹ توجه کنید فشار هوا در تایر خودرو در حدود 30 psi است.

² اخیراً از مرز نوردوز به کشور ارمنستان صادرات داریم و با کشور آذربایجان و جمهوری نخجوان نیز در راستای طرح سواب گاز مبادله می‌شود.

³ Emergency Shutdown

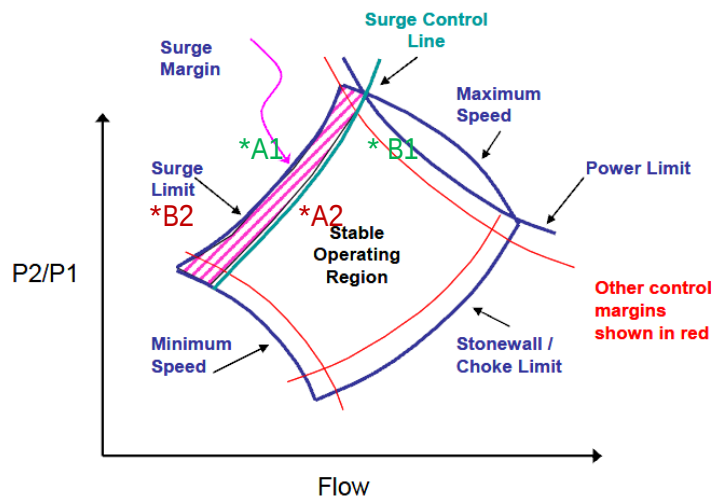
دستگاه می‌گردد. در نتیجه فرایند انتقال گاز دچار مشکل می‌شود و علاوه بر ایجاد مشکلات و گرفتاری‌های مذکور از بابت توقف انتقال پیوسته گاز، به خود کمپرسور نیز صدمات جدی وارد می‌گردد. محاسبات فنی و اقتصادی نشان می‌دهد که وقوع عیب و به دنبال آن توقف اضطراری دستگاه، در هر بار چندین هزار دلار از بابت استهلاک و کاهش عمر دستگاه، خسارت تحمیل می‌کند. البته هزینه تعمیرات و رفع عیب را نیز بایستی به این مبلغ اضافه کرد.

در حال حاضر و در عمل از روش "تست محدوده"¹ برای سیستم تشخیص عیب در کمپرسور استفاده می‌شود که ابتدایی‌ترین روش تشخیص عیب است و نتایج عملی حاصل از این روش، بیانگر کارایی بسیار ضعیف آن است. انگیزه اصلی از طرح موضوع طراحی سیستم تشخیص عیب و سیستم جبران عیب در حسگرهای کمپرسورها در این رساله، اهمیت کمپرسورها در صنایع است. بدیهی است طراحی چنین سیستم‌های بدون بهره‌گیری از روشهای نوین طراحی سیستم تشخیص و شناسایی عیب امکان‌پذیر نیست.

یکی از مشکلات اساسی و شایع در رابطه با کمپرسورها، پدیده سرج² است. اگر جریان عبوری از کمپرسور از یک مقدار معینی کمتر باشد منجر به پس‌زنی سیال و معکوس شدن جهت حرکت آن می‌شود که به آن سرج می‌گویند و نتیجه آن آسیب دیدن پره‌های کمپرسور است. برای هر کمپرسور یک منحنی مشخصه توسط سازنده با توجه به داده‌های تجربی و آزمایشگاهی همانند شکل (1-1) تعریف می‌گردد که اگر نقطه کاری در این منحنی بر اساس عوامل ناخواسته به سمت چپ آن حرکت کند و از خط سرج عبور کند باعث وقوع پدیده سرج می‌شود. از طرف دیگر خط سرج بیانگر بیشینه راندمان در کمپرسورها است که به تفصیل در فصل‌های بعدی راجع به آن بحث می‌شود.

¹ Limited Checking

² Surge Phenomenon



شکل (1-1) منحنی مشخصه کمپرسور [1]

برای آنکه بتوان در هر لحظه از درستی نقطه کار کمپرسور اطمینان حاصل کرد بایستی مقادیر خروجی حسگرهای فشار ورودی (P_1)، فشارخروجی (P_2)، جریان سیال (Flow) و سرعت کمپرسور (Speed) بدون عیب باشند. در غیر اینصورت به دلیل عیبهای اندازه‌گیری در حسگرهای مذکور، نقطه کار کمپرسور به صورت اشتباه نشان داده می‌شود. سرج کاذب در دو سناریوی مختلف به دلیل وجود عیب در حسگرهای مذکور به شرح زیر می‌تواند رخ دهد:

1- فرض کنید که نقطه کار واقعی کمپرسور نقطه A_1 است و این نقطه در ناحیه سرج واقع است. ولی به دلیل وجود عیب در حسگر مذکور¹، نقطه کاری در ناحیه مجاز با نقطه‌ای همچون B_1 نشان داده می‌شود و بهره‌بردار² برای حصول راندمان حداکثری نقطه کار را به سمت چپ هدایت می‌کند. زیرا در نزدیکی خط کنترل سرج³ (SCL) نسبت فشار خروجی به فشار ورودی بیشینه می‌شود و لذا با این عمل، کمپرسور در ظاهر در بهترین شرایط کاری و با راندمان بیشینه کار می‌کند اما در واقعیت اتفاق بسیار خطرناکی رخ داده است. زیرا نقطه

¹ منظور از عیب در حسگرهای مذکور همان حسگرهای مربوط به فشار ورودی، فشار خروجی، سرعت و جریان سیال کمپرسور است و عیب می‌تواند در یک، دو، سه و یا هر چهار حسگر به صورت همزمان رخ دهد

² منظور از بهره‌بردار همان کاربران کمپرسورهای گاز است که این افراد در تاسیسات تقویت فشار گاز به صورت عملی دستگاهها را در جهت تقویت فشار گاز طبیعی مورد استفاده قرار می‌دهند.

³ Surge Control Line

کار واقعی کمپرسور یعنی نقطه A1، که از اول در ناحیه غیر مجاز است هر چه بیشتر در ناحیه مذکور پیشروی می‌کند و آسیب‌های جدی به کمپرسور وارد می‌شود.

2- بر خلاف سناریوی اول فرض کنید که نقطه کار واقعی کمپرسور، نقطه‌ای مانند A2 است و کمپرسور در عمل در ناحیه مجاز کار می‌کند اما به دلیل وجود عیب در حسگرهای مذکور، نقطه B2 به عنوان نقطه کار نشان داده می‌شود، سیستم کنترل سرج کمپرسور برای خارج کردن کمپرسور از ناحیه غیر مجاز سرج وارد عمل می‌شود و نقطه کار را به سمت راست منحی هدایت می‌کند تا کمپرسور از ناحیه غیر مجاز خارج شود. اما در واقع، کمپرسور از سرج خارج نمی‌شود بلکه با هدایت نقطه B2 به سمت راست، در واقع کمپرسور از بازده بیشینه هر چه بیشتر فاصله می‌گیرد. لذا با توجه به سناریوهای اشاره شده وجود هر نوع عیب و خرابی در حسگرهای مذکور باعث می‌شود که امکان رصد نقطه کار واقعی کمپرسور برای سیستم کنترل ممکن نباشد و کمپرسور به صورت نامطلوب مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

2-1- مروری بر مفاهیم مفاهیم تشخیص عیب

در طول سه دهه اخیر کارهای زیادی در زمینه تشخیص و شناسایی عیب صورت گرفته است [2-5]. در این بخش عیب و عبارات مربوط به آن تعریف می‌شود و مروری تاریخی بر گسترش سیستم‌های تشخیص و شناسایی عیب و سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر عیب ارائه می‌گردد.

به دلیل آنکه عبارات "عیب"، "خرابی" یا شکست¹، "ایمنی"² در زمینه‌های مختلفی علمی کاربرد دارند، لذا تعاریف به کار رفته در مورد آنها منحصر به فرد نمی‌باشند. اما تلاش‌های زیادی در راستای استانداردسازی و یکسان‌سازی این عبارات صورت گرفته است برای مثال در فرهنگ لغت RAM³ و در استانداردهای صنعتی⁴ DIN، تعاریف متفاوتی از این عبارات صورت گرفته است. کمیته

¹ Failure

² Safety

³ Reliability, Availability, Maintainability

⁴ Deutsches Institut für Normung

فنی¹ IFAC جهت یکسان سازی تعاریف و مفاهیم تلاش زیادی کرده که تقریباً در مجامع علمی مورد پذیرش همگانی قرار گرفته است و در زیر به برخی از این تعاریف اشاره می شود [4].

عیب²: عبارت است از یک انحراف ناخواسته در حداقل یکی از ویژگی های سیستم از شرایط عادی، معمول و استاندارد

خرابی³: عبارت است از انقطاع دائمی در توانایی سیستم برای انجام یک عمل مورد انتظار در شرایط کاری مشخص

عیب یابی⁴: معلوم کردن اینکه آیا عیب در سیستم رخ داده است یا نه؟

ایزوله کردن عیب⁵: مشخص کردن محل وقوع عیب

شناسایی عیب⁶: مشخص کردن نوع، اندازه و رفتار دینامیکی عیب

سیستم کنترل تحمل پذیر عیب⁷ (FTC): سیستم کنترلی که بتواند ویژگی های اساسی همچون پایداری را با وجود عیب حفظ نماید. البته شاخص های عملکردی سیستم ممکن است تقلیل یابد.

تعریف (1-1): در این رساله سه مورد عیب یابی، ایزوله کردن عیب و شناسایی عیب را با هم به صورت اختصار "تشخیص عیب" (FDI) می نامیم.

سیستم کنترل تحمل پذیر عیب اساساً به دو رهیافت فعال⁸ (AFTC) و غیرفعال⁹ (PFTC) تقسیم می شود [6-8]. در رهیافت غیرفعال، سیستم برای عیبهای از پیش معلوم به صورت مقاوم طراحی می شود و لذا به سیستم تشخیص عیب اساساً نیازی نیست. ولی ایراد عمده این روش تحمل پذیر

¹ The International Federation of Automatic Control

² Fault

³ Failure

⁴ Fault Detection

⁵ Fault Isolation

⁶ Fault Identification

⁷ Fault Tolerant Control

⁸ Active Fault Tolerant Control

⁹ Passive Fault Tolerant Control

بودن سیستم کنترل به برخی از عیبهای معلوم از پیش فرض شده است و برای سایر عیبهای احتمالی که ممکن است در سیستم رخ بدهد کارایی لازم را ندارد. اما در رهیافت فعال سیستم تشخیص عیب می تواند محل وقوع، نوع، اندازه و رفتار دینامیکی عیب را شناسایی کند و نتایج را به سیستم کنترل تحمل پذیر عیب فعال می دهد و عیب با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط سیستم تشخیص عیب جبران می شود. این رهیافت برای تمامی انواع عیبها کارساز می باشد اما مستلزم وجود سیستم تشخیص عیب دقیق و موثر است. در این رساله برای جلوگیری از سرچ کمپرسور از سیستم کنترل تحمل پذیر عیب فعال استفاده می شود در فصل ششم اطلاعات بیشتری در مورد انواع سیستم های کنترل تحمل پذیر عیب ارائه می گردد.

عیب می تواند در حسگرها، محرکها و اجزای سیستم اتفاق بیفتد. برای مثال در یک فرایند شیمیایی، عیب حسگرهای اندازه گیری¹ pH، عیب سیستم تجزیه و تحلیل² می تواند نمونه ای از عیب حسگرها باشد، عیب محرکها³ می تواند در پمپهای تغذیه کننده و یا شیرهای مسیر رخ دهد. تغییر حجم مخزن و نشتی لوله های رابط می تواند نمونه ای از عیب اجزای⁴ سیستم باشد. هر کدام از عیبها علاوه بر اینکه می تواند منجر به آسیب دیدن هر جزء از سیستم به طور جداگانه شود باعث تحت تاثیر قرار دادن و حتی مختل کردن کل فرایند نیز می شود [9].

در روش ابتدایی، بهره بردار بر اساس دانش تجربی خود و از روی رفتار و عملکرد سیستم می تواند وقوع عیب در سیستم را تشخیص داده و اقدامات لازم را جهت باز گرداندن سیستم به شرایط عادی انجام دهد. در این روش سرعت و درستی تشخیص کاملاً به تجربه و هوشیاری فرد بستگی دارد و لذا روش چندان قابل اطمینانی نیست. شایان ذکر است که برای تشخیص عیب در حسگرها با این روش از ایده کالیبراسیون دوره ای نیز استفاده می شود. بدین ترتیب که حسگرها را با دوره زمانی

¹ Sensor Fault

² Analysis System

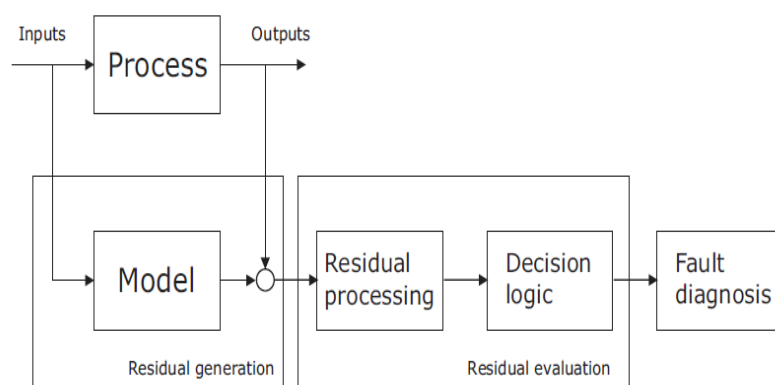
³ Actuator Fault

⁴ Component Fault

مشخص مدرج می‌کنند و هر چه قدر این بازه زمانی کوچکتر باشد قطعا ضریب اطمینان از سلامت حسگرها بیشتر خواهد شد اما کالیبراسیون دوره‌ای با بازه زمانی کوچکتر مستلزم صرف هزینه زیاد است و همچنین برای عیب‌های کند کارایی لازم را ندارد [10]. سیستم تشخیص عیب جدید پیشنهادی در این رساله به دانش بهره‌بردار متکی نیست و دارای قابلیت اطمینان بالایی است.

ایده اصلی در بحث جدید تشخیص عیب در واقع عبارت است از مقایسه عملکرد سیستم واقعی با عملکرد سیستم عادی و بدون عیب. عملکرد و رفتار سیستم عادی توسط عنصری به نام پشتیبان تولید می‌شود و برای ایجاد عنصر پشتیبان سه روش معمول وجود دارد که عبارتند از: پشتیبان سخت‌افزاری، پشتیبان مبتنی بر پردازش داده و پشتیبان تحلیلی [9, 11].

در روش پشتیبان تحلیلی، در هر لحظه خروجی سیستم واقعی و خروجی مدل همانند شکل (2-1) با هم مقایسه می‌گردد و سیگنال مانده¹ تولید می‌شود و سپس در بلوک بعدی به نام بلوک " منطق تصمیم‌گیری"² با توجه به سیگنال مانده، عیب شناسایی می‌شود. بلوک‌های تولید مانده و منطق تصمیم‌گیری را در مجموع بلوک "ارزیابی مانده"³ می‌نامند. در فصل سوم رساله، بحث مفصلی در مورد انواع روش‌های تشخیص عیب ارائه می‌گردد.



شکل (2-1) شماتیک روند تشخیص عیب به روش پشتیبان تحلیلی [4].

¹ Residual Signal

² Decision Logic

³ Residual Evaluation

انتخاب روش مناسب به پارامترهای مختلفی همچون ساختار سیستم، درجه اهمیت سیستم، سرعت پردازش، تاخیر زمانی پردازش و میزان شناخت ما از سیستم بستگی دارد. برخی از مواقع لازم است از اطلاعات به دست آمده از سیستم تشخیص عیب در قالب و آرایش و شکل خاصی به خود سیستم پس‌خورانده شود و یا در سایر فرایندهای کنترلی همچون طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب به کار رود که این شاخص نیز در انتخاب روش بسیار موثر است. و لذا در حالت کلی نمی‌توان حکم واحدی در مورد برتری و یا ضعف یک روش نسبت به دو روش دیگر صادر کرد. در کمپرسورها استفاده از روش پشتیبان سخت‌افزاری به دلیل تعدد قطعات مقرون به صرفه نیست. روش پشتیبان مبتنی بر پردازش داده در حال حاضر در کمپرسورها به کار می‌رود و ابزار "تست محدوده" در واقع در این دسته طبقه‌بندی می‌شود اما نتایج عملی حاصل از پیاده‌سازی این روش در تاسیسات تقویت فشار گاز حاکی از ضعف عملکرد این روش است. چون در این رساله از روش سوم یعنی پشتیبان تحلیلی استفاده می‌شود این روش در فصل‌های بعدی به صورت مفصل بررسی می‌شود.

3-1- مروری بر تحقیقات قبلی

در خصوص کاربرد سیستم تشخیص عیب و کنترل تحمل‌پذیر عیب در کمپرسورهای گاز و توربین‌های گازی برای جلوگیری از سرچ‌های کاذب در مقالات و مراجع، تحقیقی گزارش نشده است ولی به صورت جداگانه سیستم تشخیص عیب و کنترل تحمل‌پذیر عیب برای تشخیص و جبران عیب محرک‌ها و اجزای کمپرسور بکار گرفته شده است. همچنین فقط در خصوص جلوگیری از سرچ کمپرسورها نیز مطالعاتی صورت گرفته است که در ادامه به اهم آنها اشاره می‌گردد. در [21] مدل توربین گازی در محیط نرم‌افزاری modelica با معادلات مبتنی بر شی‌گرایی¹ توسعه می‌یابد که با استفاده از بسته GTLib در محیط نرم‌افزاری modelica مدل کمپرسور ساخته می‌شود. مدل تولید شده برای محاسبه عملکرد به کار می‌روند و پایه‌ای برای

¹ Equation-based object-oriented modeling

تست‌های تشخیص عیب می‌باشد. تست‌های مذکور برای تشخیص عیب کمپرسور و عیبهای ناگهانی حسگرها به کار می‌رود. هنگامی که اجزای کمپرسور دچار خرابی می‌شوند یک عدم تطابق بین عملکرد مدل نامی و اندازه‌گیری‌های واقعی رخ می‌دهد، به همین دلیل یک تعداد پارامترهای محاسباتی به مدل کمپرسور اضافه می‌گردد. این پارامترهای محاسباتی برای تشخیص عیبهای کند اجزای کمپرسور به کار می‌روند و با فیلتر کالمن بهره ثابت توسعه یافته، محاسبه می‌شوند. نوع تخمینگر حالت با استفاده از روش‌های ساختاری قبل از کاهش مدل انتخاب می‌شود. یک عیب پله‌ای در حد 1٪ مقدار نامی حسگر دمای خروجی کمپرسور معرفی می‌شود و عیب حسگر با استفاده از الگوریتم ویژه شناسایی می‌شود. در [22]، موضوع تشخیص خرابی محلی در یاتاقانها¹های چرخشی در حضور نویزهای غیر گوسی² مطرح می‌شود. در عمل موضوع تشخیص خرابی به مساله فیلترینگ، تجزیه‌سازی و استخراج برمی‌گردد. در بسیاری از کارهای عملی صنعتی منابع ناخواسته نویز گوسی وجود دارد بنابراین تکنیک‌های جداسازی نویز نمی‌تواند مستقیماً اعمال شود. در این مقاله بر روی یک مثال عملی با تکنیک ثابت چرخه³ نتایج خوبی حاصل می‌شود. روش‌های کلاسیک موجود همچون تحلیل طیفی، تجزیه حوزه فرکانس-زمان به دلیل نسبت بالای توان نویز قابل پیاده‌سازی نیست در این تحقیق ابتدا نقشه چگالی، ارتباط وابستگی طیفی تخمین زده می‌شود. قدم بعدی تحلیل محتویات نقشه و انتخاب بخش مفید نقشه است. در [23] مساله عیب شیر و نشستی در حلقه های پیستون به دلیل فرسودگی در کمپرسورهای رفت و برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تولید پالس‌های فشار در داخل لوله‌های کمپرسور، ابزار مناسبی برای شناسایی عیب است. در این مرجع، از روش مدل‌سازی عیب، تمامی انواع عیب در فرایند ترمودینامیکی کامل مدل کمپرسور استفاده می‌شود و تغییر در ماهیت پالس‌های فشار می‌تواند برای مانیتورینگ کمپرسور مورد استفاده قرار گیرد. در [24] سیستم تشخیص عیب حسگرها برای اطمینان از عملکرد صحیح توربین‌های گازی و

¹ Bearing

² Gaussian

³ Cyclo-stationary

کمپرسور گازی به کار می‌رود. در این تحقیق از ایده نوین آنالیز موجک¹ برای تشخیص عیب حسگرها استفاده می‌شود. در تئوری موجک از این ایده برای تجزیه سیگنال‌ها در مقیاس‌های مختلف استفاده می‌شود. آنالیز موجک لحظه‌ای و آنالیز منفرد موجک لحظه‌ای بر اساس تئوری آنالیز موجک تعریف می‌شود. متعاقباً روش دیگری مبتنی بر نتایج شبیه‌سازی عددی برای حسگرهای توربین گازی معرفی می‌شود. سپس نتایج بر روی توربین گازی در اندازه کوچک با در نظر گرفتن چهار نوع حسگر با دامنه‌های متفاوت پیاده‌سازی می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی مطلوب روش پیشنهادی است. در [25] مسئله شناسایی عیب در موتورهای جت و توربوجت‌ها با وجود نویز در حسگرهای اندازه‌گیری با روش داده رانده مطرح شده است. در این مقاله از فیلترینگ دینامیکی سمبلیک با بهینه‌سازی سری‌های زمانی استفاده می‌شود. همچنین از ایده استخراج ویژگی و کلاس‌بندی الگو استفاده می‌شود. روش پیشنهاد شده به صورت آزمایشگاهی بر روی یک موتور جت پیاده‌سازی شده است. در [26] موضوع کنترل سرج کمپرسور بررسی شده است. روش کنترل فعال سرج در واقع با افزودن عناصر سخت‌افزاری به کمپرسور حاصل می‌شود. در این تحقیق از مدل مور-گریتز² برای کنترل فعال سرج استفاده می‌شود. همچنین فرض می‌شود که تمامی متغیرهای حالت کمپرسور در دسترس بوده و قابل اندازه‌گیری است. متغیر سرعت کمپرسور به عنوان متغیر کنترلی در نظر گرفته می‌شود و بحث پایداری کمپرسور نیز با در نظر گرفتن این فرضیات انجام می‌شود در سناریو دیگر گشتاور کمپرسور به عنوان متغیر کنترلی در نظر گرفته می‌شود و روش کنترل فعال سرج اعمال می‌شود مقایسه این دو روش حاکی از آن است که انتخاب گشتاور کمپرسور به عنوان متغیر کنترلی عملکرد بهتری دارد. هر دو روش پیشنهادی به صورت عملی بر روی یک کمپرسور به صورت آزمایشگاهی پیاده‌سازی می‌شود. در [27] از ایده شناسایی سیستم‌های غیرخطی با پارامترسازی دینامیک آن به عنوان مدل‌های مختلف پارامتر خطی³ استفاده می‌شود، از مدل مور-

¹ Wavelet of Entropy

² Moore-Grietz

³ Linear Parameter Varying (LPV)

گريتر برای مطالعه و بررسی پديده سرج و خفگی کمپرسور استفاده می‌شود. مساله کنترل کمپرسور به تنظیم خروجی سیستم تحت شرایط مختلف برمی‌گردد. در این مقاله فرض می‌شود که تمامی ورودی‌ها، خروجی‌ها و پارامترهای مذکور قابل اندازه‌گیری هستند. نکته مهم این است که تکنیک‌های تطبیقی برای شناسایی ضرایب مدل LPV این امکان را فراهم می‌آورند که به تغییرات جزئی در نقاط کاری نیازی نباشد. در [28] از تکنیک کنترل‌کننده‌ای نوع لاگرانژ-اولر معکوس^۱ و آفاین تکه‌ای^۲ برای کنترل سرج و خفگی کمپرسور استفاده می‌شود پديده سرج و خفگی^۳ در واقع همان تنش‌های شار و فشار می‌باشد. پایداری لیاپانوف سیستم‌های لاگرانژ-اولر معکوس با در نظر گرفتن عبارات غیرخطی اضافی بسط داده می‌شود. نکته مهم در این روش پیدا کردن تابع لیاپانوف است. یک تکنیک کنترلی ترکیبی مبتنی بر لیاپانوف برای سیستم‌های مرتبه دوم در این مرجع معرفی می‌شود. روش پیشنهادی یک راه حل مقاوم را برای جلوگیری از پديده سرج کمپرسور در مقایسه با روش‌های خطی‌سازی فیدبک و پس انتشار^۴ معرفی می‌نماید موضوع دیگر مطرح شده در این تحقیق، معرفی الگوریتم تقریب آفاین تکه‌ای برای کاهش پیچیدگی سیستم‌های پیوسته غیرخطی با N متغیر است. با داشتن مدل آفاین تکه‌ای از معادلات سرج و خفگی کمپرسور، مساله جلوگیری از سرج کمپرسور با استفاده از تکنیک‌های ترکیبی آفاین تکه‌ای قابل حل است.

1-4 کارها و نوآوریهای رساله

در این بخش نوآوریهای صورت گرفته در رساله به صورت فهرست وار ذکر می‌شود و در خصوص هر کدام توضیحات مختصری ارائه می‌گردد.

1- *ارایه یک رویکرد جدید جهت جلوگیری از سرج های کاذب در کمپرسورهای گاز مبتنی بر*

روشهای نوین تشخیص عیب و جبران آن در حسگرها

¹ Pseudo Euler- Lagrange

² Piecewise Affine (PWA)

³ Stone Wall

⁴ Backstepping

در تاسیسات تقویت فشار گاز یکی از مهمترین مشکلات اساسی در استفاده از کمپرسورها رخداد سرجهای کاذب به دلیل بروز عیب در حسگرهای اندازه گیری است بهترین سند برای اثبات این ادعا مراجعه به تاسیسات مذکور و بررسی اسناد و تاریخچه بهره برداری از دستگاهها است. که نگارنده این بررسی ها را کامل انجام داده و اهمیت وجود سیستم تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر عیب مدرن در تاسیسات مذکور مسجل گردیده است. و تا بحال کار پژوهشی و یا عملی در خصوص استفاده از فناوری های نوین در زمینه تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر عیب برای جلوگیری از سرجهای کاذب صورت نگرفته است.

2- *ارایه یک الگوریتم کاملاً جدید جهت ارزیابی سیگنالهای مانده برای تشخیص انواع مختلف عیب و خرابی در حسگرهای کمپرسور.*

مطالعات صورت گرفته در این رساله نشان می دهد که در همه کارها و تحقیقات انجام شده قبلی روشی جامع برای جداسازی عیب از خرابی و شناسایی تمامی مشخصات آنها به صورت کامل صورت نگرفته است. در این رساله علاوه بر امکان تشخیص عیب از خرابی با طبقه بندی کردن انواع عیب و خرابی در پنج دسته متفاوت، امکان شناسایی زمان وقوع، مدت رخداد، اندازه و دینامیک آنها فراهم شده است. حتی در صورت رخداد دو عیب و یا خرابی پشت سر هم امکان تشخیص کامل هر کدام نیز فراهم شده است. لازم به توضیح است که برای فراهم آوردن این امکان، بیش از 1000 خط در محیط نرم افزاری¹ کدنویسی شده است.

3- *مطالعه و مقایسه کامل روشهای مرسوم تولید مانده² در رهیافت داده رانده³ برای تشخیص عیب حسگرها و ارایه دو قضیه جدید در خصوص تشخیص عیب با استفاده از تئوری شبکه های عصبی دینامیکی و تئوری بردارهای پشتیبان.*

¹Matlab

² Residual Generation

³ Data Driven

در این رساله در مرحله اول از شبکه‌های عصبی معمولی برای تولید مانده استفاده می‌گردد و مزایا و معایب آن بررسی می‌شود، برای برطرف کردن عیوب آن در مرحله دوم با طرح قضیه نو، از شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم مبتنی بر مد لغزشی برای تولید مانده استفاده می‌شود که در برابر عدم قطعیت‌ها کارایی بهتری از خود نشان می‌دهند نکته مهم دیگر آن است که همه انواع شبکه‌های عصبی از کمینه کردن ریسک تجربی برای طبقه بندی و آموزش استفاده می‌کنند و این نوع آموزش دارای خطای طبقه بندی است لذا برای جبران آن شبکه‌های مدرن بردارهای پشتیبان معرفی شده است در این رساله با استفاده از مفاهیم پایه‌ای در بحث بردارهای پشتیبان، قضیه نوین دیگری برای تولید مانده و تشخیص عیب با بردارهای پشتیبان و رگرسیون بردارهای پشتیبان مطرح می‌شود. ذکر این مطلب ضروری است که در فصل ششم برای طراحی سیستم تشخیص عیب از داده‌های واقعی استفاده می‌شود.

4- *ارایه راه حل نظام مند با استفاده از روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا¹ برای تعیین ماتریس*

پایدار شبکه‌های عصبی دینامیکی به جای انتخاب دلخواه

5- *ارایه یک رهیافت جبری هندسه محاسباتی برای سیستم تشخیص عیب مبتنی بر مدل با*

فرض وجود متغیر عدم قطعیت در معادلات فضای حالت سیستم

در روش مبتنی بر مدل معمولاً از روش طراحی رویتگرها استفاده می‌شود و برای طراحی رویتگرها معمولاً در سیستم پیش فرضهایی همچون آفاین² و یا لپشیتز³ بودن در نظر می‌گیرند. در این رساله برای امتناع از این پیش فرضها، از روش هندسه محاسباتی جهت ارایه یک رهیافت جبری برای تشخیص عیب استفاده می‌شود. البته از این روش قبلاً در مقالات برای تشخیص عیب استفاده شده است اما آنچه در این رساله به عنوان کار جدیدی معرفی می‌شود وارد کردن متغیر عدم قطعیت در مدل سیستم واقعی است مطالعات در همه کارهای قبلی نشان

¹ Subspace Identification Method

² Affine

³ Lipschitz

می‌دهد که در این روش، متغیر عدم قطعیت را در نظر نمی‌گیرند ولی در این رساله علاوه بر اغتشاش و عیوب حسگرها، عدم قطعیت نیز در نظر گرفته می‌شود البته این مطلب منجر به زیاد شدن محاسبات تولید پایه های گروبنر و تئوری حذف شد که برای کاهش محاسبات، از شگردهای خاصی برای انتخاب ترتیب های چند جمله‌ایها در نرم افزارهای محاسباتی Maple استفاده گردید.

روش تشخیص عیب با رهیافت داده‌رانده و رهیافت مبتنی بر مدل با هم مقایسه می‌شود و نتایج در سیستم کنترل تحمل‌پذیرعیب برای جبران عیب حسگرها مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. نتیجه وجود سیستم تشخیص عیب و کنترل تحمل‌پذیر عیب در تعیین نقطه کار بر روی منحنی عملکردی کمپرسور نیز نشان داده می‌شود. نکته مهم این است که طی بررسی های بعمل آمده در این رساله استفاده از روش طراحی مجدد کنترل کننده به روش تطبیقی و یا سایر روشهای کنترلی در طراحی سیستم تشخیص عیب حسگرها کارایی ندارد [9]. زیرا برای طراحی مجدد کنترل کننده لازم است اندازه‌گیریهای درستی از متغیرها در دسترس باشد در حالیکه حسگرهای معیوب این امکان را سلب می‌نماید و لذا استفاده از حسگرهای مجازی این ایراد را پوشش می‌دهد. در ضمن عدم دستکاری کنترل کننده در زمان وقوع عیب و جبران عیب با روش حسگر مجازی یک مزیت بسیار مهم در کاربردهای واقعی و صنعتی محسوب میشود.

5-1 مطالب مطرح در فصول بعدی رساله

در فصل دوم شبکه انتقال گاز، ساختار فیزیکی و مکانیکی کمپرسور به طور اختصار بررسی می‌گردد. همچنین مدل مور- گریترز به همراه مروری بر ادبیات مدل‌سازی کمپرسورها و تحقیقات انجام گرفته در این مورد در این فصل ارایه می‌شود. پایداری کمپرسورها و کارهای انجام شده در این خصوص و پدیده سرج، چگونگی رخداد و تبعات آن در کمپرسور در ادامه فصل دوم بررسی خواهد شد. در نهایت نقش منفی حسگرهای معیوب در بروز پدیده سرج کاذب مطالعه می‌شود.

در فصل سوم مروری بر مفاهیم اولیه و سیستم تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور ارایه می‌گردد و انواع عیب در حسگرها کلاس بندی می‌شود

در فصل چهارم با جزئیات بیشتری روش‌های تشخیص عیب مبتنی بر داده در سه بخش مجزا بررسی شده است. در بخش اول از ابزار شبکه‌های عصبی برای طراحی سیستم تشخیص عیب استفاده می‌شود. در مرحله اول از این بخش، فقط از داده‌های ورودی و خروجی مدل کمپرسور برای تشخیص عیب استفاده می‌شود. بدین ترتیب که مدل مور-گریتر در محیط نرم‌افزاری متلب شبیه‌سازی می‌گردد و خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل برای تولید سیگنال مانده با شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. برای آموزش شبکه لازم است که داده‌های سالم از مدل استخراج شود به عبارت بهتر، بایستی تمامی حسگرها سالم فرض شوند. در مرحله دوم از بخش اول، بعد از مدل‌سازی کمپرسور با شبکه‌های عصبی، خروجی مدل مور-گریتر و شبکه عصبی در هر لحظه با هم مقایسه می‌شوند که نتیجه مقایسه سالم و یا معیوب بودن حسگرها را معلوم می‌نماید. در ادامه این بخش الگوریتم ویژه‌ای برای بلوک ارزیابی مانده ارایه خواهد شد که به وسیله آن نوع، مقدار و زمان وقوع عیب قابل تشخیص می‌گردد. محاسبات و شبیه‌سازی‌های لازم برای تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی در انتهای بخش اول به تفصیل بیان می‌شود. در بخش دوم از فصل چهارم شبکه‌های عصبی دینامیکی معرفی می‌گردند و ساختار و عملکرد این شبکه‌ها با شبکه‌های عصبی متعارف مقایسه خواهند شد. برای انتخاب ماتریس پایدار هورویتز در شبکه‌های عصبی دینامیکی، روش شناسایی زیرفضا معرفی خواهد شد. بعد از آشنایی با شبکه‌های عصبی دینامیکی و روش شناسایی زیرفضا، با ارایه یک قضیه به کاربرد آنها در تولید سیگنال مانده اشاره خواهد شد. محاسبات و شبیه‌سازی‌های لازم برای تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی دینامیکی در انتهای این بخش به تفصیل ذکر می‌شوند. در بخش سوم از فصل چهارم رگرسیون بردارهای پشتیبان¹ معرفی خواهند شد بردارهای پشتیبان می‌توانند به عنوان ابزار مفید دیگری در روش داده رانده برای تولید سیگنال مانده بکار روند. لذا

¹ Support Vector Regression (SVR)

مفاهیم اساسی این ایده در وهله اول بیان خواهد شد و سپس نحوه به کارگیری این ایده در تشخیص عیب با طرح قضیه نوینی به تفصیل توضیح داده می شود. لازم به توضیح است که در این روش از داده های واقعی کمپرسور استفاده می شود. نتایج محاسبات و شبیه سازی های لازم برای تشخیص عیب با بردارهای پشتیبان و رگرسیون در انتهای فصل چهارم بیان می شوند.

در فصل پنجم روش مبتنی بر مدل برای تشخیص عیب معرفی می شود، از تئوری پایه های گروبنر و روش جبری حذف برای این منظور استفاده خواهد شد. لذا مفاهیم اساسی در جبر محاسباتی برای پایه های گروبنر و تئوری حذف در ابتدا ارائه می شود و سپس از نحوه به کارگیری این ایده ها در تشخیص عیب گزارش جامعی ارائه می گردد. الگوریتم پیاده سازی این روش در مدل مور-گربنر کمپرسور به همراه نتایج محاسبات در ادامه این فصل توضیح داده می شوند.

در فصل ششم مبانی سیستم کنترل تحمل پذیر عیب بیان می شود و روش حسگرهای مجازی به عنوان روشی مناسب در کنترل عیب حسگرها به صورت کامل توضیح داده می شود. نتایج محاسبات و پیاده سازی سیستم کنترل تحمل پذیر عیب در کمپرسور گاز در ادامه فصل آورده می شود. نتیجه عملکرد سیستم کنترل تحمل پذیر عیب در تشخیص درست و به موقع نقطه سرج کمپرسور نیز در این فصل بیان می گردد. ذکر این نکته ضروری است که خرابی حسگرها توسط سیستم کنترل تحمل عیب قابل جبران نیست و برای جبران خرابی یا باید حسگر خراب را تعمیر و یا تعویض کرد و یا باید از تکنیکهای دیگری بهره گرفت که خود موضوع این تکنیکها می تواند سرفصل جدیدی برای تحقیقات آتی باشد.

در فصل هفتم از مباحث مطرح شده در فصول قبلی جمع بندی به عمل آمده و برای کارهای آتی پیشنهادات لازم ارائه خواهند شد.

فصل دوم:

آشنایی با شبکه انتقال گاز طبیعی و کمپرسور

مقدمه

با توسعه روز افزون مصرف گاز طبیعی، انتقال گاز از مبادی تولید به مراکز مصرف با هزینه‌های کم و ضریب پایداری و ایمنی بالا مورد توجه ویژه قرار گرفته است. کمپرسورها در خطوط انتقال گاز دارای نقش کلیدی هستند. بروز عیب در کمپرسورها مانند هر دستگاه دیگر طبیعی است و لذا کنترل دقیق آنها در ارتقای بازدهی کل سیستم انتقال گاز موثر است. در این فصل بعد از آشنایی با شبکه انتقال گاز، ساختار فیزیکی و مکانیکی کمپرسور، مدل مور-گریتز و پایداری و کنترل آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش بعد، پدیده سرج، عوامل ایجاد، مضرات و نحوه تشخیص و کنترل آن توضیح داده می‌شود و در نهایت، لزوم بهره‌گیری از سیستم تشخیص عیب در کمپرسورها با عنایت به مشکلات عملی و عینی موجود تشریح می‌گردد.

2-1 شبکه انتقال گاز طبیعی

انتقال گاز طبیعی به دلیل ماهیت گازی بودن آن، با انتقال نفت و سایر میعانات نفتی متفاوت است. انتقال نفت با کشتی‌های غول‌پیکر نفت‌کش در حجم وسیع امکان‌پذیر است ولی برای انتقال حجم زیادی از گاز طبیعی، لازم است گاز، فشرده‌سازی و مایع گردد و لذا مستلزم کاهش شدید دمای گاز در تانکرهای انتقال است. مایع‌سازی گاز نیازمند وجود تکنولوژی بالا در مراحل تولید و بارگیری، انتقال و تخلیه در مراکز مصرف است. تکنولوژی "گاز طبیعی مایع" که در اساس همان فشرده‌سازی گاز با روش‌های پیشرفته است، فقط در اختیار چندین کشور محدود بوده و همچنین به دلیل هزینه زیاد احداث سایت‌های مایع‌سازی و کشتی‌های حامل گاز طبیعی مایع، جایگاه چندان مناسبی در زمینه انتقال گاز طبیعی در مقایسه با خطوط لوله انتقال گاز ندارد. البته از سایر فناوری‌ها همچون "دی متیل اتر"¹ نیز در زمینه انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود ولی این روش‌ها باز هم نتوانسته‌اند رقیب جدی برای انتقال گاز توسط خطوط لوله باشند. لذا در دنیای کنونی، انتقال گاز با خطوط لوله

¹ Dimethyl Ether

همچنان دارای جایگاه اول در صنعت انتقال گاز طبیعی است. خط لوله انتقال گاز کشور روسیه به کشورهای اروپایی، خطوط انتقال گاز در امریکای شمالی، بیست و پنج هزار کیلومتر خط انتقال گاز پرفشار در کشور ما ایران و خط انتقال گاز ناباکو همگی نشان از اهمیت خطوط لوله در انتقال گاز طبیعی می‌باشد. جهت آگاهی بیشتر مرجع [29] مطالعه شود.

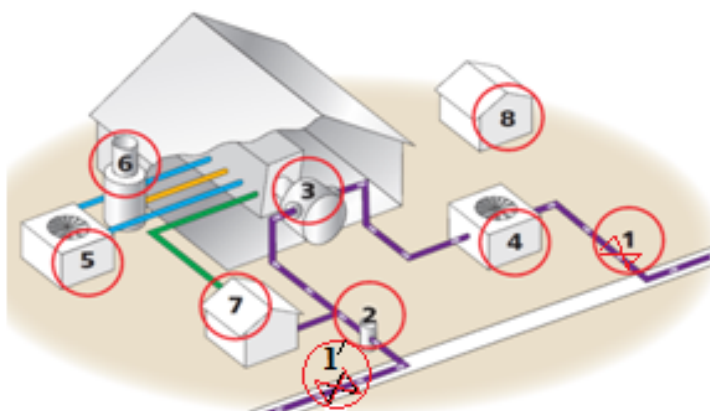
هزینه احداث و تعمیر و نگهداری خطوط انتقال گاز بسیار بالا است. مثلاً هزینه احداث یک کیلومتر خط انتقال گاز پر فشار بالغ بر یک میلیون دلار است و تاسیسات تقویت فشار گاز با چهار دستگاه توربوکمپرسور، که در فواصل 120 تا 130 کیلومتری از هم در مسیر خط لوله احداث می‌گردند؛ دارای هزینه‌ای بالغ بر 50 میلیون دلار است. سرمایه‌گذاری صورت گرفته توسط وزارت نفت در بخش انتقال گاز طبیعی به طول 25000 کیلومتر و 50 واحد تاسیسات تقویت فشار گاز طبیعی به صورت سرانگشتی مبلغی نزدیک به 35 میلیارد دلار است. البته باید به این مبلغ هزینه احداث 250000 کیلومتر خطوط لوله فشار متوسط و کم‌فشار داخل شهری نیز اضافه گردد. هدف از ارائه این آمار و ارقام نشان دادن اهمیت اقتصادی و سرمایه‌گذاری صورت گرفته در این بخش است که بایستی ملاحظات امنیتی، سیاسی و اجتماعی انتقال و جریان پیوسته گاز در این خطوط لوله را نیز به این مطلب اضافه کرد [29 و 30].

توربوکمپرسورها و به ویژه کمپرسورها در نقش قلب در شریان حیاتی انرژی کشور ایفای نقش می‌کنند که در صورت بروز مشکل برای آنها، گاز در این شریان از حرکت می‌افتد. لذا احاطه کامل به دانش فنی طراحی، ساخت، کنترل و تعمیر و نگهداری این دستگاه‌ها برای صنعت گاز کشور امری فوق‌العاده ضروری است.

سیستم‌های کنترل این دستگاه‌ها نیز کاملاً وارداتی بوده و در انحصار چند کشور محدود می‌باشد و اخیراً نیز با شدت گرفتن تحریم‌های غرب علیه ایران، هزینه تعمیر و نگهداری این سیستم‌ها چندین برابر شده است. داشتن تجربه عملی، وجود زمینه‌های فراوان برای کار تحقیقاتی

در این حوزه برای بومی‌سازی تکنولوژی و کاهش وابستگی و کاری با این دستگاه‌ها در صنعت گاز، اصلی‌ترین انگیزه کار بر روی این موضوع برای رساله دکتری حاضر است.

در شکل (2-1)، شماتیک یک تاسیسات تقویت فشار گاز نشان داده شده است [29]. شیرهای 1 و 1' به ترتیب شیرهای خروجی و ورودی توربوکمپرسورهای گاز هستند بعد از شیر ورودی، سیستم اسکرابر (2)، جهت تمیز کردن گاز ورودی به دستگاه‌های توربوکمپرسور قرار دارد که وظیفه آن حذف مواد زاید احتمالی در گاز و نم‌زدایی از گاز است. گاز بعد از عبور از سیستم نم‌زدا و تمیزکننده وارد کمپرسور می‌شود که در آن توربین گازی نقش تامین کننده انرژی لازم برای چرخش کمپرسور را بر عهده دارد. گاز خروجی از کمپرسور قبل از شیرخروجی از سیستم خنک کننده گاز عبور می‌کند. زیرا با تقویت فشار، دمای گاز خروجی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر در تزریق گاز به خط لوله از نظر دما محدودیت وجود دارد و به همین جهت دمای گاز را قبل از تزریق به خط لوله بایستی با استفاده از خنک‌کننده‌های گاز (4) پایین آورد. برای روغن کاری دستگاه توربوکمپرسور از یک سیستم مجزای روغن کاری استفاده می‌شود در این سیستم بایستی در هر چرخه، روغن فیلتر (5) شود تا ذرات احتمالی از آن گرفته شود. برای کاهش صدای شدید توربوکمپرسور از یک سیستم خفه‌کننده استفاده می‌شود. در شکل (2-1)، خفه‌کننده (6) به صورت شماتیک نشان داده شده است. سوخت توربوکمپرسور از خود تاسیسات تقویت فشار گاز تامین می‌شود. از خط ورودی یا خروجی تاسیسات، گاز وارد سیستم تقلیل فشار گاز می‌شود. زیرا گاز طبیعی لازم برای سوخت توربوکمپرسور باید دارای فشار بسیار کمتری از فشار گاز طبیعی در لوله‌های گاز باشد لذا یک سیستم تقلیل فشار (7) در تاسیسات در نظر گرفته می‌شود. همچنین گاز مصرفی برای سوخت توربوکمپرسور بایستی کاملاً فیلتر شود تا به مشعل‌های دستگاه آسیبی وارد نشود. لذا در سیستم تقلیل فشار گاز، ذرات معلق نیز گرفته می‌شود. بخش (3) در شکل مذکور همان دستگاه توربوکمپرسور است.



