

A Review of Surge Control and Modeling in Centrifugal Compressors

Adel Khosravi¹, *PhD Student*, Abbas Chatraei^{1,2}, *Assistant Professor*, Ghazanfar Shahgholian^{1,2},
Associate Professor, Seyed-Mohamad Kargar^{1,2}, *Assistant Professor*

¹Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
khosravi_adel@yahoo.com, abbas.chatraei@gmail.com, shahgholian@iaun.ac.ir, smkargar@yahoo.com

Abstract

Compressors are of particular importance due to their wide application in various industries for compression and gas transmission. Due to the increasing use of compressors in the industry, it is imperative to determine a mathematical model for the compressor to design a control system, analyze it and its simulating in corresponding computer software like MATLAB. In recent years, intelligent modeling such as neural and fuzzy networks due to the more realistic performance of these models has been considered by researchers. Its types have been used for modeling. Intelligent methods have a high ability to establish a relation between input and output data. On the other hand, in compressors surge phenomenon is a challenging case which occurs very quickly and will cause damage to the compressor and the production process. This phenomenon is defined as an instability in the operation of the compressor. Surge control expands the operating range of the compressor and exhibit the occurrence of this phenomenon. This article reviews modeling, surge phenomenon, and types of active and inactive surge control. For modeling, from the Moore–Greitzer’s model to intelligent models, it has been studied that according to the obtained results, it can be said that the Moore–Greitzer’s model has more errors over time than intelligent models and is a suitable model. Not from the compressor. Next, the control of the surge phenomenon in the compressor is checked by active and passive methods. The compressor's control in the active mode does not require a compressor performance curve. Still, in the passive method, it controls the compressor by using the performance curve and creating a safety margin from the surge line. So as not to enter the surge phenomenon. This makes active control performance more efficient than passive control.

Keywords: compressor, feedback, surge control, surge phenomenon, model predictive control, Moore–Greitzer’s

Received: 24 January 2021

Revised: 6 April 2021

Accepted: 28 April 2021

Corresponding Author: Dr. Abbas Chatraei

مروری بر کنترل پدیده سرج و مدل‌سازی در کمپرسورهای گریز از مرکز

عادل خسروی^۱، دانشجوی دکتری، عباس چترایی^{۱،۲}، استادیار، غضنفر شاهقلیان^{۱،۲}، دانشیار، سید محمد کارگر^{۱،۲}،
استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

khosravi_adel@yahoo.com, abbas.chatraei@gmail.com, shahgholian@iaun.ac.ir, smkargar@yahoo.com

چکیده: کمپرسورها به دلیل کاربرد گسترده‌ای که در صنایع مختلف برای فشرده‌سازی و انتقال گازها دارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. با توجه به افزایش روزافزون کاربرد کمپرسورها در صنعت، تعیین یک مدل ریاضی برای کمپرسور جهت طراحی سیستم کنترلی، تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی کامپیوتری آن بسیار مهم است. همچنین در سال‌های اخیر مدل‌سازی-های هوشمند نظیر شبکه عصبی و فازی به علت عملکرد واقع‌بینانه‌تر این مدل‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است و از انواع آن برای مدل‌سازی استفاده شده است. روش‌های هوشمند دارای قابلیت بالایی برای برقراری ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی است. پدیده سرج در کمپرسورها یک مورد چالش برانگیز بوده چرا که خیلی سریع اتفاق افتاده و باعث آسیب به کمپرسور و مراحل تولید خواهد شد. این پدیده به صورت یک ناپایداری در جریان کاری کمپرسور تعریف می‌شود. کنترل پدیده سرج باعث گسترش محدوده عملیاتی کارکرد کمپرسور می‌گردد و از رخداد این پدیده جلوگیری می‌کند. در این مقاله مروری بر مدل‌سازی، پدیده سرج و انواع کنترل فعال و غیرفعال سرج بررسی می‌گردد. برای مدل‌سازی مدل مورگریتز و مدل‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌اند که با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که مدل مورگریتز با گذشت زمان خطای بیشتری نسبت به مدل‌های هوشمند دارد و مدل مناسبی برای کمپرسور نیست. در ادامه کنترل پدیده سرج در کمپرسور به روش‌های فعال و غیرفعال بررسی می‌شود که کنترل کمپرسور در روش فعال نیازی به منحنی عملکرد کمپرسور نیست ولی در روش غیرفعال با استفاده از منحنی عملکرد و ایجاد حاشیه امنیت از خط سرج کمپرسور را کنترل نموده تا وارد پدیده سرج نشود. همین امر باعث می‌شود که عملکرد کنترل فعال نسبت به کنترل غیرفعال بهینه‌تر و مناسب‌تر باشد.