شکل (1-2) نمای شماتیک تاسیسات تقویت فشار گاز

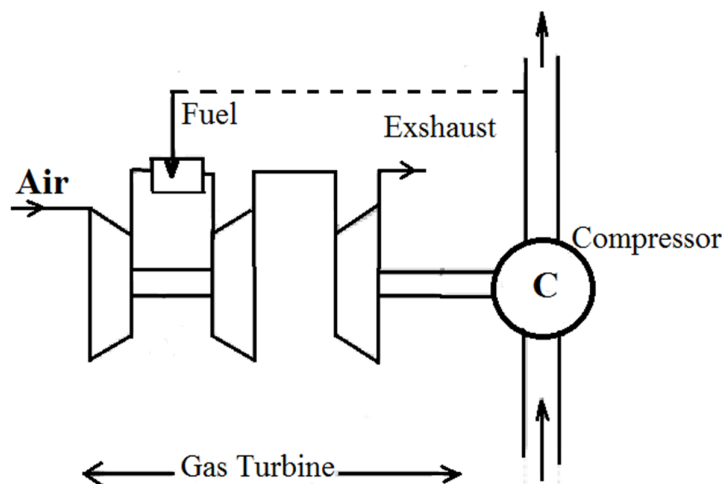
عملکرد دستگاه‌ها به وجود جریان دایم برق بستگی دارد و لذا برای تامین برق در مواقعی که برق شهری قطع می‌شود از یک دستگاه مولد برق به عنوان برق اضطراری استفاده می‌شود که به صورت اتوماتیک با قطع برق شهر، وارد مدار می‌شود بخش (8) سیستم مولد برق اضطراری را نشان می‌دهد.

توربوکمپرسورها عناصر اصلی تاسیسات هستند که در آنها، توربین‌های گازی به عنوان محرکه کمپرسورها هستند. چون از نظر تامین سوخت در تاسیسات، برای توربین‌های گازی مشکلی وجود ندارد، لذا، اکثراً از توربین‌های گازی جهت تامین قدرت لازم برای چرخش استفاده می‌کنند. ولی ایراد عمده این محرکه‌ها، راندمان پایین در حدود 40 درصد است و در ضمن چون دمای محفظه احتراق آنها، در حدود 1500 درجه سانتیگراد می‌باشد لذا استهلاک آنها زودرس است. در شکل (2-2)، شماتیک یک دستگاه توربوکمپرسور که در تاسیسات تقویت فشار گاز به کار می‌رود نشان داده شده است. گاز طبیعی از خط ورودی تزریق می‌شود، سپس توسط کمپرسور تقویت فشار شده و به خط خروجی تزریق می‌گردد. توربین گازی انرژی لازم را جهت چرخش کمپرسور سانتریفیوژ گاز تامین می‌کند. توربین گازی از دو بخش اصلی مولد گاز¹ و توربین قدرت² تشکیل شده است که در

¹ Gas Generator (GG)

² Power Turbine (PT)

اصطلاح آنها را GG و PT می‌نامند. خود بخش مولد گاز نیز از سه بخش کمپرسور محوری برای مکیدن هوای بیرون، محفظه احتراق جهت ترکیب سوخت و هوا و توربین مرحله اول مولد گاز تشکیل شده است. توربین مرحله اول انرژی لازم را برای چرخش کمپرسور محوری و توربین قدرت انرژی لازم را جهت چرخش کمپرسور سانتریفیوژ گاز تامین می‌کند.



شکل (2-2) شکل یک دستگاه توربوکمپرسور در تاسیسات تقویت فشار گاز [31]

اخیرا موضوع استفاده از موتورهای پر قدرت الکتریکی جریان مستقیم به جای توربین‌های گازی مطرح است و در تاسیسات تبریز برای اولین بار در کشور در حال اجرا و پیاده‌سازی است. جهت آگاهی بیشتر در مورد ساختار تاسیسات تقویت فشار گاز و کمپرسورهای گازی مراجع [29]-[36] مطالعه گردد.

در ادامه این بخش نحوه تنظیم فشار گاز در شبکه خطوط انتقال گاز کشور به اختصار توضیح داده می‌شود [29]. واحد دیسپچر مستقر در ستاد که مسئول کنترل فشار خطوط لوله انتقال گاز در سطح کشور است با توجه به مقدار مصرف گاز و سایر شاخص‌ها، از هر ایستگاه تقویت فشار می‌خواهد که فشار خروجی خود را در یک مقدار معین تثبیت کند. لذا بهره‌بردار موظف است با توجه به دستور دیسپچر، فشار خروجی کل ایستگاه را در مقدار مورد نظر تنظیم نماید. بهره‌بردار فقط می‌تواند جهت

حصول فشار درخواستی، سرعت کمپرسور را کنترل کند، بنابراین از دیدگاه ساده کنترلی، کل مجموعه یک سیستم کنترلی SISO حلقه باز است که در آن بهره‌بردار با توجه به فشار خروجی واقعی و فشار خروجی مطلوب، ورودی سیستم یعنی سرعت کمپرسور را تنظیم می‌نماید.

در تاسیسات تقویت فشار گاز، جهت کنترل سیستم توربوکمپرسور اغلب سه سیستم کنترل جداگانه به شرح زیر وجود دارد:

1- سیستم کنترل حلقه باز فرایند: در این سیستم فشار سیال خروجی از کمپرسور به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته می‌شود. کاربر دستگاه، فشار خروجی مطلوب را از دیسپچر دریافت می‌کند و اختلاف فشار خروجی مطلوب و فشار واقعی دستگاه را به‌دست می‌آورد. سپس بر حسب تجربه خود، تغییرات سرعت لازم توربو کمپرسور را برای حصول فشار خروجی مطلوب به‌دست آورده و آن را به دستگاه اعمال می‌نماید. در این سیستم کنترلی، بهره‌بردار دارای نقش اساسی بوده و تجربه وی در این راستا بسیار مهم است.

2- سیستم کنترل سرج کمپرسور سانتریفیوژ: در بخش بعد توضیح داده می‌شود

3- سیستم اعلام حریق: در صورت بروز مشکل این سیستم می‌تواند سامانه اطفای حریق را در داخل اتاقک توربوکمپرسور فعال کند. البته در برخی از برندها، سیستم اعلام حریق در سیستم کنترل فرایند ادغام می‌گردد ولی اکثراً به دلیل بالا بردن ضریب ایمنی سیستم در مقابل حوادثی نظیر آتش‌سوزی و انفجار از سیستم جداگانه جهت اعلام و اطفای حریق استفاده می‌گردد.

در سیستم کنترل کمپرسورهای سانتریفیوژ، از دیدگاه سیگنال و عملکرد دو دسته سیگنال وجود دارد که یک دسته مربوط به سیگنال‌های فرایند¹ سیستم می‌باشد و دسته دیگر مربوط به سیگنال‌های حفاظتی² است. به طور معمول سیگنال‌های فرایندی در یک کمپرسور گاز عبارتند از:

¹ Process Signals

² Preventing Signals

1- فشار گاز ورودی

2- فشار گاز خروجی

3- جریان گاز عبوری از کمپرسور

4- دمای گاز ورودی

5- دمای گاز خروجی

درست است که جهت تنظیم فشار خروجی، باید سرعت کمپرسور و یا گشتاور اعمالی از توربین را کنترل کرد ولی همانطوریکه ذکر شد این سیستم دارای یک سری متغیرهای فرایندی و یک سری متغیرهای حفاظتی است. سیگنال‌های حفاظتی از زیرسیستم‌های جانبی همچون روغن‌کاری، آب‌بندی، یاتاقان‌ها، سیستم لرزش و غیره تولید می‌شوند که برای عملکرد صحیح کمپرسور، حتماً بایستی تحت نظارت باشند. اکثر سیگنال‌ها با توجه به ساختار کمپرسور و فرایند و اهمیت سیگنال از لحاظ حفاظت، دارای مرزهای پایین، بالا، پایین پایین، بالا بالا است همچنین دارای محدوده مشخصی هستند. مقیاس¹ سیگنال‌ها نیز عموماً مشخص شده‌اند مثلاً سیگنال مربوط به جابجایی محوری² با برچسب³ ZE602 در یک نوع کمپرسور دارای مقیاسی به اندازه $8 \text{ mv}/\mu\text{m}$ بوده و واحد آن میلی‌متر و از نوع سیگنال لرزش⁴ می‌باشد. از نظر طبقه‌بندی ایمنی، سیگنال از نوع ایمنی داخلی⁵ است. محدوده اندازه‌گیری آن $\pm 0/5$ میلی‌متر است. آژیر هشدار اول سیگنال در $\pm 0/12$ رخ می‌دهد و آژیر هشدار دوم سیگنال در $\pm 0/2$ ظاهر می‌شود. سایر سیگنال‌ها نیز تقریباً ساختار مشابهی دارند و دارای سیستم هشدار و کنترل عیب "تست محدوده" است که ابتدایی‌ترین و ساده‌ترین روش سیستم تشخیص عیب است. در فصل بعدی به تفصیل در این مورد بحث خواهد شد.

¹ Scale

² Axial Displacement

³ Tag Name

⁴ Vibration

⁵ Intrinsic Safety(IS)

2-2 مقدمه‌ای بر کمپرسورها

تاریخ ساخت اولین نسل کمپرسورها به دهه 1860 میلادی برمی‌گردد که برای تامین هوای تونل‌های زیرزمینی معدنی استفاده می‌شد. ایزنفلد¹ در سال 1982، کمپرسورها را در چهار گروه کاری طبقه‌بندی کرد که عبارتند از: کمپرسورهای رفت و برگشتی، کمپرسورهای چرخشی، کمپرسورهای گریز از مرکز و کمپرسورهای محوری [32-33]. در برخی از مراجع، از عبارت کمپرسورهای شعاعی به جای کمپرسورهای گریز از مرکز نیز استفاده می‌شود.

کمپرسورهای رفت و برگشتی و چرخشی از اصل کاهش حجم برای افزایش فشار استفاده می‌کنند. کمپرسورهای محوری و گریز از مرکز از اصول شتاب‌دهی به سیال و افزایش سرعت آن، تبدیل انرژی جنبشی سیال به انرژی پتانسیل و کاهش شتاب گاز در کانال‌های انشعاب یافته برای افزایش فشار استفاده می‌کنند. در کمپرسورهای محوری، کاهش فشار در پره‌های استاتور و در کمپرسورهای گریز از مرکز، در پخشگر² اتفاق می‌افتد. افزایش انرژی پتانسیل سیال به صورت افزایش فشار ظاهر می‌گردد و تبدیل انرژی پتانسیل به جنبشی را می‌توان با رابطه برنولی به صورت زیر نوشت [31]:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{C_1^2}{2} + g_{z1} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{C_2^2}{2} + g_{z2} \quad (1-2)$$

در رابطه بالا P فشار و ρ چگالی سیال می‌باشد C سرعت سیال و g_z انرژی پتانسیل بر واحد جرم سیال می‌باشد. اندیس‌های 1 و 2 نیز بیانگر حالت سیستم قبل و بعد از تقویت فشار است. این معادله در واقع مبین قانون بقا انرژی در سیالات است و کاهش انرژی جنبشی موجب افزایش انرژی پتانسیل می‌گردد. در کمپرسورهای محوری، جهت حرکت سیال در راستای محور بوده ولی در کمپرسورهای گریز از مرکز، جهت حرکت سیال در راستای عمود بر محور چرخشی می‌باشد. همچنین

¹ Isenfeld

² Diffuser

کمپرسورهای محوری می‌توانند حجم زیادی از جریان را نسبت به کمپرسورهای گریز از مرکز تقویت فشار کنند. لذا به همین دلیل از کمپرسورهای محوری بیشتر در موتورهای جت استفاده می‌شود.

به صورت خلاصه، موارد کاربرد کمپرسورها در چند دسته به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

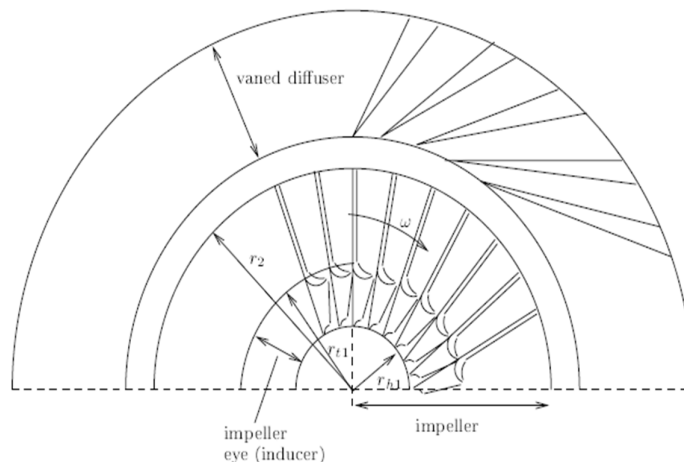
- (1) در توربین‌های گازی و موتورهای جت هواپیما به عنوان پیشران و تولید توان.
- (2) در موتورهای پیشران کشتی.
- (3) در صنعت برای انتقال گازها و سیالات در خطوط لوله و در سوپر شارژهای موتورهای احتراق داخلی.

ساختار فیزیکی یک کمپرسور سانتریفیوژ دقیقاً مانند پمپ‌های سانتریفیوژ از یک پوسته ثابت و پروانه وادارکننده¹ که داخل آن می‌چرخد تشکیل شده است. وادارکننده‌ها سرعت سیال را افزایش می‌دهند سپس سیال با عبور از یک سری مسیرهای انشعاب یافته با کاهش فشار استاتیک مواجهه می‌گردد. مرحله آخر پخشگر² است که سرعت گاز با برخورد به پخشگرها کاهش پیدا می‌کند و در عوض فشارش بالا می‌رود. شکل (2-3)، طرح واره وادارکننده و پخشگر را در یک کمپرسور سانتریفیوژ نشان می‌دهد. وادارکننده‌ها بر روی محور قرار گرفته‌اند که به همراه محور، روتور³ نامیده می‌شوند و در داخل پوسته قرار دارند. سیال به داخل چشمه‌های وادارکننده مکش می‌یابد و با سرعت بالایی به صورت چرخشی، توسط پره‌های روی صفحه وادارکننده به حرکت در می‌آید. فشار استاتیک سیال از چشمه به سمت نوک وادارکننده زیاد می‌گردد و بقیه فرایند افزایش در پخشگر صورت می‌گیرد. معمولاً نصف افزایش فشار در حرکت سیال به سمت نوک وادارکننده صورت می‌گیرد و نصف دیگر در پخشگر زیاد می‌شود [31].

¹ Impeller

² Diffuser

³ Rotor



شکل (3-2) طرح واره وادار کننده و پخشگر در کمپرسور سانتریفیوژ [31]

3-2 مدل سازی کمپرسورها

اولین مدل برای سیستم فشرده سازی و کمپرسورها در سال 1951 ارائه گردید. قدم بعدی در زمینه مدل سازی را، گریترز در سال 1976 برداشت [38] و [37]. مدل ارائه شده توسط وی مدل غیر خطی بود و در حال حاضر اساس بسیاری از تحقیقات در زمینه کنترل سرج کمپرسورها را به خود اختصاص داده است. لازم به ذکر است مدل ارائه شده توسط گریترز برای کمپرسورهای محوری بود ولی محققین در سال 1986 و در سال 1991 طی کارهای پژوهشی نشان دادند که مدل ارائه شده توسط گریترز برای کمپرسورهای سانتریفیوژ هم کاربرد دارد. [40] و [39]

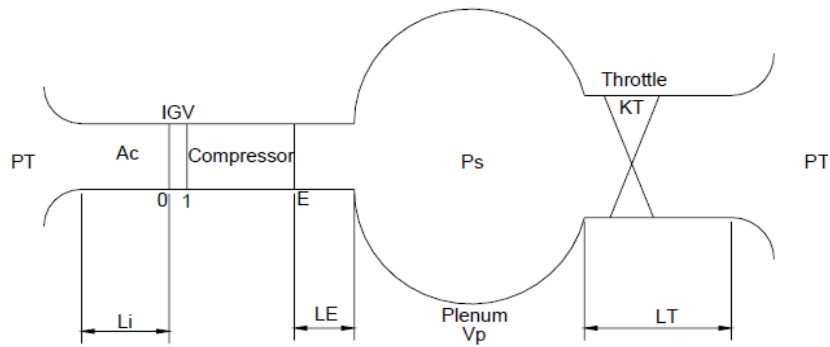
یکی از ایرادات مدل پیشنهادی گریترز این بود که در طول مسیر داخل کمپرسور، سیال را تراکم ناپذیر فرض کرده بود ولی در عمل اینگونه نیست. لذا در سال 1983 طی مقاله ای این مشکل رفع گردید و مدل ارائه شده در این مقاله برای گازهای غیر ایده آل و با ترکیبات و ساختارهای مختلف قابل استفاده شد [41]. در سال 1985 نیز موضوع تاثیر اجزای مختلف کمپرسور سانتریفیوژ بر پایداری آن مورد مطالعه قرار گرفت [42].

در سال 1986 مدل معرفی شده توسط گریترز که شامل سه متغیر بود توسعه یافت و به مدل دارای چهار متغیر توسط مور تبدیل شد و به مدل مور-گریترز معروف گردید و در این راستا دو

مقاله نیز توسط مور و همکارانش ارائه گردید [44] و [43]. در سال 1994 و 1995 موضوع مدل سازی کمپرسورها از زاویه دیگری مورد مطالعه قرار گرفت. مدل سازی با استفاده از روابط جرم و گشتاور انجام شد که این نوع از مدل سازی در تشریح پدیده سرج در کمپرسورها بسیار مفید بود [45] و [46]. مدل معرفی شده توسط گریترز با اضافه کردن سرعت متغیر دستگاه در سال 1997 تکمیل گردید [47]. کاربرد سری های فوریه برای مدل سازی کمی کمپرسور جهت بررسی رفتار دینامیک های ناپایدار کمپرسور در سال 1999 ارائه گردید [48]. یک مدل دو بعدی با فرض قابل فشرده بودن سیال در سال 2000 مطرح شد. از مشخصات اصلی این مدل مرتبه پایین و تحلیلی بودن است، مدل سازی دستگاه با در نظر گرفتن جریان های گردابی بین وادار کننده و پخشگر در کمپرسورهای سانتریفیوژ نیز یکی از ویژگی های ممتاز آن بود [49]. از سال 2000 به بعد، اکثر تحقیقات بر روی سیستم های کنترل سرج و پایداری سیستم ها متمرکز گردید و در سال 2005 مدلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و با روش های شناسایی ارائه گردید [50]. در سال 2007 مدل کمپرسور سانتریفیوژ با در نظر گرفتن تاثیر ارتعاشات خط لوله بر مدل بیان گردید [51] و در طی سالهای 2008 تا 2011 تحقیقاتی در زمینه مدل سازی کمپرسور با سیستم های فازی و کنترل سرج توسط کنترل فازی صورت گرفت [54]-[52].

در مدل سازی سیستم تقویت فشار کمپرسوری، مدل از یک کمپرسور با مجرای بین یک منبع بزرگ با فشار ثابت (اتمسفر) و حجمی که مملو از گاز قابل فشرده شدن است، تشکیل شده است. حجم مملو از گاز قابل فشردگی را در اصطلاح پلنیوم¹ می نامند. حجم پلنیوم از طریق یک شیر گلویی به منبع بزرگ دیگری تخلیه می گردد. این سیستم فشرده سازی پایه می تواند به عنوان یک مدل ساده کمپرسور در نظر گرفته شود. در شکل (2-4) مدل مور-گریترز برای کمپرسور به صورت طرحواره نشان داده شده است:

¹ Plenum



شکل (2-4) مدل مور گریترز کمپرسور [31]

متغیرها و پارامترهای شکل (2-3) عبارتند از:

P_T : فشار ورودی

A_c : سطح مجرای کمپرسور

IGV: پره های متحرک ورودی

به ترتیب طول مجاری ورودی، خروجی و گلوی: L_T, L_E, L_I

0: ورودی کمپرسور

1: خروجی پره های متحرک

E: خروجی کمپرسور

P_T : فشار استاتیک خروجی در انتهای مجرای خروجی

V_p : حجم پلنیوم

K_T : ضریب گلویی

قبل از معرفی مدل گریترز، قانون نظام مندی جهت تشخیص اینکه کمپرسور به کدام ناحیه از ناپایداری سوق پیدا می کند وجود نداشت. لذا با معرفی پارامتر B گریترز به این سوال پاسخ داده شد.

$$B = \frac{U}{2\omega_H L_C} \sqrt{\frac{V_p}{A_c L_c}} \quad (2-2)$$

در رابطه بالا B سرعت میانگین روتور و ω_H فرکانس رزونانسی هلمولتز¹ می باشد، L_c طول موثر کمپرسور و مجرا است. V_p حجم پلنیوم و A_c سطح مقطع مسیر جریان عبوری است. در نهایت بعد از اعمال روابط حاکم بر دستگاه، معادلات ساده توصیفی فضای حالت مدل مور-گریتز عبارتند از [55] و [29]:

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi}{d\xi} &= \frac{\Lambda_2}{B}(\Phi - \Phi_r) - 2\Lambda_1\Gamma B\Psi \\ \frac{d\Phi}{d\xi} &= \frac{H}{l_c(B)} \left[-\frac{\Psi - \Psi_{c0}}{H} + 1 + \frac{3}{2}\left(\frac{\Phi}{W} - 1\right)\left(1 - \frac{J}{2}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{\Phi}{W} - 1\right)^3 - \frac{l_E U_d \Lambda_1 \Gamma \Phi}{bH} \right] \\ \frac{dJ}{d\xi} &= J \left[1 - \left(\frac{\Phi}{W} - 1\right)^2 - \frac{J}{4} - \frac{2U_d \Gamma (m-1) W \Lambda_1}{3bH} \right] \frac{3aH}{(1 - m_B(B)a)W} \\ \frac{dB}{d\xi} &= \Lambda_1 \Gamma B^2 \\ y &= \begin{bmatrix} \Psi \\ \Phi \\ B \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{3-2}$$

متغیر ورودی U همان گشتاور ورودی Γ از طرف توربین گازی می باشد و چهار متغیر حالت کمپرسور عبارتند از Ψ بیانگر فشار بدون بعد، Φ جریان میانگین بدون بعد را نشان می دهد. J ضریب خفگی² است اگر $J > 0$ باشد در این صورت کمپرسور در ناحیه خفگی کار می کند و $J = 0$ نشان می دهد که کمپرسور خارج از ناحیه خفگی کار می کند. متغیر زمان با استفاده از رابطه (2-4) بدون بعد می گردد.

$$\xi = \frac{Ut}{R}\tag{4-2}$$

¹ Helmholtz

² Stone wall Coefficient

t بیانگر زمان، U نشانگر سرعت روتور در شعاع میانگین و R شعاع میانگین کمپرسور است. پارامترهای کمپرسور و مقادیر نامی آنها نیز در رابطه (2-2) عبارتند از:

جدول (1-2) پارامترهای مدل مور-گریتر [55]

R شعاع میانگین کمپرسور	0.1m
l_E طول خروجی (بدون بعد)	8
V_P حجم پلنیوم	$1.5m^3$
H ارتفاع مشخصه ¹ (بدون بعد)	0.18
I ممان اینرسی کمپرسور	0.03 kgm^2
ρ چگالی	1.15kg/m^3
l_I طول ورودی (بدون بعد)	2
A_C مساحت مجرای ورودی هوا	$0.01m^2$
W عرض مشخصه (بدون بعد)	0.25
m شیب منحنی مشخصه	1.75
a_s سرعت صوت	340m/s
L_c طول مجرای ورودی هوا	3m
a ضریب تاخیر داخلی کمپرسور	0.3
Ψ_{c0} مقدار مشخصه متقارن شیر سوپاپی ²	0.3
σ عامل لغزشی ³	0.9
γ بهره گلوی ⁴	0.7
U_d سرعت مطلوب کمپرسور	215 m/s
R_{tip} شعاع روتور	0.1m

پارامترهای b، Λ_1 ، Λ_2 در رابطه (3-2) عبارتند از:

$$b = 2a_s \sqrt{\frac{A_c L_c}{V_P}}, \quad \Lambda_1 = \frac{\rho b R^3 A_c}{2IU_d}, \quad \Lambda_2 = \frac{Rb}{L_c U_d} \quad (5-2)$$

متغیرهای $l_c(B)$ ، Φ_T ، $m_B(B)$ نیز در رابطه (3-2) به صورت (6-2) تعریف می‌شوند.

¹ Height of characteristic

² Shut off value of axisymmetric characteristic

³ Slip factor

⁴ Throttle Gain

$$m_B(B) = (1-m) \frac{U_d}{bB} - 1, \Phi_T = \gamma \sqrt{\Psi}, l_c(B) = l_I + l_E \frac{U_d}{bB} + \frac{1}{a} \quad (6-2)$$

به عنوان یک جمع‌بندی از بحث مدل‌سازی می‌توان گفت که کارهای زیادی در زمینه مدل‌سازی کمپرسور با معادلات ریاضی و روابط فیزیکی حاکم بر سیستم صورت گرفته است. مدل استفاده شده برای اکثر کارهای تحقیقاتی در زمینه مهندسی کنترل کمپرسورها مدل ارائه شده توسط مور-گریترز است. این مدل با وجود آنکه کاربرد زیادی در مقالات دارد اما مدل کاملی نیست. یکی از دلایل عدم کامل بودن مدل مور-گریترز در نظر نگرفتن همه متغیرهای سیستم در مدل‌سازی است، مثلاً در یک توربو کمپرسور واقعی در تاسیسات تقویت فشار تبریز، 78 سیگنال ورودی و خروجی در سیستم وجود دارد که اکثر آنها نشانگر متغیرهای مستقل و تاثیر گذار در مدل بوده و لازم است در مدل‌سازی در نظر گرفته شوند ولی همه این متغیرها در فرایند ایجاد مدل مور-گریترز لحاظ نشده‌اند [31]. دلیل دوم برای عدم کامل بودن مدل، استفاده از ساده‌سازی بیش از حد، در روند ایجاد مدل مور-گریترز است. روش دیگر برای مدل‌سازی کمپرسور به صورت نسبتاً دقیق، استفاده از روش مدل‌سازی دینامیک سیالاتی محاسباتی¹ CFD است که در آن دستگاه را جزء به جزء و با تحلیل‌های عددی شبیه‌سازی می‌کنند. این روش برای بررسی رفتار ترمودینامیکی توربو کمپرسور مناسب است ولی مدل بسته‌ای را به صورت فضای حالت و یا معادلات دیفرانسیل ارائه نمی‌دهد و برای تحلیل‌ها و کارهای کنترلی مناسب نیست.

لازم به توضیح است که در عمل برای ایجاد منحنی عملکرد توربو کمپرسور گاز، هر سازنده‌ای دستگاه را در آزمایشگاه و در شرایط مختلف کاری تست می‌کند و منحنی آن را به دست می‌آورد. علت این که از تست‌های آزمایشگاهی و عملی به جای معادلات ریاضی جهت استخراج منحنی استفاده می‌شود همان عدم دقت کافی این معادلات در توصیف رفتار دینامیکی دستگاه است. در خصوص بحث پایداری مدل مور-گریترز تحقیقات زیادی صورت گرفته است و در اینجا فقط به

¹ Computational fluid dynamics

توضیح مختصری از این کارها اکتفا می‌شود و به جزئیات آنها پرداخته نمی‌شود. در سال 1997 در دانشگاه کالیفرنیا طی مقاله‌ای [56] تابع لیاپانوف برای بررسی پایداری مدل مور-گریتر معرفی شد. البته این مدل با در نظر گرفتن سه متغیر حالت مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در [57] از تحلیل دو شاخگی¹ برای بررسی پایداری مدل مور-گریتر استفاده می‌شود. با تحلیل پایداری خطی می‌توان ناحیه پایداری را بدست آورد البته تحلیل دوشاخگی این امکان را فراهم می‌آورد که نقاط پایداری ضعیف همچون نقاط زینی، هاف² و Takens-Bogdanov را نیز بدست آورد. در سال 1999، [31] پایداری سازی پسخورد خروجی با استفاده از تحلیل دوگانگی دوباره مطرح گردید. اما برای بررسی پایداری کمپرسور، شیر سری کوپل شده در [31] اضافه شده است. اضافه شدن شیر مذکور می‌تواند به عنوان تکنیک کنترل فعال کمپرسور مطرح شود و در کنترل سرج کمپرسور به کار رود. با استفاده از شیر سری کوپل شده فشار خروجی کمپرسور کنترل می‌شود و از پدیده سرج کمپرسور نیز ممانعت به عمل می‌آید.

2-4 پدیده سرج و روش‌های کنترل آن در کمپرسور سانتریفیوژ

به جرات می‌توان گفت که اساسی‌ترین موضوع در بهره‌برداری از توربوکمپرسورهای گاز پدیده سرج است. چرا که در صورت عدم تشخیص به موقع و درست و کنترل صحیح آن، این پدیده می‌تواند صدمات جدی همچون شکستگی پره‌ها، به دستگاه وارد کند. در این بخش ضمن معرفی پدیده سرج، روش‌های رایج تشخیص و کنترل آن در صنعت بیان خواهد شد. همچنین کارهای تحقیقاتی صورت گرفته در این زمینه نیز بیان خواهد شد.

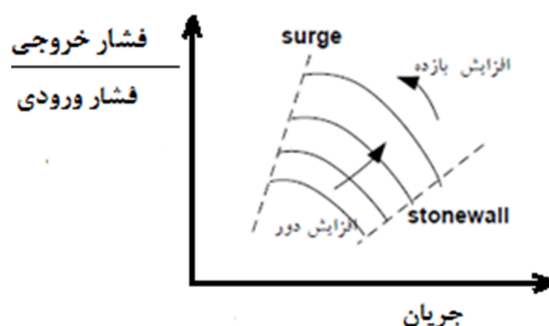
2-4-1 معرفی پدیده سرج در کمپرسور سانتریفیوژ

همانطوریکه پیشتر ذکر گردید برای هر توربوکمپرسور، نمودار عملکردی مانند شکل (2-5) توسط شرکت سازنده به صورت تجربی تهیه می‌گردد. این نمودار از دو محور افقی و عمودی و

¹ Bifurcation Analysis

² Hopf

همچنین یک دسته منحنی تشکیل شده که محور افقی میزان جریان سیال و محور عمودی، نسبت فشار خروجی به ورودی را نشان می‌دهد. دسته منحنی‌ها نیز بیانگر عملکرد توربوکمپرسور در دوره‌های مختلف می‌باشد. در این نمودار برای هر دور، یک نقطه حداقل و یک نقطه حداکثر جریان سیال وجود دارد که بین این دو نقطه، کارکرد توربو کمپرسور گاز، پایدار و قابل پیش‌بینی می‌باشد. به نقطه حداکثر جریان سیال، نقطه خفگی و به نقطه حداقل جریان سیال، نقطه سرج گفته می‌شود. با اتصال نقاط سرج در دوره‌های مختلف، خط حد سرج به دست می‌آید. اگر توربوکمپرسور گاز در سمت راست این خط کار کند در حالت پایدار و اگر در سمت چپ این خط کار کند در حالت ناپایدار یا سرج می‌باشد [31].

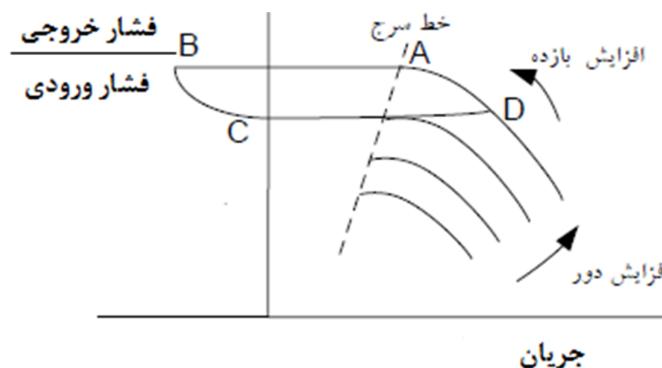


شکل (5-2) منحنی عملکرد کمپرسور سانتریفیوژ [30]

سرج به صورت یک ناپایداری در جریان که اساساً در دینامیک کمپرسورها گاز اتفاق می‌افتد، تعریف می‌شود. این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که کمپرسور گاز قادر به تولید فشار کافی برای غلبه بر مقاومت پایین‌دست خود نمی‌باشد و یا به طور ساده‌تر فشار خروجی تولیدی توسط کمپرسور گاز کمتر از فشار پایین‌دست آن است. در این حالت، یک حرکت رفت و برگشتی چرخه‌ای در جریان گاز ایجاد خواهد شد. علت این جریان رفت و برگشتی که به چرخه سرج معروف است در قسمت بعد توضیح داده شده است.

2-4-2 سیکل سرج

در شکل (2-6)، سیکل سرج روی منحنی مشخصه کمپرسور گاز رسم شده است. فرض می‌شود کمپرسور در نقطه پایدار D کار می‌کند. با کاهش تقاضای گاز در پایین‌دست کمپرسور، نقطه کار به سمت نقطه A (حد سرج) خواهد رفت و با گذشتن نقطه کار از A، کمپرسور گاز دیگر توانایی افزایش فشار خروجی را نخواهد داشت. در نتیجه فشار خروجی کمپرسور کمتر از فشار پایین‌دست خواهد شد که این باعث می‌شود جهت جریان در کمپرسور عکس شده و نقطه کار به B جهش پیدا کند که یک نقطه پایداری در کارکرد کمپرسور گاز نمی‌باشد.



شکل (2-6) سیکل سرج روی منحنی مشخصه کمپرسور [30]

هنگامی که جریان معکوس اتفاق می‌افتد فشار پایین‌دست کمپرسور افت پیدا کرده و همزمان، جریان به سمت مثبت شدن خواهد رفت تا اینکه نقطه کار به C برسد. در نقطه C میزان جریان به اندازه‌ای نیست که بتواند فشار مورد نیاز برای بازگشت به نقطه A را بسازد و در نتیجه نقطه کار به نقطه D (جایی که میزان جریان بیشتر از حدی که بار تقاضا دارد) می‌رود. لذا در خروجی دوباره فشار ساخته می‌شود تا اینکه به نقطه A برسد. اگر تغییری در شرایط کمپرسور ایجاد نشود این عمل به صورت دوره‌ای تکرار خواهد شد. پدیده سرج می‌تواند به وسیله کمبود جریان ورودی نیز ایجاد شود. زیرا کمبود جریان ورودی نیز باعث کاهش جریان خروجی می‌شود. از آنجایی که این چرخه ممکن است چندین بار در ثانیه اتفاق بیفتد در نتیجه، نوسانات ناشی از فشار ایجاد شده بسیار آسیب

زننده است. لذا برای جلوگیری از این آسیب‌ها لازم است عواملی که باعث نزدیکی نقطه کار کمپرسور به خط سرج می‌شوند شناخته شوند [31].

2-4-3 عوامل سرج

یک کمپرسور در هر یک از سه حالت کاری خود از قبیل راه‌اندازی، شرایط عادی بهره‌برداری و یا زمان توقف اضطراری با خطر سرج مواجه است. لذا سیستم کنترل باید برای جلوگیری از سرج در هر یک از شرایط فوق، طراحی خاص آن شرایط را داشته باشد. عوامل سرج عبارتند از [1 و 31]:

1. بالا بودن فشار در قسمت خروجی در زمان به سرویس آوردن یک کمپرسور.
2. کاهش جریان کمپرسور به هر علت، کاهش مصرف در پایین‌دست یا بسته شدن شیرهای بین راهی خطوط انتقال یا از سرویس خارج شدن ایستگاه‌های بعدی
3. افزایش فشار در قسمت خروجی کمپرسور به علت بسته شدن مسیر در پایین‌دست.
4. کاهش فشار گاز ورودی به کمپرسور به هر علت.
5. تغییرات در جرم مولکولی سیال به علت تغییر در ترکیب گاز.
6. کاهش سریع دور به هر علت مثلاً توقف اضطراری.

2-4-4 نتایج سرج

در صورت عدم کنترل درست و به موقع این پدیده، صدمات جدی می‌تواند به سیستم وارد

شود که در زیر به اهم آنها اشاره می‌شود [1]:

- ایجاد آشفستگی¹ در فرایند.
- کم شدن بازده.

¹ Disturbance

- کم شدن عمر کمپرسور به دلیل آسیب‌های مکانیکی وارده به آب بندها، یاتاقان‌ها، روتورها و پروانه.

در این پدیده به علت نوسانات شدید فشار، روتور دائما به سمت جلو و عقب رانده شده و موجب وارد آمدن بار اضافی بر روی یاتاقان‌ها خصوصا یاتاقان محوری¹ می‌شود.

- از بین رفتن درجه آزادی‌های داخلی و حساس قطعات مکانیکی سیستم (لقی‌های مجاز).

2-4-5 مشخصه‌های سرج

وقوع سرج در کمپرسورهای سانتریفیوژ اغلب با مشخصه‌هایی همراه می‌باشد که در زیر به آنها اشاره شده است [1].

- معکوس شدن سریع جریان خروجی کمپرسور در حد میلی ثانیه
- نوسانات شدید فشار
- افزایش سریع دمای گاز عبوری و همچنین دمای داخلی کمپرسور به این علت است که در طی پدیده سرج، گاز یکسانی چندین بار در ثانیه از خروجی کمپرسور عبور داده می‌شود.
- ارتعاشات بیش از حد کمپرسور که می‌تواند سبب توقف اضطراری کمپرسور شود.
- سر و صدا و نویز زیاد

2-4-6 سیستم کنترل سرج در کمپرسور

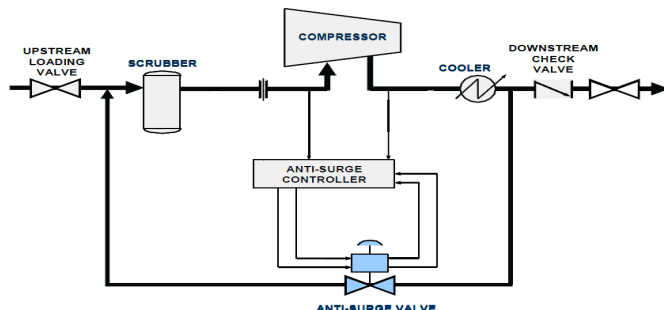
از آنجایی که کمپرسورهای سانتریفیوژ، اجزای گران و اصلی اکثر فرایندها هستند حفاظت این دارائی پرارزش از آسیب‌هایی که به سبب سرج اتفاق می‌افتد بسیار ضروریست. این وظیفه بر عهده سیستمی مستقل به نام سیستم کنترل سرج یا آنتی سرج می‌باشد. البته به این نکته توجه شود که بهتر است بهره‌بردار، نقطه کار کمپرسور را در هر لحظه مد نظر داشته باشد و اجازه ندهد نقطه کار به خط سرج نزدیک شود به طوری که لازم باشد سیستم کنترلی عمل کند. در صنعت برای

¹ Trust Bearing

کنترل سرج در کمپرسورها، دو روش عمده با استفاده از کنترل کننده کلاسیک و ساده PID وجود دارد [1]:

✓ کنترل سرعت کمپرسور

✓ استفاده از شیر آنتی سرج



شکل (2-7): سیستم کنترل سرج کمپرسور با استفاده از شیر پاد سرج

در خصوص کنترل سرج در کمپرسورهای سانتریفیوژ علاوه بر روش‌های مذکور، کارهای پژوهشی زیادی نیز صورت گرفته است. تحقیقات صورت گرفته اغلب در قالب کنترل فعال سرج کنترل بوده و هدف از کنترل فعال سرج، پایداری نقطه کاری سیستم است. در این روش، اصلاحاتی روی ساختار انجام می‌گیرد. بهره‌گیری از روش جابجایی دیواره پلنیوم و تجهیزات جانبی دیگر همچون شیرهای گلوبی، محرکه‌های هوا [31]، شیر زوج¹ [50]، پره‌های ورودی متغیر، کنترل گشتاور درایو² در اعمال کنترل فعال سرج به کار می‌روند. لذا به صورت خلاصه می‌توان گفت که هدف از اکتیو سرج کنترل، جابجایی خط سرج به افزودن تجهیزات ساختاری مختلف است [1]. نکته قابل ذکر این است که با وجود تحقیقات زیاد [58-61] در مورد روش‌های مختلف برای کنترل فعال سرج، این روش در حال حاضر در صنعت به صورت عملی کاربرد جدی ندارد زیرا مستلزم هزینه‌های زیاد اقتصادی است. در کنترل سرج با روش چرخه و شیر پاد سرج در شکل (2-7) و یا سایر روش‌های کنترلی، فرض بر این است که سیستم اندازه‌گیری متغیرهای تعیین کننده نقطه کار در

¹ Closed Coupled Valve

² Drive Torque Control

نمودار عملکرد، به صورت دقیق و درست عمل می‌کنند و دارای هیچ نوع عیبی نیستند. ولی در عمل این فرض همیشه درست نیست. چون هر سیستمی با عیب همراه است. وجود عیب در حسگرهای اندازه‌گیری فشار ورودی، خروجی، جریان، سرعت و دمای سیال قطعا موجب ایجاد عیب در تعیین محل دقیق نقطه‌کاری خواهد شد. لذا ممکن است سیستم در عمل در ناحیه سرج کار کند ولی عیبهای ناشی از اندازه‌گیری نقطه‌کاری را در محدوده مجاز نشان دهد و یا برعکس این مطلب اتفاق بیفتد. پس نتیجه گرفته می‌شود که عدم لحاظ عیب در حسگرهای اندازه‌گیری، موجب بروز عیب در تعیین دقیق نقطه کار می‌شود و عیب در تعیین نقطه‌کاری دستگاه باعث ایجاد عیب در سیستم تشخیص سرج و کنترل آن می‌گردد. در فصل قبل به تفصیل در شکل (1-1) مشکل عدم وجود سیستم تشخیص عیب در تعیین نقطه سرج توضیح داده شد.

2-5 نتیجه‌گیری

در این فصل آشنایی با شبکه انتقال گاز و کمپرسور گازها به عنوان جزء اساسی شبکه صورت گرفت. وقوع پدیده سرج به عنوان یکی از مشکلات اساسی کمپرسور گاز تشریح گردید و مشخص شد که برای تشخیص به موقع و درست این پدیده از روی نمودار عملکرد، لازم است سیستم اندازه‌گیری و حسگرهای مربوط به جریان، سرعت کمپرسور، فشار ورودی و خروجی کمپرسور بدون عیب عمل کنند. ولی واقعیت این است که عیب در حسگرهای مذکور همانند سایر سیستم‌های مهندسی جزء اجتناب‌ناپذیر سیستم است و اندازه‌گیری همراه با عیب، سیستم تشخیص سرج و به تبع آن سیستم کنترل سرج را دچار اشکال جدی خواهد کرد. نقطه کلیدی در این رساله رفع این مشکل است بدین ترتیب که با تشخیص به موقع و کنترل درست عیب در حسگرهای مذکور، می‌توان کیفیت سیستم تشخیص و کنترل سرج را بهبود داد و این بهبود قطعا می‌تواند در ارتقای بازدهی کل شبکه انتقال گاز موثر باشد.

فصل سوم:

طبقه بندی انواع عیب و خرابی و روشهای تشخیص عیب حسگرها

مقدمه

همانطوریکه در فصل قبل بحث گردید تشخیص به موقع و کنترل درست عیب در حسگرهای اندازه‌گیری جریان، سرعت، فشار ورودی و فشار خروجی کمپرسور، در عملکرد مطلوب سیستم تشخیص سرج و کنترل آن بسیار موثر است. لذا در این فصل ابتدا به بررسی مفاهیم اساسی در سیستم‌های تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر عیب پرداخته و روش‌های مرسوم تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر عیب در حسگرها ارائه می‌گردد و عوامل بروز عیب در کمپرسور مورد بررسی قرار خواهند گرفت، در ادامه سیستم تشخیص عیب فعلی و بکار رفته در کمپرسورها نیز مطالعه می‌شود.

3-1 مفاهیم اساسی

در شرایط عادی کاری، سیستم‌های کنترل متعارف می‌توانند عملکرد مطلوب را تضمین نمایند ولی وقتی عیبی در سیستم رخ می‌دهد، حفظ شرایط کاری عادی برای سیستم امری لازم و اغلب حیاتی است. در این بخش مفاهیم اساسی و کلیدی همچون عیب و خرابی و عملکرد بد و ویژگی‌های آنها را که در بحث تشخیص عیب¹ به کار می‌روند، معرفی خواهند شد. البته همانطوریکه در فصل اول ذکر گردید یک تعریف مشترک و واحدی از این مفاهیم در مجامع علمی و صنعتی وجود ندارد ولی به هر حال سعی خواهد شد تعریف مفاهیم از منابع معتبر و استاندارد مطرح گردد.

3-1-1 عیب و ویژگی‌های آن

در فصل اول، عیب به صورت زیر تعریف گردید:

عیب در یک سیستم عبارت است از یک انحراف ناخواسته حداقل در یک ویژگی مشخصه از حالت عادی/معمول/ استاندارد. اگر این عیب ناشی از اشتباه کاربر سیستم باشد آن را عیب

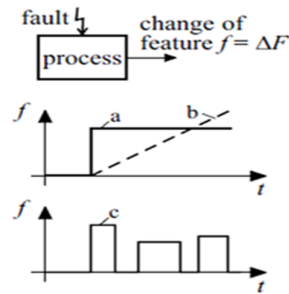
¹ Fault Detection, Isolation and Identification(FDII)

بهره‌برداری¹ می‌نامند که عیب بهره‌برداری نیز جزئی از مفهوم کلی عیب محسوب می‌شود. موارد زیر در خصوص عیب قابل تامل است [4]:

- 1) عیب حالتی از سیستم می‌باشد ولی آن حالتی که ناخواسته است.
 - 2) عیب ممکن است به وضوح و به راحتی قابل تشخیص و شناسایی نباشد و از تکنیک‌های ویژه‌ای باید در این صورت استفاده کرد.
 - 3) عیب ممکن است خیلی کوچک باشد و حتی در عملکرد کلی سیستم خللی ایجاد نکند.
 - 4) عیب ممکن است منجر به عملکرد سوء کلی سیستم شود.
 - 5) عیب ممکن است به صورت ناگهانی بروز کند و یا ممکن است در طول زمان رخ دهد.
 - 6) بروز عیب همواره در حالت روشن نیست و ممکن است سیستم در حال خاموش باشد ولی عیب در آن ایجاد شود.
- مدل‌سازی درست عیبها در اِعمال صحیح روش‌های عیب‌یابی و شناسایی و کنترل آن امری ضروری است. در ضمن برای بروز عیب در یک سیستم دلایل مختلفی وجود دارد که آنها را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد:

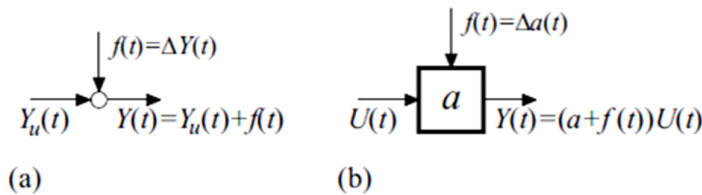
- 1- عیب حاصل از طراحی نادرست
 - 2- عیب حاصل از عملکرد نادرست
 - 3- عیب حاصل از فرسودگی و سپری شدن عمر مفید قطعات
- همچنین عیبها می‌توانند بر اساس تابع زمان به صورت ناگهانی رخ دهند و یا به مرور زمان ظاهر شوند. در شکل (3-1) انواع وابستگی عیبها به زمان مشاهده می‌شود [9]:

¹ Error



شکل (1-3) (a) عیب ناگهانی (b) عیب نرم (c) عیب متناوب¹

عیبها همچنین می توانند بر اساس دیاگرام های سیگنال به دو دسته جمع شونده و ضرب شونده تقسیم شوند که در شکل (2-3) نشان داده شده است:



شکل (2-3) (a) عیب جمع شونده (b) عیب ضرب شونده

عیب از نظر محل وقوع می تواند در سه بخش عملگر، حسگر و اجزای سیستم تحت کنترل رخ دهد [4 و 62]

الف) عیب عملگر

این عیب به صورت از دست رفتن بخشی از کنش کنترلی ظاهر می شود. برای مثال، گیر کردن یک عملگر به طوری که برای سیگنال ورودی از کنترل کننده، کنش به صورت کند انجام شود و یک نوع ضعف در کنش کنترلی محسوب می شود. عیب عملگرها همچنین می تواند ناشی از نشتی در سیستم های هیدرولیکی باشد. لازم به ذکر است که به دلیل بالا بودن هزینه و حجیم شدن کل سیستم، پشتیبانی و استفاده دوبله از عملگرها کاربرد زیادی ندارد.

¹(a) Abrupt (b) Incipient (c) Intermittent

ب) عیب حسگر

عیب حسگر می‌تواند به صورت‌های مختلف ظاهر شود. وجود مقدار بایاس در خروجی حسگر یکی از انواع معمول عیب در حسگرها است. به دلیل کوچک بودن حسگرها می‌توان از دو و یا چند حسگر برای بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم استفاده کرد. در خصوص عیب حسگر در بخش‌های بعدی مفصل بحث می‌شود.

ج) عیب اجزای سیستم تحت کنترل

این نوع عیب به صورت تغییر در پارامترهای داخلی سیستم ظاهر می‌شود، تغییر جرم و یا ضریب فنر در سیستم ساده جرم، فنر و دمپر می‌تواند نمونه‌ای از این دست عیبها باشد. فرسایش و خوردگی قطعات را نیز می‌توان در این قالب بررسی کرد.

3-1-2 خرابی یا شکست¹

خرابی یا شکست : عبارت است از یک انقطاع دائمی در توانایی سیستم برای انجام یک عمل مورد انتظار در شرایط کاری مشخص^[4]

1) بر خلاف عیب که حالتی از سیستم است خرابی یک رخداد و واقعه² است.

2) یک خرابی می‌تواند نتیجه یک و یا چندین رخداد باشد.

3) خرابی برای سیستم در حال کار تعریف می‌شود. چون معمولاً در شرایط خاص کاری و تحت فشار امکان وقوع آن زیاد می‌شود.

¹ Failure

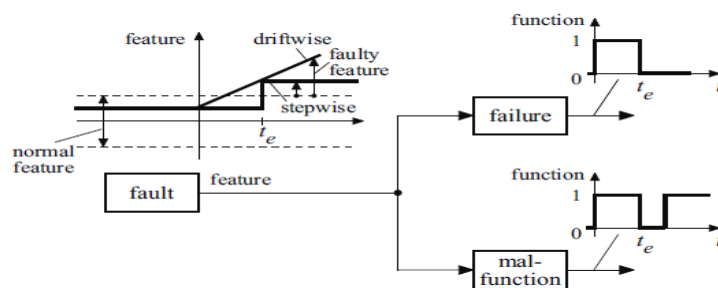
² Event

4) خرابی در یک سیستم می‌تواند به صورت تصادفی و احتمالی باشد. بدین صورت که امکان بروز یک خرابی می‌تواند مستقل از مدت زمان و یا وابسته به مدت زمان کار سیستم و یا سایر خرابی‌های سیستم باشد.

5) خرابی در یک سیستم می‌تواند قابل پیش‌بینی باشد به‌طوری‌که می‌توان با توجه به شرایط کاری معین سیستم و یا روابط علت و معلولی حاکم بر سیستم این پیش‌بینی را انجام داد.

3-1-3 عملکرد بد¹

عملکرد بد نیز تعریفی تقریباً همانند خرابی دارد با این تفاوت که در صورتی که یک سیستم دچار خرابی شود عملکرد سیستم کلاً مختل می‌شود ولی در عملکرد بد، سیستم می‌تواند بین حالت عادی و غیر عادی عملکرد نوسان داشته باشد [5] و [4]. عملکرد بد نیز همانند خرابی، یک رخداد بوده و می‌تواند نتیجه یک و یا چندین عیب باشد و در شرایط کاری خاص و حساس، امکان بروز عملکرد بد زیادتر می‌شود. در شکل (3-3) به صورت شماتیک تعاریف عیب، خرابی و عملکرد بد نشان داده شده است.



شکل (3-3) گسترش خرابی و یا عملکرد بد از یک عیب [4]

در جدول 1-3 مثال‌هایی از عیب، خرابی و عملکرد بد برای چندین سیستم الکتریکی، مکانیکی و نیوماتیکی آورده شده است.

¹ Malfunction

جدول 1-3 مثالهایی از عیب، خرابی و عملکرد بد

عیب	عارضه ¹	خرابی	عملکرد بد
-----	--------------------	-------	-----------

1. در سیستم روشنایی:

شل شدن کنتاکت‌های کلید	ایراد در رسانایی و انتقال جریان ولتاژ	-----	قطع و وصل روشنایی لامپ
قطعی کابل	ایراد در رسانایی و انتقال جریان ولتاژ	خاموشی	-----

2. در موتور الکتریکی:

سوختن فیوز	عدم برقراری جریان برق	از کار افتادن موتور speed=0	
خود گرمایی سیم‌پیچ و افزایش دما	افزایش مقاومت سیم‌پیچ		تغییر دور موتور

سایر مفاهیم همچون قابلیت اطمینان²، قابلیت نگهداری³، قابلیت دسترسی⁴ و ایمنی و امنیت⁵ به تفصیل در منابع آورده شده است [4-10].

همان‌طوری که در فصل قبل ذکر شد تمرکز این رساله بر روی عیب‌یابی حسگرهای جریان سیال، سرعت کمپرسور، فشار ورودی و خروجی سیال کمپرسور است و لذا موضوع عیب، خرابی و عملکرد بد در حسگرها توضیح داده می‌شود.

¹ Feature

² Reliability

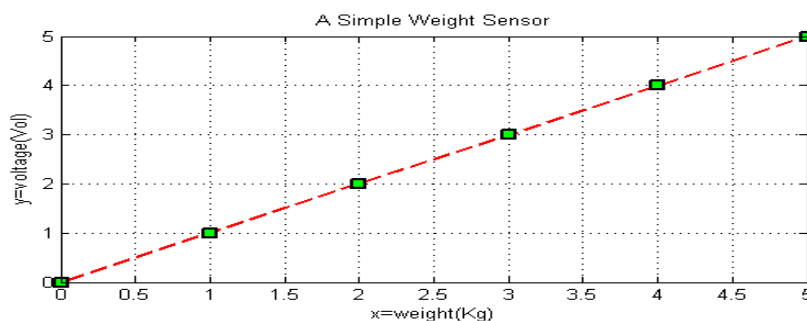
³ Maintainability

⁴ Availability

⁵ Safety & Security

حسگر به عنوان مبدل سیگنال می باشد که می توان آن را مبدل انرژی نیز نامید. مثلاً یک حسگر فشار، سیگنال و انرژی فشار را به سیگنال الکتریکی تبدیل می کند یا یک ترازو به عنوان مبدل وزن به سیگنال الکتریکی است. انواع حسگرهای مختلف با طرز عملکردهای متفاوت وجود دارند. وقوع عیب در حسگرها نیز همانند سایر سیستمهای مهندسی اجتناب ناپذیر است و لذا جهت تشخیص عیب در حسگر، لازم است در ابتدا با انواع عیب، خرابی و عملکرد بد در حسگر آشنا شد.

یک حسگر ساده وزن با متغیر ورودی x و متغیر خروجی y را در نظر بگیرید. متغیر x دارای واحد kg و متغیر y دارای واحد ولت است. در شکل (3-4)، رابطه این دو متغیر نشان داده شده است.



شکل (3-4) یک حسگر ساده وزن

در شکل (3-4) متغیرهای ورودی x و خروجی y دارای رابطه ساده زیر هستند:

$$y=m.x, m=1 \quad (v/kg) \quad (1-3)$$

اگر رابطه مذکور در واقعیت و برای داده های حاصل از اندازه گیری های عملی صادق باشد در این صورت این حسگر سالم است ولی اگر به جای رابطه (1-3) رابطه ای مانند (2-3) وجود داشته باشد در این صورت حسگر دارای عیب است:

$$y=mx+a \quad (2-3)$$

حالت های زیر را برای عیب و خرابی می توان متصور شد:

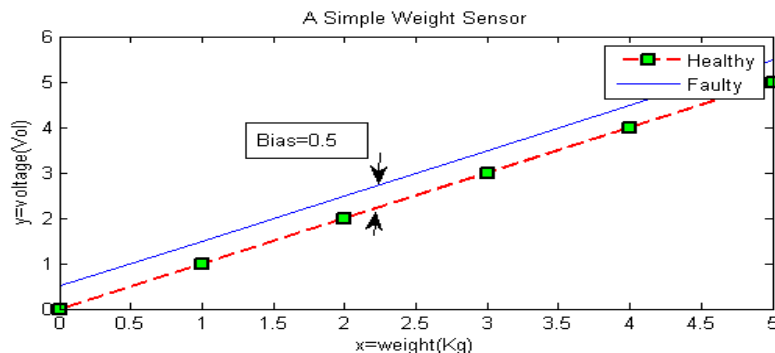
$$m=1, a=0 \quad \text{حالت الف) } :$$

حسگر سالم بوده و فاقد عیب است که در اصطلاح Fault Free نامیده می‌شود.

حالت ب) $m=1, a \neq 0$ (fixed)

حسگر عیب ثابت بایاس دارد. شکل (3-5)، حسگر مذکور را با مقدار عیب ثابت بایاس $a=0.5$ نشان

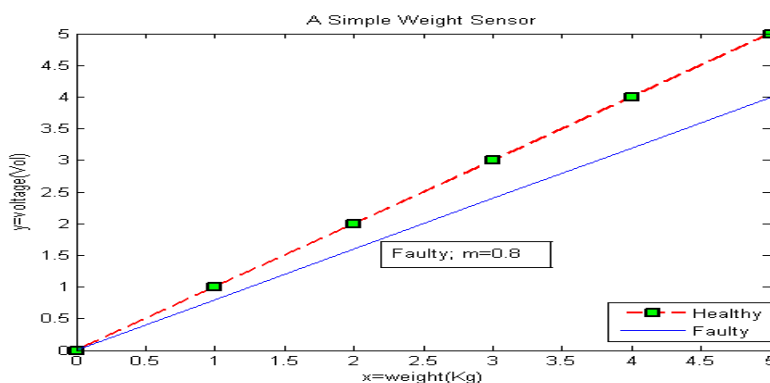
می‌دهد:



شکل (3-5) حسگر با عیب بایاس ثابت

حالت پ) $0 < m < 1, a=0$

در این حالت حسگر دچار مشکل "از دست دادن بهره وری"¹ شده است شکل (3-6)، حسگر مذکور را با مقدار ضریب $m=0.8$ نشان می‌دهد:

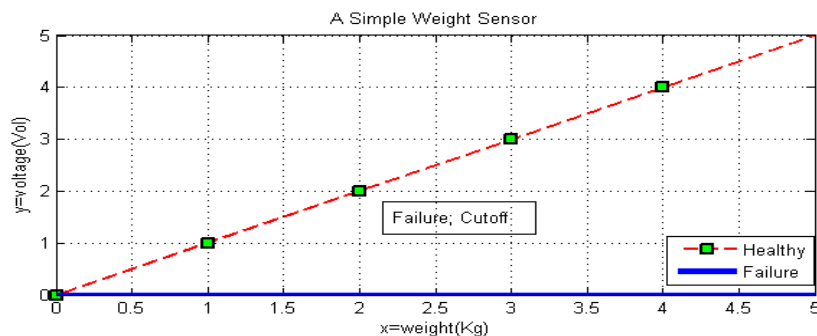


شکل (3-6) حسگر با عیب $m=0.8$

حالت ت) $m=0, a=0$

¹ Loss of efficiency

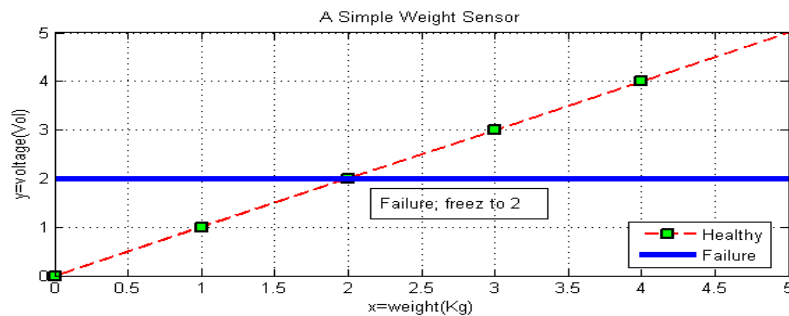
در این حالت حسگر قطع¹ است شکل (7-3)، حسگر مذکور را با مقدار ضریب $m=0.0$, $a=0$ را نشان می‌دهد:



شکل (7-3) حسگر با خرابی $m=0.0, a=0$

حالت ث $m=0.0, a=a1; 0 < a1$:

در این حالت خروجی حسگر از ورودی تاثیر نمی‌پذیرد و در یک مقدار ثابت به اصطلاح freeze می‌شود. در شکل (8-3) این حالت آورده شده است.

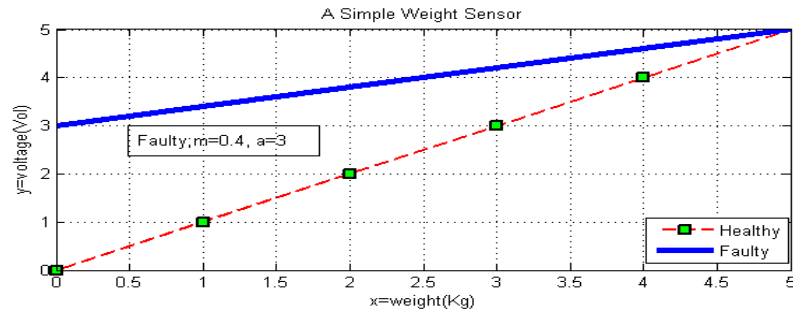


شکل (8-3) حسگر با خرابی $m=0.0, a=2$

حالت ج $0 < m < 1, a \neq 0$ ($0 < a$):

در این حالت حسگر در واقع دارای عیب جمعی بایاس و ضریبی توام می‌باشد. در شکل (9-3), $m=0.4$, $a=3$ نشان داده می‌شود.

¹ Cutoff



شکل (3-9) حسگر با عیب $m=0.4, a=3$

نکته بسیار مهم در مورد تشخیص عیب از خرابی این است که اکثر مواقع تاثیر نامطلوب عیب با طراحی جبرانگر و یا سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب قابل کاهش و یا حذف است. ولی در مورد خرابی این امکان وجود ندارد و بایستی سیستم تعمیر یا تعویض گردد. برای مثال حسگری که در حالت قطع است دیگر با روش‌های نرم‌افزاری قابل جبران نیست و باید تعمیر و یا تعویض گردد، ولی برای حسگری که فقط دارای بایاس روی سیگنال خروجی است امکان جبران آن توسط کنترل کننده وجود دارد. لذا با توجه به این نکته حالت‌های (ب)، (پ) و (ج) جزء سناریوهای عیب و حالت‌های (ت) و (ث) جز سناریوهای معیوب و خرابی‌دار هستند. یکی از ایده‌های نو که در این رساله به آن پرداخته می‌شود زمینه‌سازی برای امکان تشخیص عیب از خرابی برای حسگرهای کمپرسور و اعلان آن به بهره‌بردار است.

2-3 سیستم‌های تشخیص عیب و تشخیص خرابی در حسگرها

در بخش 1-3 گفته شد که در حسگرها می‌تواند عیب و یا خرابی رخ دهد و سناریوهای مختلفی در این زمینه مطرح شد. برای آنکه بتوان سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب را به طرز مناسبی طراحی کرد لازم است سیستم تشخیص عیب مطلوب را داشته باشیم. لذا کیفیت عملکرد سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب از نوع فعال، صد در صد به کیفیت و چگونگی سیستم تشخیص عیب بستگی دارد.

در رابطه (1-3) فرض بر این شد که حسگر دارای رابطه ساده $y=x$ است ولی برای آنکه به واقعیت نزدیک تر باشد؛ برای حسگرهای مورد استفاده در سیستم کمپرسور تعریف (1-3) در نظر گرفته می شود:

تعریف (1-3):

- 1- حسگرها دارای دینامیک سریع، ساده و از مرتبه اول است.
 - 2- حسگرها تقریباً خطی فرض می شوند.
 - 3- حسگرها در لحظه شروع تشخیص عیب کالیبره شده و سالم فرض می شوند و دارای تاییدیه معتبر کالیبره هستند.
- با در نظر گرفتن فرضیات مذکور، می توان رابطه (1-3) را به رابطه $y=m_0 x$ تغییر داد ولی حتی فرض $m_0=1$ نیز تاثیری بر تحلیل های ما در سیستم تشخیص عیب ندارد.
- همان طوری که در فصل اول ذکر شد سیستم های تشخیص عیب در سه دسته کلی زیر قابل طبقه بندی هستند:

- 1- سیستم تشخیص عیب مبتنی بر پشتیبان سخت افزاری،
 - 2- سیستم تشخیص عیب مبتنی بر پردازش داده
 - 3- سیستم تشخیص عیب مبتنی بر پشتیبان تحلیلی
- سیستم تشخیص عیب مبتنی بر پشتیبان سخت افزاری، در فرایندهای حیاتی و مهم به کار می رود. بدین ترتیب که برای عناصر مهم و کلیدی فرایند پشتیبان سخت افزاری به موازی عناصر اصلی تعریف می شود و اگر عنصر اصلی دچار عیب شود با مقایسه خروجی آن با خروجی عنصر پشتیبان عیب تشخیص داده می شود. این روش با وجود اینکه روش تقریباً مطمئنی است ولی به دلیل هزینه اولیه بالا و هزینه های تعمیرات و نگهداری ثانویه مقرون به صرفه نیست مگر برای

سیستم‌های خاص مانند نیروگاه‌های هسته‌ای. در ضمن این روش در سیستم‌هایی مانند هواپیما که وزن کل سیستم دارای اهمیت است و با پشتیبان سخت‌افزاری وزن کل سیستم بالا می‌رود قابل استفاده نیست. گاهی تعداد عناصر پشتیبان برای یک عنصر به 2 یا 3 عنصر هم می‌رسد و عنصر اصلی و عناصر پشتیبان همزمان کار می‌کنند. مثلاً برای اندازه‌گیری دمای آب یک راکتور اتمی از چهار عدد حسگر استفاده می‌شود و میانگین خروجی آنها به عنوان دمای راکتور است و اگر خروجی هر کدام از این چهار حسگر به صورت زیاد و معنادار از خروجی سه حسگر دیگر فاصله داشته باشد آن حسگر عیب‌دار محسوب می‌شود. برای آنکه ضریب اطمینان از عملکرد سیستم بالا برود معمولاً چهار حسگر مختلف و با روش‌های اندازه‌گیری متفاوت انتخاب می‌کنند تا اگر به دلیل شرایط محیطی ویژه‌ای، یکی دچار مشکل شد دیگری مشکل پیدا نکند. برای اجرای این سیستم، استانداردهای ویژه‌ای تحت عنوان "سیستم ایمنی یکپارچه"¹ تعریف شده است. بنا به دلایلی که برای اهمیت موضوع پایداری شبکه انتقال گاز در فصل اول آورده شد، گاهی، برای برخی از قطعات و تجهیزات کمپرسور نیز از این روش تشخیص عیب استفاده می‌شود.

ب) سیستم تشخیص عیب مبتنی بر پردازش داده: در این روش اطلاعات مهم سیستم در عملکرد واقعی هر لحظه اندازه‌گیری و رصد می‌شود و با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی حوزه زمان و فرکانس، برخی از موارد مهم از سیگنال‌ها استخراج می‌گردد و با اطلاعات مفیدی که قبلاً از سیستم عادی و سالم حاصل شده است مقایسه می‌شود. ساده‌ترین روش، مقایسه دامنه سیگنال سیستم با عملکرد واقعی با یک مقدار معین (مقدار آستانه) است که به این روش در اصطلاح "تست محدوده"² می‌گویند و در حال حاضر سیستم تشخیص عیب در کمپرسورها بر اساس این روش ساده عمل می‌کند. در بخش مربوط به مروری بر سیستم تشخیص عیب موجود در کمپرسور، این روش به تفصیل و با واقعیت‌های عینی مطالعه می‌شود. البته سایر شاخص‌ها همچون طیف توان، مشخصات

¹ Integrated Safety Level (SIL)

² Limit Checking

آماري و غيره نيز مي‌تواند در سيستم تشخيص عيب مبتني بر پردازش داده مورد بررسي و مقايسه قرار گيرد.

ايده اساسي در روش تشخيص عيب مبتني بر پشتيبان تحليلي، طراحي يك مدل براي سيستم واقعي است كه اين مدل مي‌تواند به سه صورت به دست آيد:

- 1- با استفاده از معادلات رياضي و فيزيكي حاكم بر سيستم (روش كمی¹)
- 2- با استفاده از قواعد حاكم بر رفتار و ديناميك سيستم (روش كيفي²)
- 3- با استفاده از داده‌هاي مستخرج از سيستم در حالت كار (روش داده رانده³)

در روش كمی بايستي بر تمامي معادلات رياضي و فيزيكي حاكم بر سيستم و همچنين پارامترهاي سيستم مسلط بود، در غير اينصورت اين روش كارايي لازم را ندارد. در سيستم‌هاي ساده اين تسلط مي‌تواند مقدور باشد ولي در سيستم‌هاي پيچيده اين موضوع امكان پذير نيست. روش كمی مي‌تواند با سه ابزار رويتگرها، فضاي تعادلي و متدهاي حوزه فرکانس پياده سازي شود. در سال 1971 اولين كار تحقيقاتي در زمينه مدل‌هاي كمی با استفاده از رويتگرها انجام شد. [64] و [63] ايده اصلي در رويتگرها عبارتست از تخمين خروجي‌ها با اندازه‌گيري‌هاي لازم. اين رويتگرها مي‌توانند براي فرايندهاي با ساختار معلوم، آماری و يا فرايندهاي اتفاقي طراحي شوند. لذا با توجه به شرايط مختلف مي‌توان از رويتگرهاي خطي، غير خطي، مرتبه کاهش يافته، مرتبه كامل، ثابت و يا تطبيقي استفاده كرد. در طراحي رويتگرها برخي از محدوديتها و شرايط همچون آفاين⁴ و يا ليپشيتز⁵ بودن بايستي در مدل سيستم وجود داشته باشد در واقع طراحي رويتگر بدون وجود قيود مذکور مشکل و گاهي غير ممكن است.

¹ Quantitative model- based approach

² Qualitative model- based approach

³ Data-driven approach

⁴ Affine

⁵ Lipschitz

ایده اساسی در روش فضای برابری یا تعادلی¹ چک کردن تعادل مدل‌های سیستم با خروجی‌ها و ورودی‌های معلوم فرایند است. در این روش ساختار مدل جهت به دست آوردن بهترین حالت ایزوله کردن عیب، آرایش مجدد پیدا می‌کند. در سال 2000 روابط تعادلی دینامیکی مطرح گردید [49].

متدهای حوزه فرکانس را روش فاکتورگیری نیز می‌نامند. در حوزه فرکانس با فاکتورگیری از تابع تبدیل سیستم، مانده ایجاد می‌شود. در مرجع [50] مطالعه‌ای در خصوص شباهت تولید مانده به روش رویتگرها و روش فاکتورگیری در سیستم‌های خطی صورت گرفته است. برای آگاهی بیشتر در زمینه روش حوزه فرکانس مرجع [51] مطالعه گردد.

در روش کیفی، ساختار دقیق سیستم، پارامترهای فیزیکی و روابط ریاضی توصیف‌گر برای ما معلوم نیست ولی قواعد حاکم بر سیستم به صورت گزاره‌های "اگر... آنگاه" برگرفته از تجربه انسانی و یا گراف‌های مبین رفتار فرایند به صورت روابط علت و معلولی و تحلیل درختی برای ما معلوم است و فی‌الواقع مدل به صورت خاکستری قابل تعریف است. متدهای گراف‌های جهت‌دار با علامت²، تحلیل درختی عیب³، توصیف کیفی فیزیکی⁴، سیستم‌های خبره⁵ و تحلیل روند کیفی⁶ از ابزارهای مورد استفاده در روش کیفی هستند. اگرچه مدل‌سازی کیفی برای تشخیص عیب در عمل کارایی زیادی دارد ولی دارای عیوب عمده‌ای نیز هست. اگر رفتار سیستم تغییر پیدا کند اصلاح قواعد و موتور استنتاج مشکل است. در ضمن برای فرایندهای بسیار پیچیده، امکان شناخت همه ابعاد عملکردی و رفتاری سیستم وجود ندارد. لذا در برخی از منابع به این ایده، "روش کم عمق و یا سطحی"⁷ نیز می‌گویند. به همین دلیل در عمل برای سیستم‌های صنعتی و پیچیده کارایی زیادی پیدا نکرده است.

¹ Parity Space

² Signed Digraphs

³ Fault Tree Analysis

⁴ Qualitative physics approach(QPA)

⁵ Expert System

⁶ Qualitative trend analysis approach

⁷ Shallow method

در این رساله نیز از این روش برای مدل سازی سیستم کمپرسور استفاده نمی شود. جهت توضیح بیشتر در مورد این روش، مرجع [20] مطالعه شود. در این مقاله به صورت مفید و اجمالی این روش تشریح گردیده است.

در روش سوم یعنی روش پشتیبان تحلیلی یا همان روش داده رانده، اساسا هیچ گونه شناختی از ساختار فیزیکی و معادلات ریاضی حاکم بر سیستم در دسترس نیست و سیستم کاملا به صورت جعبه سیاه فرض می شود و فقط داده های سیگنال های ورودی و خروجی از سیستم در دسترس است. برای طراحی سیستم تشخیص عیب به روش داده مانده، از دانش "محاسبات نرم"¹ استفاده می کنند. چون در این رساله برای تشخیص عیب در کمپرسور از روش داده رانده و محاسبات نرم نیز استفاده می شود؛ لذا به طور جداگانه این مطلب در ادامه مورد بررسی بیشتر قرار می گیرد.

محاسبات نرم یک زمینه علمی جدید چند رشته ای² است که توسط دکتر لطفی زاده مطرح گردید [54]. برای برخی از مسایل دنیای واقعی که مدل سازی و حل آنها با روابط و معادلات ریاضی متعارف و معمول امکان پذیر نیست و یا بسیار مشکل است از محاسبات نرم استفاده می شود. این گونه از مسایل معمولا دارای دینامیک بسیار پیچیده و یا فازی هستند. هسته مرکزی محاسبات نرم به تلفیق مجموعه های فازی، شبکه های عصبی و الگوریتم ژنتیک برمی گردد. مزایای کاربرد محاسبات نرم در واقع در دو دسته قابل بررسی است. دسته اول برای حل معادلات غیرخطی (که با ریاضیات معمول قابل حل نیستند) و برای مدل سازی و حل سیستم هایی که توسط روابط و معادلات ریاضی قابل حل و توصیف نیستند؛ کاربرد داشته و دسته دوم به استفاده از دانش بشری همچون شناخت، درک و یادگیری بشری در حل مسایل مرتبط است. بعد از معرفی این شاخه علمی، کارهای پژوهشی زیادی روی این مطلب انجام گرفت در سال 2001 محققین مفاهیم دیگری همچون مجموعه های

¹ Soft Computing

² Multidisciplinary

خشن¹، محاسبات تکاملی² را به این موضوع اضافه کردند. در تحقیقات بعدی تئوری آشوب³ و تئوری شبکه‌های ایمن⁴ به این بحث اضافه گردید و تحت عنوان محاسبات نرم گسترده⁵ مطرح گردید[4]. بعد از حصول مدل از روش پشتیبان تحلیلی، در هر لحظه رفتار سیستم واقعی و مدل شده مقایسه می‌گردد و سیگنال مانده⁶ تولید می‌شود و سپس در بلوک بعدی به نام بلوک "منطق تصمیم‌گیری"⁷ با توجه به سیگنال مانده، عیب تشخیص داده می‌شود. بلوک‌های تولید مانده و تصمیم‌گیر منطقی را در مجموع بلوک "ارزیابی مانده"⁸ می‌نامند. در مقام مقایسه، نمی‌توان یک روش را در حالت کلی به روش دیگر ترجیح داد و انتخاب روش مناسب علاوه بر میزان و نوع دانش ما از سیستم به پارامترهای مختلف دیگری همچون ساختار سیستم، درجه اهمیت سیستم، سرعت پردازش، تاخیر زمانی پردازش و غیره بستگی دارد. مثلاً برخی از مواقع لازم است اطلاعات به دست آمده از سیستم تشخیص عیب در قالب و فرمت خاصی به خود سیستم پس‌خورانده شود و یا در سایر فرایندهای کنترلی همچون طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب به کار رود و این شاخص نیز در انتخاب روش مناسب باید مد نظر قرار گیرد.

در سیستم‌های مدرن برخی از مواقع امکان مدل‌سازی فقط صرفاً با یکی از روش‌های تحلیلی وجود ندارد و یا بسیار مشکل است و لذا در این حالت بایستی از روش‌های ترکیبی بهره گرفت. این روش‌ها از ادغام دو روش حاصل می‌شود مثلاً گاهی فقط داده از سیستم در دسترس است و از روش "زیر فضا" مدل فضای حالت سیستم استخراج می‌شود و بعد از آن از روش تحلیلی نوع اول استفاده می‌شود و از رویکردهای حالت برای تولید مانده استفاده می‌شود یا گاهی ممکن است مدل سیستم

¹ Rough Set

² Evolutionary Computing

³ Chaos Theory

⁴ Immune Networks Theory

⁵ Extended Soft Computing

⁶ Residual Signal

⁷ Decision logic

⁸ Residual evaluation

علاوه بر اینکه به صورت خاکستری فرض شود دارای یک سری داده خروجی و ورودی قابل دسترسی نیز باشد. در این صورت می‌توان از شبکه‌های عصبی-فازی جهت مدل‌سازی استفاده کرد.

3-3 سیستم تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور

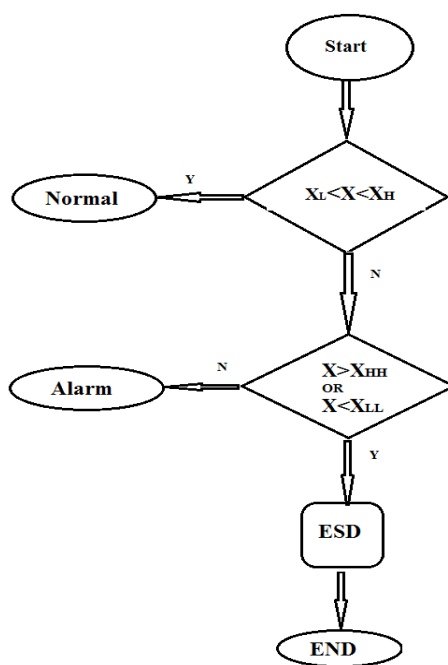
در تاسیسات تقویت فشار گاز برای تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور از روش ساده "تست محدوده" استفاده می‌شود. این روش ابتدایی‌ترین روش عیب‌یابی است با روش تست محدوده می‌توان دو فاز عیب‌یابی و ایزوله کردن عیب را پیاده‌سازی نمود. به عبارت دیگر با این روش می‌توان در قدم اول در مورد سالم یا عیب دار بودن سیستم اطلاع حاصل کرد و زمان و محل (کدامین حسگر) وقوع عیب با این روش قابل تشخیص است ولی در مورد اندازه عیب و رفتار دینامیکی عیب به ما اطلاعاتی نمی‌دهد.

شایان ذکر است که تست محدوده با مقادیر ثابت، ایده اولیه عیب‌یابی است ولی در ایده‌های جدید از مرزهای تطبیقی جهت عیب‌یابی استفاده می‌شود. روش تست "سوق و تمایل"¹ نیز شبیه ایده تست محدوده است با این تفاوت که در این روش روند تغییرات سیگنال را در نظر می‌گیرند و حتی می‌توان این روش را با ایده تست محدوده ادغام کرد. در جهت تکمیل ایده قدیمی تست محدوده، کارهای دیگری همچون تست تغییر محدوده میانگین و واریانس و یا نگاه فازی به مرزها و تطبیق مرزها با ساختار سیستم‌های متغیر، انجام شده است.

در سیستم کنترل کمپرسور، متغیرها و پارامترهای مهم سیستم برای کاربر یا ناظر نشان داده می‌شود و بر اساس مقادیر مطلوب و مقادیر واقعی نمایش داده شده در هر لحظه، سیستم تشخیص عیب می‌تواند بروز عیب در سیستم را تشخیص دهد. مثلاً در مدارک مربوط به سیستم کنترل کمپرسور تاسیسات تبریز مشاهده می‌شود که یک سیگنال آنالوگ که از یک ترانس‌میتور اندازه‌گیری

¹ Trend

ارتفاع روغن مخزن سیستم روغن کاری کمپرسور از دستگاه به قسمت سیستم کنترل و نظارت¹ ارسال می‌شود دارای محدوده کاری 0 تا 813 میلی‌متر بوده و حد پایین سیگنال که متناسب با آژیر هشدار است برابر با 633 میلی‌متر و حد بالای آژیر هشدار متناسب با 733 میلی‌متر می‌باشد. حد پایین و بالای توقف اضطراری² به ترتیب برابر با 583 و 783 میلی‌متر است که با عبور از این محدوده‌ها، سیستم بایستی به حالت ایمن برود و بر اساس مباحث مطرح در مدیریت ریسک³ سیستم در حالت ایمن بایستی از سرویس خارج شود. پس الگوریتم ساده سیستم تشخیص عیب به روش تست محدوده به شکل (10-3) است:



شکل (10-3) الگوریتم ساده روش تست محدوده

در این نوع تشخیص عیب، مشکلاتی به شرح ذیل وجود دارد:

1- ابتدایی بودن سیستم

2- عدم وجود سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب

¹ Supervisory and Control System

² Emergency Shutdown(ESD)

³ Risk Management

3- کاربرد صرفا مانیتورینگ آن

به جز موارد محدود که سیگنال توقف اضطراری تولید می‌شود در بقیه موارد سیستم تشخیص عیب فقط دارای کاربرد مانیتورینگ است. لازم به توضیح است که هر بار توقف اضطراری منجر به کاهش طول عمر مفید سیستم می‌شود و لذا اگر سیستم تشخیص عیب به صورت کاذب منجر به توقف اضطراری شود مضرات زیادی به همراه خواهد داشت.

4- عدم ارایه اطلاعات در مورد مقدار، نوع عیب و رفتار دینامیکی آن

5- عملکرد نادرست سیستم تشخیص سرج در صورت عیب دار بودن حسگرها.

6- توقف‌های اضطراری کاذب

7- مشکل اعمال تشخیص عیب برای تمامی سیگنال‌ها

اگر حتی فرض کنیم برای همه سیگنال‌ها سیستم تشخیص عیب در نظر گرفته شود؛ در این صورت آیا بهره‌بردار می‌تواند نسبت به همه آنها واکنش نشان دهد؟

به مشکلات مذکور می‌توان ایراد زیر را نیز اضافه کرد. با توسعه اندازه سیستم، حتی اگر امکان لیست نمودن تمامی متغیرها و پارامترهای مهم و شناسایی عیب آنها برای سیستم کنترلی مقدور باشد ولی قطعاً برای بهره‌بردار امکان اتخاذ عکس‌العمل مناسب در زمان لازم وجود ندارد و لذا هر چقدر سیستم از لحاظ سخت‌افزاری گسترش یابد این امکان ضعیف‌تر می‌شود. مثلاً در سیستم کنترل کمپرسور، بالغ بر 78 سیگنال وجود دارد که بایستی بهره‌بردار همواره به مقادیر آنها و سوق و تمایل آنها توجه نماید.

شایان ذکر است که در بین تمامی موارد مطرح شده، عملکرد نادرست سیستم تشخیص سرج کمپرسور در صورت عیب دار بودن حسگرها دارای اهمیت زیادی است و لذا در این رساله هدف از طراحی و اعمال سیستم تشخیص عیب، استفاده از نتایج آن در سیستم تشخیص به موقع و درست سرج و کنترل آن است. امکان مدیریت عیب و جبران آن نیز از دیگر اهداف رساله است.

3-4 نتیجه گیری

مفاهیم اولیه و اساسی در زمینه سیستم تشخیص عیب و دسته‌بندی روش‌های تشخیص عیب در این فصل آورده شد. از مطالب ارائه شده در این فصل مشخص شد که سیستم تشخیص عیب موجود در کمپرسور یک سیستم ساده و مبتنی بر تست محدوده است و معایب این سیستم توضیح داده شد. به لزوم به کارگیری سیستم تشخیص عیب مدرن و کارا در کمپرسور برای عملکرد درست سیستم تشخیص سرج کمپرسور اشاره گردید و در فصل‌های بعدی موضوع طراحی و پیاده سازی سیستم تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور مطرح خواهد شد.

فصل چهارم:

روشهای تشخیص عیب حسگرها مبتنی بر داده

مقدمه

در فصل قبل سیستم تشخیص عیب موجود و بکاررفته فعلی برای حسگرهای کمپرسور کاملاً تشریح گردید و مشکلات این سیستم به تفصیل بیان گردید. در این فصل، در بخش اول سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی شبیه سازی شده و نتایج آن به طور کامل توضیح داده خواهد شد. در بخش دوم روش تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم مبتنی بر مد لغزشی تشریح می‌گردد و متعاقباً نتایج شبیه سازی ارائه می‌شود. در نهایت در بخش سوم، ایده رگرسیون بردارهای پشتیبان معرفی می‌شود و سیستم تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور گاز با استفاده از این ایده طراحی می‌گردد.

1-4 سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی

در معرفی سیستم تشخیص عیب مناسب برای هر سیستم مهندسی، بایستی به چند سوال مهم، کلیدی و اساسی زیر در ابتدای طراحی پاسخ داده شود:

- 1- اهمیت دستگاه و اعمال سیستم تشخیص عیب برای ما چقدر است؟ و چقدر حاضریم برای ایمنی سیستم هزینه کنیم؟
- 2- چه نوع و به چه میزان اطلاعات و دانش از دستگاه و سیستم در دسترس است؟
- 3- آیا در همه اجزای سیستم، همچون حسگرها، محرکه‌ها و اجزای اصلی سیستم عیب رخ خواهد داد؟
- 4- نتایج حاصل از سیستم تشخیص عیب بایستی در چه حدی باشد و در چه فرمت و قالبی؟
- 5- آیا از نتایج آن در سایر بخش‌ها و سیستم‌ها استفاده خواهد شد؟

پاسخ درست و کامل به هر یک از سوالات مذکور یقیناً در انتخاب سیستم تشخیص عیب مناسب رهگشاست. برای داشتن دید بهتر به موضوع، در مورد سوالات مذکور توضیحات بیشتری به شرح ذیل ارائه می‌شود:

پاسخ سوال 1- اهمیت دستگاه و سیستم تشخیص عیب از ابعاد مختلف قابل بررسی است. یکی از این ابعاد اهمیت سیستم از دیدگاه ملاحظات ایمنی است. به بیان بهتر در صورت بروز مشکل فنی و از کار افتادن سیستم در بدترین حالت چه صدمات جانی، مالی، زیست‌محیطی و امنیتی و اجتماعی به بار خواهد آمد. برای مثال صدمات ناشی از خراب شدن و از کار افتادن یک هواپیما در اوج پرواز با چند صد نفر مسافر و یا انفجار یک نیروگاه هزار مگاواتی هسته‌ای در حال کار با صدمات ناشی از خراب شدن و از کار افتادن یک خودرو شخصی در جاده و یا از کار افتادن یک پمپ چاه کشاورزی برابر است؟ قطعاً پاسخ به این سوال منفی است لذا هزینه‌ای که برای تامین ایمنی و تضمین کار درست و مداوم یک خودرو صرف می‌شود به مراتب کمتر از هزینه صرف شده برای یک هواپیما است. همان‌طوری‌که پیشتر ذکر شد در هواپیما، نیروگاه هسته‌ای و سایر سیستم‌های مشابه برای بالا بردن ضریب ایمنی سیستم از روش پشتیبان سخت‌افزاری استفاده می‌شود که هزینه بالایی نیز دربردارد. در کمپرسورها نیز که در شبکه انتقال گاز به کار می‌رود در برخی از مواقع از این روش استفاده می‌شود ولی یک روش توجیه‌پذیر از نظر مالی نیست. لذا استفاده از روش تشخیص عیب با پشتیبان سخت‌افزاری برای حسگرهای کمپرسور در این رساله رد می‌شود.

پاسخ سوال 2- در مطالب پیشین بر اهمیت میزان و نوع دانش ما در انتخاب روش تشخیص عیب اشاره کاملی شد. همان‌طوری‌که در فصل دوم بحث شد در خصوص مدل‌سازی کمپرسورها کارهای تحقیقاتی زیادی صورت گرفته است ولی مدل مور-گریتر در مباحث مهندسی کنترل دارای کاربرد ویژه‌ای است. این مدل دارای ساختار غیرخطی بوده و با معادلات فضای حالت بیان می‌گردد. همچنین اشاره شد که علیرغم کاربردی بودن این مدل در مقالات و تحقیقات کنترلی، در کارهای

عملی و واقعی کارایی ضعیفی دارد. علت اصلی این کارایی ضعیف، لحاظ نشدن تمامی متغیرها و پارامترهای دخیل در ساختار واقعی کمپرسور در این مدل است و ذکر شد که برای به دست آوردن نمودار عملکردی کمپرسور، سازندگان از روش‌های تست تجربی و آزمایشگاهی استفاده می‌کنند. در این فصل رساله از روش داده رانده برای تشخیص عیب استفاده می‌شود. لذا برای تولید داده‌ها جهت طراحی سیستم تشخیص عیب، مدل مور-گریترز در محیط نرم‌افزاری متلب¹ شبیه‌سازی می‌شود. قطعا بهره‌گیری از داده‌های واقعی و عملی برای طراحی سیستم تشخیص عیب بهتر و کاربردی‌تر است و حتی می‌توان نتایج تحلیل را روی سیستم واقعی و عملی کمپرسور پیاده‌سازی کرد با اجرای فایل مدل، داده‌های متغیرهای جریان سیال، سرعت کمپرسور، فشار ورودی و خروجی کمپرسور از آن استخراج گردید و به عنوان داده‌های واقعی در نظر گرفته شد و چون در محیط نرم‌افزاری مدل سیستم وجود دارد، لذا برای اعتبارسنجی تحلیل و طراحی انجام شده، می‌توان سیستم تشخیص عیب طراحی شده را شبیه‌سازی کرد. از پاسخ ارائه شده به این سوال این جمع‌بندی حاصل می‌شود که از روش مبتنی بر داده برای طراحی سیستم تشخیص عیب در این فصل بهره گرفته و برای تولید داده‌های لازم برای طراحی، مدل مور-گریترز به کار گرفته خواهد شد.

پاسخ سوال 3- عیب فقط در سیستم حسگر و اندازه‌گیری لحاظ می‌شود و در این رساله فرض بر این است که در ابتدای کار حسگرها کالیبره شده‌اند و صحت عملکرد آنها به تایید رسیده است و لذا دسترسی به داده‌های سالم برای تحلیل کاملاً مقدور است.