کلمات کلیدی: پدیده سرج، کمپرسور، کنترل سرج، مدل کنترل پیش‌بین، فیدبک، مدل‌سازی، مورگریتز

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عباس چترایی

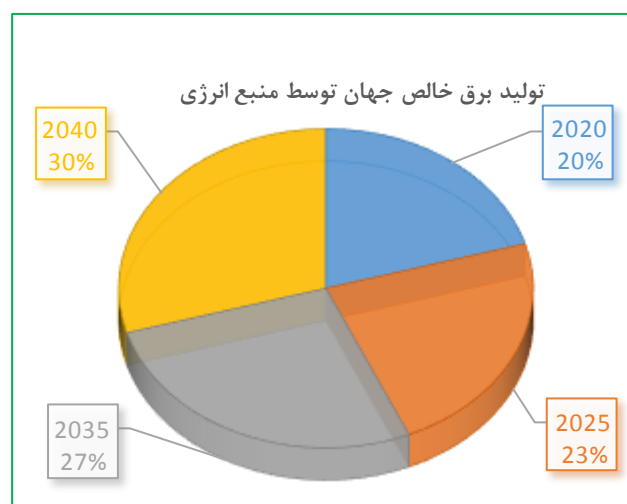
نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان - نجف‌آباد - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

کمبود انرژی یکی از موضوعات مورد توجه پژوهشگران است و تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد انواع انرژی انجام شده است [۱،۲]. با توسعه صنعت و مصارف الکتریکی در سراسر جهان، مصرف انرژی در حال افزایش است و سوخت‌های فسیلی سنتی نمی‌توانند تقاضای فعلی را برآورده کنند [۳،۴]. همان‌طور که در شکل (۱) میزان انرژی تولید شده در ۲۰ سال آینده پیش‌بینی شده است، لازم است با بهینه مصرف کردن انرژی، ائتلاف آن را کاهش داد تا تولید انرژی کمتری نیاز باشد [۵،۶]. کمپرسورها نقش مهمی برای مصرف انرژی در صنعت دارند [۷،۸]. کمپرسور یک دستگاه مکانیکی است که با کاهش حجم گازها، فشار آن‌ها را افزایش می‌دهد. در برخی دستگاه‌ها و ماشین‌آلات، کمپرسورها هوا را فشرده کرده و به قسمت احتراق ارسال می‌کنند. در حقیقت کمپرسورها با صرف انرژی مکانیکی، سیال را با سرعت به درون خود مکیده و فشرده می‌کند [۹،۱۰].

در اثر این عملیات، دمای گاز فشرده شده نیز افزایش می‌یابد. معمولاً گاز با فشار بالا در خروجی کمپرسورها را از یک سیستم خنک‌کننده عبور می‌دهند تا دمای گاز کاهش یابد. تاکنون استراتژی‌های مختلفی جهت صرفه‌جویی و بهینه‌سازی انرژی در کمپرسورها ارائه شده است که با توجه به نیازهای خاص این استراتژی‌ها متفاوت هستند. بر اساس مطالعات انجام شده، استراتژی‌های صرفه‌جویی انرژی موجود را می‌توان به سه گروه کنترل کمپرسور، توزیع سطح کنترل و کنترل توزیع زیرزمینی تقسیم کرد، که استراتژی کنترل کمپرسور سهم بیشتری برای صرفه‌جویی در انرژی دارد [۱۱،۱۲].

انواع گوناگونی از کمپرسورها وجود دارد که برای مصارف صنعتی و عمومی طراحی شده‌اند [۱۳،۱۴]. در جدول (۱) معیارهای کلیدی در انتخاب کمپرسور بیان می‌شود، کمپرسورها براساس فرآیند تراکم، به دو دسته کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت یا جریان منقطع [۱۵،۱۶] و کمپرسورهای جابه‌جایی منفی^۳ یا جریان پیوسته [۱۷،۱۸] که در شکل (۲) قابل مشاهده است، تقسیم‌بندی می‌شوند. هریک از دسته‌های فوق، تنوع زیادی در شکل و ساختار مکانیکی دارند ولی از لحاظ رفتاری دارای ویژگی‌های نسبتاً یکسانی هستند. در گروه اول کمپرسورها از حالت متناوب فشرده‌سازی استفاده می‌کنند که در آن مقدار مشخصی گاز به کمپرسور وارد می‌شود و سپس تخلیه می‌شود که این فرآیند در صورت لزوم تکرار می‌گردد. در گروه دوم کمپرسورها با جریان مداوم کار می‌کنند، که در آن گاز به‌طور مداوم به کمپرسور وارد می‌شود، فشار آن افزایش می‌یابد و سپس بدون قطع شدن جریان تخلیه می‌گردد. در جدول (۲) مزایا و معایب برخی از کمپرسورها مانند کمپرسورهای محوری^۴ [۱۹] ارائه شده است.



شکل (۱): درصد تولید برق خالص جهان توسط منبع انرژی در بیست سال میلادی
Figure (1): Percentage of world net electricity generation by energy source in twenty years

Table (1): A key criterion in choosing a compressor

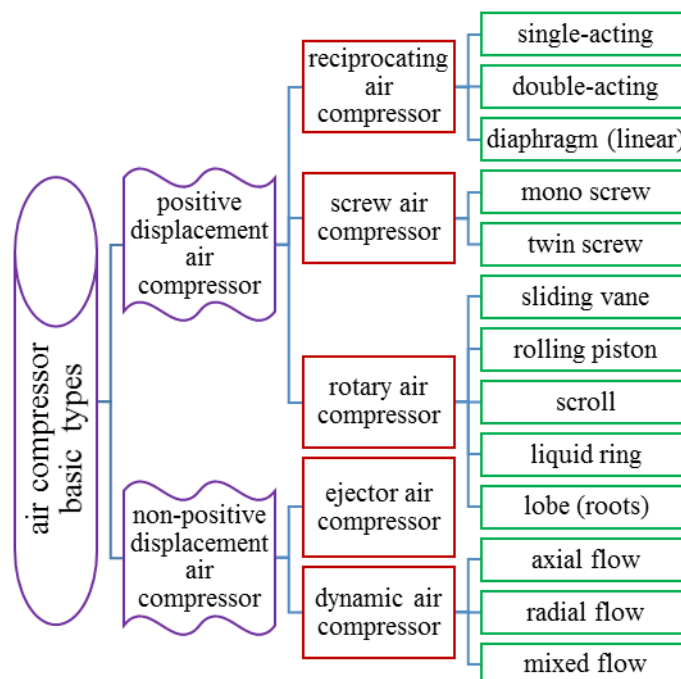
جدول (۱): معیار کلیدی در انتخاب کمپرسور

توانایی کار	موتورهای مورد استفاده می‌تواند بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اسب بخار باشد.
بهره‌برداری	بین ۳۰ تا ۴۰ درصد برای کمپرسورهای جریان منقطع و ۵۰ درصد برای کمپرسورهای جریان پیوسته
تجهیزات اولیه مورد نیاز	فنداسیون، درایور و سیستم‌های مورد نیاز کمپرسور مانند: فیلترها، کولرها، سوپاپ‌ها، شیرهای ضربه‌گیر دار برای کمپرسورهای رفت و برگشتی و...
هزینه‌های عملیاتی	بسته به نوع تجهیزات و موتور الکتریکی متفاوت است
زمینه‌های کاری	کمپرسورها در عملیات مختلف حمل‌گاز استفاده می‌شوند: فشرده‌سازی گاز برای تحویل به بازار، تزریق مجدد برای پشتیبانی از مخزن، تزریق مجدد برای بهبود، تزریق مجدد به سازه‌ها، بازیابی مایعات با ارزش گاز طبیعی (NGL)