پاسخ سوال 4 و 5- هدف از تشخیص عیب فقط مانیتورینگ نیست و نتایج حاصل از اجرای سیستم تشخیص عیب حسگرهای کمپرسورها در سیستم تشخیص سرج کمپرسور نیز استفاده خواهد شد و در طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب نیز از نتایج آن بهره گرفته خواهد شد. از پاسخ به

¹ Matlab

این سوال مشخص می‌شود که همه اطلاعات عیب از جمله نوع، تعیین حسگر عیب دار، زمان وقوع، اندازه و شکل موج عیب نیز مورد نیاز است.

4-1-1-4 نتایج شبیه‌سازی طراحی سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی

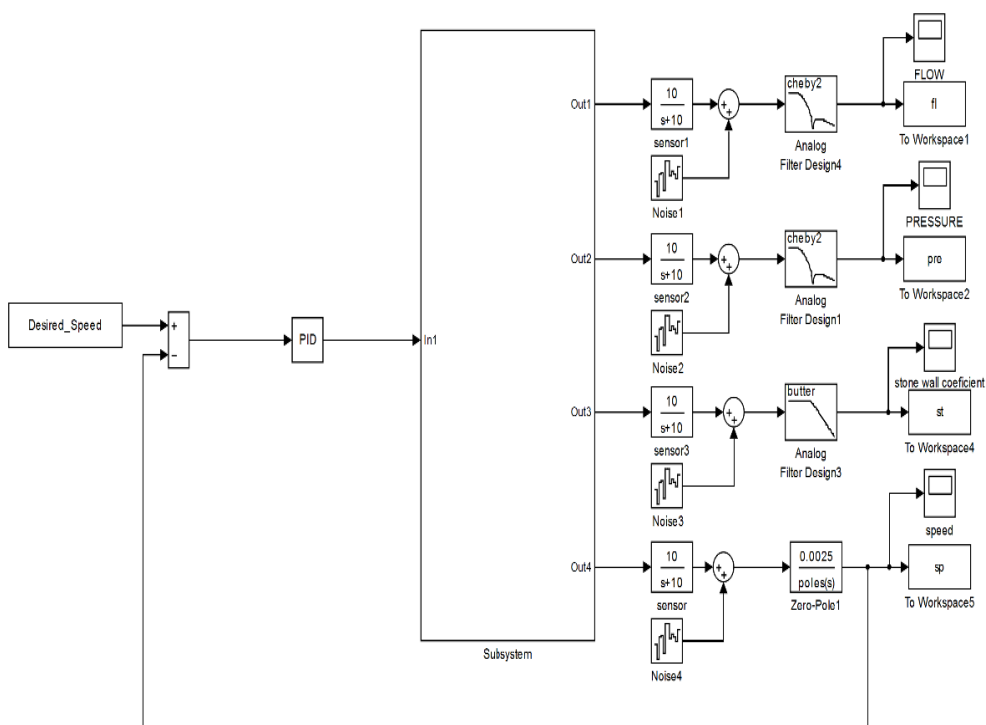
همان‌طوری که پیشتر ذکر شد در گام اول بایستی داده‌های لازم برای طراحی سیستم تشخیص عیب با شبیه‌سازی مدل مور-گریتر کمپرسور در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب به دست آید. در گام دوم، سیستم مذکور با در نظر گرفتن چهار حسگر با ویژگی‌های ذکر شده در فصل 3، تعریف (3-1)، با یک کنترل کننده کلاسیک PID به صورت حلقه بسته کنترل می‌شود. تا خروجی سرعت مطلوب و یا به تبع آن فشار خروجی مطلوب بدست آید. برای هر یک از حسگرها یک فیلتر مناسب طراحی شده و با اعمال نویز به خروجی حسگرها به صورت تجمعی، پاسخ هریک از سیگنال‌ها با فیلتر به دست می‌آید. در شکل (4-1) سیستم کنترلی حلقه بسته مشاهده می‌شود. شکل (4-2) مدل شبیه‌سازی شده کمپرسور را نشان می‌دهد. برای آنکه پاسخ مطلوب به دست آید ضرایب $K_p=8$, $K_i=0.01$, $K_d=0$ انتخاب می‌شود. هدف از این انتخاب شباهت هر چه بیشتر کنترل کننده به واقعیت است. چون در صنعت معمولاً از کنترل کننده‌های PI برای کنترل فرایند کمپرسور استفاده می‌شود. در رابطه (2-3) متغیرهای حالت عبارت بودند از: Ψ, Φ, J, B که Ψ بیانگر فشار بدون بعد، Φ بیانگر جریان میانگین بدون بعد، B بیانگر سرعت کمپرسور و J ضریب خفگی¹ است. اگر $J>0$ باشد در این صورت کمپرسور در ناحیه خفگی کار می‌کند و $J=0$ نشان می‌دهد که کمپرسور خارج از ناحیه خفگی کار می‌کند. نکته مهم دیگر آن است که متغیرهای حالت مذکور Ψ, Φ, J, B به عنوان متغیرهای خروجی مدل و یا همان سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری و ورودی حسگرها در نظر گرفته می‌شوند و خروجی نهایی سیستم کنترل حلقه بسته با وجود حسگرها، نویز، فیلترهای حذف نویز و سیگنال‌های عیب عبارتند از:

¹ Stone wall Coefficient

$$Y = [\text{Flow, Pressure, Speed}]$$

(1-4)

در این رساله فرض می‌شود که کمپرسور همواره به دور از ناحیه خفگی کار می‌کند؛ لذا مقدار ضریب خفگی را تقریباً صفر فرض کرده و فقط با سه متغیر باقی‌مانده کار خواهد شد.



شکل (1-4) سیستم کنترل حلقه‌بسته کمپرسور با کنترل کننده کلاسیک PI

خروجی هر حسگر همواره با نویز همراه است لذا در گام اول برای حذف نویز از سه نوع

مختلف نویزگیر به شرح ذیل استفاده می‌شود: برای سیگنال‌های جریان و فشار از فیلتر چیبیشف¹

نوع دو با مرتبه 3 استفاده می‌شود و برای سیگنال خفگی از فیلتر باتروث² از مرتبه 4 استفاده

می‌شود. برای سیگنال سرعت نیز یک فیلتر پایین‌گذر از مرتبه دو طراحی می‌شود. البته علاوه بر

فیلتر از بهره ثابت به عنوان تطبیق دهنده سیگنال³ استفاده می‌شود.

¹ Chebyshev

² Butter worth

³ Signal conditioner

با توجه به تجارب عملی کار با کمپرسور، بررسی پاسخ زمانی سیستم در یک حلقه کنترلی بسته ساده و مطالعه مدل مور-گریترز موارد زیر در ارتباط با رفتار دینامیکی و مشخصه‌های مدل قابل تأمل است:

1- در این رساله متغیر ضریب خفگی تقریباً صفر فرض می‌شود و صفر بودن آن به این معنا است که نقطه کاری سیستم از ناحیه خفگی دور است. متغیرهای جریان و افزایش فشار کمپرسور طی یک سری محاسبات ریاضی به متغیر بدون بعد تغییر ماهیت داده است و متغیر سرعت کمپرسور بیانگر سرعت روتور است و دارای دیمانسیون متر بر ثانیه است.

2- توربوکمپرسور جزء دستگاه‌های سنگین مکانیکی محسوب می‌شود و اساساً نمی‌تواند دینامیک سریعی داشته باشد زیرا دستگاه محرک آنها یعنی توربین گازی خود دستگاه‌کننده می‌باشد. این مطلب در پاسخ‌های به دست آمده از سیستم به وضوح قابل درک است. در عمل و در تجربه نیز این مطلب قابل لمس است.

3- کمپرسورها همانند اکثر سیستم‌های مکانیکی دارای ساختاری پایدار هستند ولی از دیدگاه تحلیل ریاضی، پایداری آن با استفاده از مدل مور-گریترز قبلاً در طی کارهای تحقیقاتی به اثبات رسیده است که در فصل دوم موضوع پایداری مدل مور-گریترز مورد بررسی واقع گرفت.

4- همان‌طوری که در فصل دوم ذکر گردید برای کنترل کمپرسور، از متغیر سرعت فیدبک گرفته می‌شود. ولی در عمل آنچه که در تاسیسات تقویت فشار گاز اتفاق می‌افتد این است که بر اساس تجربه، کاربر دستگاه می‌داند که برای افزایش فشار خروجی به اندازه 10 درصد در یک نقطه کاری معین بایستی چقدر سرعت کمپرسور را افزایش دهد. لذا هدف اصلی از کنترل، تنظیم فشار خروجی است که برای تنظیم آن نیز بر حسب تجربه کاری، بهره‌بردار سرعت کمپرسور را تنظیم می‌کند.

خروجی مطلوب برای سیگنال‌های ضریب جریان سیال، ضریب فشار کمپرسور، ضریب خفگی و سرعت کمپرسور به ترتیب 0/55 (بدون بعد)، 0/65 (بدون بعد)، 0 (بدون بعد) و 70 متر بر ثانیه تعریف می‌شوند و خروجی‌های واقعی در حالت پایدار با مقادیر خطاهای ماندگار زیر به خروجی‌های مطلوب رسیده‌اند.

خطای حالت پایدار سیگنال جریان $\pm 2/78\%$

خطای حالت ماندگار سیگنال فشار $\pm 0/82\%$

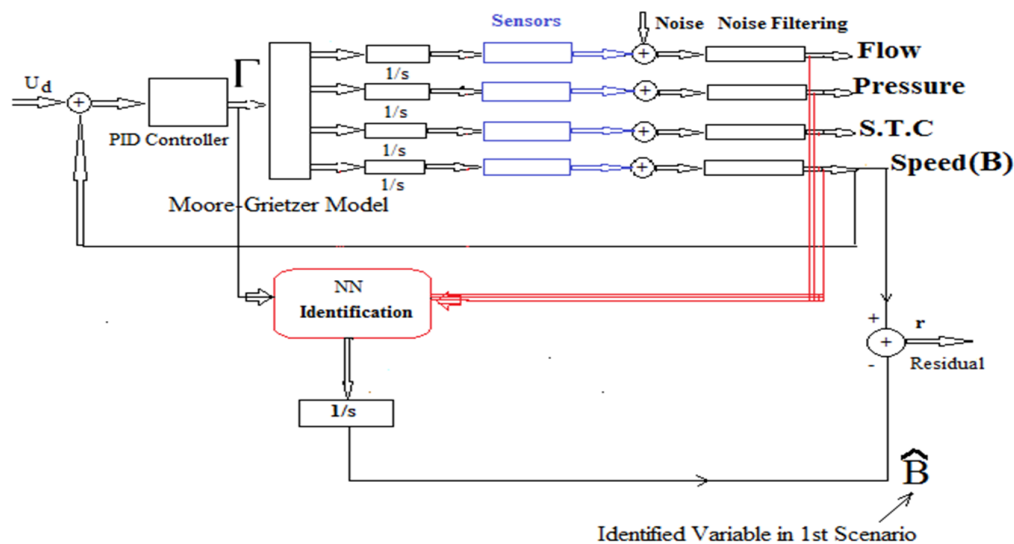
خطای حالت ماندگار ضریب خفگی $\pm 0/4\%$

خطای حالت ماندگار سیگنال سرعت کمپرسور $\pm 15\%$

از مطالب ارائه شده تا اینجا و با پاسخ به سوالات بخش قبلی، روش تشخیص عیب برای دستگاه کمپرسور استفاده از روش تحلیلی داده رانده معرفی گردید. قبلاً نیز گفته شد که مهم‌ترین ابزار برای پیاده‌سازی این روش، بهره‌گیری از محاسبات نرم است. چون از سیستم فقط داده‌های ورودی و خروجی در دسترس است، لذا از روش‌های مختلف محاسبات نرم همچون سیستم‌های فازی، شبکه‌های عصبی، محاسبات تکاملی، محاسبات آماری و محاسبات آشوب و روش شبکه‌های عصبی برای تشخیص عیب مناسب است چرا که برای مدل‌سازی سیستم، فقط داده وجود دارد و امکان دسترسی به رفتار دینامیکی سیستم وجود ندارد. متغیر کنترلی گشتاور اعمالی از توربین گازی می‌باشد که با تنظیم آن سرعت کمپرسور تنظیم می‌گردد. پس در واقع سیستم تک‌ورودی/تک‌خروجی است. توربین‌های گازی دارای دینامیک بسیار پیچیده‌ای هستند و در واقع مدل‌سازی آنها با معادلات ریاضی و فیزیکی از مدل‌سازی کمپرسورها مشکل‌تر است در این رساله مدل بسیار ساده‌ای با تابع خطی $\Gamma = 0.373\Theta - 7.836$ برای توربین گازی فرض می‌شود که در آن Γ, Θ به ترتیب دبی سوخت گاز ورودی به توربین گازی بر حسب متر مکعب بر ساعت و گشتاور تولیدی از توربین گازی

بر حسب نیوتن متر است مقدار دبی با کنترل کننده نشان داده در شکل (2-4) تنظیم می‌گردد. توجه شود که رابطه مذکور بعد از ساده سازی‌های لازم و با استفاده داده های واقعی مستخرج از یکی از توربین گازی بکار رفته در تاسیسات تقویت فشار گاز کشور بدست آمده است. ذکر این مطلب ضروری است که نوع و پیچیدگی مدل بکار رفته در مورد توربین گازی در این رساله دارای اهمیت نیست و هر چه قدر مدل توربین گازی ساده‌تر باشد به دلیل ساده شدن محاسبات شبیه سازی مفیدتر هست.

هدف رساله در وهله اول تشخیص عیب در حسگرهای جریان سیال، فشار کمپرسور و سرعت کمپرسور است تا منحنی عملکرد و سیستم تشخیص سرج با استفاده از نتایج سیستم تشخیص عیب اصلاح گردد. لذا بایستی برای متغیرهای مذکور به صورت جداگانه سیستم تشخیص عیب طراحی گردد. به همین دلیل سیستم، سه مرتبه به صورت شکل (2-4) به صورت مستقل توسط شبکه‌های عصبی شناسایی می‌شود. در مرحله اول هدف شناسایی متغیر سرعت و در مراحل دوم و سوم به ترتیب هدف شناسایی متغیرهای جریان و نسبت فشار است:



شکل (2-4) بلوک دیاگرام تولید مانده

در شکل (2-4) مدل کنترلی و ورودی و خروجی‌های سیستم تخمین‌گر عصبی نشان داده شده است و لذا بر حسب سناریوی‌های مختلف ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تخمین‌گر (شبکه‌های عصبی) عبارتند از:

سناریوی اول: Inputs=[u, Flow, Pressure], Output=Speed

سناریوی دوم: Inputs=[u, Speed, Pressure] Output=Flow

سناریوی سوم: Inputs=[u, Speed, Flow] Output=Pressure

بر اساس این سه سناریو، سه سیستم مستقل شبکه عصبی تخمین‌گر شکل می‌گیرد. توجه شود که داده لازم برای این شناسایی بایستی از سیستم سالم به دست آید و 80٪ داده‌ها برای آموزش و 20٪ داده‌ها برای تست شبکه به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. شبکه عصبی‌های بکار رفته برای بلوک تخمین‌گر هر سه از نوع پس انتشار خطا و با تابع انتقال سیگموئید تانژانت هیپربولیک بوده که در لایه اول آنها 6 نرون، لایه دوم 5 نرون و لایه آخر 1 نرون وجود دارد. انتخاب شبکه عصبی کاملاً دلخواه و تجربی بوده و سعی بر آن بود که با کوچکترین شبکه میزان خطای مربعات میانگین از 00001/ کوچکتر باشد. بعد از مرحله شناسایی سیستم، به حسگرها جداگانه عیب اعمال می‌شود. معمولاً در مقالات عیب حسگر را به صورت جمعی در نظر می‌گیرند ولی در اینجا عیب (هم جمعی و هم ضربی) به صورت زیر فرض می‌شود:

$$Y = Mx + A \quad (M: \text{Multiplicative, Add: Additive})$$

$$0 \leq M \leq 1$$

$$A \geq 0$$

(2-4)

با توجه به مقادیر M , A ، حالت‌های مختلف ممکن است رخ دهد:

جدول (1-4) حالت‌های مختلف فرضی عیب

حالت	M	A	Result
1	M=1	A=0	Fault Free
2	M=0	A=0	Cutoff Connection(Failure)
3	M=0	A=A1	Freeze(Failure)
4	0<M<1	A>0	Additive, Multiplicative (Fault)
5	0<M<1	A=0	Loss of Efficiency (Fault)

در خصوص جدول (1-4) به موارد زیر توجه شود:

1- عیب جمعی می‌تواند از نوع عدد ثابت بایاس، جهشی پله‌ای یا از نوع عیب نرم مانند شکل موج شیب یا سینوسی باشد. عیب جهشی پله‌ای با نماد A و عیب شیب با نماد AR در جدول (2-4) نشان داده شده است.

2- عیب ضربی همواره نقش تضعیف سیگنال را دارا است. با در نظر گرفتن موارد فوق‌الذکر، سیستم را با اعمال عیب، که شرح حالت‌های مختلف آن در جدول (1-4) ذکر گردید، مدل‌سازی و شبیه‌سازی نموده و نتایج در جدول (2-4) ذکر می‌شود. در خصوص نتایج مذکور در جدول (2-4) موارد زیر قابل استنتاج است:

1- با کد برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب، نوع عیب (جمعی بودن و یا ضربی بودن) قابل تشخیص است.

2- نوع عیب جمعی، پله‌ای و یا نرم قابل تشخیص است.

3- زمان شروع عیب قابل تشخیص است. چون سیستم دارای فیدبک حالت است طبیعی است که مدت زمان کوتاهی عیب تحمل شود و اختلاف بین زمان واقعی اعمال عیب و زمان شناسایی شده ناشی از همین مطلب است.

4- مقدار عیب، قابل تشخیص است و با دقت خوبی می‌توان مقدار عیب را تعیین کرد.

5- در برنامه نوشته شده دو عیب ضربی و جمعی در دو زمان مختلف در مدت معین اعمال گردیده است و لذا می‌توان برنامه را با تغییرات اندک، برای بازه گسترده زمانی و تعداد زیادی عیب نوشت.

6- اگر فاصله زمانی رخداد دو عیب پشت سر هم کم باشد به طوری که در هم ادغام شوند، این سیستم قادر به تشخیص آنها نخواهد بود.

7- در حالتی که هنوز سیستم حالت گذر خود را طی می کند اگر عیبی رخ دهد به دلیل

ادغام با حالت گذر سیستم، خطای محاسباتی در تشخیص زمان رخداد و مقدار عیب وجود خواهد داشت.

8- در مورد سیگنال سرعت که از آن برای کنترل سیستم حلقه فیدبک گرفته شده است،

خرابی از نوع قطعی سیگنال منجر به ناپایداری سیستم می شود چون سیستم در دل

خود دارای مشتق گیر است؛ لذا قطع یکباره سیگنال و صفر شدن آن منجر به تولید

سیگنال ضربه در حلقه کنترلی و ناپایداری سیستم می شود.

جدول (2-4): نتایج شبیه سازی تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور

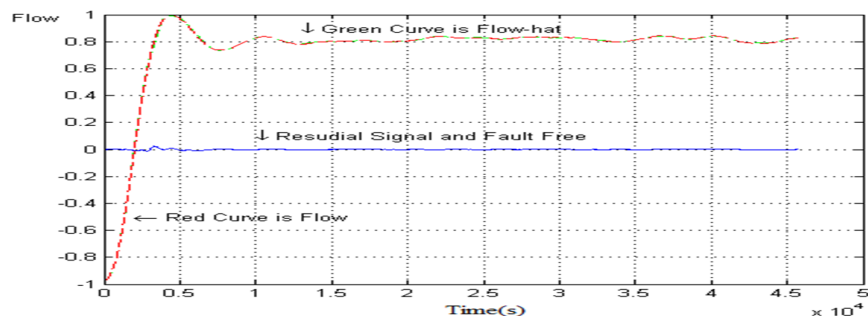
No	Flow1	Flow2	Pressure1	Pressure2	Speed1	Speed2	Result
1	M1=1	A1=0	M2=1	A2=0	M3=1	A3=0	Free -Free-Free
2	M1=0 at 3780	A1=0	M2=1	A2=0	M3=1	A3=0	Cutoff 3830 -Free-Free
3	M1=0 at 2230	A1=0	M2=0 at 3480	A2=0	M3=0 at 6850	A3=0	Cutoff-2282, Cutoff-3556, Cutoff 6883
4	M1=0 at 2210	A1=.6 at 3920	M2=1	A2=0	M3=0 at 7000	A3=0	Freez=0.5569 , Free, Cutoff 7027
5	M1=1	A1=0	M2=0 at 2760	A2=0	M3=.7 at 2330	AR3=.03, 5220 to 5500	Free, Cutoff 2805, M=67.5 at 2373, AR=13.7 at 5332
6	M1=0 at 3230	A1=.3 at 6420	M2=0 at 2900	AR2=.04 , 4850 to 5300	M3=1	A3=0	Freez=.3A, Freez=5.1 AR ,Free
7	M1=.7at 9700	AR1=.03 2370 to 2680	M2=.35 at 2580	A2=.75 at 6970	M3=.45 at 8690	A3=4 at 3440	M1=73 at 9800, AR1=1.89 at 2398 M2=39 at 2743 A2=.79 at 7071 M3=57.6 at 8766, A3=12.73 at 3453
8	M1=.45at 710	A1=.3 at 2580	M2=.65 at 3200	AR2=.04 at 750 to 890	M3=.72 at 1040	AR3=.03 2480 to 2600	M1=47 at 740, A1=.34 at 2620 M2=71 at 3245 AR2=4.2 at 780 M3=69 at 1060, AR3=14.16 at 2501
9	M1=0.33 at 8930	AR1=.05at 2680 to 3080	M2=.48 at 30 80	AR2=.01 at 7660 to 7900	M3=.67 at 10900	A3=6 at 2890	M1=37.5 at 8966, AR1=1.59 at 2870 M2=51.36 at 3352 AR2=.41 at 7792 M3=69.7 at 11006, A=19.27 at 2903

در جدول (2-4) سعی شده است حالت ها و سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در اولین

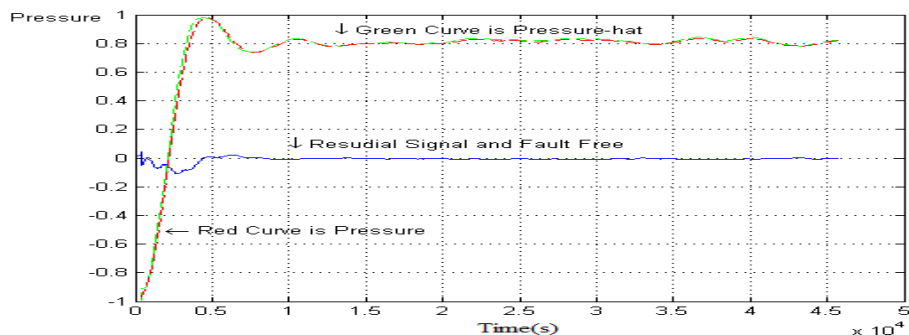
حالت سیستم بدون عیب اجرا می شود. در شکل (3-4) منحنی های آبی رنگ بیانگر سیگنال مانده

است و لذا بر اساس شکل (3-4) حسگرهای جریان، فشار و سرعت عاری از عیب هستند. توجه شود

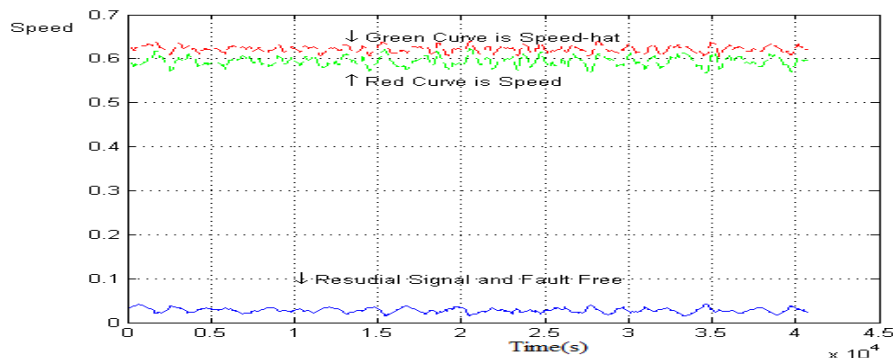
که مقادیر سیگنال‌ها در شکل‌های بعدی این بخش برای نشان دادن بهتر سیگنال اصلی، سیگنال تخمینی و مانده نرمالیزه شده‌اند. لازم به توضیح است که همه شبیه سازها در محیط نرم افزاری متلب صورت گرفته است.



(a)



(b)

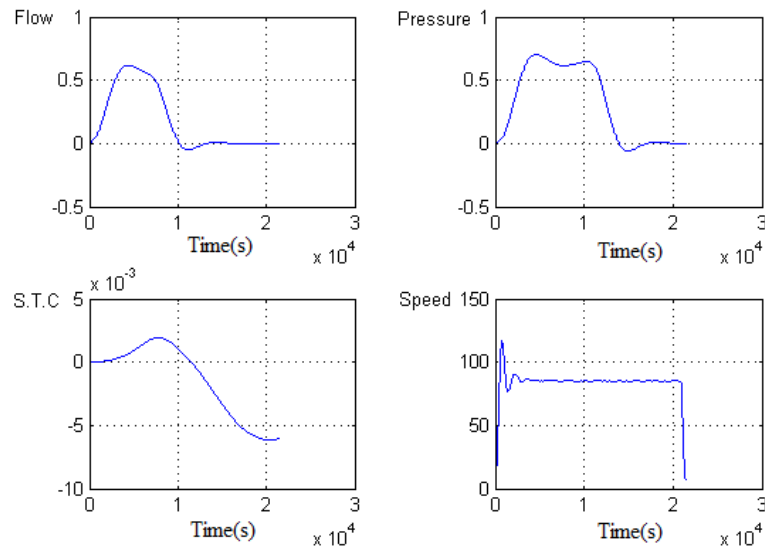


(c)

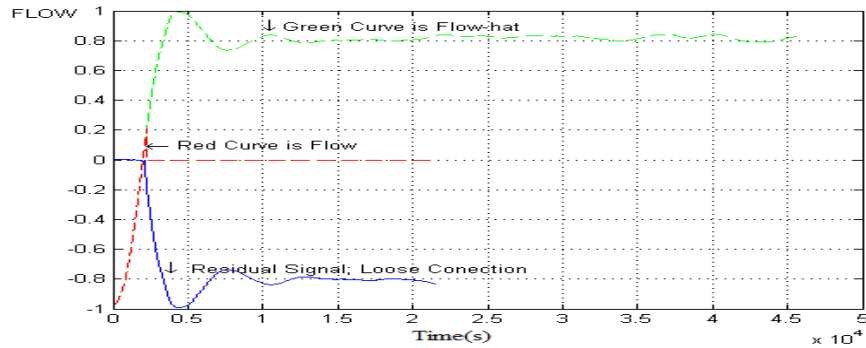
شکل (3-4) حالت بدون عیب حسگرهای جریان، فشار و سرعت

در جدول (2-4) در مورد شماره 3 مشاهده می‌شود که سیگنال‌های جریان، فشار و سرعت در لحظات 2230، 3480 و 6850 قطع می‌شود و یا به اصطلاح Cutoff می‌شوند. سیستم تشخیص عیب این

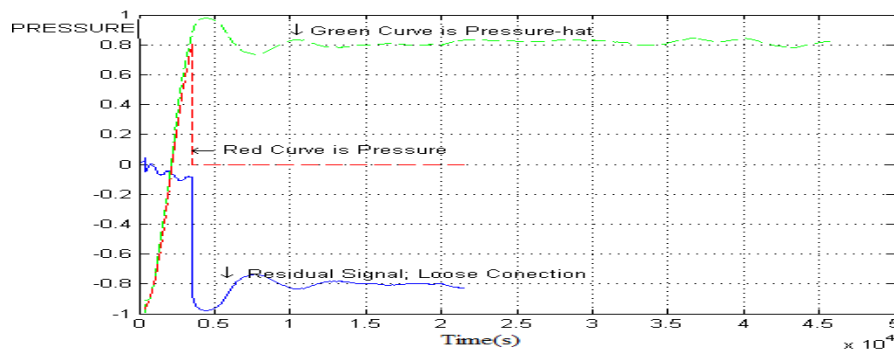
قطعی را در لحظات 2282، 3556 و 6883 نشان می‌دهد. در شکل (4-4) نیز این مقادیر قابل مشاهده است.



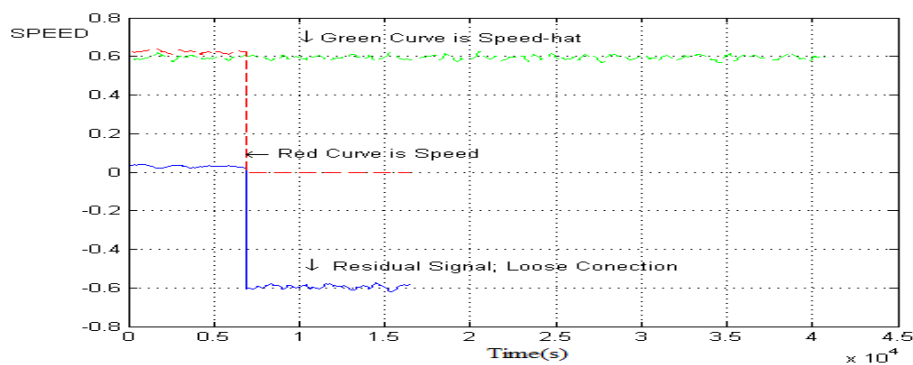
(a)



(b)



(c)



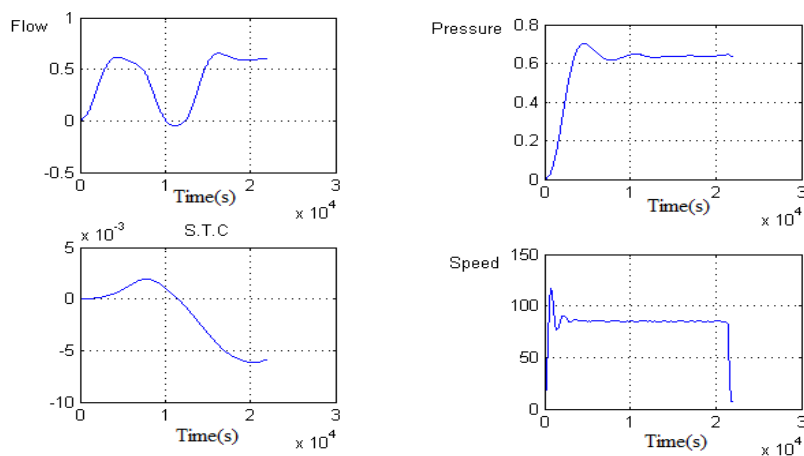
(d)

شکل (4-4) حالت قطعی حسگرهای جریان، فشار و سرعت

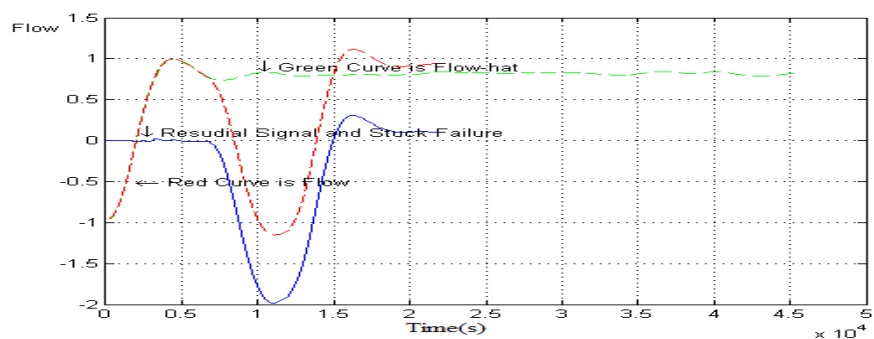
در هر یک از سه شکل (b),(c),(d) منحنی خط چین قرمز رنگ در لحظات قطعی مذکور صفر می گردد و سیگنال مانده دقیقاً برابر با معکوس تخمینی می شود زیرا داریم:

$$\text{Residual} = y - \hat{y} \text{ if } y=0 \text{ then Residual} = -\hat{y} \quad (3-4)$$

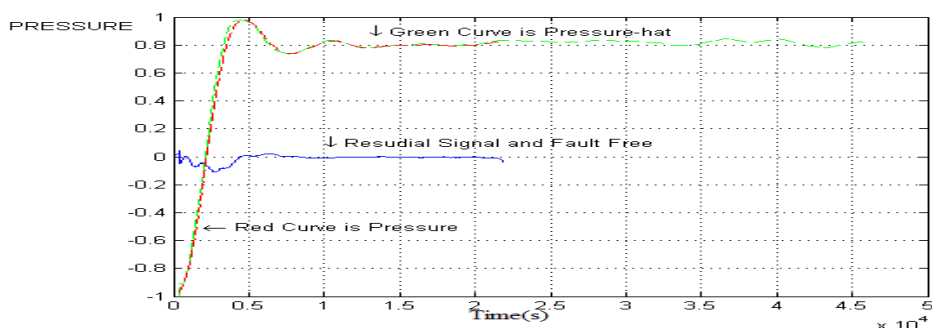
در مورد 4 در جدول (2-4)، هر سه حالت Cutoff, Freez, Free با هم ظاهر شده اند. فریز شدن سیگنال جریان در مقدار 0/6 رخ می دهد و سیگنال فشار بدون عیب است و سیگنال سرعت در لحظه 7000 قطع می گردد نتایج تحلیل در شکل (4-5) نشان می دهد که مقدار Freez سیگنال برابر با 0/5569 می باشد. سیگنال فشار نیز بدون عیب است و سیگنال سرعت در لحظه 7027 قطع شده است.



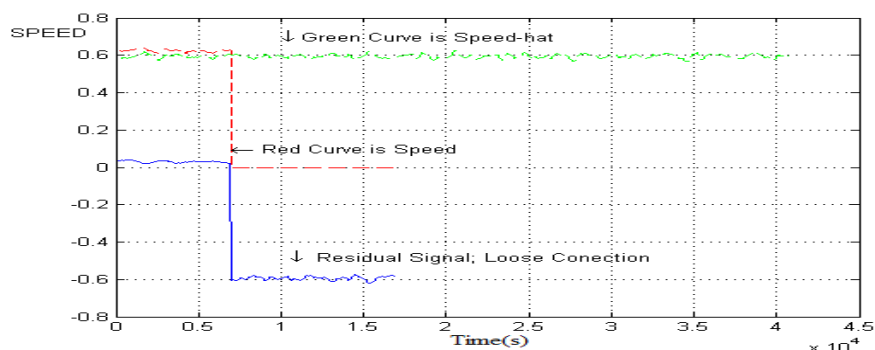
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل (4-5) حالت Freeze حسگر جریان (b)، بدون عیب حسگر فشار (c) و قطعی حسگر سرعت (d)

در مورد 8 در جدول (4-2)، در سیگنال جریان در لحظه 710 عیب ضربی با ضریب تضعیف 0/45 و عیب جمعی پله‌ای به اندازه 3/ در لحظه 2580 رخ می‌دهد. در سیگنال فشار نیز عیب جمعی نرم از نوع شیب با شیب 0/04 از لحظه 750 تا لحظه 890 رخ می‌دهد و عیب ضربی با ضریب 0/65 در لحظه 3200 رخ می‌دهد. در سیگنال سرعت در لحظه 1040 عیب ضربی با ضریب تضعیف

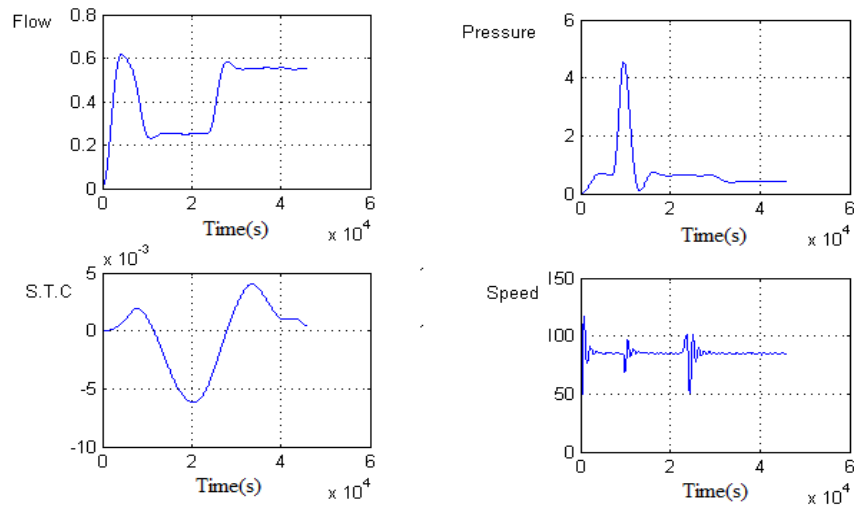
0/72 و از لحظه 2480 تا 2600 عیب جمعی شیب با شیب 03/. اتفاق می‌افتد. نتیجه حاصل از

سیستم تشخیص نیز به شرح زیر در جدول (2-4) آورده شده است:

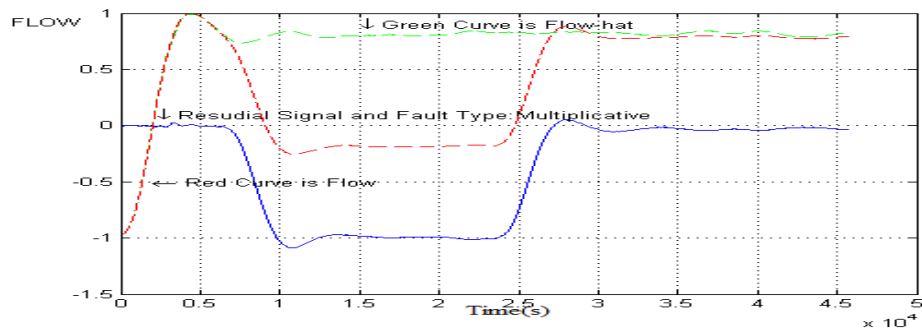
عیب جریان: ضربی در لحظه 740 با ضریب 47 شکل (b-6-4) و جمعی پله در لحظه 2620 به مقدار 0/34 شکل (c-6-4)

عیب فشار: تجمعی نرم شیب در لحظه 780 به مقدار 4/2 شکل (d-6-4) و ضربی در لحظه 3245 با ضریب 71 درصد شکل (e-6-4)

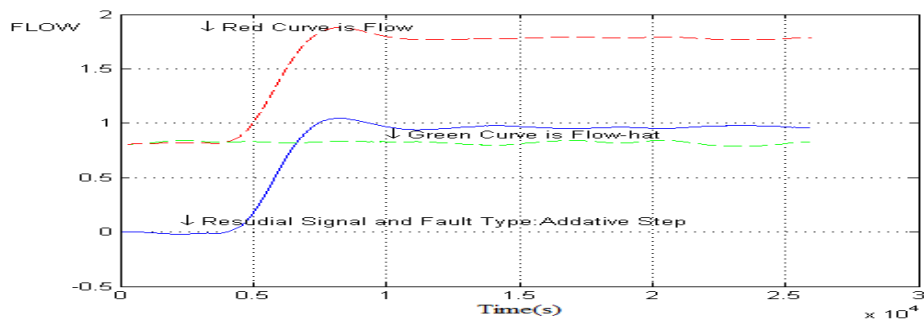
عیب سرعت: ضربی در لحظه 1060 با ضریب 69 درصد و جمعی از نوع عیب نرم شیب به مقدار 14/16 در لحظه 2502 مقادیر شکل (f-6-4)



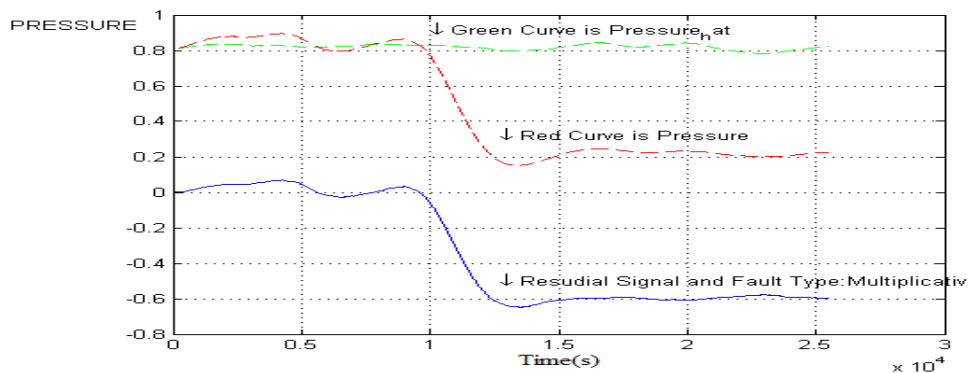
(a)



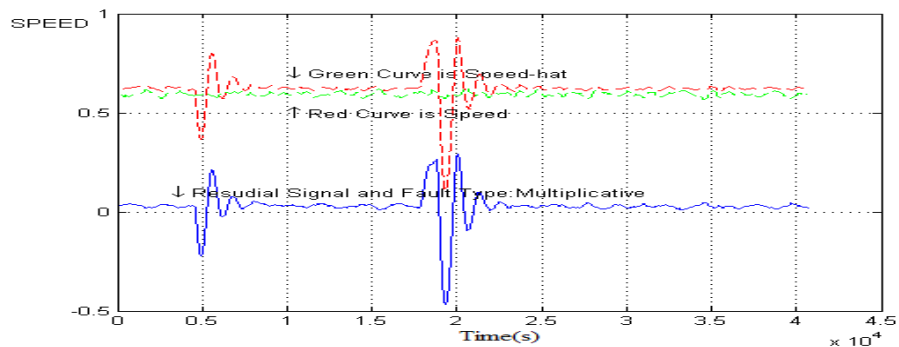
(b)



(c)



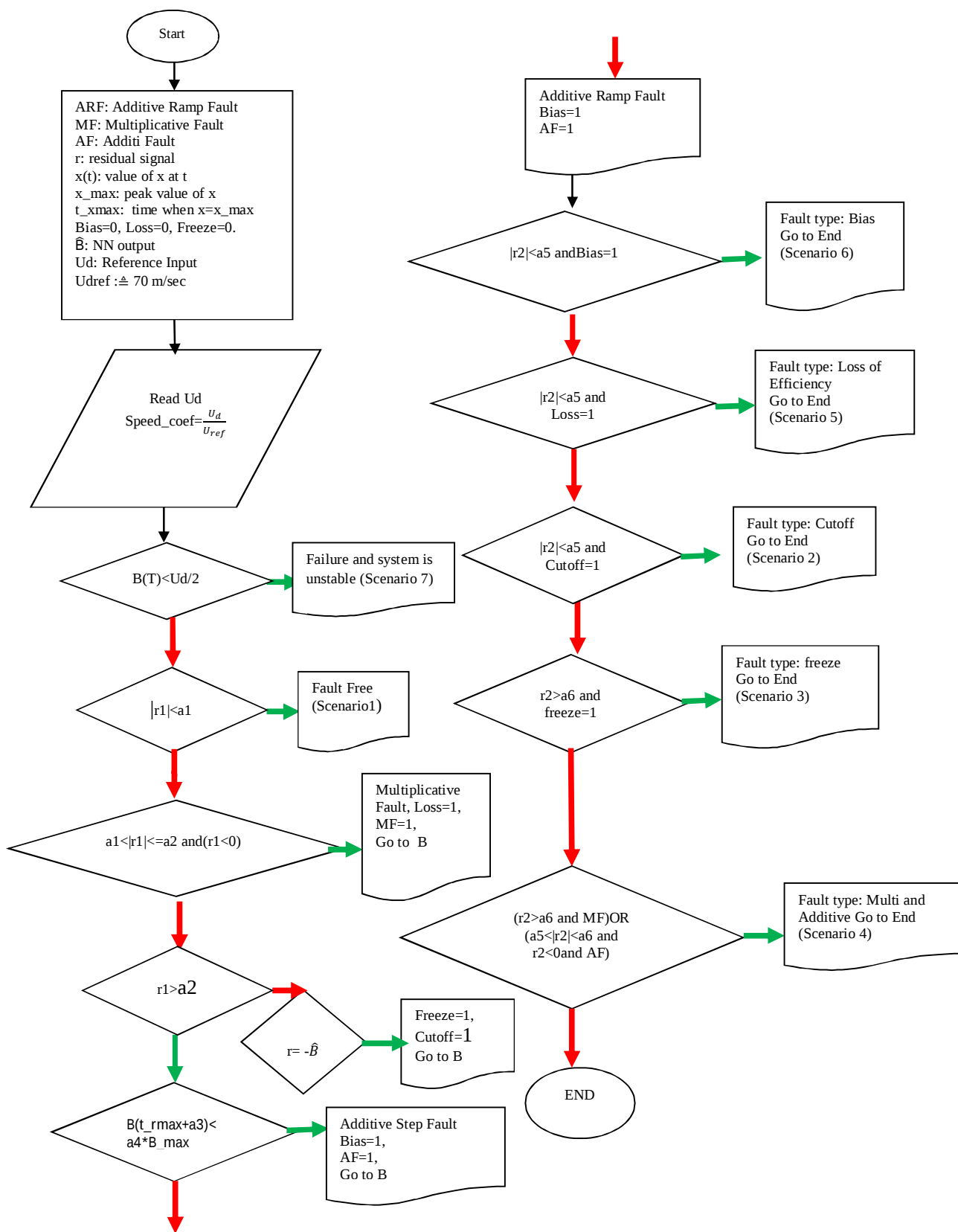
(d)



(e)

شکل (6-4) حالت عیب جمعی و ضربی حسگرهای جریان، فشار و سرعت

در این بخش برای تشخیص عیب در کمپرسور از روش مبتنی بر داده و ابزار شبکه‌های عصبی استفاده گردید. با استفاده از سیستم تشخیص عیب، امکان عیب یابی، تعیین نوع، اندازه و محل عیب برای انواع عیب‌های جمعی و ضربی فراهم گردید و عیب نرم و جهشی نیز از یکدیگر قابل تفکیک شد. ایراد اصلی شبکه‌های عصبی متعارف پیشنهاد شده در این فصل بزرگ بودن آنها است و در ضمن به



الگوریتم 1: بلوک ارزیابی مانده برای تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسورها

عدم قطعیت و داده‌های آموزشی حساس هستند [75]. و لذا در بخش دوم از شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم مبتنی بر مد لغزشی برای رفع ایرادات مذکور استفاده می‌شود. نوآوری رساله در بخش اول ارایه الگوریتم پیچیده و بدیع برای تشخیص عیب و خرابی از همدیگر است و با این الگوریتم می‌توان ویژگیهای عیب را به طور کامل بدست آورد.