Table (2): Advantages and disadvantages of different types of compressors

جدول (۲): مزایا و معایب انواع کمپرسور

معایب	مزایا	نوع کمپرسور
هزینه نگهداری بالاتر تحرك بیش از حد ارتعاشات فراوان	طراحی ساده نصب آسان هزینه اولیه پایین	رفت و برگشتی ^۵
سرعت چرخش بالا عمر مفید پایین در محیط‌های کثیف به‌درستی کار نمی‌کند	طراحی ساده نصب سریع هزینه نگهداری پایین	پیچی ^۶
هزینه اولیه بالا سیستم‌های نظارت و کنترل پیچیده ظرفیت کنترل محدود	بازدهی بالا فشار حداکثر ۱۲۰۰ psi نیاز به زیر ساخت نیست	گریز از مرکز ^۷
هزینه ساخت بالا وزن سنگین مصرف انرژی فراوان در راه‌اندازی	بازده بالا ورودی کوچک برای گاز ورودی افزایش فشار راحت	محوری



شکل (۲): دیاگرام انواع کمپرسور

Figure (2): Diagram of compressor types

کمپرسورها با توجه به مصرف انرژی و اندازه با یکدیگر متفاوت هستند و از مدل ۵ اسب بخار تا مدل ۵۰۰۰ اسب بخار وجود دارد. بعضی از کمپرسورهای بزرگ برای ساخت هوای فشرده به چندین کیلووات توان نیازمند هستند ولی برای کمپرسورهای کوچک یک موتور الکتریکی با توان بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلووات کافی است [۲۰،۲۱]. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش توان مصرفی کمپرسورهای بزرگ صنعتی و متوسط، استفاده از فرآیند فشرده‌سازی چند مرحله‌ای با خنک‌کن میانی است به‌صورتی که گاز پس از فشرده شدن در هر کمپرسور در یک خنک‌کننده سرد شده و سپس به مرحله بعدی وارد می‌شود [۲۲،۲۳].

چالش‌های مختلفی برای کنترل کمپرسور وجود دارد. یکی از مشکلات، تست و آزمایش کنترل‌کننده است که با توجه به خطرناک و هزینه‌بر بودن آزمایش در عمل بهتر است ابتدا مدل کمپرسور تخمین زده شود و در شبیه‌سازی کنترل‌کننده مورد استفاده قرار گیرد و بعد از اطمینان از قابلیت عملکرد مطلوب کنترل‌کننده، در عمل اجرایی شود که اهمیت برجسته مدل‌سازی مشخص می‌گردد [۲۴]. دیگر چالش موجود هنگام کارکرد یک کمپرسور پدیده سرج^۱ است که حتی‌الامکان باید به‌طور خودکار یا غیرخودکار از رخداد چنین پدیده‌ای جلوگیری شود. پدیده سرج به پدیده‌ای گفته می‌شود که در طول آن، جهت جریان گاز در داخل کمپرسور برای لحظاتی برعکس می‌شود؛ یعنی گاز داخل کمپرسور ضمن غلبه بر نیروی پروانه، به‌طور معکوس به سمت ورودی کمپرسور حرکت می‌کند. در این حالت جریان ورودی یا فشار مکش از حد مجاز طراحی کمتر شده، گاز قادر به خروج از کمپرسور نبوده و کمپرسور دچار ارتعاشات شدیدی می‌گردد [۲۵]. ارتعاشات ایجادشده ممکن است منجر به آسیب رساندن به بلبرینگ‌ها، آسیب به تیغه‌های روتور، شفت روتور خم شود، سروصدای زیاد، تلف شدن انرژی و کاهش بازده کمپرسور شود [۲۶،۲۷].

دلیل به‌وجود آمدن ارتعاشات، این است که شفت کمپرسور از یک طرف در جهت دوران محرک چرخیده و از طرف دیگر به‌علت افزایش نسبت تراکم بیشتر از حد مجاز، تحت نیرویی برای چرخش در خلاف جهت محرک قرار می‌گیرد. پدیده سرج معمولاً وقتی رخ می‌دهد که جریان بین ۵۰ تا ۷۰ درصد زیر مقدار طراحی شده باشد.