2-4 سیستم تشخیص عیب با شبکه‌های عصبی دینامیکی

در این بخش ابزار شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم مبتنی بر ایده مد لغزشی¹، برای تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور با فرض وجود عدم قطعیت پارامتری در کمپرسور و نویز در حسگرها استفاده می‌گردد. ضعف اساسی در کاربرد شبکه‌های عصبی دینامیکی، فقدان روشی قانونمند برای تعیین ماتریس پایدار هورویتز² است که این ضعف با استفاده از روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا در این رساله جبران می‌شود. از مدل مور-گریتر شیه‌سازی شده کمپرسور، داده‌های لازم برای تولید مانده استخراج می‌شود و سپس در بلوک ارزیابی مانده، الگوریتم ویژه‌ای برای تعیین مشخصات عیب ارائه می‌گردد.

1-2-4 شبکه‌های عصبی دینامیکی مبتنی بر مد لغزشی

در دهه‌های اخیر شبکه‌های عصبی در زمینه‌های مختلفی همچون شناسایی سیستم‌های صنعتی کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند. در شبکه‌های عصبی دینامیکی نه تنها ورودی‌هایی از خارج وجود دارد؛ بلکه در ساختار داخلی آنها پس‌خورد نیز وجود دارد. این پس‌خورد در شبکه‌های عصبی دینامیکی باعث انتقال داده از خروجی به ورودی نرون و بر عکس می‌شود و به دلیل همین پس‌خورد، این شبکه‌ها می‌توانند رفتار دینامیکی سیستم‌های پیچیده را با دقت دلخواهی مدل کنند [65]. از

¹ Sliding Mode

² Hurwithz

مزایای دیگر شبکه‌های عصبی دینامیکی نسبت به شبکه‌های عصبی معمولی کوچک‌تر بودن آنها در عین دقت بالای مدل‌سازی آنها است [66-68].

همانطوریکه پیشتر ذکر شد، ایراد اساسی در شبکه‌های عصبی دینامیکی عدم وجود روش قانونمند برای انتخاب ماتریس پایدار هورویتز است و در مقالات برای انتخاب ماتریس مذکور روش خاصی ارائه نشده است و روش انتخاب دلخواه آدرس داده شده است [69] ولی برای انتخاب این ماتریس، روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا در این رساله پیشنهاد می‌گردد. روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا یک روش بسیار موثر در به‌دست آوردن ماتریس مذکور می‌باشد.

در سال 2001، از شبکه‌های عصبی دینامیکی برای شناسایی سیستم‌های غیر خطی استفاده شده است [69]. برای شناسایی مدل یک راکتور اوزون از شبکه‌های عصبی دینامیکی استفاده شده است [70] که در آن برای شناسایی حالت‌ها از شبکه‌های عصبی و برای تخمین پارامترها از ایده کمترین مربعات استفاده می‌شود. در [71-72]، از شبکه‌های عصبی دینامیکی دارای پروجکشن برای تخمین متغیرهای حالت استفاده شده است که مزیت آن شناسایی سیستم‌های غیر خطی با وجود اغتشاشات بیرونی است. شبکه‌های عصبی در تشخیص عیب در سیستم‌های غیر خطی نیز کاربرد دارند، در [73]، از شبکه‌های عصبی در دو سطح برای تشخیص عیب استفاده می‌شود که دینامیک‌های غیرخطی پرواز هواپیما با استفاده از شبکه‌های عصبی دینامیکی مدل می‌شود. در [74]، از شبکه‌های عصبی دینامیکی برای تشخیص عیب در مدل ماهواره استفاده شده است.

حسگرها در هر سیستمی به تغییرات ناشی از نویز، عدم قطعیت در ساختار داخلی سیستم و پارامترهای آن و عیب‌های اجزای داخلی سیستم، محرک‌ها و حسگرها حساس هستند. لذا سیستم تشخیص عیب پیشنهادی بایستی در قبال تغییرات مذکور به غیر از عیبهای حسگر مقاوم باشد. در این بخش نیز فرض می‌شود که در اجزای داخلی سیستم و محرک‌ها هیچ گونه عیبی وجود ندارد و نویز در حسگرها نیز با استفاده از فیلترهای مناسب از پیش طراحی شده حذف شده و یا به حداقل

می‌رسد. منبع عدم قطعیت در پارامترهای کمپرسور می‌تواند از پارامترهای فیزیکی خود کمپرسور و یا از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی گاز طبیعی به عنوان سیال داخل کمپرسور نشأت بگیرد. کمپرسورها دستگاه‌های گرانش‌میت و برخورددار از فناوری‌های بالا و به روز هستند، لذا فرض وجود عدم قطعیت‌های یزرگ در ساختار فیزیکی آنها از واقعیت بسیار دور است. برای مثال، تغییرات سانتی‌متری در طول چند متری محور کمپرسور اصلاً قابل قبول نبوده و موجب آسیب جدی به کمپرسور می‌گردد. لذا تغییرات در چگالی گاز طبیعی و دمای آن می‌توانند نمونه‌ای از منابع عدم قطعیت در ساختار کمپرسور باشند و فرض بر این است که سرعت این تغییرات در مشخصات گاز نسبت به سرعت رخداد عیب در حسگرها بسیار کند می‌باشد. از این ویژگی مهم می‌توان در طراحی شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم مناسب بهره گرفت.

در این بخش، در گام اول از ایده تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور با استفاده از شبکه‌های عصبی دینامیکی مبتنی بر شناسایی مقاوم استفاده می‌شود. برای مقاوم بودن شبکه در مقابل عدم قطعیت کمپرسور، از ایده مد لغزشی بهره گرفته می‌شود و از تفاوت دینامیک عیب حسگرها و عدم قطعیت کمپرسور، مقاوم بودن شبکه پیشنهادی تضمین می‌شود. ضعف عدم وجود قانون سیستماتیک برای انتخاب ماتریس هورویتز در شبکه عصبی دینامیکی، با استفاده از روش شناسایی مبتنی بر زیرفضا اصلاح می‌گردد. در گام دوم، برای بلوک ارزیابی مانده، الگوریتم لازم طراحی می‌شود تا ویژگی‌های اساسی عیب در حسگر همچون زمان وقوع و مقدار عیب تعیین شود.

شبکه‌های عصبی می‌توانند به دو دسته عمده استاتیک (پیش‌خورد) و دینامیک (تفاضلی) تقسیم شوند، شبکه‌های استاتیک دارای عنصر پس‌خورد نیستند و در زمینه شناسایی سیستم‌های غیرخطی و کنترل آنها با شبکه‌های استاتیک گزارش‌های متعددی ارائه شده است. همانطوریکه در بخش قبل ذکر شد ایراد عمده شبکه استاتیک این است که در تنظیم وزن آنها از ساختار داده‌های محلی استفاده نمی‌شود و در تقریب تابع به داده‌های آموزشی حساس است [75]. اما در شبکه‌های

عصبی دینامیکی (به دلیل برخورداری از پس‌خورد در ساختارشان) این ایراد وجود ندارد. در واقع، عملکرد یک شبکه عصبی دینامیکی با وجود یک پس‌خورد، معادل عملکرد یک شبکه عصبی معمولی بزرگ است [76]. لذا دلیل استفاده از شبکه‌های عصبی دینامیکی در این بخش رفع ایرادات مذکور است. در شکل (4-7) یک شبکه عصبی دینامیکی نشان داده شده است. برای آموزش شبکه‌های عصبی الگوریتم پسانتشار عیب متداول‌ترین روش آموزش است و در شبکه‌های عصبی دینامیکی نیز از بسط یافته این روش جهت آموزش استفاده می‌گردد. جزییات الگوریتم مذکور در [78] و [77] آورده شده است.

در این رساله، از شبکه عصبی دینامیکی جهت شناسایی کمپرسور و تولید سیگنال مانده استفاده می‌شود. برای ویژگی مقاوم از تکنیک مد لغزشی استفاده می‌گردد، لذا مزیت شبکه عصبی دینامیک مقاوم این است که نیازی به تنظیم مکرر وزن‌های شبکه جهت حصول خاصیت مقاوم بودن شبکه در برابر عدم قطعیت‌ها نیست و ویژگی مهم پایداری شبکه مذکور با انتخاب تابع لیپانوف متناسب قابل اثبات است [78].

تعریف 1: یک سیستم غیر خطی آفاین¹ را به شکل زیر در نظر بگیرید [78]:

(4-4)

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + d$$

$$y = c^T x + f_s$$

که $x \in R^n$ بردار متغیرهای حالت قابل اندازه‌گیری با شرایط اولیه کراندار $x(0) = x_0$ و $u \in R^m$ ورودی کنترلی است. $y \in R$ خروجی سیستم بوده، $f(x) \in R^n$ تابع غیر خطی نامعین و $g(x) \in R^{n \times m}$ ماتریس ورودی نامعلوم، کراندار است. $d \in R^n$ بیانگر عدم قطعیت‌های پارامتری و کراندار موجود در سیستم بوده که همزمان $d, \dot{d}, \ddot{d} \in L_\infty$ است. f_s بیانگر عیب تجمعی حسگر است. تابع غیرخطی در (4-4) را می‌توان با کاربرد شبکه عصبی دینامیکی به شکل زیر نوشت:

$$\dot{x} = \bar{A}x + W^T \sigma(V^T x) + \varepsilon + g(x)u + d \quad (5-4)$$

¹ Affine

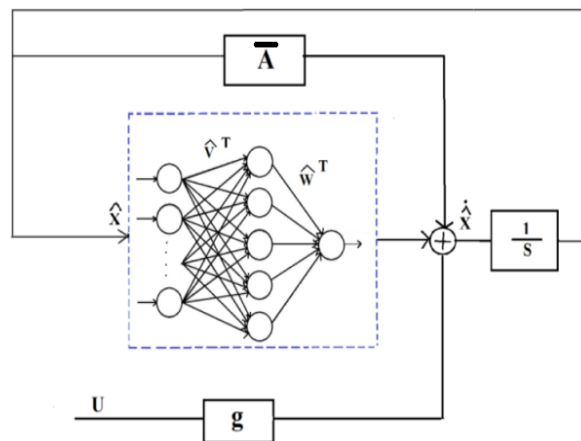
در رابطه (5-4) تابع $f(x)$ با شبکه های عصبی دینامیکی تخمین زده می شود و برای شناسایی تابع نامعلوم $g(x)$ از روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا استفاده خواهد شد. با استفاده از خاصیت تقریب عمومی شبکه های عصبی چند لایه، تابع $f(x) - \bar{A}x$ را می توان از روابط (4-4) و (5-4) به دست آورد:

$$f(x) - \bar{A}x(t) = W^T \sigma(V^T x) + \varepsilon(x) \quad (6-4)$$

در رابطه (5-4) $\bar{A} \in R^{n \times n}$ ماتریس هورویتز می باشد و در این رساله برای انتخاب آن، روشی سیستماتیک با استفاده از روش شناسایی زیر فضا ارائه می شود. $W \in R^{N \times n}, V \in R^{n \times N}$ ماتریس های وزنی، کراندار و ثابت ایده ال هستند. N بیانگر تعداد نورون های لایه پنهان شبکه عصبی و n نیز تعداد متغیرهای حالت را بیان می کند. $\|W\| \leq W_0, \|V\| \leq V_0$. شبکه عصبی با تابع عضویت $\sigma(\cdot) \in R^n$ از نوع تانژانت هیپربولیک در این رساله به دلخواه انتخاب می شود و $\varepsilon(x) \in R^n$ خطای مدل سازی بوده و مشتقات مرتبه اول و دوم آن نیز کراندار است:

$$\|\varepsilon(x)\| \leq \varepsilon_1, \|\dot{\varepsilon}(x, \dot{x})\| \leq \varepsilon_2, \|\ddot{\varepsilon}(x, \dot{x}, \ddot{x})\| \leq \varepsilon_3 \quad (7-4)$$

با توجه به اینکه شرط اولیه x_0 کراندار بوده و سیگنال کنترل کننده پیوسته زمانی متعاقبا برای تضمین کراندار بودن متغیر حالتها طراحی می شود؛ لذا تابع $f(x) - \bar{A}x$ به عنوان مجموعه فشرده تعریف شده و ویژگی تقریب عمومی شبکه های عصبی برقرار می گردد.



شکل (7-4) شبکه عصبی دینامیکی

تعریف (1-4): شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم:

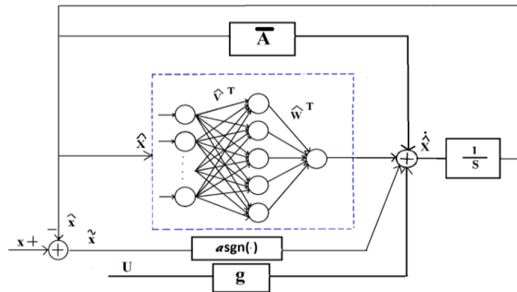
شبکه عصبی دینامیکی با یک لایه پنهان برای تخمین حالت مقاوم سیستم رابطه (1-4) عبارتست از:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= \bar{A}\hat{x} + \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \hat{x}) + g u + \alpha \operatorname{sgn}(\tilde{x}) \\ \hat{y} &= c^T \hat{x}\end{aligned}\quad (8-4)$$

که $\hat{x} \in R^n$ متغیرهای حالت شبکه عصبی دینامیکی است و تقریب ماتریس وزن‌ها عبارتست از $\hat{W} \in R^{N \times n}$, $\hat{V} \in R^{n \times N}$ و بهره کنترلی ثابت مثبت $\alpha \in R$ می‌باشد. $\tilde{x} \in R^n$ نیز به عنوان خطای حالت تخمین تعریف می‌شود.

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (9-4)$$

شکل (8-4) شبکه عصبی دینامیکی را با تکنیک مد لغزشی نشان می‌دهد.



شکل (8-4) شمای تخمین حالت مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی

در اینجا یکی از نتایج و نوآوریهای اصلی رساله در قالب طراحی یک مولد مانده جهت

تشخیص مقاوم عیب حسگر به صورت قضیه زیر بیان می‌گردد.

قضیه (1-4): مولد ماند با شبکه‌های عصبی دینامیکی مبتنی بر مد لغزشی:

برای سیستم (4-4) و روینگر (8-4) و ورودی ناشناخته اغتشاش کراندار d داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = f_s \quad (10-4)$$

که در آن $r = y - \hat{y}$ سیگنال مانده می‌باشد.

اثبات: با توجه به تعریف مانده r می‌توان گفت:

$$r = y - \hat{y} = c^T x + f_s - c^T \hat{x} = c^T (x - \hat{x}) + f_s = c^T \tilde{x} + f_s \quad (11-4)$$

و اگر در رابطه (11-4) شرط زیر برقرار باشد:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}(t) = 0 \quad (12-4)$$

در این صورت رابطه (10-4) برقرار خواهد شد. لذا کافی است در ادامه رابطه (12-4) اثبات گردد.

برای این منظور با استفاده از (9-4) می توان گفت:

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = \bar{A}\tilde{x} + W^T \sigma(V^T x) - \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \hat{x}) + \varepsilon + d - \alpha \text{sgn}(\tilde{x}) \quad (13-4)$$

با اضافه و کم کردن جمله $W^T \sigma(\hat{V}^T \hat{x})$ رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{\tilde{x}} = \bar{A}\tilde{x} + W^T \sigma(V^T x) - W^T \sigma(\hat{V}^T \hat{x}) + \tilde{W}^T \sigma(\hat{V}^T \hat{x}) + \varepsilon + d - \alpha \text{sgn}(\tilde{x}) \quad (14-4)$$

که $\tilde{W} \triangleq W - \hat{W}$ بیانگر تفاضل ماتریس وزن های واقعی و ایده آل در شبکه عصبی است. برای تسهیل

محاسبات جمله $W^T \sigma(V^T x^*)$ به رابطه (14-4) اضافه و کم می گردد که $x^* \in R^n$ یک نمونه از

حالت انتخابی است. بسط تیلور در مجاورت $\sigma(V^T x^*)$ عبارتست از:

$$\sigma(V^T x^*) = \sigma(\hat{V}^T x^*) + \sigma'(\hat{V}^T x^*) \tilde{V}^T x^* + L(\tilde{V}^T x^*)^2 \quad (15-4)$$

که

$$\sigma'(\hat{V}^T x^*) \equiv d\sigma(\xi) / d(\xi) \big|_{\xi = \hat{V}^T x^*}$$

$$\tilde{V} \equiv V - \hat{V} \in R^{n \times N}$$

جمله های مرتبه بالای بسط تیلور هستند و رابطه (14-4) را می توان به صورت زیر

نوشت:

$$\dot{\tilde{x}} = \bar{A}\tilde{x} + W^T \tilde{\sigma}_1 + W^T \tilde{\sigma}_2 + W^T \sigma'(\hat{V}^T x^*) \tilde{V}^T x^* + W^T L(\tilde{V}^T x^*)^2 + \tilde{W}^T \sigma(\hat{V}^T \hat{x}) + \varepsilon + d - \alpha \text{sgn}(\tilde{x}) \quad (16-4)$$

که جملات $\tilde{\sigma}_1$ و $\tilde{\sigma}_2$ را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\tilde{\sigma}_1 = \sigma(V^T x) - \sigma(V^T x^*)$$

$$\tilde{\sigma}_2 = \sigma(\hat{V}^T x^*) - \sigma(\hat{V}^T \hat{x})$$

لذا رابطه (16-4) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\dot{\tilde{x}} = \bar{A}\tilde{x} + \hat{W}^T \sigma'(\hat{V}^T x^*) \tilde{V}^T x^* + \tilde{W}^T \sigma(\hat{V}^T \hat{x}) + h - \alpha \text{sgn}(\tilde{x}) \quad (17-4)$$

که $h(x, x^*, \hat{x}, \hat{W}, \hat{V}, \varepsilon, d) \in \mathbb{R}^n$ به عنوان جمله اغتشاش عمل می‌کند.

$$h = W^T \tilde{\sigma}_1 + W^T \tilde{\sigma}_2 + W^T \sigma'(\hat{V}^T x^*) \tilde{V}^T x^* + W^T L(\tilde{V}^T x^*)^2 + \varepsilon + d \quad (18-4)$$

قانون به روز کردن وزن‌ها برای DNN با استفاده از تحلیل پایداری به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \hat{W} &= \Gamma_1 \text{proj}[\sigma(\hat{V}^T \hat{x}) \tilde{x}^T], \\ \hat{V} &= \Gamma_2 \text{proj}[x^* \tilde{x}^T \hat{W}^T \sigma'(\hat{V}^T x^*)], \end{aligned} \quad (19-4)$$

$\Gamma_1 \in \mathbb{R}^{N \times N}$ و $\Gamma_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ بهره‌های ثابت متقارن مثبت تطبیقی هستند. اپراتور پروجکشن نرم برای

تضمین کراندار بودن وزن‌های تخمین ماتریس‌های $\hat{W}(t)$ و $\hat{V}(t)$ به کار می‌روند. با توجه به روابط (4-4-

5)، (4-8)، (4-11) و (4-19) می‌توان ثابت کرد که جمله اغتشاش در رابطه (4-15) کراندار بوده و

می‌توان نوشت:

$$\|h\| \leq \bar{h} \quad (20-4)$$

که $\bar{h}$ مقدار ثابت معلومی دارد. با انتخاب تابع لیاپانوف مناسب همانند [78] و [77] و با انجام عملیات

جبری می‌توان نشان داد که با فرض $\alpha > \bar{h}$ داریم؛

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}(t) = 0$$

برقرار است و متعاقباً رابطه (4-10) برقرار می‌شود.

4-2-2 روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا

تا اینجا روش شناسایی با شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم توضیح داده شد. همان‌طوری‌که پیشتر اشاره شد ضعف اساسی در این روش، عدم وجود قانونی سیستماتیک برای تعیین ماتریس پایدار در شبکه‌های عصبی دینامیکی است. در [72] و [69] انتخاب این ماتریس اختیاری است، بنابراین اگر ماتریس مذکور نتواند ویژگی‌ها و دینامیک سیستم اصلی را با دقت بالا مدل کند، در این صورت رابطه $\bar{A}x - f(x)$ در رابطه (4-6) ممکن است دینامیک پیچیده و غیرخطی داشته باشد. لذا برای انتخاب دقیق ماتریس مذکور، روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا پیشنهاد می‌گردد. در ضمن تابع نامعلوم $g(x)$ را می‌توان با روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا با یک ماتریس خطی از روی داده‌های ورودی و خروجی تخمین زد. الگوریتم‌های شناسایی مبتنی بر زیر فضا در سال‌های اخیر کاربردهایی در بحث کنترل پیدا کرده‌اند زیرا این روش می‌تواند مدل فضای حالت سیستم‌های MIMO را شناسایی کند [81 و 79]. مشکل اساسی در استفاده از این روش، فهم و پیاده‌سازی ریاضیات پیچیده آن است و بر خلاف روش‌های کلاسیک شناسایی همچون PEM^1 ، این روش یعنی روش‌های عددی برای شناسایی سیستم $n4sid^2$ ، حالت‌های فیلتر کالمن سیستم دینامیکی را از داده‌های ورودی-خروجی با استفاده از روش‌های جبر خطی همچون QR^3 و SVD^4 به دست می‌آورد [82-83]. در ایده شناسایی مبتنی بر زیر فضا، سیستم ارائه شده برای داده‌های ورودی-خروجی خطی علی و از مرتبه n بوده و به صورت مدل فضای حالت قابل توصیف است [80-81].

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \bar{A}x(k) + \bar{B}u(k) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + v(k) \end{aligned} \quad (21-4)$$

¹ Prediction error estimate for linear or nonlinear model

² Numerical algorithms for Subspace State Space System Identification

³ هر ماتریس مربعی حقیقی A را می‌توان به صورت حاصلضرب $A=QR$ نوشت که Q ماتریس متعامد و R ماتریس مثلثی است.

⁴ Singular Value Decomposition

که در آن $v \in \mathbb{R}^l$ و $w \in \mathbb{R}^n$ نویز سفید فرایندی است. ورودی $u \in \mathbb{R}^m$ و خروجی $y \in \mathbb{R}^l$ نیز داده شده است. با توجه به سیستم خطی (21-4)، معادله جبری ورودی-خروجی در روش شناسایی زیر فضا منجر به رابطه (22-4) می شود.

$$Y = \Gamma_r X + H_r U + \Phi_r W + V \quad (22-4)$$

که $Y \in \mathbb{R}^{l \times N}$ ماتریس داده خروجی بوده و می تواند با استفاده از $N+r-1$ داده گذشته و جاری و توسط ماتریس هنکل تشکیل گردد:

$$Y = [Y_r(k), Y_r(k+1), \dots, Y_r(k+N-1)] \quad (23-4)$$

که در آن

$$Y_r(j) = [y^T(j); y^T(j+1), \dots, y^T(j+r-1)] \quad (24-4)$$

ماتریس $\Gamma_r \in \mathbb{R}^{l \times n}$ ماتریس رویتگر بسط یافته می باشد و $\Phi_r \in \mathbb{R}^{l \times m}$ ، $H_r \in \mathbb{R}^{l \times m}$ ماتریس های پایین مثلثی شامل ماتریس های سیستم است:

$$\Gamma_r = [C^T (C \bar{A})^T, \dots, (C \bar{A}^{r-1})^T]^T \quad (25-4)$$

در واقع اگر فضای ستونی ماتریس Γ_r معلوم باشد در این صورت ماتریس های $\bar{A}$ ، C را می توان به طور مستقیم با بهره گیری از شیفت معکوس فضای ستونی Γ_r به دست آورد. اگر $\hat{A}$ و $\hat{C}$ معلوم باشند $\bar{B}$ ، D ، x_0 می توانند با حل مساله رگرسیون خطی به دست آیند.

$$\arg \min_{B, D, x_0} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|y(t) - \hat{C}(qI - \hat{A})^{-1} \bar{B}u(t) - Du(t) - \hat{C}(qI - \hat{A})^{-1} x_0 \delta(t)\| \quad (26-4)$$

که q اپراتور شیفت زمانی ماتریس واحد است. برای مطالعه جزئیات بیشتر به [79-82] مراجعه شود.

3-2-4 واحد ارزیابی مانده

هدف از ارزیابی مانده تعیین حسگر عیب دار و شناسایی مشخصات عیب در آن است. در حالت کلی این مشخصات شامل زمان وقوع عیب، مقدار عیب، نوع عیب و در حالت کلی مشخصات استاتیکی و دینامیکی عیب است. سیستم کنترل حلقه بسته ذاتا دارای عملکردی مشابه با سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب است و لذا می‌تواند اثر عیبه‌ها با دامنه کم را جبران نماید و در مورد عیبه‌های بزرگ نیز تا مدت زمان محدودی خاصیت تحمل‌پذیری را از خود نشان دهد. مطلب مذکور منجر به آن می‌شود که سیستم تشخیص عیب در تعیین زمان دقیق وقوع عیب با مشکل مواجه شود و در واقع زمان رخداد عیب را کمی دیرتر از زمان واقعی وقوع عیب نشان دهد. برای به دست آوردن دامنه عیب لازم است که تابع تبدیل سیستم، از نقطه وقوع عیب تا سیگنال مانده به دست آید و بر اساس این تابع تبدیل، مقدار بهره DC سیستم محاسبه می‌گردد. این بهره DC بایستی در بلوک ارزیابی مانده مد نظر قرار گیرد. حسگرها اغلب دارای سرعت پاسخی بسیار سریع‌تر از خود سیستم هستند و لذا زمان گذرای کوتاهی دارند و در تحلیل و ارزیابی مانده برای عیبه‌ها حسگرها، معمولا حالت گذاری پاسخ حسگرها را در نظر نمی‌گیرند و در حالت مانا مشخصات عیب را به دست می‌آورند.

در شکل (4-9) نمای سیستم کنترل حلقه بسته به همراه سیستم تشخیص عیب با ابزار شبکه عصبی دینامیکی و بلوک ارزیابی مانده به صورت یکجا نشان داده شده است. اما زمان رخداد واقعی عیب در سیستم کنترل حلقه بسته از زمان نشان داده شده جلوتر می‌باشد و لذا لازم است با اعمال اصلاحاتی، زمان نشان داده شده واقعی شود. در این رساله با تزریق عیب در اندازه‌های مختلف و در زمان‌های متفاوت، تفاوت مذکور به صورت تجربی به دست می‌آید. برای محاسبه سریع مقدار عیب لازم است رابطه (4-27) بین اندازه عیب و اندازه پیشینه سیگنال مانده محاسبه شود. لذا با شبیه‌سازی سیستم برای مقادیر مختلف عیب، مقدار متناظر سیگنال مانده بدست آمده و با برازش یک منحنی خطی، تابع f_R محاسبه می‌شود.

$$r = y - \hat{y} = f_R(\text{Max}f_s) \quad (27-4)$$

که متغیر $\text{Max}f_s$ بیانگر اندازه بیشینه عیب حسگر و تابع f_R بیانگر رابطه بین متغیر r و متغیر $\text{Max}f_s$ است. ذکر این نکته باز هم ضروری است که سیستم کنترل حلقه بسته ذاتا دارای خاصیت تحمل پذیری عیب است ولی جبران عیب توسط آن مستلزم زمان است؛ لذا در تشخیص و تصحیح سریع سرج کمپرسور نمی تواند به کار رود. همچنین با توجه به رابطه (4-10) مقدار مانده در حالت ماندگار دقیقا با مقدار عیب برابر است ولی باز به دلیل زمان بر بودن نمی توان از حالت ماندگار سیگنال مانده برای تعیین مقدار عیب حسگر استفاده کرد. بنا به دلایل مذکور از مقدار بیشینه سیگنال مانده برای شناسایی مقدار مانده استفاده می شود.

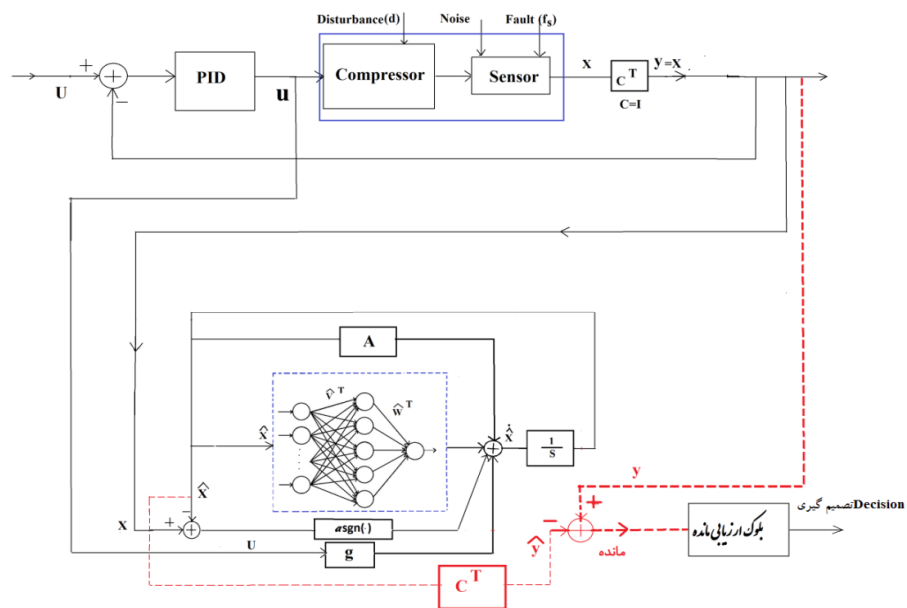
4-2-4 نتایج شبیه سازی طراحی سیستم تشخیص عیب با شبکه های عصبی دینامیکی

در این بخش سرعت کمپرسور یعنی متغیر B به عنوان خروجی در نظر گرفته می شود و شبیه سازی ها برای آن انجام می شود. برای سایر خروجی ها نیز این شبیه سازی ها را می توان تکرار نمود. سیستم حلقه بسته با یک کنترل کننده ساده PI شبیه سازی می شود. ورودی سیستم از نوع پله انتخاب می شود. مساله مهم دیگر آن است که خروجی های کمپرسور دارای رابطه خطی با ورودی متغیر کنترلی برای مقادیر مختلف ورودی هستند و لذا کافیسیت برای یک ورودی کنترلی معلوم، سیستم شناسایی گردد. در رابطه (4-5) ماتریس هورویتز $\bar{A}$ و ماتریس $\bar{B}$ برای تابع نامعلوم g ، با استفاده از روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا به دست می آید. در کد نوشته شده مرتبه سیستم چهار فرض می شود و لذا ماتریس های $\bar{A}$ و $\bar{B}$ به ترتیب عبارتند از:

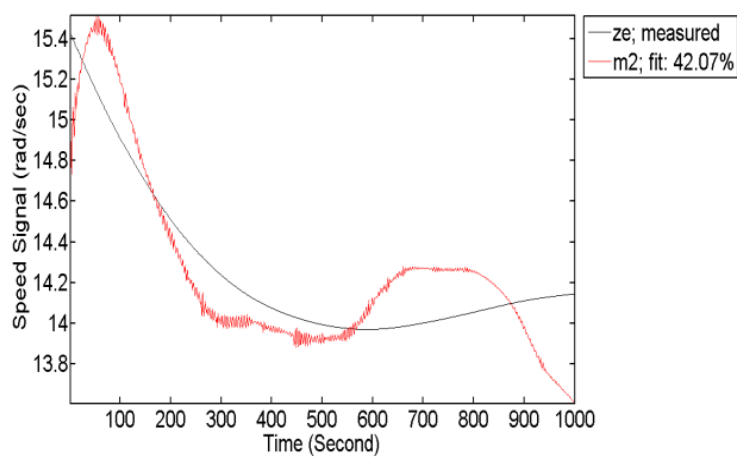
$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -0.0595 & 0.21 & 0.004 & -0.098 \\ -8 \times 10^{-6} & -2.7 \times 10^{-5} & -7 \times 10^{-4} & -9 \times 10^{-4} \\ 0.1 & -0.3 & -0.07 & 0.1 \\ 0.0059 & -10^{-2} & 0.002 & 9 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} -7 \times 10^{-4} & -1.5 \times 10^{-7} & 1.8 \times 10^{-5} & 15 \times 10^{-7} \end{bmatrix}^T$$

هنگامی که خروجی کمپرسور با خروجی مدل خطی شده مستخرج از روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا مقایسه می‌گردد مشاهده می‌شود که دو منحنی نشان داده شده در شکل (4-9) بیش از 42٪ با هم دیگر سازگار هستند.



شکل (4-9) بلوک دیاگرام کلی سیستم تشخیص عیب

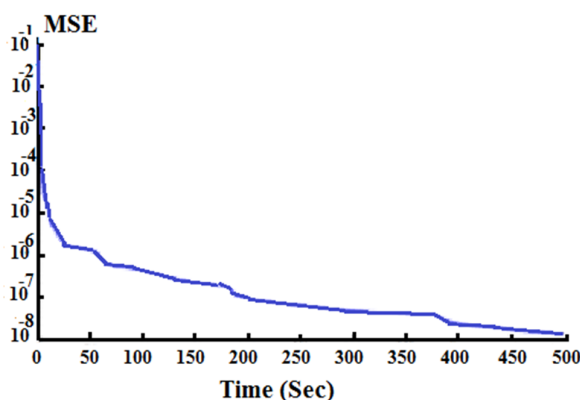


شکل (4-10) سازگاری خروجی سرعت واقعی و مدل خطی مستخرج از روش شناسایی

توجه شود که سازگاری مذکور در صورتی که سیستم اصلی در بازه شناسایی خیلی پیچیده باشد نمی تواند به دست آید. لذا کارکرد شبکه عصبی، شناسایی قسمت غیرخطی در رابطه $f(x) - \bar{A}x$ می باشد. برای آموزش شبکه عصبی دینامیکی پیشنهاد شده، لازم است که داده های خام نرمالیزه گردد زیرا داده های بزرگتر باعث کم رنگ شدن اثر داده های کوچک تر می شود. نرمالیزه کردن داده های آموزشی با استفاده از رابطه (28-4) محدوده آنها را به بازه -1 تا +1 منتقل می نماید.

$$X_n = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (28-4)$$

X_n بردار مقادیر نرمالیزه شده داده ها بوده و $X_{\min}$ ، $X_{\max}$ مقادیر بیشنه و کمینه داده های اصلی می باشند و X بردار داده های اصلی است. شبکه پیشنهادی دارای یک لایه پنهان با 8 نرون و تابع انتقال تانژانت هیپربولیک می باشد و مقدار 1.22×10^{-8} برای میانگین مربعات خطا بعد از 500 تکرار آموزش همانند شکل (11-4) به دست می آید.

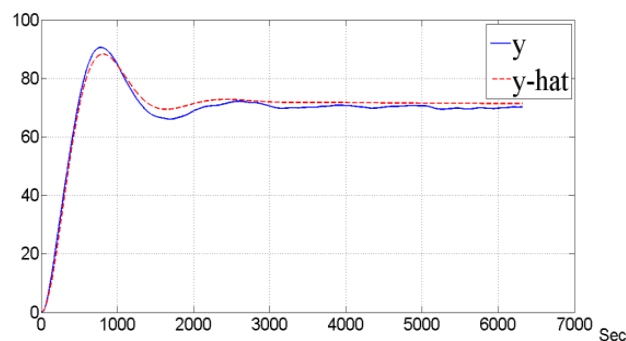


شکل (11-4) خطای میانگین مربعی

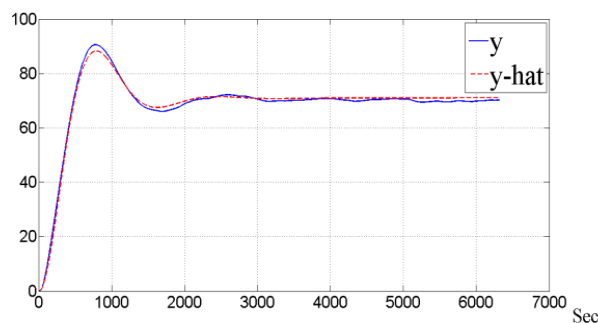
شکل (12-4)، سیگنال y و $\hat{y}$ را به عنوان خروجی کمپرسور و خروجی شبکه عصبی دینامیکی بدون وجود مد لغزشی را در حالت بدون عیب در حسگر B را نشان می دهد. برای سیستم عدم قطعیتی در حد هفت درصد برای چگالی گاز در نظر گرفته شده است. واضح است که سیگنال مانده تولید شده برای تشخیص عیب نمی تواند فقط نمایانگر عیب در حسگرها باشد و اثر عدم قطعیت های مذکور بایستی با مقاوم نمودن شبکه عصبی دینامیکی به حداقل برسد. در شکل (13-4) خروجی $\hat{y}$ و y در

شبکه عصبی دینامیکی مقاوم مشاهده می‌شود. عنصر مد لغزشی اثر عدم قطعیت مذکور را به حداقل می‌رساند. برای به دست آوردن مقدار ضریب α در رابطه (8-4)، مقدار نرم h از رابطه (18-4) به دست آمده و بر اساس آن مقدار کراندار و معلوم $\bar{h}$ به دست می‌آید. مقدار α بایستی بزرگتر از مقدار h باشد [78]. بعد از محاسبات مذکور ضریب α ، مقدار 65٪ تعیین می‌گردد.

نکته 1: در شکل‌های (12-4) تا (22-4) محور عمودی بیانگر متغیر سرعت بوده و همان‌طوری‌که پیشتر ذکر گردید فاقد بعد هستند.

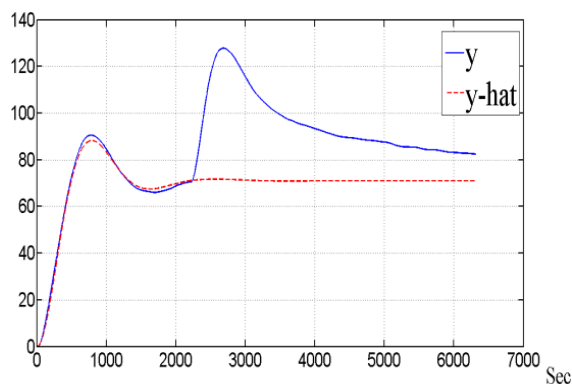


شکل (12-4) خروجی سرعت کمپرسور و شبکه عصبی دینامیکی



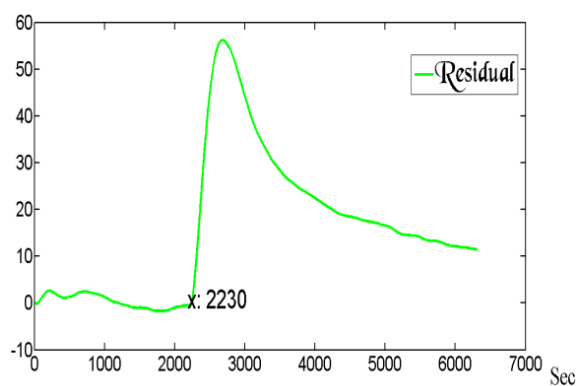
شکل (13-4) خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم با شبکه عصبی دینامیکی

حال با اعمال عیب تجمعی از نوع ناگهانی پله‌ای در لحظه 2100، سیگنال مانده تولید می‌شود.



شکل (14-4) خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم

با شبکه عصبی دینامیکی و عیب تجمعی



شکل (15-4) سیگنال مانده با عیب تجمعی

نکته مهم در شکل (14-4) و (15-4) این است که لحظه 2230 نشان داده شده برای وقوع عیب حسگر است در حالی که در عمل در لحظه 2100 تزریق شده است که قبلا در مورد این اختلاف توضیحاتی ارائه شد. با تکرار این روند و محاسبه اختلاف‌های زمانی می‌توان در رابطه (4-29)، ضریب تصحیح زمانی β را به صورت تجربی محاسبه کرد.

$$t_{act} = \beta \cdot t_{ind} \quad (29-4)$$

که t_{act} , t_{ind} به ترتیب بیانگر زمان‌های نشان داده شده و واقعی است. ضریب β با روش تجربی برابر است با 0/94 در زمان قبل از لحظه 2100 یعنی قبل از وقوع عیب در حسگر، اساسا مقدار مانده

بایستی صفر باشد ولی اندکی تغییرات مشاهده می‌شود. این تغییرات می‌تواند به یکی از دو دلیل زیر و یا هر دو آنها رخ دهد:

(1) عدم حذف کامل نویز حسگر توسط نویز گیر

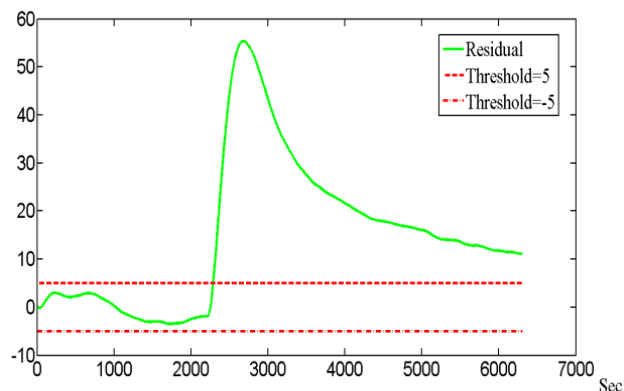
(2) عدم عملکرد درست صد در صدی عنصر مقاوم مد لغزشی در برابر عدم قطعیت‌ها

برای جبران تغییرات مذکور، برای تشخیص عیب، یک بازه آستانه به صورت زیر معرفی می‌شود:

اگر $|r| \leq 5$ در این صورت حسگر سالم است.

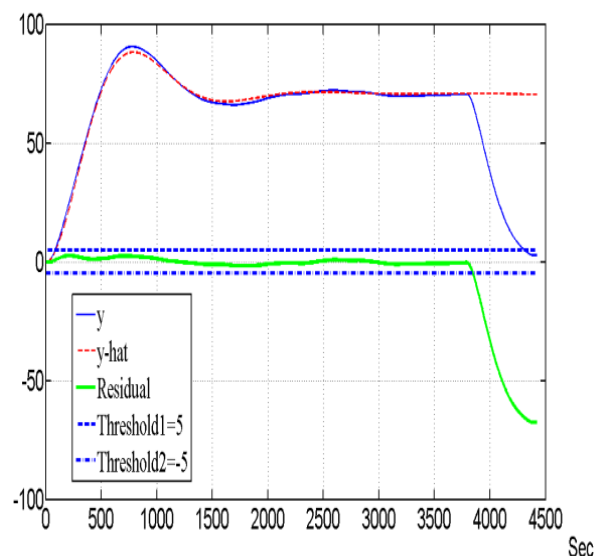
اگر $|r| \geq 5$ در این صورت حسگر عیب دار است.

انتخاب مقادیر آستانه بایستی با در نظر گرفتن دو شاخص مهم آلامر کاذب و آلامر از دست رفته یا گم شده صورت گیرد. اگر مقدار آستانه کوچک انتخاب شود دقت سیستم تشخیص عیب بالا می‌رود ولی به تبع آن احتمال رخداد آلامرهای کاذب افزایش می‌یابد. همچنین بر عکس اگر این مقادیر بزرگ‌تر انتخاب شوند برای عیبهای کوچک‌تر از حد آستانه، سیستم تشخیص عیب، توانایی شناسایی را نخواهد داشت و در واقع آلامر گم شده خواهیم داشت. لذا ضروری است بین این دو شاخص، مصالحه‌ای صورت بگیرد. در شکل (4-16)، سیگنال‌های مانده با وجود حدود آستانه نشان داده شده است.



شکل (4-16) سیگنال مانده و حدود آستانه

در سناریوی دیگر عیب از نوع ضربی با بهره صفر می‌باشد. بهره صفر معادل قطعی حسگر است. در شکل (4-17)، در لحظه 3600 قطعی حسگر منجر به حرکت خروجی به مقدار صفر می‌شود.



شکل (4-17) سیگنال مانده، خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم

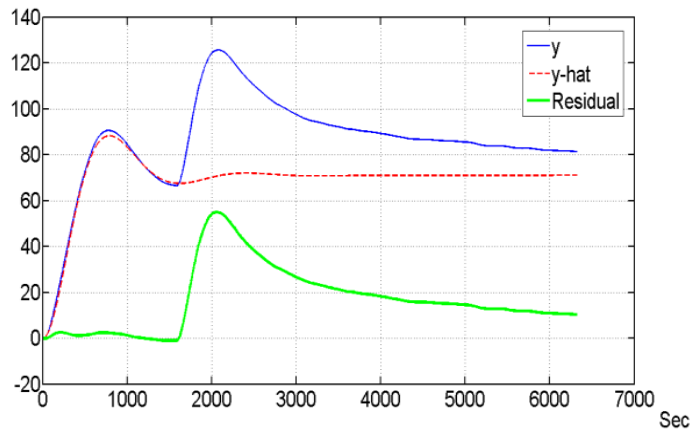
با شبکه عصبی دینامیکی با با قطع شدن حسگر

با تزریق عیب در چند زمان مختلف و با اندازه‌های متفاوت رابطه f_R در رابطه (4-30) با برازش منحنی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$r = 4.1 \times \text{Max}(f_s) - 5.5 \quad (4-30)$$

لذا در شکل (4-9)، بلوک ارزیابی مانده دارای روابط دامنه و زمانی (4-29) و (4-30) برای مقدار مانده خواهد بود. در لحظه 1500 عیبی به اندازه 15 به حسگر تزریق می‌شود و در شکل (4-18) سیگنال‌های y , $\hat{y}$, r نشان داده شده است. زمان عیب نشان داده 1617 بوده در حالی که بر اساس رابطه (4-30) زمان واقعی رخداد عیب 1519 به دست می‌آید. مقدار حداکثر مانده در شکل

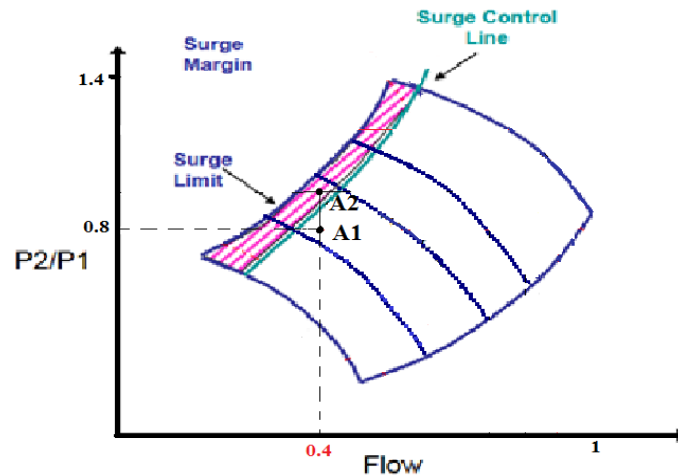
(18-4) برابر است با 54/9. و بر اساس رابطه (4-30) مقدار واقعی عیب برابر با 14/73 است. در نهایت خروجی بلوک ارزیابی مانده بیانگر رخداد عیبی به اندازه 14/73 در لحظه 1519 است.



شکل (18-4) سیگنال مانده، خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم

با شبکه عصبی دینامیکی با وجود عیب در حسگر

تأثیر سیستم تشخیص عیب در تعیین دقیق نقطه کار کمپرسور بر روی منحنی عملکردی کمپرسور به صورت عملی در شکل (4-19) نشان داده شده است. نقطه A1 را نقطه کار واقعی در نظر بگیرید. اما به دلیل رخداد عیب تجمعی در لحظه 1500 همانند شکل (4-18)، نقطه کار کمپرسور به غلط نقطه A2 در سیستم کنترل و مانیتورینگ نشان داده می‌شود. نقطه A1 در ناحیه مجاز کاری کمپرسور قرار دارد ولی نقطه A2 برخلاف آن در ناحیه سرچ یا همان غیر مجاز قرار دارد و سیستم کنترل سرچ کمپرسور عکس العمل نشان داده و نقطه A2 در اثر عمل سیستم کنترلی مذکور به سمت راست منحنی سوق داده می‌شود و به ظاهر نقطه کاری A2 از ناحیه سرچ خارج می‌شود ولی در عمل آنچه اتفاق می‌افتد این است که نقطه کاری واقعی A1 از خط سرچ که همان خط بازده بیشینه است دورتر می‌گردد و کمپرسور با بازده کمینه کار می‌کند.



شکل (19-4) نقش سیستم تشخیص عیب در تصحیح نقطه کار کمپرسور

در این بخش از شبکه‌های عصبی دینامیکی مبتنی بر شناسایی مقاوم برای تولید سیگنال مانده استفاده شد. برای تعیین ماتریس اولیه هورویتز در شبکه‌های مذکور، روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا پیشنهاد شد. اهمیت این سیستم در تعیین دقیق محل نقطه در شکل (19-4) به وضوح نشان داده می‌شود که بدون وجود سیستم تشخیص عیب و سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب؛ یک نقطه کاری مجاز به عنوان نقطه سرچ تشخیص داده شود و یا بر عکس نقطه سرچ به عنوان نقطه مجاز کاری شناخته شود. در این بخش، استفاده از شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم مبتنی بر مد لغزشی ایراد بزرگ بودن و حساس یودن شبکه‌های عصبی متعارف به داده‌های آموزشی و عدم قطعیتها را برطرف کرد و برای پیدا کردن ماتریس پایدار هورویتز $\bar{A}$ و ماتریس خروجی $\bar{B}$ از روش شناسایی مبتنی بر زیر فضا استفاده شد. برای واحد ارزیابی مانده در این بخش روش تجربی بکار برده شد. که مزیت آن عدم نیاز به الگوریتم پیچیده همانند بخش قبل است اما نسبت به الگوریتم بخش قبلی دقت لازم را ندارد. نکته مهم دیگر آن است که عیب عمده کلی شبکه‌های عصبی کمینه کردن ریسک تجربی است که برای جبران از رگرسیون بردارهای پشتیبان در بخش بعد استفاده می‌گردد و با رگرسیون بردارهای پشتیبان ریسک عملیاتی کمینه می‌گردد.

3-4 سیستم تشخیص عیب با رگرسیون بردارهای پشتیبان

در این بخش برای تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسورها از ایده رگرسیون بردارهای پشتیبان¹ (SVR) استفاده می‌شود. ایده SVR به عنوان ابزاری نوین در شبکه‌های عصبی برای تولید سیگنال مانده استفاده می‌گردد. با انجام شبیه‌سازی‌های لازم مزایای SVR در تشخیص عیب نشان داده می‌شود.

ایده اصلی در بحث تشخیص عیب، تولید مانده همچون رابطه (31-6) است. در این بخش برای تولید مانده، خروجی تخمینی با استفاده از ماشین بردارهای پشتیبان به دست می‌آید.

$$r = y - \hat{y} \quad (31-4)$$

با تعریف مقدار مثبت $\varepsilon > 0$ و مقایسه آن با سیگنال مانده، الگوریتم ساده برای تشخیص عیب به صورت زیر قابل بیان است:

اگر $|r| < \varepsilon$ در این صورت حسگر سالم است.

در غیر این صورت $|r| \geq \varepsilon$ می‌باشد و حسگر عیبدار می‌باشد.

توجه شود که انتخاب نامناسب مقدار آستانه می‌تواند منجر به ایجاد آلام‌های کاذب² و یا آلام‌های گم‌شده³ شود. بدین ترتیب که انتخاب کوچک مقدار آستانه منجر به افزایش حساسیت سیستم ولی در مقابل افزایش تعداد آلام‌های کاذب می‌شود و انتخاب مقدار بزرگ برای مقدار آستانه باعث کاهش حساسیت سیستم تشخیص عیب و افزایش آلام‌های گم شده می‌شود. لذا بایستی در انتخاب آن دقت شود که مصالحه‌ای بین آنها صورت گیرد.

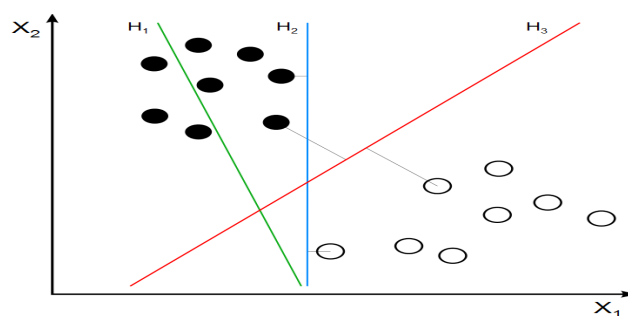
همان‌طوری که پیشتر ذکر شد روش پشتیبان تحلیلی برای تشخیص عیب به دو دسته عمده مبتنی بر مدل و مبتنی بر داده تقسیم می‌شود و شبکه‌های عصبی به عنوان مهم‌ترین ابزار در روش

¹ Support Vector Regression

² False alarm

³ Missed alarm

مبتنی بر داده مطرح گردید. در این بخش از ماشین بردارهای پشتیبان و رگرسیون بردارهای پشتیبان به عنوان ابزار سودمند دیگری در روش مبتنی داده بهره گرفته می‌شود. در رهیافت تشخیص عیب با SVM نیازی به مدل ریاضی و فیزیکی سیستم نیست و در ضمن اغتشاش و نویز در سیستم می‌تواند در نظر گرفته شود. SVM ها می‌توانند یک صفحه یا مجموعه‌ای از صفحات با ابعاد متفاوت را برای طبقه‌بندی و یا رگرسیون تولید کنند [83]. موضوع SVM اولین بار توسط وپنیک و همکارانش در سال 1996 مطرح گردید [84]. تکنیک SVR در تولید مدل توربوماشینها برای تشخیص عیب [85] به کار رفته است. در [86] یک سیستم تشخیص عیب هوشمند به روش SVR برای مساله شناسایی عیب شیرهای کمپرسورهای رفت و برگشتی مطرح گردید. نتایج حاصل در این کار به عملکرد منعطف این تکنیک طبقه‌بندی در مانیتورینگ وضعیت شیرها اشاره دارد. شبکه‌های عصبی در قالب یک تئوری آماری، ریسک تجربی¹ را کمینه می‌کند. در حالی که SVM ریسک عملیاتی² را بر اساس تئوری‌های آماری کمینه‌سازی می‌کند [87]. در شکل (4-20) خط تفکیک بندی کننده H_1 از نظر شبکه های عصبی و ماشین بردارهای پشتیبان درست نیست اما خطوط H_2, H_3 از دیدگاه شبکه های عصبی درست و یکسان است اما اگر از روش طبقه بندی با استفاده از بردارهای پشتیبان استفاده شود در اینصورت H_3 نسبت به خط H_2 مزیت دارد. علت این تمایز بین تفکیک کننده همان استفاده از تکنیک کمینه کردن ریسک عملیاتی به جای ریسک تجربی در روش بردارهای پشتیبان است.

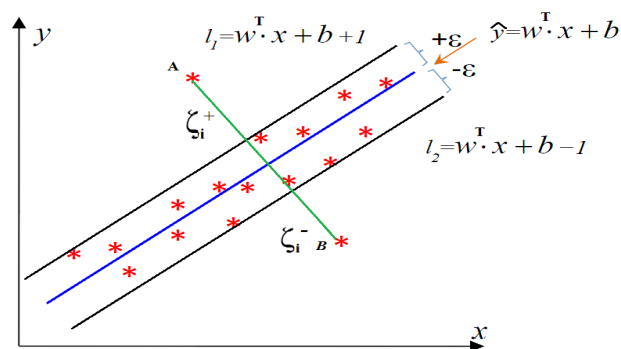


شکل (4-20) تفکیک کننده های مختلف

¹Empirical risk

² Structural risk

SVR با استفاده از حيله کرنل مي‌تواند داده‌ها را با ابعاد بالاتر بنگارد. SVR به دليل كمينه‌سازي مقدار ريسك عملياتي داراي جذابيت بيشترى نسبت به ساير روشهاى رگرسيون است. فرض كنيد به n تا حسگر دسترسى داريم و داده‌هاى خروجى آنها در هر لحظه قابل اندازه‌گيرى است و هم‌زمان همه حسگرها را كالibre مي‌كنيم. بعد از سپري شدن زمان t از زمان كالibreاسيون، عيب دار بودن يكي از حسگرها براى ما محتمل مي‌گردد ولي زمان رخداد عيب دقيقاً براى ما معلوم نيست. در ضمن مطمئن هستيم كه بقيه حسگرها $m=n-1$ حتماً از زمان كالibreاسيون تا لحظه t سالم هستند. بردار ورودى $x_i \in R^m$ ، خروجى m تا حسگر سالم را در لحظه i نشان مي‌دهد كه $i=1, \dots, N$ و N بيانگر تعداد نمونه از زمان كالibreاسيون تا لحظه t است. براى سادگى بيان فرض كنيد كه سيستم داراي يك ورودى بوده و $m=1$ است و داده‌هاى خروجى حسگر سالم x و حسگر معيوب y در شكل (21-4) نشان داده شده است.



شكل (21-4) داده‌هاى حسگرهاى سالم و عيب دار

در اينجا يكي از نتايج و نوآوريتهاى اصلى رساله در قالب بيان يك قضيه براى مولد مانده جهت تشخيص عيب حسگر با استفاده از رگرسيون بردارهاى پشتيبان بيان مي‌گردد.

1-3-4 قضيه تشخيص عيب با SVR

براى خروجى‌هاى حسگر معيوب در نمونه‌هاى $y_1, \dots, y_N$ ، مي‌توان يك تابع نرم $\hat{y}$ را براى مقادير خروجى‌هاى مذكور نسبت به $x_i \in R^m$ به دست آورد كه آن تابع مي‌تواند داده‌هاى

مذکور معیوب را با مقدار خطای قابل قبول ε تقریب زد.

$$\hat{y} = f(x) = w^T x + b \quad (32-4)$$

بر اساس رابطه (31-4) مقدار مانده r با رابطه (33-4) قابل محاسبه است.

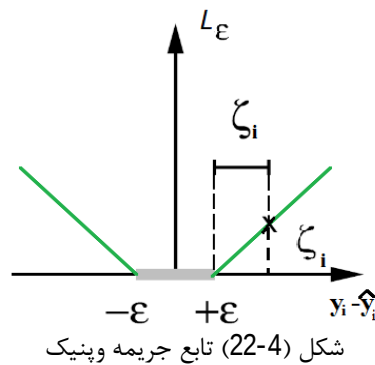
$$r = y - (w^T x + b) \quad (33-4)$$

اثبات:

تعریف تابع وپنیک¹ $L_\varepsilon(y, \hat{y})$ به صورت زیر تعریف میشود [84]:

$$L_\varepsilon(y_i, \hat{y}_i) = \begin{cases} 0 & |y_i - \hat{y}_i| \leq \varepsilon \\ + & \text{Otherwise} \end{cases} \quad \forall i \quad (34-4)$$

رابطه (34-4) به صورت شکل (22-4) قابل نمایش است:



تابع جریمه می تواند به صورت درجه دوم، خطی و مربعی میانه باشد. برای سادگی تابع جریمه خطی

(35-4) انتخاب می شود.

$$L_\varepsilon(y_i, \hat{y}_i) = \begin{cases} 0 & |y_i - \hat{y}_i| \leq \varepsilon \\ |y_i - \hat{y}_i| - \varepsilon & \text{Otherwise} \end{cases} \quad \forall i \quad (35-4)$$

هدف از الگوریتم رگرسیون، پیدا کردن منحنی هموار برای داده ها است. منظور از هموار بودن منحنی

پیدا کردن یک مقدار کوچک برای w است. یک راه برای پیدا کردن w مذکور، کمینه کردن $\|w\|^2$

است. لذا مساله رگرسیون را می توان به صورت مساله بهینه سازی محدب نوشت [88]:

¹ Vapnik

$$\min D = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (36-4)$$

Subject to:

$$|y_i - \hat{y}_i| \leq \varepsilon \quad (37-4)$$

در شکل (20-4) نقاط A,B خارج از تیوب بین دو خط موازی l_1, l_2 هستند برای این نقاط، مقادیر پناستی ζ_i^+ , ζ_i^- تعریف می‌شوند و مساله بهینه‌سازی درجه دوم با رابطه (38-4) به دست می‌آید [89].

$$\min R = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\zeta_i^- + \zeta_i^+) \quad \forall i \quad (38-4)$$

Subject to:

$$\begin{aligned} -\varepsilon - \zeta_i^- &\leq y_i - \hat{y}_i \leq \varepsilon + \zeta_i^+ \\ \zeta_i^- &\geq 0 \\ \zeta_i^+ &\geq 0 \end{aligned} \quad \forall i$$

ثابت C بزرگتر از صفر می‌باشد و در ضمن یک حسگر نمی‌تواند در یک لحظه دو مقدار متفاوت عیب داشته باشند لذا یکی از متغیرهای ζ_i^+ , ζ_i^- قطعاً صفر می‌باشد.

$$\zeta_i^- \zeta_i^+ = 0 \quad (39-4)$$

مساله بهینه‌سازی در رابطه (38-4) یک تابع هدف اولیه بوده و برای حل آن، مساله دوگان بایستی طرح شود. ایده اصلی در طرح مساله دوگان نوشتن تابع لاگرانژ و قیود مربوطه با معرفی یک مجموعه از متغیرها است. تابع هدف اولیه در رابطه (8-4) را می‌توان همانند رابطه (40-4) به صورت دوگان نوشت [88-90].

$$\begin{aligned} L_p = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^N (\zeta_i^- + \zeta_i^+) - \sum_i \alpha_i^+ (y_i - \hat{y}_i + \varepsilon + \zeta_i^-) \\ - \sum_i \alpha_i^- (y_i - \hat{y}_i - \varepsilon - \zeta_i^+) - \sum_i \mu_i^+ \zeta_i^+ - \sum_i \mu_i^- \zeta_i^- \end{aligned} \quad (41-4)$$

که ضرایب لاگرانژ α_i^+ , μ_i^- , α_i^- , μ_i^+ مقادیر مثبتی هستند. برای بهینه‌سازی، متغیرهای اولیه بایستی با مشتق گیری L نسبت به ضرایب مذکور حذف شوند.

$$\frac{\partial L_p}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) x_i \quad (41-4)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) = 0 \quad (42-4)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial \zeta_i^+} = 0 \rightarrow \alpha_i^+ + \mu_i^+ = C \quad (43-4)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial \zeta_i^-} = 0 \rightarrow \alpha_i^- + \mu_i^- = C \quad (44-4)$$

متغایب مساله بهینه‌سازی دوگان می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [87].

$$\min L_D = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) (\alpha_j^+ - \alpha_j^-) x_i^T x_j^T - \sum_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) t_i + \varepsilon \sum_i (\alpha_i^+ + \alpha_i^-) \quad (45-4)$$

Subject to:

$$\sum_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) = 0$$

$$0 \leq \alpha_i^+ \leq C$$

$$0 \leq \alpha_i^- \leq C$$

شرایط کراش کان تاکر¹ [87] برای حل مساله لاگرانژ بسیار کارساز هستند. این شرایط بیان می‌کنند که در راه حل، ضرب بین متغیرهای دوگان و قیود بایستی حذف شوند.

$$\alpha_i^+ (y_i - \hat{y}_i + \varepsilon + \zeta_i^+) = 0 \quad (46-4)$$

$$\alpha_i^- (y_i - \hat{y}_i - \varepsilon - \zeta_i^-) = 0 \quad (47-4)$$

$$\mu_i^+ \zeta_i^+ = (C - \alpha_i^+) \zeta_i^+ = 0 \quad (48-4)$$

$$\mu_i^- \zeta_i^- = (C - \alpha_i^-) \zeta_i^- = 0 \quad (49-4)$$

با اعمال شرایط مذکور، مساله دوگان به صورت زیر نوشته می‌شود [87].

¹ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

$$\min L_D = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j (\alpha_i^+ - \alpha_i^-)(\alpha_j^+ - \alpha_j^-) x_i^T x_j^T - \sum_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) t_i + \varepsilon \sum_i (\alpha_i^+ + \alpha_i^-) \quad (50-4)$$

s.t:

$$\sum_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) = 0$$

$$0 \leq \alpha_i^+ \leq C$$

$$0 \leq \alpha_i^- \leq C$$

تبصره (1-4): با توجه روابط (46-4) تا (50-4) می توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

1- فرض کنید که $\alpha_i^+ = 0$ لذا از رابطه (48-4) می توان نوشت $\zeta_i^+ = 0$ و $\mu_i^+ = C$ و در ضمن

از رابطه (48-4) خواهیم داشت

$$\hat{y}_i - y_i = \varepsilon \quad (51-4)$$

2- فرض کنید که $\alpha_i^- = 0$ لذا از رابطه (49-4) می توان نوشت $\mu_i^- = C$ و $\zeta_i^- = 0$ و در ضمن

از رابطه (47-4) خواهیم داشت:

$$\hat{y}_i - y_i = -\varepsilon \quad (52-4)$$

3- فرض کنید که $0 < \alpha_i^+ < C$ لذا از رابطه (48-4) می توان نوشت $0 < \mu_i^+ < C$ و $\zeta_i^+ = 0$ و

در ضمن از روابط (46-4) و (47-4) خواهیم داشت:

$$\alpha_i^- = 0, \mu_i^+ = C, \hat{y}_i - y_i = \varepsilon, \alpha_i^- \alpha_i^+ = 0 \quad (53-4)$$

4- فرض کنید که $0 < \alpha_i^- < C$ لذا از رابطه (49-4) می توان نوشت $0 < \mu_i^- < C$ و $\zeta_i^- = 0$ و

در ضمن از رابطه (46-4) و (47-4) خواهیم داشت:

$$\alpha_i^+ = 0, \mu_i^- = C, \hat{y}_i - y_i = -\varepsilon, \alpha_i^- \alpha_i^+ = 0 \quad (54-4)$$

تبصره (2-4): داده های آموزشی که با ضرایب غیر صفر همراه است؛ بردارهای پشتیبان نامیده

می شوند.

$$S = \{i | 0 < \alpha_i^+ + \alpha_i^- < C, \alpha_i^- \alpha_i^+ = 0\} \quad (55-4)$$

استنتاج (1-4): رابطه (55-4) بیان می‌دارد که α_i^+ و α_i^- همزمان صفر نیستند و به همین جهت می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

$$a) \alpha_i^- = \alpha_i^+ = 0, \quad (56-4)$$

$$b) 0 < \alpha_i^+ < C, \alpha_i^- = 0$$

$$c) 0 < \alpha_i^- < C, \alpha_i^+ = 0,$$

$$d) \alpha_i^+ = C, \alpha_i^- = 0,$$

$$e) \alpha_i^- = C, \alpha_i^+ = 0$$

تبصره (3-4): با توجه به بند 3 در تبصره (1-4) و نتیجه b در استنتاج (1-4) نتیجه زیر را می‌توان به دست آورد.

$$0 < \alpha_i^+ < C, \alpha_i^- = 0, \hat{y}_i - y_i = \varepsilon \quad i \in s \quad (57-4)$$

همچنین با توجه به بند 4 در تبصره (1-4) و نتیجه c در استنتاج (1-4) نتیجه زیر را می‌توان به دست آورد:

$$0 < \alpha_i^- < C, \alpha_i^+ = 0, \hat{y}_i - y_i = -\varepsilon \quad i \in s \quad (58-4)$$

که "s" مجموعه بردارهای پشتیبان را نشان می‌دهد و روابط (27-4) و (28-4) را می‌توان به فرم بسته زیر نوشت:

$$\hat{y}_i = y_i + \text{sgn}(\alpha_i^+ - \alpha_i^-) \varepsilon, \quad i \in s \quad (59-4)$$

با ترکیب روابط (52-4) و (59-4) تابع هموار می‌تواند به فرم زیر تولید شود:

$$w^T x + b = y_i + \text{sgn}(\alpha_i^+ - \alpha_i^-) \varepsilon \quad (60-4)$$

مقدار بایاس b می‌تواند از رابطه (30-4) محاسبه شود.

$$b = \frac{1}{|s|} \sum_{i \in s} [y_i + \text{sgn}(\alpha_i^+ - \alpha_i^-) \varepsilon - w^T x] \quad (61-4)$$

معمولا با استفاده از حیل کرنل¹[91-92]، می‌توان داده‌ها را به فضایی با ابعاد بالاتر نگاشت داد. کرنل‌های متعارف مورد استفاده برای اینکار شامل کرنل خطی، چند جمله‌ای، گوسین و اسپیلاین² است. رابطه (32-4) می‌تواند با استفاده از حيله کرنل $K(x_i, x)$ و مقدار w در رابطه (42-4) را مجدداً بازنویسی کرد.

$$\hat{y} = \sum_i (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) K(x_i, x) + b \quad (62-4)$$

کرنل‌های ثابت $k(x, x') = k(x - x')$ کاملاً فراگیر هستند. کرنل گوسین پرکاربردترین بوده و در این رساله نیز از آن استفاده می‌شود

$$k(x, x') = e^{-\frac{\|x - x'\|^2}{2\sigma^2}} \quad (63-4)$$

حال مساله بهینه‌سازی دوگان در رابطه (51-4)، با حیل کرنل بازنویسی می‌گردد. لذا برای سادگی ابتدا تعریف زیر صورت می‌گیرد.

$$h_{ij} = K(x_i, x_j) \quad (64-4)$$

با استفاده از تعریف (64-4) ماتریس H به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H & -H \\ -H & H \end{bmatrix} \quad (65-4)$$

$$H = [h_{ij}] \in R^{n \times n} \quad \text{که}$$

با یک جمع‌بندی، مساله بهینه‌سازی در رابطه (50-4) به صورت رابطه کمینه‌سازی (66-4) تبدیل می‌شود.

$$\min \frac{1}{2} \alpha^T \mathbf{H} \alpha + f^T \alpha \quad (66-4)$$

که در رابطه مذکور α و f بردار افزوده به شکل رابطه (67-4) هستند.

¹ Kernel Tricks

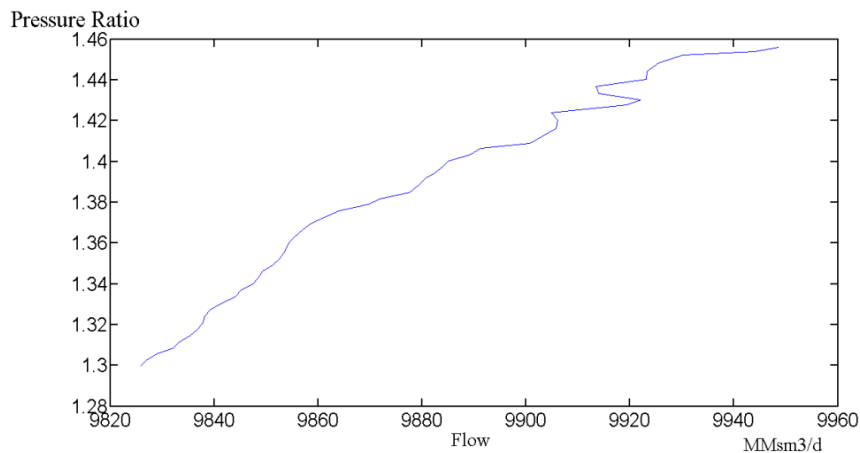
² Spline

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha^+ \\ \alpha^- \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} -\hat{y}_i + \varepsilon \\ \hat{y}_i + \varepsilon \end{bmatrix} \quad (67-4)$$

رابطه (66-4) یک مساله برنامه‌ریزی درجه دوم است و α می‌تواند با حل آن به دست آید و w, b نیز از روابط (42-4) و (60-4) به دست می‌آید. مانده در رابطه (4-33) نیز متعاقبا به دست می‌آید.

2-3-4 نتایج شبیه‌سازی طراحی سیستم تشخیص عیب با رگرسیون بردارهای پشتیبان

تکنیک تشخیص عیب در کمپرسور گاز واقعی اعمال می‌شود. این کمپرسور ساخت شرکت Dresser-Rand. S.A بوده و مدل آن 553P2 است. ظرفیت عادی کاری آن $9925 \text{ m}^3/\text{h}$ بوده بیشینه فشار خروجی کمپرسور مذکور $75/1 \text{ Kg/cm}^2$ بوده و محدوده کاری سرعت از 7125 RMP تا 9975 RMP می‌باشد. بیشینه دما 150°C درجه سانتیگراد است. سرعت کمپرسور و جریان عبوری از آن به متغیرهای ورودی با حسگرهای سالم در نظر گرفته می‌شوند. و متغیر نسبت فشار کمپرسور به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته می‌شود و این متغیر عیب دار نیز می‌باشد. داده‌های لازم از کمپرسور بین سرعت 8300 RPM تا 8800 RPM به دست می‌آید و در این بازه سرعت، 50 نمونه ثبت می‌گردد و نسبت فشار کمپرسور و جریان آن در شکل (4-23) ترسیم می‌گردد.

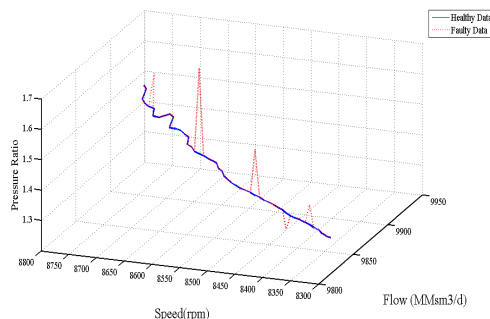


شکل (4-23) منحنی نسبت فشار کمپرسور نسبت به جریان

در شکل (4-24) نسبت فشار کمپرسور نسبت به جریان و سرعت کمپرسور ترسیم می‌شود. توجه شود که عیبها همانند جدول (4-3) در حسگر نسبت فشار کمپرسور اعمال می‌شود. یک مدار الکتریکی برای اعمال عیب به سیگنال خروجی مذکور متصل می‌گردد. عیب تجمعی در واقع یک سیگنال پله بوده و عیب ضربی نیز با استفاده از یک مدار پتانسیومتر ساده قابل اعمال است. همچنین عیب در سیگنال نسبت فشار می‌تواند با اعمال عیب به یکی از حسگرهای فشار ورودی و یا خروجی کمپرسور به دست آید. البته می‌توان با اعمال عیب به هر دو سیگنال به صورت همزمان نیز عیب نسبت فشار را تولید کرد. البته توجه شود که اعمال عیب در سیگنال فشار خروجی کمپرسور دارای ارجحیت است. زیرا عیب در سیگنال فشار ورودی می‌تواند به ناپایداری کمپرسور منجر شود. در ضمن عیب اعمالی بایستی دارای مقادیر قابل قبول باشد زیرا مقادیر بزرگ عیب نیز می‌تواند منجر به ناپایداری شود.

جدول (4-3) عیبهای اعمالی به متغیر فشار کمپرسور

Scenario	Abnormality type	Sample Number	Abnormalities Value
1	Additive	6 th	0.07
2	Multiplicative	11 th	0.96 (Abnormalities Coefficient) is equivalent to 0.051 incipient step
3	Additive	18 th	0.1651
4	Additive	32 nd	0.3354
5	Multiplicative	45 th	1.08 (Abnormalities Coefficient) is equivalent to 0.051 incipient step

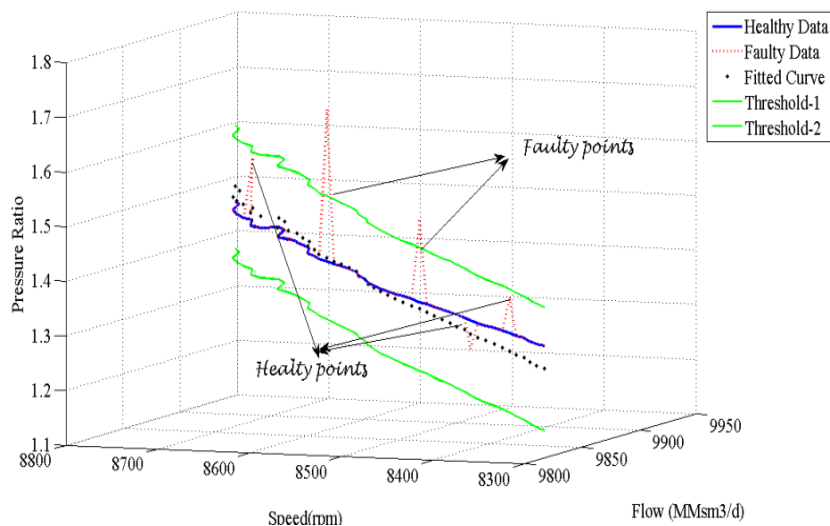


شکل (4-24) منحنی نسبت فشار کمپرسور نسبت به سرعت و جریان کمپرسور

براساس قضیه (4-1)، می‌توان یک تابع هموار در رابطه (4-32) بر داده‌های آموزشی شکل (4-24) با استفاده از SVR برازش کرد. مقدار آستانه برای تشخیص عیب به اندازه 10٪ سیگنال $\hat{y}$ انتخاب می‌شود و لذا الگوریتم تشخیص عیب را می‌توان به صورت عبارت زیر بازنویسی کرد.

"اگر $r = y - \hat{y} \leq (\varepsilon = 0.1\hat{y})$ در این صورت حسگر سالم است. در غیر این صورت حسگر عیب دار است."

برای مثال، در سناریوی دوم جدول (4-3)، عیب ضربی با بهره 0/96 در لحظه 11 به سیگنال اعمال می‌شود و این عیب می‌تواند مقدار سیگنال را در لحظه مذکور به اندازه 0/07 تغییر دهد. مقدار عیب کمتر از مقدار آستانه بوده و لذا این عیب اعمالی با در نظر گرفتن آستانه مذکور به عنوان عیب در نظر گرفته نمی‌شود. زیرا مقدار آستانه در لحظه مذکور برابر با 0/128 است. در سناریوی دیگر در لحظه 32، یک عیب تجمعی به اندازه 0/3354 اعمال می‌شود و این عیب بزرگ‌تر از مقدار آستانه 0/14 است و لذا به عنوان عیب در نظر گرفته می‌شود نتایج خروجی سیستم تشخیص عیب برای سناریوهای مختلف مطرح در جدول (4-3) در جدول (4-4) نشان داده شده است.



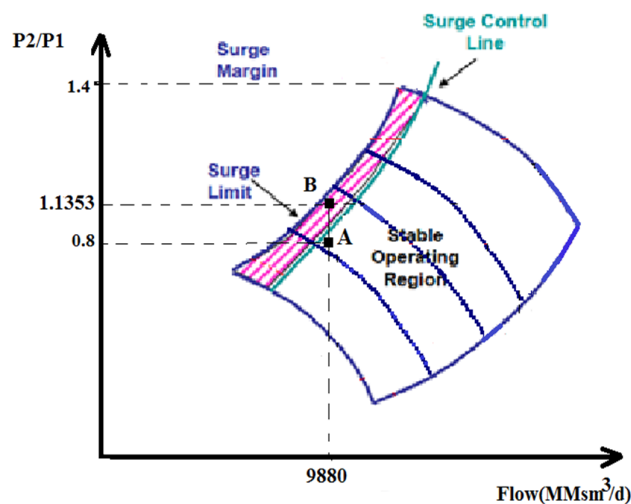
شکل (4-25) منحنی نسبت فشار کمپرسور به همراه منحنی هموار

جدول (4-4) نتایج سیستم تشخیص عیب

Scenario	Abnormality type	Sample Number	Abnormalities Value	Threshold value	Healthy	Faulty
1	Additive	6 th	0.07	0.128	*	
2	Multiplicative	11 th	0.96 (Abnormality gain) is equivalent to 0.051 incipient step	0.13	*	
3	Additive	18 th	0.1651	0.134		*
4	Additive	32 nd	0.3354	0.14		*
5	Multiplicative	45 th	1.08 (Abnormality gain) is equivalent to 0.051 incipient step	0.146	*	

داده‌های سالم و معیوب در شکل (4-25) نشان داده شده است و نتایج در این شکل به همراه خط آستانه نشان داده می‌شود و نقاط عیب بیرون از حد آستانه نیز در شکل مذکور به وضوح دیده می‌شود.

کارکرد سیستم تشخیص عیب در حسگرهای کمپرسور در عملکرد صحیح تشخیص سرج کمپرسور در این بخش نشان داده خواهد شد. در شکل (4-26) در لحظه 32، نقطه A1 نقطه کاری کمپرسور می‌باشد این نقطه در ناحیه پایدار قرار دارد. عیب تجمعی لحظه‌ای در حسگر نسبت فشار به اندازه 0/3353 در جریان 9880 موجب هدایت کارکرد کمپرسور به نقطه B می‌شود که به خط سرج بسیار نزدیک است. سیستم کنترل سرج کمپرسور برای پیشگیری از سرج، نقطه B را با اعمال عکس العمل مناسب به سمت راست هدایت می‌کند ولی آنچه در عمل اتفاق می‌افتد دور شدن عملکرد کمپرسور از ناحیه بازده بیشینه است. لذا سیستم تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور می‌تواند این عیب را تشخیص دهد و مانع از انحراف کمپرسور از بازده بیشینه شود.



شکل (26-4) سیستم تشخیص عیب در تشخیص نقطه کار صحیح کمپرسور

4-4 نتیجه گیری:

در این فصل از تشخیص عیب مبتنی بر داده و ابزارهای شبکه‌های عصبی، شبکه‌های عصبی دینامیکی مقاوم مبتنی بر مد لغزشی و رگرسیون بردارهای پشتیبان برای تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور استفاده گردید. در انتهای هر بخش کارایی هر کدام از ابزارها برای تولید مانده با بیان نتایج تشریح گردید. مزایا و معایب هر کدام از آنها نیز ذکر شد. برای واحد ارزیابی مانده از دو روش تجربی و ارایه الگوریتم کامل ارزیابی مانده استفاده شد. مزیت روش تجربی ساده بودن آن است اما نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم به کارایی بهتر آن اشاره دارد.

فصل پنجم:

رهیافت جبری مبتنی بر مدل برای سیستم تشخیص عیب

مقدمه

در این فصل یک رهیافت جبری برای سیستم تشخیص عیب مبتنی بر مدل در حسگرهای کمپرسور ارائه می‌گردد. این رهیافت جبری مبتنی بر مفاهیم هندسه محاسباتی شامل پایه‌های گروبنر و تئوری حذف معرفی می‌باشد. در این فصل از مدل غیرخطی مور-گریتز با وجود عیب، عدم قطعیت و اغتشاش مورد استفاده قرار می‌گیرد و کارایی آن جهت تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور با انجام شبیه‌سازیهای کامپیوتری تشریح می‌گردد.

5-1 مفاهیم اساسی در هندسه محاسباتی

5-1-1 تک جمله‌ای¹ و چند جمله‌ای²:

یک تک جمله‌ای از $x_1, \dots, x_n$ حاصل ضربی به شکل $x_1^{\alpha_1} \cdot x_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_n}$ است که در آن همه توان‌های $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ اعداد صحیح نامنفی هستند و یک چند جمله‌ای f از $x_1, \dots, x_n$ با ضرایب k در یک مجموع خطی متناهی از تک جمله‌ها است. چند جمله‌ای f را به شکل $f = \sum_{\alpha} a_{\alpha} x^{\alpha}, a_{\alpha} \in k$ خواهیم نوشت که در آن، مجموع روی تعداد متناهی از n تایی‌های $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ تغییر میکند. مجموعه همه چند جمله‌ای‌ها با n متغیر $x_1, \dots, x_n$ و با ضرایب در k را با نماد $k[x_1, \dots, x_n]$ نمایش می‌دهند [93].

5-1-2 تعریف ایده‌آل³

زیر مجموعه $I \subset k[x_1, \dots, x_n]$ یک ایده‌آل است هرگاه در شرایط زیر صدق کند [93]:

$$(i) \quad 0 \in I. \quad (1-5)$$

$$(ii) \quad \text{If } f, g \in I, \text{ then } f + g \in I.$$

¹ Monomial

² Polynomial

³ Ideal

(iii) If $f \in I, I = x_1, \dots, x_n$ then $hf \in I$

3-1-5 چند جمله‌ای پیشرو¹

فرض کنید چند جمله‌ای ناصفر $f \in k[x_1, \dots, x_n]$ به شکل $f = a_0 x^m + a_1 x^{m-1} + \dots + a_m$ داده شده باشد که در آن $a_i \in k$ و $a_0 \neq 0$ در این صورت $a_0 x^m$ جمله پیشرو f نامیده می‌شود و با نماد $LT(f) = a_0 x^m$ نشان داده می‌شود [93].

4-1-5 ترتیب تک جمله‌ای

یک ترتیب تک جمله‌ای روی $k[x_1, \dots, x_n]$ رابطه‌ای مانند $\succ$ روی $Z_{\geq 0}^n$ ، یا به طور معادل رابطه‌ای روی مجموعه تک جمله‌ای‌های x^α و $\alpha \in Z_{\geq 0}^n$ است به طوری که [93-94]:

$\succ$ یک ترتیب کلی (یا خطی) روی $Z_{\geq 0}^n$ است.

هرگاه $\alpha \succ \beta$ و $\gamma \in Z_{\geq 0}^n$ ، آنگاه $\alpha + \gamma \succ \beta + \gamma$ است.

$\succ$ روی $Z_{\geq 0}^n$ خوش‌ترتیب است. (یعنی هر زیر مجموعه ناتهی $Z_{\geq 0}^n$ نسبت به $\succ$ دارای کوچکترین عضو است.)

سه ترتیب پرکاربرد عبارتند از [93-94]:

ترتیب الفبایی²: فرض کنید $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ و $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ عناصری از $Z_{\geq 0}^n$ باشد گوئیم

$\alpha \succ_{lex} \beta$ هرگاه، در تفاضل برداری $\alpha - \beta \in Z_{\geq 0}^n$ ، اولین درایه ناصفر از سمت چپ مثبت باشد. به

عنوان مثال $(0, 3, 4) \succ_{lex} (1, 2, 0)$ ، چون $(-4, -1, 1) = (0, 3, 4) - (1, 2, 0)$ ، و $1 > 0$.

ترتیب الفبایی مدرج¹: فرض کنید $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ و $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ عناصری از $Z_{\geq 0}^n$ باشد گوئیم

$\alpha \succ_{grlex} \beta$ هرگاه در $\alpha, \beta \in Z_{\geq 0}^n$ ، داشته باشیم $|\alpha| > |\beta|$

¹ leading term

² Lexicographical order

به عنوان مثال $(3و2و0) \succ_{grlex} (1و2و3)$ ، چون $|(3و2و0)| = 5 > |(1و2و3)| = 6$

ترتیب الفبایی معکوس مدرج²: فرض کنید $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ و $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ عناصری از $Z_{\geq 0}^n$

باشد گوئیم $\beta \succ_{grelex} \alpha$ هرگاه در $\alpha, \beta \in Z_{\geq 0}^n$ داشته باشیم $|\alpha| > |\beta|$ و در $\alpha - \beta \in Z_{\geq 0}^n$ اولین

درایه ناصفر از سمت راست منفی باشد.

به عنوان مثال $(4و2و3) \succ_{grelex} (4و7و1)$ ، چون $|(4و2و3)| = 9 > |(4و7و1)| = 13$ و $4-4=0$ و $7-2=5$.

اکنون می‌خواهیم ببینیم که یک ترتیب تک جمله‌ای چطور می‌تواند روی چندجمله‌ای‌ها به

کار گرفته شود. هر گاه، $f = \sum_{\alpha} a_{\alpha} x^{\alpha}$ یک چندجمله‌ای در $k[x_1, \dots, x_n]$ باشد و ما ترتیب تک جمله-

ای را $\succ$ اختیارکنیم، آنگاه می‌توانیم تک جمله‌ایهای f را به روشی غیر مبهم مرتب کنیم.

مثال (5-1): فرض کنید $f = 4xy^2z + 4z^2 - 5x^3 + 7x^2z^2 \in k[x, y, z]$ در این صورت:

نسبت به ترتیب الفبایی می‌توان جملات f را به طور نزولی مرتب کرد:

$$f = -5x^3 + 7x^2z^2 + 4xy^2z + 4z^2$$

نسبت به ترتیب الفبایی مدرج داریم:

$$f = 7x^2z^2 + 4xy^2z - 5x^3 + 4z^2$$

نسبت به ترتیب الفبایی معکوس مدرج داریم:

$$f = 4xy^2z + 7x^2z^2 - 5x^3 + 4z^2$$

فرض کنید $f = \sum_{\alpha} a_{\alpha} x^{\alpha}$ یک چندجمله‌ای ناصفر در $k[x, y, z]$ و $\succ$ یک ترتیب تک جمله-

ای باشد.

(1) چند درجه f به صورت زیر است:

$$\text{Multideg}(f) = \max(\alpha \in Z_{\geq 0}^n : a_{\alpha} \neq 0) \quad (2-5)$$

¹ Degree lexicographical

² Degree reverse lexicographical

(2) ضریب پیشرو عبارت است از:

$$LC(f) = a_{\text{multideg}(f)} \in k \quad (3-5)$$

(3) تک جمله‌ای پیشرو f عبارتست از:

$$LM(f) = x^{\text{multideg}(f)} \quad (4-5)$$

(4) جمله پیشرو f عبارتست از:

$$LT(f) = LC(f).LM(f) \quad (5-5)$$

مثال (2-5): به عنوان مثال چند جمله‌ای $f = 4xy^2z + 4z^2 - 5x^3 + 7x^2z^2$ را با ترتیب الفبایی در نظر بگیرید. در این صورت:

$$\text{Multideg}(f) = (3, 0, 0),$$

$$LC(f) = -5,$$

$$LM(f) = x^3,$$

$$LT(f) = -5x^3$$

در این بخش، یک الگوریتم تقسیم در $k[x_1, \dots, x_n]$ که تعمیمی از آن در $k[x]$ است را فرمول‌بندی خواهیم کرد. در حالت کلی هدف، تقسیم $f \in k[x_1, \dots, x_n]$ بر $f_1, f_2, \dots, f_s \in k[x_1, \dots, x_n]$ است. و منظور این است که f به شکل $f = a_1 f_1 + \dots + a_s f_s + r$ نوشته شود که در آن خارج قسمت‌های $a_1, a_2, \dots, a_s$ و باقیمانده r در $k[x_1, \dots, x_n]$ قرار دارند [93].

قضیه (1-5): الگوریتم تقسیم

در یک ترتیب تک جمله‌ای $>$ را روی $Z_{\geq 0}^n$ تثبیت می‌کنیم و فرض می‌کنیم که $F = (f_1, f_2, \dots, f_s)$ یک s تایی مرتب از چندجمله‌ای‌ها در $k[x_1, \dots, x_n]$ باشد. در اینصورت با الگوریتم ساده در رابطه (6-5)، هر $f \in k[x_1, \dots, x_n]$ می‌تواند به شکل $f = a_1 f_1 + \dots + a_s f_s + r$ نوشته شود که در آن $a_i, r \in k[x_1, x_2, \dots, x_n]$ و یا $r=0$ یا r ترکیبی خطی از تک جمله‌ای‌ها است. که هیچ کدام از

آنها بر $LT(f_1), \dots, LT(f_s)$ تقسیم پذیر نیست. r را یک باقی مانده f در تقسیم بر F می نامیم. بعلاوه،

هرگاه $a_i f_i \neq 0$ ، آنگاه $[93] \text{multi deg}(f) \geq \text{multi deg}(a_i f_i)$

$$h = f - \frac{LT(f)}{LT(p_i)} p_i \quad (6-5)$$

الگوریتم تقسیم در حل از آن جهت مهم است که مسئله عضویت در ایده آل را حل می کند.

5-1-5 ایده آل تک جمله ای

یک ایده آل $I \subset k[x_1, \dots, x_n]$ ایده آلی تک جمله ای است هرگاه زیر مجموعه ای مانند

$$I = \langle x^\alpha : \alpha \in A \rangle \text{ وجود داشته باشد به طوری که } A \subset \mathbb{Z}_{\geq 0}^n.$$

نکته: ایده آل تولید شده با عناصر x^α را با نماد $\langle LT(x^\alpha) \rangle$ نشان می دهیم.

قضیه (2-5) مولد هیلبرت:

هر ایده آل $I \subset k[x_1, \dots, x_n]$ یک مجموعه مولد متناهی دارد. به عبارتی $I = \langle g_1, \dots, g_s \rangle$ برای

برخی $g_1, \dots, g_s \in I$ [93]. برای اثبات این قضیه [93] مطالعه شود. این قضیه بیان می دارد که در

الگوریتم تقسیم مقدار باقی مانده r حتما صفر است بنابراین خواهیم داشت:

$$f = a_1 g_1 + \dots + a_s g_s \quad (7-5)$$

درست است که قضیه مولد هیلبرت، مجموعه پایه های یک ایده آل را بیان می دارد اما تضمینی در

مورد حداقل بودن مرتبه پایه های تولید شده ارائه نمی دهد، لذا پایه هایی که دارای حداقل مرتبه

هستند را پایه های گروبنر می نامند. به زبان ریاضی میتوان پایه های گروبنر را به صورت زیر تعریف

کرد.

6-1-5 پایه‌های گروبنر

با فرض ترتیب تک جمله‌ای خاصی، یک زیر مجموعه متناهی $G = \langle g_1, \dots, g_s \rangle$ از یک ایده-آل I یک پایه گروبنر خوانده می‌شود [94-95] هرگاه

$$\langle LT(g_1), \dots, LT(g_t) \rangle = \langle LT(I) \rangle \quad (8-5)$$

برای پیدا کردن پایه‌های گروبنر از الگوریتم S جفت بوخبرگر استفاده می‌شود. در این الگوریتم از چند جمله‌ای‌های S استفاده می‌شود و آن به صورت زیر تعریف می‌گردد.

7-1-5 تعریف چند جمله‌ای‌های S

برای دو چند جمله‌ای مرتبه غیر صفر $p, \pi \in k[x]$ ، چند جمله‌ای S به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S(p, \pi) = \frac{LCM(LM(p), LM(\pi))}{LT(p)} p - \frac{LCM(LM(p), LM(\pi))}{LT(\pi)} \pi \quad (9-5)$$

در رابطه بالا نماد LCM^1 بیانگر کوچکترین مضرب مشترک بین دو تک جمله‌ای است.

8-1-5 تعریف کوچکترین مضرب مشترک

برای دو تک جمله‌ای $x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}$ و $x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_n^{\beta_n}$ کوچکترین مضرب مشترک به صورت زیر تعریف می‌گردد [94]:

$$LCM(x^\alpha, x^\beta) = x_1^{\max(\alpha_1, \beta_1)} x_2^{\max(\alpha_2, \beta_2)} \dots x_n^{\max(\alpha_n, \beta_n)} \quad (10-5)$$

مثال (3-5): برای دو تک جمله‌ای $p = x - 13y^2 - 12z^3$ و $\pi = x^2 - xy + 92z$ با تعریف ترتیب الفبایی $x \succ_{lex} y \succ_{lex} z$ ، چند جمله‌ای S را محاسبه کنید.

حل: با جایگذاری در رابطه (9-5) خواهیم داشت:

¹ Lowest Common Multiple

$$S(p, \pi) = \frac{x^2}{x}(x - 13y^2 - 12z^3) - \frac{x^2}{x^2}(x^2 - xy + 92z).$$

$$S(p, \pi) = -13xy^2 - 12xz^3 + xy - 92z$$

برای درک بهتر الگوریتم بوخبرگر در ابتدا دو مثال ساده ارایه می‌گردد و سپس الگوریتم با طرح قضیه الگوریتم بوخبرگر بیان می‌گردد.

مثال(4-5): ایده‌آل خم درجه سوم تابدار در R^3 یعنی $I = \langle y - x^2, z - x^3 \rangle$ را در نظر بگیرید. با فرض ترتیب دلخواه که در آن $y > z > x$ ادعا می‌کنیم که $G = \{y - x^2, z - x^3\}$ یک پایه گروبنر است.

حل: با توجه به اینکه پایه‌های G دقیقاً مشابه I هستند؛ لذا بنا بر رابطه (7-5) $a_1 = a_2 = 1, r = 0$ لذا در قضیه مولد هیلبرت صدق می‌کند اما برای اثبات گروبنر بودن این پایه‌ها، لازم است چند جمله‌ای S به صورت زیر تشکیل گردد.

$$S(y - x^2, z - x^3) = \frac{yz}{y}(y - x^2) - \frac{yz}{z}(z - x^3) \quad (11-5)$$

$$z(y - x^2) - y(z - x^3) = -zx^2 + yx^3$$

از طرف دیگر پایه‌های G خود پایه‌های مولد چند جمله‌ای S هستند زیرا بنا بر الگوریتم تقسیم رابطه زیر برقرار است:

$$-zx^2 + yx^3 = x^3(y - x^2) + (-x^2)(z - x^3) + 0$$

با توجه به اینکه مانده تقسیم صفر است لذا پایه‌های مذکور، پایه‌های گروبنر نیز هستند.

مثال(5-5): در اینجا فرض کنید که برای ایده‌آل تک جمله‌ای مفروض x^2 پایه‌های $I = \langle f_1, f_2 \rangle = \langle x^3 - 2xy, x^2y - 2y^2 + x \rangle$ با استفاده از الگوریتم تقسیم به دست آمده است اما پایه‌های مذکور گروبنر نیستند زیرا با تعریف پایه‌های گروبنر در رابطه(8-5) سازگار نیستند.

$$LT(f_1, f_2) = -x^2 \notin \langle LT(f_1), LT(f_2) \rangle$$

برای تولید پایه‌های گروبنر به صورت زیر عمل می‌کنیم.

ابتدا $S(f_1, f_2) = -x^2 \in I$ را محاسبه کرده که باقی‌مانده‌اش در تقسیم بر $I = \langle f_1, f_2 \rangle$ برابر با $-x^2$ و ناصفر است از این رو بایستی این باقی‌مانده در مجموعه مولد به عنوان یک مولد جدید وارد گردد و لذا قرار می‌دهیم: $I = (f_1, f_2, f_3)$. به منظور بررسی پایه گروبنر بودن این مجموعه جدید، $S(f_1, f_3) = -2xy \neq 0$ را بدست آورده و چون مخالف صفر است، لیکن $f_4 = -2xy$ به مجموعه مولد اضافه می‌گردد. $I = (f_1, f_2, f_3, f_4)$ دوباره برای بررسی گروبنر بودن این پایه‌های جدید، $S(f_2, f_3) = -2y^2 + x \neq 0$ را محاسبه کرده و چون نتیجه مخالف صفر است لذا $f_5 = -2y^2 + x$ به مجموعه مولد اضافه می‌شود و قرار می‌دهیم: $I = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5)$ حال می‌توان نشان داد که برای $1 \leq i \leq j \leq 5$ ، می‌توان نوشت $S(f_i, f_j) = 0$ لذا:

$$\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\} = \{x^3 - 2xy, x^2y - 2y^2 + x, -x^2, -2xy, -2y^2 + x\}$$

یک پایه گروبنر با ترتیب الفبایی مدرج برای ایده‌آل به دست می‌آید.

قضیه (3-5): قضیه بوخبرگر

فرض کنید $I = \langle f_1, \dots, f_s \rangle \neq 0$ یک ایده‌آل چند جمله‌ای باشد. در این صورت، یک پایه گروبنر برای I ، توسط الگوریتم زیر که دارای تعداد متناهی گام است می‌تواند ساخته شود [93-95].

$$F = (f_1, \dots, f_s) \text{ ورودی:}$$

$$G := F \text{ خروجی: یک پایه گروبنر برای } I \text{ با شرط } F \subset G$$

$$G' := G \text{ تکرار کن}$$

$$S := S(p, q)^G \text{ برای هر زوج } p \neq q, \{p, q\} \text{ در } G' \text{ انجام بده}$$

$$G := G \cup \{S\} \text{ هر گاه } S \neq 0 \text{ آنگاه}$$

$$G = G' \text{ تا زمانی که}$$

5-1-9 پایه‌های گروبنر مینیمال

یک پایه گروبنر مینیمال برای یک ایده‌آل چندجمله‌ای I یک پایه گروبنر G برای I خواص

زیر است [93]:

$$(1) \quad LT(p) = 1, p \in G \quad \text{برای هر}$$

$$(2) \quad LT(p) \notin \langle LT(G - \{p\}) \rangle, p \in G \quad \text{برای هر}$$

در مثال (5-5) با استفاده از ترتیب الفبایی مدرج، پایه‌های گروبنر به شرح زیر پیدا شد.

$$f_1 = x^3 - 2xy$$

$$f_2 = x^2y - 2y^2 + x$$

$$f_3 = -x^2$$

$$f_4 = -2xy$$

$$f_5 = -2y^2 + x$$

چون برخی از ضرایب پیشرو یک نیست، اولین گام "یک" سازی آنها است. توجه کنیم که

$$LT(f_1) = x^3 = -xLT(f_3) \quad \text{بنابراین می‌توان } f_1 \text{ را در پایه گروبنر مینیمال حذف کرد. به طور}$$

$$\text{مشابه، چون } LT(f_2) = x^2y = -\frac{1}{2}xLT(f_4), \text{ پس } f_2 \text{ نیز قابل حذف است. اکنون دیگر جمله}$$

پیشروی مولدی توسط جمله پیشروی دیگر مولدها عاد نمی‌شود. از این رو،

$$\tilde{f}_3 = x^2, \tilde{f}_4 = xy, \tilde{f}_5 = y^2 - \frac{1}{2}x$$

یک پایه گروبنر مینیمال برای یک ایده‌آل I است.

پایه‌های گروبنر دارای کاربردهای زیادی در مسایل به شرح زیر است:

$$(1) \quad \text{ضمنی سازی}$$

$$(2) \quad \text{حل معادلات چند جمله‌ای}$$

$$(3) \quad \text{حذف}$$

در اینجا به کاربرد پایه‌های گروبنر در تئوری حذف اشاره می‌شود. برای مشاهده نحوه کار حذف با پایه‌های گروبنر، با یک مثال توضیح داده می‌شود.

مثال (5-6): دستگاه معادلات

$$x^2 + y + z = 1$$

$$x + y^2 + z = 1$$

$$x + y + z^2 = 1$$

را در نظر بگیرید. لذا ایده‌آل I عبارت است از:

$$I = \langle x^2 + y + z - 1, x + y^2 + z - 1, x + y + z^2 - 1 \rangle$$

در این صورت، یک پایه گروبنر I نسبت به ترتیب الفبایی با چهار چند جمله‌ای داده می‌شود.

$$g_1 = x + y + z^2 - 1,$$

$$g_2 = y^2 - y - z^2 + z$$

$$g_3 = 2yz^2 + z^4 - z^2$$

$$g_4 = z^6 - 4z^4 + 4z^3 - z^2$$

چون $g_4 = z^2(z-1)^2(z^2+2z-1)$ شامل تنها z است، مشاهده می‌شود که z های ممکن

$0, 1, -1 \pm \sqrt{2}$ هستند. با جایگذاری این مقادیر در $g_2 = y^2 - y - z^2 + z = 0$ و

$g_3 = 2yz^2 + z^4 - z^2 = 0$ می‌توان y های ممکن و بالاخره از $g_1 = x + y + z^2 - 1 = 0$ ، x های متناظر

را به دست آورد. در این مثال توانستیم معادله $g_4 = 0$ را از معادلات اولیه‌مان بدست بیاوریم که تنها

شامل z است، یعنی x, y از دستگاه حذف شد.

قضیه (5-4): قضیه حذف

فرض کنید $I \subset k[x_1, \dots, x_n]$ یک ایده‌آل و G یک پایه گروبنر I نسبت به ترتیب الفبایی باشد که در

آن $x_1 > \dots > x_n$. در این صورت، برای هر $0 \leq l \leq n$ ، مجموعه $G_l = G \cap k[x_1, \dots, x_n]$ یک پایه

گروبنر I امین ایده‌آل حذف I_l است [93-96].

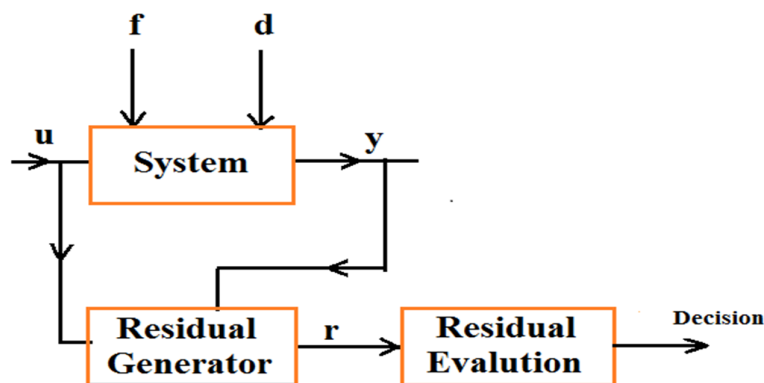
مثال (5-7) دستگاه معادلات داده شده در مثال (5-6) را در نظر بگیرید. یک پایه گروبر نسبت به

ترتیب الفبایی برای ایده‌آل I توسط g_1, g_2, g_3, g_4 داده شد. از قضیه حذف نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} I_1 &= I \cap C[y, z] \\ &= \langle y^2 - y - z^2 + z, 2yz^2 + z^4 - z^2, z^6 - 4z^4 + 4z^3 - z^2 \rangle \\ I_2 &= I \cap C[z] = \langle z^6 - 4z^4 + 4z^3 - z^2 \rangle \end{aligned}$$

2-5-2-ارایه یک رهیافت جبری جدید برای تشخیص عیب

همان‌طوری که در فصول قبل ذکر شد اساس سیستم تشخیص عیب به‌دست آوردن مانده است و براساس مقایسه مقدار آن با یک مقدار معلوم آستانه می‌توان عیب دار بودن و یا سالم بودن حسگر را تشخیص داد. رهیافت‌های طراحی سیستم تشخیص عیب به دو دسته عمده مبتنی بر مدل و مبتنی بر داده تقسیم‌بندی شدند و در این بخش در نظر است با رهیافت مبتنی بر مدل سیستم تشخیص عیب طراحی گردد. در شکل (5-1) به مدل سیستم دسترسی وجود دارد و داده‌های ورودی و خروجی نیز در دسترس است. فرض می‌شود که در مدل سیستم، دارای عدم قطعیت‌های پارامتری اغتشاش در سیستم وجود دارد و در حسگرها نیز فرض می‌شود عیب وجود دارد.



شکل (5-1) شماتیک تشخیص عیب با رهیافت مبتنی بر مدل

در روش جبری پیشنهادی فرض می‌شود که مدل سیستم تحت مطالعه با معادلات جبری دیفرانسیلی همانند رابطه کلی (12-5) قابل بیان است [97]:

$$F_i(y, u, d, d_u, f, x) = 0, i = 1, \dots, p \quad (12-5)$$

که در آن u بردار کنترلی، y بردار خروجی تحت اندازه‌گیری است. تمامی اغتشاش‌های ممکن در مدل تحت بردار d تجمیع می‌شوند. d_u بیانگر عدم قطعیت پارامتری در مدل بوده و بردار f بیانگر عیب حسگرها است. بردار x نیز بردار متغیرهای حالت است. هدف پیدا کردن یک رابطه ریاضی همانند (13-5) است که در آن همه بردارهای d و d_u و x حذف شود و به ازای بردار عیب معادل صفر (حسگرهای سالم) این رابطه برابر صفر گردد و برای حالت عیب‌دار بودن حسگرها این رابطه ریاضی غیر صفر می‌شود.

$$C(u, y) = 0, \forall t, u, y, d \quad \text{iff} \quad f = 0 \quad (13-5)$$

توجه شود که در رابطه (13-5) بردارهای حالت x ، عدم قطعیت d_u و اغتشاشات d حذف شده‌اند لذا در واقع این رهیافت به بردارهای حالت غیر قابل اندازه‌گیری، اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها مقاوم است. برای به دست آوردن رابطه (13-5) از رابطه (12-5)، در گام نخست پایه‌های گروبنر بایستی با استفاده از الگوریتم بوخبرگر محاسبه شوند و سپس با بهره‌گیری از پایه‌های گروبنر و تئوری حذف بردارهای حالت x ، عدم قطعیت d_u و اغتشاشات d حذف می‌شوند. رابطه کاهش یافته el به دست آمده تحت فرایند حذف، خود به دو دسته موسوم به بخش محاسباتی¹ و بخش داخلی² قابل تقسیم است. بخش محاسباتی تابعی از عیب نبوده و قابل پیاده‌سازی است. اما بخش داخلی تابعی از بردار عیب بوده و قابل پیاده‌سازی نیست. [97-100]

$$el = r^{comp} + r^{int} \quad (14-5)$$

¹ Computational form

² Internal form

$$r^{comp}(y,u) = \sum_{i=1}^r h_i b_i |_{f_{i=0}}$$

$$r^{int}(f,y,u) = \sum_{i=1}^r h_i b_i |_{-I^{comp}}$$

در رابطه (14-5) h_i ضرایب پایه‌های گروبنر مینیمال است و b_i همان پایه‌های گروبنر است. نکته مهم دیگر آن است که در بخش محاسباتی ممکن است مرتبه‌های مشتق بالا وجود داشته باشد و با طراحی فیلترهای مناسب نسبت به حذف آنها بایستی اقدام شود که در ادامه راجع به آن بحث خواهد شد.

3-5 کاربرد روش جبر محاسباتی جهت تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور

مدل مور-گریترز دوباره در این قسمت برای یادآوری بیان می‌گردد.

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi}{d\xi} &= \frac{\Lambda_2}{B} (\Phi - \Phi_T) - 2\Lambda_1 \Gamma B \Psi \\ \frac{d\Phi}{d\xi} &= \frac{H}{l_c(B)} \left[-\frac{\Psi - \Psi_{c0}}{H} + 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Phi}{W} - 1 \right) \left(1 - \frac{J}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{W} - 1 \right)^3 - \frac{l_E U_d \Lambda_1 \Gamma \Phi}{bH} \right] \\ \frac{dJ}{d\xi} &= J \left[1 - \left(\frac{\Phi}{W} - 1 \right)^2 - \frac{J}{4} - \frac{2U_d \Gamma (m-1) W \Lambda_1}{3bH} \right] \frac{3aH}{(1 - m_B(B)a)W} \\ \frac{dB}{d\xi} &= \Lambda_1 \Gamma B^2 \end{aligned} \quad (15-5)$$

$$y = \begin{bmatrix} \Psi \\ \Phi \\ B \end{bmatrix}$$

متغیر ورودی U همان گشتاور ورودی Γ از طرف توربین گازی می‌باشد و چهار متغیر حالت کمپرسور عبارتند از Ψ : فشار بدون بعد، Φ : جریان میانگین بدون بعد، B : سرعت کمپرسور و J ضریب خفگی¹ است. اگر $J > 0$ باشد در این صورت کمپرسور در ناحیه خفگی کار می‌کند و $J \approx 0$ نشان

¹ Stone wall Coefficient

می‌دهد که کمپرسور خارج از ناحیه خفگی کار می‌کند. در گام اول فرض می‌شود خروجی y_1 سالم بوده ولی خروجی‌های y_2, y_3 عیب دار هستند لذا می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (16-5)$$

f_2, f_3 در رابطه (16-5) بیانگر عیبهای حسگرها بوده و مقدار آنها به صورت ثابت فرض می‌شود. در ضمن دو عیب نمی‌توانند به صورت همزمان رخ دهند. از رابطه (16-5) می‌توان متغیرهای حالت را بر حسب متغیرهای خروجی و عیبهای مذکور همانند رابطه (17-5) به دست آورد.

$$\begin{aligned} x_1 &= y_1 \\ x_2 &= y_2 - f_2 \\ x_3 &= y_3 - f_3 \end{aligned} \quad (17-5)$$

گام دوم: با مشتق گرفتن از طرفین رابطه (17-5) و جایگذاری آنها در رابطه (15-5) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= \frac{\Lambda_2}{y_3} ((y_2 - f_2) - d_3 \gamma \sqrt{y_1}) - 2\Lambda_1 y_1 y_3 u + d_1 \\ \dot{y}_2 &= \frac{H}{l_c(B)} \left[-\frac{y_1 - \Psi_{c0}}{H} + 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{y_2 - f_2}{W} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y_2 - f_2}{W} - 1 \right)^3 - \frac{l_E U_d \Lambda_1 u (y_2 - f_2)}{bH} \right] + d_2 \\ \dot{y}_3 &= \Lambda_1 u (y_3 - f_3)^2 + d_2 \end{aligned} \quad (18-5)$$

توجه شود که در رابطه (18-5) d_1, d_2 نشانگر اغتشاش بوده و d_3 نیز بیانگر عدم قطعیت در ضریب γ است و در ضمن چون J برابر صفر فرض می‌شود، لذا رابطه (15-5) از چهار معادله حالت به سه معادله تقلیل می‌یابد.

گام سوم: برای ساده‌سازی عبارت $y_T = \gamma \sqrt{y_1}$ می‌توان از بسط تیلور بهره گرفت اما می‌توان با تعریف متغیر افزوده‌ای همانند y_{1AR} به صورت رابطه (19-5) عمل نمود.

$$y_{1AR}^2 = y_1 \quad (19-5)$$

با در نظر گرفتن رابطه (19-5) می‌توان رابطه (18-5) را دوباره بازنویسی کرد.

$$\dot{y}_{1AR} = -\frac{1}{2y_{1AR}y_3} \Lambda_2 ((y_2 - f_2) - d_3 y_{1AR}) - \Lambda_1 y_{1AR} y_3 u + \frac{d_1}{2y_{1AR}} \quad (20-5)$$

$$\dot{y}_2 = \frac{H}{l_c(B)} \left[-\frac{y_{1AR}^2 - \Psi_{c0}}{H} + 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{y_2 - f_2}{W} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y_2 - f_2}{W} - 1 \right)^3 - \frac{l_E U_d \Lambda_1 u (y_2 - f_2)}{bH} \right] + d_2$$

$$\dot{y}_3 = \Lambda_1 u (y_3 - f_3)^2 + d_2$$

گام چهارم: برای تولید پایه‌های گروبنر و اعمال الگوریتم حذف، بایستی از نرم‌افزارهای مناسب همچون Maple بهره گرفت اما در این نرم‌افزارها امکان وارد کردن متغیرهای مشتق‌دار وجود ندارد لذا با تغییر متغیر همچون رابطه (21-5) می‌توان متغیرهای مشتق‌دار را حذف کرد.

$$\begin{aligned} \dot{y}_{1AR} &= z_1 \\ \dot{y}_2 &= z_2 \\ \dot{y}_3 &= z_3 \end{aligned} \quad (21-5)$$

با جایگذاری (21-5) در رابطه (20-5) معادلات جبری غیر خطی بدون متغیرهای مشتق‌دار به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\begin{aligned} z_1 - \frac{\Lambda_2}{2y_{1AR}y_3} ((y_2 - f_2) - d_3 y_{1AR}) + \Lambda_1 y_{1AR} y_3 u - \frac{d_1}{2y_{1AR}} &= 0 \\ z_2 - \frac{H}{l_c(B)} \left[-\frac{y_{1AR}^2 - \Psi_{c0}}{H} + 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{y_2 - f_2}{W} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y_2 - f_2}{W} - 1 \right)^3 - \frac{l_E U_d \Lambda_1 u (y_2 - f_2)}{bH} \right] - d_2 &= 0 \\ z_3 - \Lambda_1 u (y_3 - f_3)^2 - d_2 &= 0 \end{aligned} \quad (22-5)$$

گام پنجم: با حذف d_1, d_2, d_3 رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} el &= -0.3 - 23.2189z_3 + 23.2189z_2 - 4.32f_2^2 + 8.64y_2f_2 - 0.0015uf_2 \\ &- 4.32y_2^2 + 0.0015uy_2 + y_1^2 - 5.76f_2^3 + 17.28y_2f_2^2 \\ &- 17.28y_2^2f_2 + 0.002uf_3^2 - 0.004uy_3f_3 + 0.002uy_3^2 + 5.76y_2^3 \end{aligned} \quad (23-5)$$

گام ششم: رابطه (23-5) به دو بخش محاسباتی و داخلی همانند رابطه (24-5) قابل تقسیم است.

$$\begin{aligned}
r^{comp} &= -0.3 - 23.2189\dot{y}_3 + 23.2189\dot{y}_2 - 4.32y_2^2 \\
&+ 0.0015uy_2 + y_1^2 + 0.002uy_3^2 + 5.76y_2^3 \\
r^{int} &= 4.32f_2^2 + 8.64y_2f_2 - 0.0015uf_2 - 5.76f_2^3 + 17.28y_2f_2^2 \\
&- 17.28y_2^2f_2 + 0.002uf_3^2 - 0.004uy_3f_3
\end{aligned} \tag{24-5}$$

گام هفتم: بخش محاسباتی در رابطه (24-5) برای پیاده‌سازی مناسب نیست زیرا دارای متغیرهای خروجی مشتق‌دار است. عناصر مشتق‌دار به نویزهای فرکانس بالا حساس هستند. لذا در این گام که آن را تحقق مانده¹ می‌نامند [100]، سعی می‌شود با طراحی یک فیلتر مناسب نسبت به حذف آنها اقدام شود و لذا در گام نخست، مانده محاسباتی را بر حسب نوع متغیرهای مشتق‌دار بایستی همانند رابطه (24-5) به دو قسمت r_1^{comp} و r_2^{comp} تقسیم کرد.

$$r^{comp} = r_1^{comp} + r_2^{comp} \tag{25-5}$$

که در رابطه (25-5) r_1^{comp} و r_2^{comp} عبارتند از:

$$\begin{aligned}
r_1^{comp} &= -0.3 + y_1^2 - 23.2189\dot{y}_3 + 0.002uy_3^2 \\
r_2^{comp} &= 23.2189\dot{y}_2 + 0.0015uy_2 - 4.32y_2^2 + 5.76y_2^3
\end{aligned} \tag{26-5}$$

در رابطه r_1^{comp} و r_2^{comp} برای سادگی قسمت‌های غیر مشتق‌دار، به ترتیب $P_1(y,u)$ و $P_2(y,u)$ نامیده می‌شوند و با تعریف r_1, r_2 به عنوان مانده محاسباتی فیلتر شده خواهیم داشت.

$$\begin{aligned}
r_1 + \alpha_1 \dot{r}_1 &= r_1^{comp} = -23.2189\dot{y}_3 + P_1(y,u) \\
r_2 + \alpha_2 \dot{r}_2 &= r_2^{comp} = 23.2189\dot{y}_2 + P_2(y,u)
\end{aligned} \tag{27-5}$$

که در رابطه بالا $P_1(y,u)$ و $P_2(y,u)$ عبارتند از:

$$\begin{aligned}
P_1(y,u) &= -0.3 + y_1^2 + 0.002uy_3^2 \\
P_2(y,u) &= 0.0015uy_2 - 4.32y_2^2 + 5.76y_2^3
\end{aligned} \tag{28-5}$$

همچنین ضرایب α_1, α_2 در رابطه (27-5) بایستی درست انتخاب شوند. برای حذف جمله‌های مشتق‌دار در رابطه (27-5)، متغیرهای واسط z_1, z_2 به صورت زیر تعریف می‌شوند.

¹ Residual realization

$$\begin{aligned} z_1 &= \alpha_1 r_1 - 23.2189y_2 \\ z_2 &= \alpha_2 r_2 + 23.2189y_3 \end{aligned} \quad (29-5)$$

گام هشتم: با مشتق‌گیری از روابط (29-5) و جایگذاری در روابط (27-5) و (28-5) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 + \frac{1}{\alpha_1} z_1 &= P_1(y, u) - \frac{1}{\alpha_1} (23.2189y_2) \\ \dot{z}_2 + \frac{1}{\alpha_2} z_2 &= P_2(y, u) + \frac{1}{\alpha_2} (23.2189y_3) \end{aligned} \quad (30-5)$$

در رابطه (30-5) دیده می‌شود که ترم‌های مشتق‌دار با موفقیت حذف شدند و z_1 ، z_2 به آسانی از رابطه بالا قابل پیاده‌سازی و محاسبه هستند و r^1 و r^2 از رابطه (31-5) قابل محاسبه هستند.

$$r = r_1 + r_2 \quad (31-5)$$

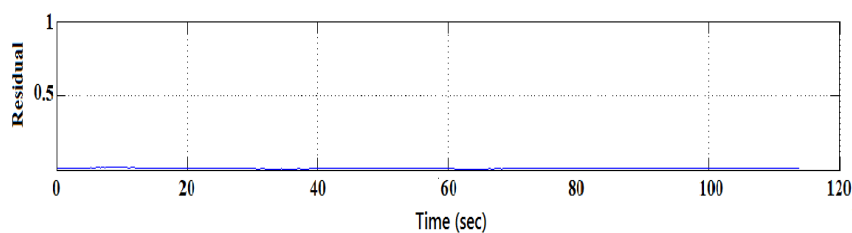
که در آن

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{1}{\alpha_1} (z_1 + 23.2189y_2) \\ r_2 &= \frac{1}{\alpha_2} (z_2 - 23.2189y_3) \end{aligned} \quad (32-5)$$

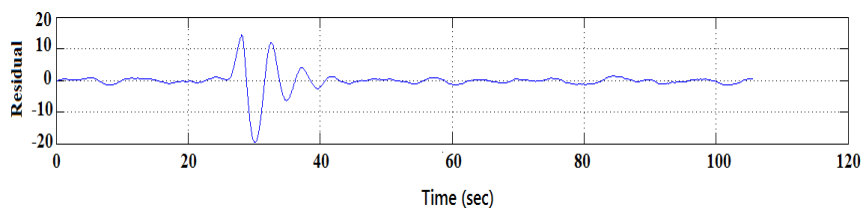
گام‌های مذکور را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد. در ابتدا مدل مور-گریتر کمپرسور با وجود اغتشاش، عدم قطعیت‌ها و عیب‌های حسگرها در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از روابط خروجی حسگرها با متغیرهای حالت و بردار عیب می‌توان متغیرهای حالت را حذف نمود. سپس با استفاده از تئوری حذف می‌توان بردارهای اغتشاش و عدم قطعیت را حذف کرد. برای حذف جمله‌های مشتق‌دار نیز می‌توان از متغیرهای افزوده شده بهره گرفت. رابطه به دست آمده به دو قسمت محاسباتی و داخلی تقسیم می‌شود. بخش داخلی به دلیل وجود متغیر عیب قابل پیاده‌سازی نبوده و بخش محاسباتی با استفاده از طراحی فیلتر قابل پیاده‌سازی می‌باشد.

4-5 نتایج شبیه‌سازی

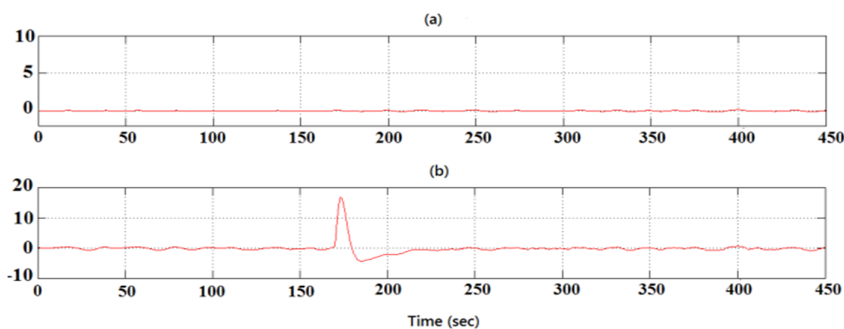
مدل مور-گریترز با پارامترهای مذکور در رابطه (2-3) برای طراحی سیستم تشخیص عیب به روش جبری در نظر گرفته می‌شود. در شکل (5-2) مشاهده می‌شود که مقدار مانده برای حالت بدون عیب حسگرها صفر است. در سناریوی دوم عیب پله‌ای f_2 در لحظه 26 در حسگر مزبور به متغیر جریان کمپرسور Φ رخ داده است و در شکل (5-3) مشاهده می‌شود که سیگنال مانده به سرعت به رخداد عیب عکس‌العمل نشان می‌دهد و بعد از گذشت مدت زمانی مقدار مانده صفر می‌شود و علت این صفر شدن سیستم کنترل حلقه بسته است که دارای ویژگی تحمل‌پذیر عیب است. در سناریوی سوم فرض می‌شود که در لحظه 163 در حسگر سرعت عیب رخ می‌دهد و باز هم سیگنال مانده تولید شده به آن عکس‌العمل نشان می‌دهد. همانند فصول قبل، می‌توان تاثیر سیستم تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور را در تعیین دقیق نقطه کار بررسی کرد. فرض کنید در شکل (5-4) نقطه کاری اولیه کمپرسور نقطه‌ای مانند A_1 باشد و عیب تجمعی در حسگر مربوط به سیگنال Φ در لحظه 26 تا لحظه 42 در شکل (5-5) منجر به نوسان نقطه کار در بین نقاط A_1, A_2 می‌گردد و سیستم کنترل سرج کمپرسور این نوسان‌های ناخواسته را به عنوان سرج فرض می‌کند و نسبت به کنترل آن عکس‌العمل نشان می‌دهد در حالی‌که این سرج کاذب بوده و در واقع هیچ مشکلی برای خود کمپرسور رخ نداده است و وجود یک عیب در حسگر مذکور این اشکال را به وجود آورده است. در لحظه 163 بروز عیب در حسگر سرعت، منجر به جابجایی نقطه کار از A_1 به A_3 می‌شود و این نقطه دقیقاً در ناحیه غیر مجاز سرج قرار دارد و سیستم کنترل سرج کمپرسور، به طور ناگهانی سرعت کمپرسور را برای خروج از سرج کاهش می‌دهد. ولی در واقع این کاهش ناگهانی سرعت اساساً لازم نیست و فقط کافی بود رخداد عیب در حسگر کمپرسور را تشخیص دهیم و با استفاده از سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب، عیب حسگر را جبران کنیم.



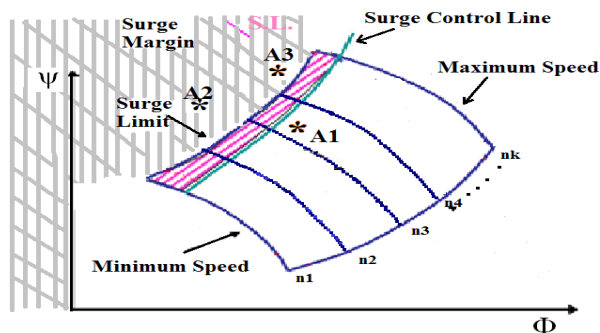
شکل (2-5) مانده حالت بدون عیب



شکل (3-5) عیب حسگر متغیر Φ در لحظه 26



شکل (4-5) a- حالت بدون عیب b- رخداد عیب در حسگر متغیر سرعت در لحظه 163



شکل (5-5) تاثیر سیستم تشخیص عیب در تعیین دقیق نقطه کار کمپرسور

5-5 مقایسه رهیافت‌های مبتنی بر داده و مبتنی بر مدل

در اینجا قصد داریم مقایسه‌ای بین دو رهیافت مبتنی بر داده‌رانده و مبتنی بر مدل برای

سیستم تشخیص عیب داشته باشیم. از دیدگاه طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب، به روش

حسگرهای مجازی فرقی بین استفاده از رهیافت مبتنی بر داده و مبتنی بر مدل وجود ندارد. در واقع خروجی هر یک از رهیافت‌ها می‌تواند برای جبران عیب در روش حسگرهای مجازی به کار رود اما از نظر عملیاتی می‌توان دو رهیافت فوق‌الذکر را به صورت زیر مقایسه کرد. همانطوریکه پیشتر ذکر گردید رهیافت مبتنی بر داده رانده عملی‌تر است زیرا مدل‌سازی دقیق و کامل سیستم‌های صنعتی در عمل غیر ممکن است و چون در این رهیافت به مدل واقعی و ریاضی سیستم نیازی نیست لذا این رهیافت دارای جنبه کاربرد عملی نسبت به رهیافت مبتنی بر مدل است. حجم محاسبات در این رهیافت نسبت به رهیافت مبتنی بر مدل زیادتر است و در واقع یک ضعف برای این رهیافت محسوب می‌شود اما در مقابل از لحاظ پیچیدگی محاسبات به دلیل امکان استفاده از نرم افزار متلب و امکان استفاده از ابزارهای کد نویسی و شبیه‌سازی نسبت به رهیافت مبتنی بر مدل ساده‌تر است زیرا در رهیافت مبتنی بر مدل نیازمند استفاده از ابزارهای ریاضی پیچیده‌تر و آشنایی کامل با هندسه جبر محاسباتی هستیم. در ضمن برخی از شگردها همچون انتخاب نوع ترتیب در پیدا کردن پایه‌های گروبنر نیازمند تجربه کاری با نرم افزار Maple است. استفاده بر خط از رهیافت مبتنی بر داده رانده در تشخیص عیب نسبت به رهیافت مبتنی بر مدل به دلایل مذکور راحت‌تر و ساده‌تر است ولی برای سیستم‌های که بر خلاف کمپرسور دارای دینامیک سریع‌تر و پیچیده‌تر هستند لازم است در بازه‌های کوچک‌تر زمانی، شبکه‌های عصبی آموزش ببینند. در رهیافت مبتنی بر مدل پارامترهای عدم قطعیت و اغتشاش از روابط کاملاً حذف می‌شوند ولی در رهیافت مبتنی بر داده رانده امکان به حداقل رساندن اثر آنها وجود دارد اما حذف کامل تاثیر آنها بر عملکرد سیستم تشخیص عیب وجود ندارد.

5-6 نتیجه‌گیری

در این فصل از رساله از رهیافت مبتنی بر مدل برای تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور بهره گرفتیم. در مدل مور-گریتر متغیرهای اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری و عیب لحاظ شدند. بعد از آن با بهره‌گیری از تئوری حذف و پایه‌های گروبنر نسبت به حذف متغیرهای اغتشاش و عدم

قطعیت اقدام شد. توجه شود که متغیرهای حالت نیز با استفاده از روابط خروجی قابل حذف هستند. رابطه نهایی تولید شده تابعی از عیب حسگرها است و قابل پیاده‌سازی نیست لذا رابطه مذکور به دو قسمت موسوم به محاسباتی و داخلی تقسیم می‌گردد که در بخش محاسباتی متغیر عیب ظاهر نمی‌شود و در عوض در بخش داخلی متغیر عیب ظاهر می‌شود و لذا این بخش قابل پیاده‌سازی نیست. در بخش محاسباتی با استفاده از روش‌های خاص و فیلترینگ، ترم‌های مشتق دار حذف گردید. در نهایت سیگنال مانده قابل پیاده‌سازی برای تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور استفاده گردید. در این فصل عدم قطعیت پارامتری در پارامتر بهره شیر گلوی به محاسبات افزوده شد اضافه کردن متغیرهای قابل حذف باعث زیاد شدن محاسبات ریاضی می‌شود و برای اجتناب از این محاسبات بایستی ترتیب‌های مختلف را امتحان کرد و با ترتیب خاصی که در این رساله انتخاب شد حجم محاسبات کاهش یافت.

فصل ششم:

سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب حسگرهای

کمپرسور

مقدمه

در فصول قبلی روشهای متنوعی برای طراحی سیستم تشخیص عیب حسگرهای کمپرسور مبتنی بر مدل و داده ارایه گردید. در این فصل با استفاده از روشهای مذکور سیستم کنترل تحمل پذیر عیب از نوع حسگرهای مجازی جهت جلوگیری از سرچ های کاذب کمپرسور ارایه می گردد و کارایی آن با استفاده از شبیه سازی نشان داده می شود.

6-1 رهیافت های سیستم کنترل تحمل پذیر عیب

به طور کلی، یک سیستم کنترل حلقه بسته متعارف توانایی پایدار سازی و حصول شاخص های عملکردی مطلوب را دارد. برای ایجاد قابلیت تحمل پذیر بودن در مقابل عیب بایستی سیستم کنترل تغییر یابد و یا بلوک های دیگری به سیستم کنترل متعارف اضافه شود. لذا می توان ادعا کرد که سیستم کنترل تحمل پذیر عیب قابلیت حفظ پایداری و شاخص های عملکردی مطلوب را با فرض وجود عیب در سیستم دارا می باشد. رهیافت سیستم کنترل تحمل پذیر عیب می تواند از لحاظ ساختاری به دو دسته عمده فعال¹ AFTC و غیر فعال² PFTC طبقه بندی شود [101]. در رهیافت PFTC، سیستم کنترل حلقه بسته به گونه ای طراحی می شود که در مقابل برخی از عیبهایی از پیش تعریف شده مقاوم باشد. به عبارت دیگر در این رهیافت، فقط سیستم کنترل تحمل پذیر عیب قادر است به عیبهایی از قبل تعریف و پیش بینی شده پاسخ مناسبی دهد و اگر عیب خارج از موارد از پیش تعریف شده رخ دهد در این صورت سیستم کنترل مذکور نمی تواند پاسخ مطلوب را تولید کند. حتی آن عیب می تواند منجر به ناپایداری سیستم شود. در مقابل مزیت عمده رهیافت PFTC عدم نیاز به سیستم تشخیص عیب است و لذا می تواند واکنش سریعی در مقابل رخداد عیب داشته باشد. در سیستم هایی که دارای دینامیک سریع بوده و ممکن است رخداد عیب به صورت سریع، منجر به

¹ Active Fault Tolerant Control (AFTC)

² Passive Fault Tolerant Control (PFTC)

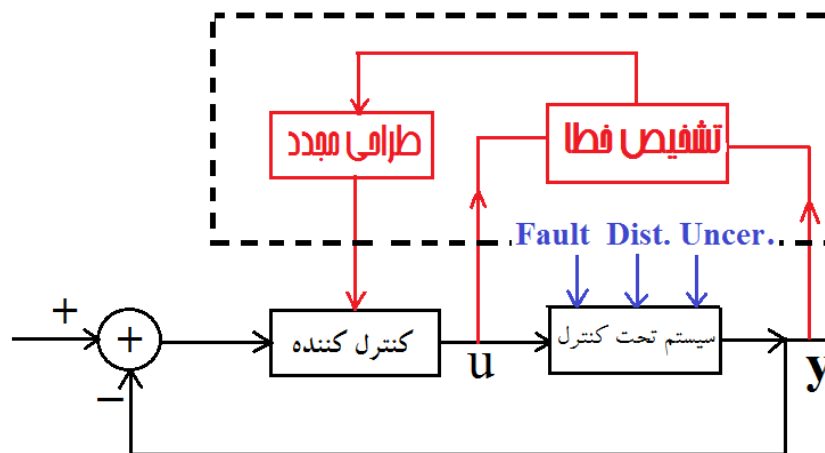
ناپایداری سیستم کنترل شود این رهیافت کارایی بهتری دارد. برای مثال در طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب برای پاندول معکوس [102] ، این رهیافت کاربردی‌تر بوده و مناسب است. بسیاری از روش‌های طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب با رهیافت PFTC مبتنی بر تئوری‌های کنترل مقاوم است. اما فرق اساسی بین سیستم کنترل مقاوم و رهیافت PFTC برای سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب در این است که در سیستم‌های کنترل مقاوم معمولاً تغییرات پارامتری کوچک و یا عدم قطعیت‌های جزئی را در نظر می‌گیرند اما در PFTC لازم است تغییرات قابل توجه در ساختار سیستم به دلیل رخداد عیب در نظر گرفته شود و سیستم کنترل مقاوم بایستی بتواند نسبت به این تغییرات قابل توجه مقاوم باشد [103]. البته لازم به توضیح است که در برخی از مراجع سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب مقاوم استفاده شده در PFTC را کنترل قابل اعتماد¹ نیز می‌نامند [104].

در طراحی رهیافت AFTC، دو گام مهم ضروری است. در گام نخست بایستی یک سیستم تشخیص عیب مناسب طراحی شود به طوری که بتواند مشخصات عیب را برای گام بعدی فراهم نماید. در گام بعدی لازم است سیستم کنترل بر اساس نتایج سیستم تشخیص عیب تنظیم گردد تا شاخص‌های عملکردی در حضور عیب، به‌صورت مطلوب تامین گردد [105]. سیستم کنترل در AFTC می‌تواند به دو روش طراحی و تحلیل شود. در روش اول ساختار کنترل‌کننده و قوانین حاکم بر آن از قبل تعریف می‌گردد و سیستم کنترلی بر اساس نتایج خروجی سیستم تشخیص عیب، عکس‌العمل‌های لازم را در مقابل عیب اتخاذ می‌کند [106]. در روش دوم ساختار کنترل‌کننده از قبل معلوم نیست و در هر لحظه با توجه ساختار عیب، سیستم کنترل به صورت برخط² همانند شکل (8-1) طراحی می‌شود. و می‌توان گفت بر اساس عیب، سیستم کنترل خود را برای جبران عیب تطبیق می‌دهد و می‌توان گفت که سیستم کنترل در این روش از نوع کنترل تطبیقی است [107].

¹ Reliable control

² Online

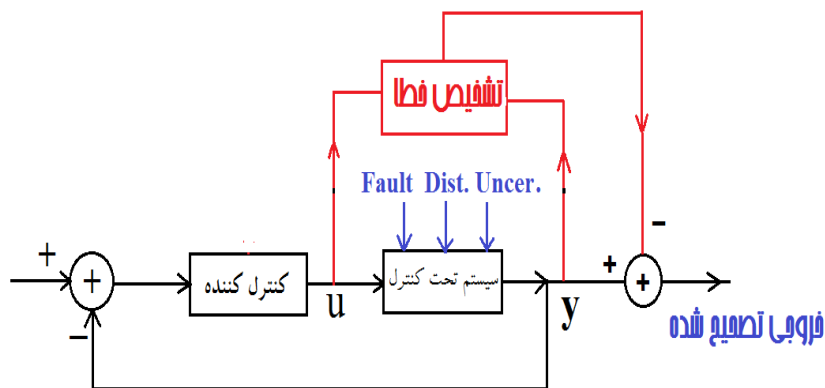
شایان ذکر است که سیستم کنترل تطبیقی در خصوص کنترل سیستم‌هایی که سرعت تغییرات پارامتری کم باشد کارایی لازم را دارد، در حالی که مدل سیستم در هنگام رخداد عیب معمولاً تغییرات سریعی دارد و در ضمن با رخداد عیب رفتار غیر خطی در سیستم ظاهر می‌شود و حتی رفتار خطی می‌تواند منجر به جابجایی نقطه کار سیستم به نقطه ناپایدار شود. نکته مهم دیگر در این روش، این است که سیستم کنترل تطبیقی برای رهیافت AFTC در مورد عیبهای محرکها و اجزای سیستم کاربرد دارد اما در مورد عیبهای حسگرها کارایی ندارد. نمی‌توان با سیستم کنترل تطبیقی، سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب در حالت رخداد عیب حسگرها طراحی کرد زیرا کنترل‌کننده تطبیقی برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده از داده‌های اندازه‌گیری شده عیب‌دار استفاده خواهد کرد و موجب عملکرد نادرست سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب خواهد شد [101].



شکل (6-1): بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب به روش AFTC تطبیقی [9]

در طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب در حالت رخداد عیب حسگرها، استفاده از روش حسگرهای مجازی کارایی مناسب‌تری دارد. بدین ترتیب که خروجی سیستم تشخیص عیب که شامل اطلاعات مفیدی در مورد نوع، محل، زمان و و اندازه عیب حسگرها است را می‌توان به خروجی حسگرها تزریق کرد و عیبهای حسگرها با این تزریق در واقع جبران می‌شود. در شکل (6-2) بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب برای جبران عیب حسگرها نشان داده شده است. توجه گردد

که این روش جبران عیب را می‌توان در قالب ایده "همسازی و یا تطبیق عیب"¹ مطرح کرد. اگرچه ساختار کنترل کننده در این روش تغییر نمی‌کند ولی جزء روشهای AFTC محسوب می‌گردد.



شکل (2-6): بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل پذیر عیب به روش حسگرهای مجازی [9]

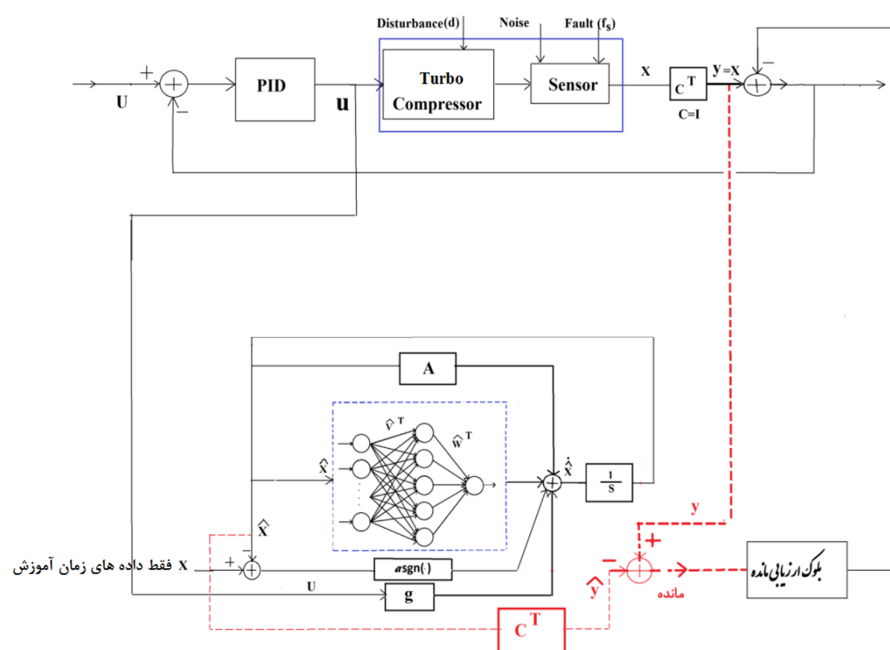
به دلیل اینکه در رهیافت سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب به روش PFTC، برخی از عیبهای معلوم از پیش تعیین شده را مد نظر قرار می‌دهند و برای سایر عیبهای احتمالی پیش‌بینی نشده کارایی ندارد و لذا در عمل روش ضعیفی می‌باشد. به همین دلیل در این رساله از این روش استفاده نمی‌گردد. از طرف دیگر، همان‌طوری‌که پیشتر ذکر شد در این رساله فقط عیب حسگرها مورد بررسی قرار می‌گیرند و فرض بر آن است که در محرکه‌ها و اجزای داخلی کمپرسور عیبی وجود ندارد بنابراین ایده حسگرهای مجازی برای طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب مناسب‌تر است.

2-6 نتایج شبیه‌سازی

در فصول قبلی، سیستم تشخیص عیب طراحی گردید. در فاز اول از سه ابزار شبکه‌های عصبی متعارف، شبکه‌های عصبی دینامیکی به همراه مد لغزشی و ماشین بردارهای پشتیبان به عنوان روش‌های مورد استفاده در رهیافت مبتنی بر داده رانده برای تشخیص عیب استفاده گردید. در فصل هفتم نیز از رهیافت مبتنی بر مدل برای تشخیص عیب استفاده شد. نتایج سیستم تشخیص عیب در

¹ Fault Accommodation

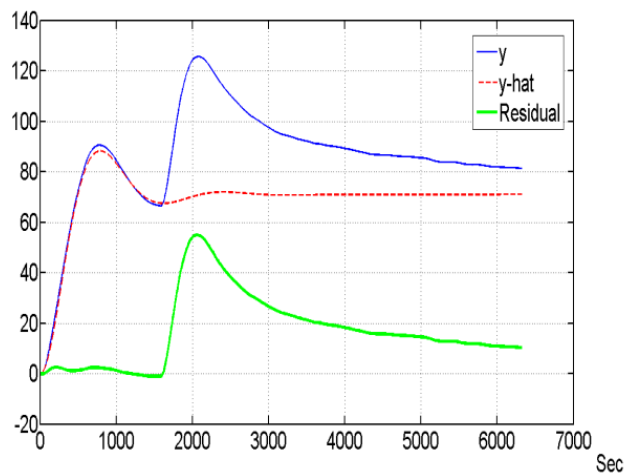
طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب استفاده می‌شود. در مرحله اول، نتایج سیستم تشخیص عیب با ابزار شبکه‌های عصبی دینامیکی به همراه مد لغزشی از فصل چهارم با سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب در نظر گرفته می‌شود. در شکل (3-6) بلوک دیاگرام مذکور نشان داده شده است. شکل (3-6) در واقع تکمیل شده شکل (9-4) است که در آن فقط نتایج سیستم تشخیص عیب در خروجی حسگر لحاظ شده است.



شکل (3-6): بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب با تشخیص عیب مبتنی بر داده رانده

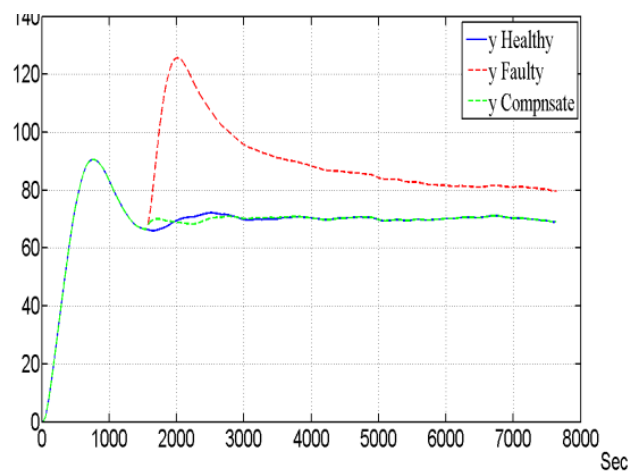
در لحظه 1500 عیبی به اندازه 15 به حسگر تزریق می‌شود و در شکل (4-8) سیگنال‌های y , $\hat{y}$, r نشان داده شده است. زمان عیب نشان داده 1617 بود در حالی که بر اساس رابطه (5-26) زمان واقعی رخداد عیب 1519 به دست می‌آید. مقدار حداکثر مانده در شکل (4-6) برابر است با 54/9 بر اساس رابطه (5-30) مقدار واقعی عیب برابر با 14/73 در نهایت خروجی بلوک ارزیابی مانده بیانگر رخداد عیبی به اندازه 14/73 در لحظه 1519 است، با استفاده از این مقادیر خروجی حسگر تصحیح می‌شود و به اصطلاح از حسگر مجازی برای جبران عیب استفاده می‌گردد. در شکل (5-6)

خط آبی خروجی حسگر عیب‌دار و بدون سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب و خط قرمز خروجی سالم و بدون عیب و خط سبز خروجی سیستم را با وجود سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب نشان می‌دهد. مقایسه دو شکل موج خروجی سالم و خروجی عیب‌دار جبران شده توسط سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب نشان از عملکرد بسیار مطلوب آن در جبران عیب دارد.



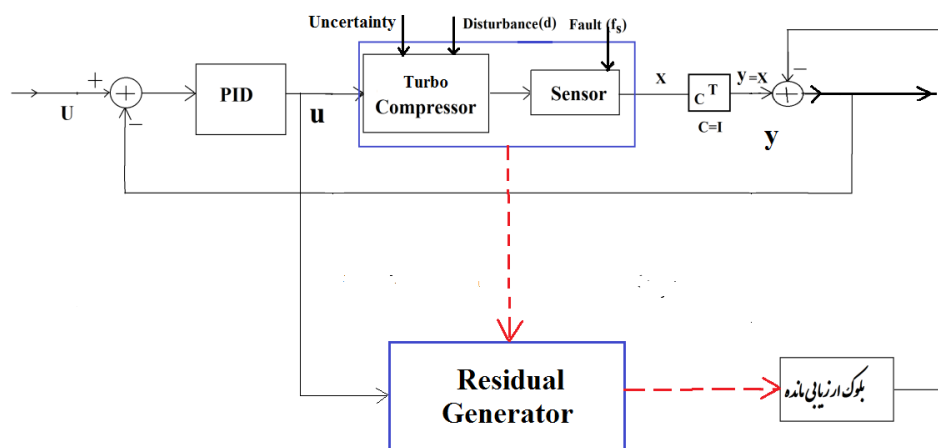
شکل (4-6) سیگنال مانده، خروجی سرعت کمپرسور و خروجی تخمین زده شده مقاوم

با شبکه عصبی دینامیکی با وجود عیب در حسگر



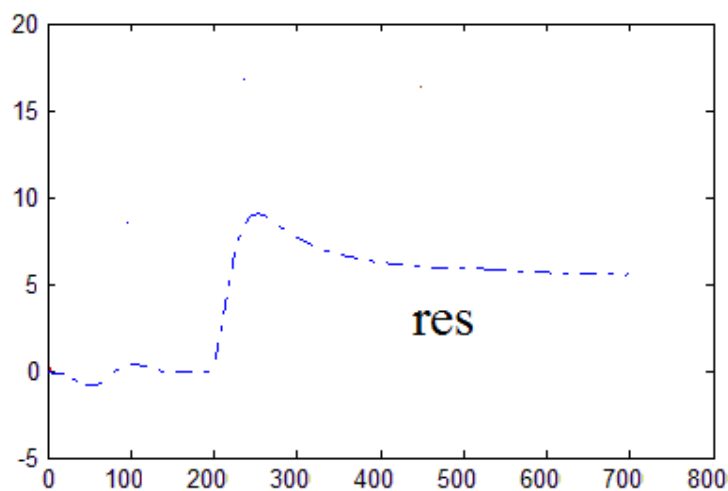
شکل (5-6) خروجی سرعت سالم، عیب‌دار و جبران شده حسگر

در مرحله دوم در نظر داریم که از نتایج سیستم تشخیص و شناسایی عیب با رهیافت مبتنی بر مدل و به روش هندسه محاسباتی برای طراحی سیستم کنترل تحمل پذیر عیب بهره بگیریم لذا شکل (5-6) که شماتیک سیستم تشخیص و شناسایی عیب مبتنی بر مدل را نشان می‌دهد را بایستی با شکل (6-2) ادغام کرد. در شکل (6-2) ایده استفاده از حسگرهای مجازی برای سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب نشان داده شده است. شکل (6-6) نتیجه این ادغام را به صورت نمادین نشان می‌دهد.

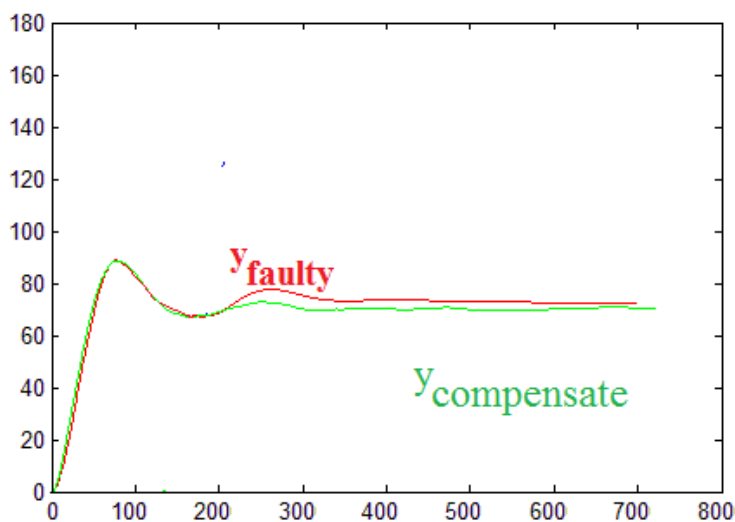


شکل (6-6): بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحمل پذیر عیب با تشخیص عیب مبتنی بر مدل

در لحظه 210 عیبی به اندازه 5 به حسگر سرعت تزریق می‌شود و در شکل (8-7) سیگنال مانده، res بدست آمده از رابطه (5-30) نشان داده شده است. زمان عیب نشان داده نیز تقریباً 210 است. مقدار مانا مانده در شکل (6-7) برابر است با $5/37$. با استفاده از این مقادیر خروجی حسگر تصحیح می‌شود و به اصطلاح از حسگر مجازی برای جبران عیب استفاده می‌گردد. در شکل (6-8) خط قرمز خروجی حسگر عیب‌دار و بدون سیستم کنترل تحمل پذیر عیب و خط سبز خروجی سیستم را با وجود سیستم کنترل تحمل پذیر عیب نشان می‌دهد. مقایسه دو شکل موج خروجی سالم و خروجی عیب‌دار جبران شده توسط سیستم کنترل تحمل پذیر عیب نشان از عملکرد بسیار مطلوب آن در جبران عیب دارد.



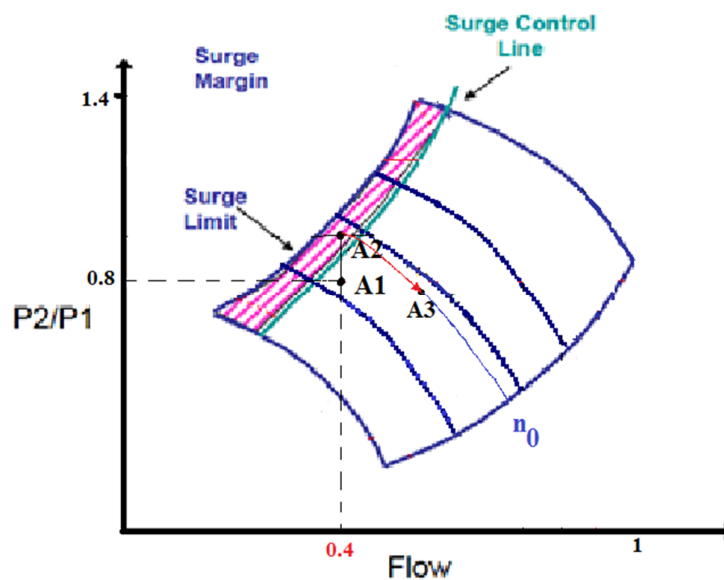
شکل (7-6) سیگنال مانده، با رهیافت مبتنی بر مدل با وجود عیب در حسگر



شکل (8-6) خروجی حسگر سرعت عیب‌دار و جبران شده حسگر

برای نشان دادن تاثیر مثبت سیستم تشخیص عیب و سیستم کنترل تحمل پذیر عیب در تعیین دقیق نقطه کار کمپرسور و جلوگیری از سرجهای کاذب به شکل (9-6) توجه شود. در لحظه 1500 بر اساس منحنی شکل (4-6) عیبی به اندازه 15 در حسگر سرعت کمپرسور رخ می‌دهد و نقطه کار دستگاه در شکل (9-6) به جای نقطه واقعی A1 به نقطه کاذب A2 منتقل می‌شود و سیستم کنترل سرچ کمپرسور در شکل (7-2) با باز کردن مسیر چرخه برگشتی سیال و با افزودن گاز از این مسیر

به ورودی کمپرسور به هدایت نقطه A2 به سمت نقطه A3 اقدام می کند. نقطه A3 در ناحیه مجاز کاری قرار دارد و البته روی یک منحنی از نظر سرعت قرار دارد و سرعت نقاط A2, A3 هردو برابر با n_0 است ولی به مراتب از دیدگاه بازده کاری نقطه کم بازدهی نسبت نقطه کاری واقعی A1 است در ضمن باز شدن مسیر چرخه سیال و تزریق گاز از خروجی به ورودی کمپرسور موجب تحمیل تنش های مکانیکی به خود دستگاه هم می گردد.



شکل (6-9): تاثیر سیستم تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر عیب در تعیین دقیق نقطه کار کمپرسور

3-6 نتیجه گیری:

در این فصل رویکرد جدیدی جهت جلوگیری از سرجهای کاذب کمپرسور مبتنی بر روشهای عیب مبتنی بر مدل و داده ارایه گردید. سیستم حاصل که می توان آن را نوعی سیستم کنترل تحمل پذیر عیب فعال دانست قادر است با استفاده از روشهای تشخیص عیب، سرچ کاذب کمپرسور را تشخیص داده و مانع از بروز مشکلات احتمالی در عملکرد کمپرسور شود.

فصل هفتم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

کمپرسورها در صنایع مختلف بالاخص در صنعت انتقال گاز طبیعی کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. یکی از اساسی‌ترین مشکلات در بکارگیری این دستگاهها، رخداد سرج های کاذب به دلیل بروز عیب های احتمالی در حسگرهای کمپرسور است. در زمینه تشخیص به موقع و درست عیبهای حسگرها و جبران آنها توسط سیستم کنترل تحمل پذیر عیب در کمپرسورها تاکنون هیچ تحقیق و پژوهشی صورت نگرفته است و لذا نیز مشکلات عملی عدیده‌ای از این بابت از تاسیسات تقویت فشار گاز گزارش شده است.

در این رساله از رویکرد فعال برای طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب استفاده گردید و چون عیب مفروض در رساله فقط عیبهای حسگرها بودند لذا مناسبترین روش برای کنترل و جبران عیب، استفاده از رویکرد حسگرهای مجازی است که در عمل خروجی واقعی حسگرها با مقادیر و نتایج به دست آمده از سیستم تشخیص عیب اصلاح می‌گردد. عدم دستکاری و تنظیم مجدد و چندباره سیستم کنترل موجود در حلقه کنترلی کمپرسور، مزیت دیگری برای استفاده از رویکرد حسگرهای مجازی در جبران عیب حسگرها است.

پیاده‌سازی سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال نیازمند وجود سیستم تشخیص دقیق عیب است. در این رساله از رهیافت جبری هندسه محاسباتی و ابزارهای ریاضی محض همچون پایه‌های گروبنر، قضیه بوخبرگر و تئوری حذف در رویکرد مبتنی بر مدل برای سیستم تشخیص عیب استفاده گردید. طراحی و پیاده‌سازی رهیافت مبتنی بر مدل در چندین گام اساسی صورت گرفت و کارایی آن با شبیه‌سازی‌های لازم تشریح گردید. شایان ذکر است در تحقیقات قبلی، گزارشی مبنی بر لحاظ نمودن متغیر عدم قطعیت در معادلات تابحال ارایه نشده است اما در این رساله متغیر عدم قطعیت نیز به معادلات غیر خطی مور-گریتر کمپرسور اضافه گردید و طراحی با رهیافت جبری با وجود همزمان متغیرهای عدم قطعیت، عیب و اغتشاش در مدل کمپرسور صورت گرفت.

در رهیافت مبتنی بر داده از ابزارهای شبکه‌های عصبی، شبکه‌های عصبی دینامیکی به همراه مد لغزشی و رگرسیون بردارهای پشتیبان برای تولید مانده استفاده گردید. و مزایای شبکه‌های عصبی دینامیکی به همراه مد لغزشی نسبت به شبکه‌های عصبی متعارف بیان گردید. کمینه کردن ریسک عملیاتی به جای ریسک تجربی مهمترین مزیت رگرسیون بردارهای پشتیبان است که در رساله تشریح شد. برای استفاده از شبکه‌های عصبی دینامیکی مبتنی بر مد لغزشی و رگرسیون بردارهای پشتیبان در طراحی سیستم تشخیص عیب، دو قضیه جدید ارائه گردید. همچنین برای تولید ماتریس هورویتز در شبکه‌های عصبی دینامیکی، بهره‌گیری از روش شناسایی زیر فضا پیشنهاد شد. نوآوری مهم دیگر در این رساله ارائه یک الگوریتم کامل برای تشخیص و جداسازی عیوب و خرابی حسگرها از یکدیگر است همچنین علاوه بر آن، می‌توان مشخصات کامل عیب از جمله زمان وقوع، زمان خاتمه، اندازه، نوع و رفتار عیب را با استفاده از این الگوریتم استخراج کرد.

برای تحقیقات آتی می‌توان موارد زیر را پیشنهاد کرد:

- 1- در نظر گرفتن عیب محرک‌ها و اجزای اساسی کمپرسورها
- 2- جابایی مناسب و بهینه حسگرها برای تشخیص خطای دقیق تر
- 3- پیاده‌سازی عملی سیستم‌های تشخیص عیب و کنترل تحمل‌پذیر عیب با برقراری ارتباط

تنگاتنگ با صنعت

- [1] Brun K. Nored M.G., (2008), "*Application guideline for centrifugal compressor surge control systems*" Ver 4.3, GMRC Guideline, Gas Machinery Research Council Southwest Research Institute
- [2] Frank P.M. and Ding S.X., (1997), "Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems", *J.of. Process Control* 7(6), pp 403-424.
- [3] Ding S.X. (2007), "*Model based fault diagnosis technique*", ISBN: 978-1-4471-4799-2, Springer Verlag, Berlin
- [4] Isermann R. (2006), "*Fault diagnosis system*", ISBN-10 3-540-24112-4, Springer-Verlag, Heidelberg
- [5] Alwi H., Edwards C. and Pin Tan C., (2011), "*Fault detection and fault-tolerant control using sliding modes*", ISBN 978-0-85729-649-8, Springer-Verlage, London.
- [6] Noura H, Theilliol, D., Ponsart, J.C., (2009), "*Fault-tolerant control systems*", ISBN 978-1-84882-652-6, Springer-Verlag London Limited
- [7] Ducard G.J.J. (2009), "*Fault-tolerant flight control and guidance systems*", ISBN 978-1-84882-560-4, Springer-Verlag London Limited
- [8] Montes de Oca S., Puig, V., (2010), "Fault-tolerant control design using a virtual sensor for LPV systems", Conference on Control and Fault Tolerant Systems Nice, France.
- [9] Sami S. M., (2012), Ph.D. thesis, "Active fault-tolerant control of nonlinear systems with wind turbine application", The University of Hull.
- [10] Mehranbod N., (2002), Ph.D. thesis, "A probabilistic approach for sensor fault detection and identification", Drexel University.
- [11] Subodh Naik A., (2010), Ph.D. thesis, "Subspace based data-driven designs of fault detection systems", Universit"at Duisburg-Essen.
- [12] Kaibo L., and Jianjun S.,(2014), "Adaptive sensor allocation strategy for process monitoring and diagnosis in a bayesian network" , *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* , Vol. 11. Doi: 10.1109/TASE.2013.2287101, pp 452 – 462.
- [13] Abid M., (2010), Ph.D. thesis, "Fault detection in nonlinear systems: An observer-based approach", University of Duisburg-Essen

- [14] Basseville M., Nikiforov I. V., (1993), “*Detection of abrupt changes: theory and application*”. Prentice Hall Inc.
- [15] Hotelling H. (1936), “Relations between two sets of variables”. *J. of Biometrika*, 26: pp 321–377
- [16] Pearson R., (1999) “Data cleaning for dynamic modeling and control”. In Proc. of IFAC European Control Conference, Karlsruhe, Germany.
- [17] Hoeskuldsson A., (1988), “Pls regression methods”. *J. of Chemometrics* 2(3), Vol 2(3), DOI: 10.1002/cem.1180020306, pp 211 – 228.
- [18] Chow E., Willsky A., (1984) “Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 29, DOI: 10.1109/TAC.1984.1103593, pp 603–614.
- [19] Frank P. M., Ding S.X., and Marcu T., (2000) “Model-based fault diagnosis in technical processes”, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 22(1), DOI: 10.1177/014233120002200104, pp 57–101.
- [20] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K. and Kavuri S.N., (2003) “Review of process fault detection and diagnosis part ii: Qualitative models and search engines”. *J.of. Computers and Chemical Engineering*, No 27, pp 313–326.
- [21] Larsson E., (2012), Ph.D. thesis, “Diagnosis and supervision of industrial gas turbines”, Linköping University.
- [22] Barszcz T., (2013), “Bearings fault detection in gas compressor in presence of high level of non-gaussian impulsive noise”, *Engineering Materials*, Vols. 569-570 pp 473-480.
- [23] Manepatil S.S., Tiwari A., (2006), “Fault diagnosis of reciprocating compressor using pressure pulsations”, International Compressor Engineering Conference, paper no, 1819, Purde, Italy.
- [24] Qingxian J., Wen C., Yingchun Z. and Xueqin C.,(2014), “Robust fault reconstruction via learning observers in linear parameter-varying systems subject to loss of actuator effectiveness” *Control Theory & Applications, IET* , Vol, 8, Issue 1. DOI:10.1049/iet-cta.2013.0417, pp 42 - 50
- [25] Sarkar S., Jin, X. and Ray, A., (2011), “Data-Driven fault detection in aircraft engines with noisy sensor measurements”, *J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, DOI: 10.1115/1.4002877, Vol 133 / 081602-1.
- [26] Bøhagen B., (2007), Ph.D. thesis, “Active surge control of centrifugal compression systems”, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology

[27] Giarre L., Bauso, D., Falugi, P. and Bamieh, B., (2005), "LPV model identification for gain scheduling control: An application to rotating stall and surge control problem", *Control Engineering Practice*, Doi:10.1016/j.conengprac. 2005.01.013.

[28] Zavieh S.M., (2013), Ph.D. thesis, "Pseudo Euler-Lagrange and piecewise affine control applied to surge and stall in axial compressors," The Department of Electrical and Computer Engineering Concordia University.

[29] ذالویی م.م. (1386) "انتقال گاز با فناوری های نوین، میر مهدی ذالویی"، انتشارات شرکت ملی گاز ایران

[30] راه آوران، جزوه آموزشی "اصول کار توربین های گازی"، انتشارات شرکت ره آوران فنون پتروشیمی

[31] Gravdahl J.T., Egeland, O, (1999), "*Compressor surge and rotating stall: modeling and control*" Springer Verlag, London.

[32] Rolls-Royce (1986), "*The Jet Engine*", fifth edition, ISBN 0902121 235, the technical publications department, Rolls-Royce plc Derby, England

[33] Yoon S.Y., Lin Z. and Allaire P.E., (2014), "Experimental evaluation of a surge controller for an AMB supported compressor in the presence of piping acoustics", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, Vol 22., Doi:10.1109/TCST.2013.2274729 , pp 1215 – 1223.

[34] Mehrawan P.B. (2002), "*Gas turbine engineering handbook*", ISBN: 0-88415-732-6, Gulf professional publishing, Huoston, Texas

[35] Cousins W.T., Ph.D. thesis (1999), "The dynamics of stall and surge behavior in axial centrifugal compressors", Mechanical Enginreeing, Virginia polytechnic institute.

[36] Hanlon P.C., (2001), "*Compressor Handbook*", ISBN 0-07-026005-2, McGraw Hill publishcation

[37] Greitzer E. M., (1976), "Surge and rotating stall in axial flow compressors: Part I- Theoretical compression system model", *ASME J. Engineering for Gas Turbine and Power*, No.98, pp 190–198.

[38] Greitzer E. M. (1976), "Surge and rotating stall in axial flow compressors: Part II Experimental results and comparison with theory", *ASME J. Engineering for Gas Turbine and power*, DOI:10.1115/1.3446139 No. 98, pp 199–217.

[39] Hansen K. E., Jorgensen P. and Larsen P.S. (1986), "Experimental and theoretical study of surge in a small centrifugal compressor" *ASME J., Fluids engineering*, 103, DOI:10.1115/1.3240796, pp 391–395.

[40] Fink D. A., Cumpsty, N. A. and Greitzer. E. M, (1991), "Surge Dynamics in a Free-Spool Centrifugal Compressor System", *ASME J. of Turbomachinery*, 114, DOI: 10.1115/1.2929146, pp 321–332.

- [41] MacDougal I., Elder. R. L., (1983), "Simulation of centrifugal compressor transient performance for process plant applications" *ASME J. of Engineering for Gas Turbine and power*, 105(4), DOI: 10.1115/1.3227497, pp 885–890.
- [42] Elder R. L., Gill. M. E. (1985), "A discussion of the factors affecting surge in centrifugal compressors" *ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, 107(2), DOI:10.1115/1.3239759, pp 499–506.
- [43] Moore F. K., Greitzer. E. M. (1986), "A theory of post stall transient in axial compression systems: Part I—Development of equations" *ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power*", 108, DOI: 10.1115/1.3239887 pp 68–76.
- [44] Greitzer E. M., MOORE. F. K. (1986), "A theory of post-stall transient in axial compression systems: Part II, Application", *ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, 108, pp 231–239.
- [45] Badmuos O. O., Eveker. K. M. and Nett. C. N. (1995), "Control-oriented high-frequency turbomachinery modeling: General one-dimensional model development". *ASME J. of Turbomachinery*, 117(3). DOI:10.1115/1.2835666 pp 320–335.
- [46] Botros K. K. (1994), "Transient phenomena in compressor stations during surge", *ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, 116(1), DOI: 10.1115/1.2906782, pp 133–142.
- [47] Gravdahl J.T., Egeland O. (1997), "A Moore-Greitzer axial compressor model with spool dynamics", In Proc. 36th IEEE Conf. on Decision and Control, DOI: 10.1109/CDC.1997.649750, pp 4714–4719, San Diego, CA. USA.
- [48] Markopoulos N., Neumeier Y., Prasad J. V. R. and Zinn B. T., (1999), "An extended analytical model for compressor rotating stall and surge", AIAA, paper 99–2124.
- [49] Spakovszky Z. S., (2000), Ph.D. thesis, "Applications of axial and radial compressor dynamic system modeling", Massachusetts institute of technology, Boston, MA.
- [50] Helvoirt. J. V, Jager. B. D., Steinbuch, M., Smeulers. J., (2005), "Modeling and identification of centrifugal compressor dynamics with approximate realizations" in Proc. 2005 IEEE Conference on control applications, DOI: 10.1109/CCA.2005.1507335 pp 1441–1447, Toronto, Canada
- [51] Helvoirt J. V, Jager. B.D. (2007), "Dynamic model including piping acoustics of a centrifugal compression system", *Journal of sound and vibration*, 302, No. 1-2, DOI: 10.1016/j.jsv.2006.12.003, pp 361–378.
- [52] Hafaifa A., Laaouad. F. and Laroussi. K. (2009), "Fuzzy model ling and control for detection and isolation of surge in industrial centrifugal compressors" *Automatic*

control journal of the university of Belgrade, Vol. 19, No. 1, DOI: 10.2298/JAC0901019, pp 19-26.

[53] Hafaifa A., Laaouad. F. and Laroussi. K (2010), “Fuzzy logic approach applied to the surge detection and isolation in centrifugal compressor,” *Automatic control and computer sciences*, Springer, Vol. 44, No. 1, ISSN 0146_4116, pp 53-59.

[54] Hafaifa A., Laaouad. F. and Laroussi. K. (2010), “Robust fuzzy fault detection and isolation approach applied to the surge in centrifugal compressor modeling and control” ,*Fuzzy information and engineering*. Springer, Vol. 2, No. 1, DOI 10.1007/s12543-010-0037-6, pp 49-73.

[55] Hahn A. (2004), M.Sc. Thesis, “Modeling and control of solid oxide fuel cell-gas turbine power plant systems, Mechanical Engineering, University of Pittsburgh.

[56] Kappos E., (1997), “Lyapunov functions and controllers for the global stabilization of the two and three dimensional Moore – Greitzer compressor dynamic models”, University of California, Santa Barbara.

[57] Hos C., Champneys, A., Kullmann, L., (2002), “Bifurcation Analysis of Surge and Rotating Stall in the Moore-Greitzer Compression System”, Department of Hydraulic Machines, Budapest Uni. of Technology and Economics (BME), 1521 Budapest, Pf. 91, Hungary.

[58] Sodemann A.A. (2006), Master of Science thesis, “Data-Driven surge map modeling for centrifugal air compressors”, The University of Wisconsin-Milwaukee.

[59] Chen Y., (2010), “The research of anti-surge control on air separation compressor”, *Information Science and Engineering (ICISE)*, 2nd International Conference on, ISBN: 978-1-4244- 7618-3 /10, pp 1613 – 1616.

[60] Grong T. S. (2009), “Modeling of compressor characteristics and active surge control of centrifugal compression systems”, M.Sc. thesis, Norwegian university of science and technology, Trondheim, Norway.

[61] Grong T. S. (2008), “Modeling of compressor train”, Norwegian university of science and technology, Project report.

[62] Ding S. X. (2009), “*Model-based fault diagnosis techniques design schemes, algorithms, and tools*”, ISBN 978-3-540-76303-1, Springer, Berlin.

[63] Beard R., (1971), PhD. thesis, “Failure accommodation in linear systems through self- reorganization”, MIT.

[64] Joens H, (1971), PhD.thesis, “Failure detection in linear systems”, MIT.

- [65] Pham D., Liu, X., (1992), “Dynamic system identification using partially recurrent neural networks”, *J. Syst. Eng.*, Vol. 2, no. 2, DOI:10.1007/978-1-4471-3244-8_3, pp 90–97.
- [66] Gupta M., Jin L. and Homma, N., (2003), “Static and dynamic neural networks: *from fundamentals to advanced theory*”, Wiley-IEEE Press.
- [67] Funahashi K., Nakamura, Y., (1993), “Approximation of dynamic systems by continuous-time recurrent neural networks”, *Neural Networks*, Vol. 6, DOI: 0893-6080/93 \$6.00 pp 801–806.
- [68] Zhixi Sh., Kai Z., (2014), “Dynamic neural network identification and decoupling control approach for MIMO time-varying nonlinear systems”, *Abstract and Applied Analysis*, Doi, 10.1155/2014/316206
- [69] Poznyak, A. S., Yu, W., and Sanchez, E.N., (2001), “Differential Neural Networks for Robust Nonlinear Control: Identification, State Estimation and Trajectory Tracking, ISBN:9810246242, World Scientific.
- [70] Poznyak A.S., Wen Y., Poznyak T.I. and Najim K., (2004), “Simultaneous states and parameters estimation of an ozonation reactor based on dynamic neural network”, *Differential Equations and Dynamical Systems*, Vol. 12, pp 195-221.
- [71] García1, A., Poznyak A., Chairez I. and Poznyak T., (2008), “Projectional differential neural network observer with stable adaptation weights”, DOI:10.1109/CDC.2008.4738950, pp 3652-3657, Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico.
- [72] Garcia B., Poznyak A., Chairez I. and Poznyak T., (2007), “Projectional dynamic neural network observer”, DOI: 0.3182/20071017-3-BR-2923.00028, pp 166-171, In proceedings 3rd IFAC symposium on system, structure and control. Brazil.
- [73] Mirak, S.M., (2013), M.Sc. thesis, “Neural network-based fault diagnosis of satellites formation flight”, Concordia University
- [74] Li, L., Khorasani, K., (2005), “A dynamic recurrent neural network fault diagnosis and isolation architecture for satellites actuator/thruster failures”, Proceedings of second International Symposium on Neural Networks, Chongqing., pp 574-583, China
- [75] Mrugalski M., (2014). “*Advanced neural network-based computational schemes for robust fault diagnosis*”, ISBN: 978-3-319-01546-0, Springer International Publishing Switzerland.
- [76] Luzar M. ; Czajkowski A. ; Witczak M. and Korbicz J. , (2012), “Actuators and sensors fault diagnosis with dynamic, state-space neural networks”, Methods and

Models in Automation and Robotics (MMAR), 2012 17th International Conference on , DOI: 978-1-4673-2124-2/12/\$31.00 pp. 196 - 201

[77] Tayarani-Bathaie S.S., Sadough Vanini Z.N. and Khorasani K, (2013), “Dynamic neural network-based fault diagnosis of gas turbine engines”, DOI:10.1016/j.neucom.2012.06.050 Neurocomputing, pp 153-165, Elsevier.

[78] Dinh H.A. (2012), PhD. thesis “Dynamic neural network-based robust control methods for uncertain nonlinear systems”, University of Florida.

[79] Van P., Overschee P. and Moor B.D., (1994), “N4sid: subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems”, *Automatica*, 30(1), pp 75-93.

[80] Naik A.S., (2010), PhD. Thesis, “Subspace based data-driven designs of fault detection systems”, University Duisburg-Essen.

[81] Trnka P., (2005), PhD. Thesis, “Subspace identification methods, technical report”, Technical University in Prague, Czech.

[82] Haber A., Verhaegen M. (2014), "Subspace identification of large-scale interconnected systems", *Automatic Control, IEEE Transactions on*, DOI: 10.1109/TAC.2014.2310375.

[83] Cristianini N., Shawe-Taylor J., (2000), “*An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*”, Cambridge University Press. ISBN: 0-521-78019

[84] Vapnik V., Golowich S. and Smola A., (1999), “*Support vector method for multivariate density estimation*”, advances in neural information processing systems, Vol. 12, pp. 659-665, MIT Press.

[85] Yuan S., Chu F., (2006), “Support vector machines-based fault diagnosis for turbo-pump rotor”, *mechanical systems and signal processing*, Vol. 20, No. 4, DOI:10.1109/CDC.2008.4738950, pp 939-952.

[86] Ren Q., Ma, X. and Miao G., (2005), “Application of support vector machines in reciprocating compressor valve fault diagnosis”, *Lecture Notes in Computer Science* Vol. 3611, pp 81-84.

[87] Smola A., Scholkopf B., (2004), “A tutorial on support vector regression”, *J of. Statistics and Computing* 14, pp 199–222.

[88] Basak D., Pal, S. and Patranabis D.C., (2007), “Support vector regression”, *Neural Information Processing – Letters and Reviews*, Vol. 11, No. 10.

- [89] Khawaja T.S., A., (2010), Ph.D. Thesis, “Bayesian least square support vector machines based framework for fault diagnosis and failure prognosis”, Georgia Institute of Technology.
- [90] Changqing S., Fei H., Fang L., Ao Z. and Fanrang K., (2014), “Quantitative recognition of rolling element bearing fault through an intelligent model based on support vector regression”, *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 2013 Fourth International Conference on , DOI: 10.1109/ICICIP.2013.656818, pp 842 – 847, China
- [91] Shitong W, Jun W., and Fu-lai C., (2014), “Kernel density estimation, kernel methods, and fast learning in large data sets”, *Cybernetics, IEEE Transactions on* , Vol. 44. Doi: 10.1109/TSMCB.2012.2236828 , pp 1-20.
- [92] Fangming Y., Zhaobo Z., Chakrabarty, K. and Xinli G., (2014), “Board-Level functional fault diagnosis using multikernel support vector machines and incremental learning”, *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on* , DOI: 10.1109/TCAD.2013.2287184 , pp 279 – 290.
- [93] Cox D., Little J. and O’Shea D., (2007), “*Ideals, varieties, and algorithms*”, 3rd Edition. Springer
- [94] Lynch S., (2010), “*Dynamical systems with application with using Maple*”. Birkhuser Boston publication.
- [95] Buchberger B., (1998), Ed., “Gröbner bases and applications”. *Mathematical Society Lecture Note Series*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [96] Wang D. M. (2004), “*Elimination practice: software tools and applications*”, Imperial College Press, London.
- [97] Liu L., (2006), Ph.D. Thesis, “Robust fault detection and diagnosis for permanent agent synchronous motors,” The Florida State University.
- [98] Svärd C., Frisk E. and Krysander M., (2014), “Data-driven and adaptive statistical residual evaluation for fault detection with an automotive application,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 45, Issue 1, 3, DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.11.002 pp. 170–192.
- [99] Huang Z., Yang Y., Wang, J. and LI Y., (2013), “Parity space-based fault diagnosis of CCBII braking system,” *J. of. Central South University*, DOI: 10.1007/s11771-013-1814-2, Vol. 20, Issue 10, pp 2922-2928.
- [100] Frisk E., (2001), Ph.D. thesis, “Residual generation for fault diagnosis” Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden.

- [101] Shen Y., Hao L. and Ding S.X. (2014), “Real-Time implementation of fault-tolerant control systems with performance optimization”, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, DOI: 10.1109/TIE.2013.2273477 , pp 2402 – 2411.
- [102] Niemann, H. Stoustrup, J. (2005), “Passive fault tolerant control of a double inverted pendulum—a case study”, *Control Engineering Practice*, 13, DOI: 10.1016/j.conengprac.2004.11.002 pp 1047-1059.
- [103] Benosman M., Lum K. Y. (2010), “Passive actuators fault-tolerant control for affine nonlinear systems”, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 18, DOI: 10.1109/TCST.2008.2009641, pp 152-163.
- [104] Veillette R. J., Medanic J. B. and Perkins W. R. (1992), “Design of reliable control systems”, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 37, DOI: 10.1109/9.119629, pp 290-304.
- [105] Richter J. H. (2011), “Reconfigurable control of nonlinear dynamical systems, A fault-hiding approach”, Springer-Verlag.
- [106] Sanchez-Parra M., Suarez D. A. and Verde C. (2011), “Fault tolerant control for gas turbines”, 16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, DOI: 10.1109/ISAP.2011.6082247 pp 25-28.
- [107] Dong J.; Yang G.H, (2014), “Reliable state feedback control of T-S fuzzy systems with sensor faults”, *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, DOI: 10.1109/TFUZZ.2014.2315298. pp 1-12.

Abstract:

Surge is a serious harmful instability in compressors that affects the entire compression system. For quick and accurate surge suppressing, the real and healthy values of fluid flow, pressure ratio and speed of compressor sensors as key variables should be accessible any time. Currently, there is not any sensor fault diagnosis (FD) in the compressor. Statistical and field studies in the gas compressor station show that compressors shut down frequently due to absence of FD. To prevent performance deterioration, major collapses, for instance surge phenomenon in the compressor as a sophisticated, expensive and safety critical system, advanced technologies for early FD and control must be incorporated into engineering designs. However, no considerable and impressive work has previously been reported on the use of sensor FD within compressor surge suppressing system.

In this thesis, the neural networks, Dynamic neural network based on robust identification and Support vector regression are used as model free technique tools to diagnosis of compressor sensor faults. The type, amplitude and behaviour of fault can be identified by proposal residual evaluation block. Subspace identification method is used for generating of Hurwitz matrix in the dynamic neural network based on robust identification. Groebner basis and elimination theory is also used as a model based method for fault diagnosis. The results of fault diagnosis systems are used in virtual sensor method as a fault tolerant control system.

Keywords: Gas Compressor, Surge Phenomenon, Fault Diagnosis, Fault Tolerant Control.



Shahrood University of Technology

Faculty: Electrical and Robotic Engineering

Gas Compressor Surge Suppression via Sensor Fault Diagnosis

Sayyid Mahdi Alavinia

Supervisor

Dr. Mohammad Ali Sadrnia

Advisors

Dr. Mohammad Javad Khosrowjerdi

Dr. Mohammad Mahdi Fateh

Date: May 2014