در تمام رشته‌ها و علوم برای شناخت آن‌چه که در واقعیت اتفاق می‌افتد نیاز به استفاده از کامپیوتر به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل است [۲۸،۲۹]. برای این کار ابتدا باید به مدل‌سازی آن‌چه در واقعیت وجود دارد اشاره شود. مدل‌سازی یعنی یافتن یک رابطه بین ورودی و خروجی سیستم است که اگر یک سیگنال ورودی مشابه به سیستم و مدل شبیه‌سازی شده اعمال گردد، خروجی‌های سیستم اصلی و مدل تقریباً یکسان باشند [۳۰،۳۱]. به‌عبارت دیگر مدل‌سازی به‌دست آوردن یک رابطه بین سفید^۲ [۳۳]، جعبه خاکستری^۳ [۳۴] و جعبه سیاه^۴ [۳۵] تقسیم‌بندی می‌شوند [۳۶].

مدل‌های مکانیکی که مبتنی بر مکانیسم‌ها یا اصول بنیادی هستند، همیشه نقشی اساسی در طراحی و بهینه‌سازی کمپرسور دارند [۳۷،۳۸]. حرکت گاز در داخل کمپرسور شامل جریان سه بعدی و تبدیل انرژی است. محققان انواع مختلفی از مدل و مکانیزم را بر اساس ساختار داخلی کمپرسور، انتقال انرژی داخلی و اتلاف آن مدل‌سازی کرده‌اند، اما فرضیه‌ها و ساده‌سازی‌ها در روند تحلیل مکانیسم منجر به خطای قابل توجهی بین مدل طراحی شده و روند واقعی است. در نظر گرفتن انرژی و تبدیل تکانه در هر یک از قطعات کار کمپرسور، مدل را پیچیده می‌کند که این امر مدل‌سازی را مشکل می‌کند. در سال ۱۹۵۰، تحقیقات گسترده‌ای برای مدل‌سازی کمپرسورها انجام شده است. در مرحله اول تحقیق بر اساس جمع‌آوری داده‌های تجربی و اتصال آن‌ها به شرایط کار کمپرسورها بوده است [۳۹،۴۰]. این درک محققان را تشویق و ترغیب کرد تا یک مدل ریاضی برای درک مکانیسم جریان و شروع به کار انداختن و افزایش فشار در کمپرسورها طراحی کنند که این مدل به‌نام مدل مور-گریترز نام‌گذاری شد [۴۱،۴۲]. در سال‌های اخیر به دلیل پیشرفت سریع فناوری رایانه و استفاده از DCS ذخیره شده که مقدار گسترده‌ای از داده‌های اندازه‌گیری میدانی را در اختیار محققان قرار داده، امکان مدل‌سازی‌های داده محور مانند مدل پیش-بینی مبتنی بر حداقل مربعات [۴۳]، مدل غیرخطی بر اساس حداقل مربعات جزئی^۲ [۴۴]، مدل تجزیه و تحلیل سری زمانی غیرخطی^۳ [۴۵]، مدل شبکه عصبی^۴ [۴۶] و ... را میسر کرده است. در جدول (۳) مزایا و معایب چند مدل‌سازی در کمپرسورها بیان شده است.

Table (3): Advantages and disadvantages of several methods of modeling the compressor

جدول (۳): مزایا و معایب چند روش مدل‌سازی در کمپرسور

روش مدل‌سازی	مرجع	مزایای روش	معایب روش
مورگریتز	[۴۷]	انتخاب راحت پارامترها، مدل شناخته شده و طراحی ساده	تعداد متغیر کم، محدودیت مفروضات و در صورت تغییر پارامترهای کمپرسور خطای مدل زیاد می‌شود
یک بعدی	[۴۸]	تعداد پارامتر زیاد و تخمین دقیق در صورت تغییرات	طراحی پیچیده و نیاز به نقشه‌های عملکردی کمپرسور
اسکرول سرعت متغیر	[۴۹]	انتخاب راحت پارامترها و تخمین دقیق در صورت تغییرات	طراحی پیچیده و فقط قسمتی از کمپرسور را مدل‌سازی می‌کند

تاکنون مطالعات مروری مختلفی در زمینه کاربرد و ساختار کمپرسور ارائه شده که در جدول (۴) به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. همچنین در زمینه روش‌های مختلف کنترل در کمپرسور مطالعات مختلفی انجام شده است. در مقاله [۵۰] با کم و زیاد کردن سرعت موتور کمپرسور ناحیه عملکردی کمپرسور را افزایش می‌دهند که همین امر باعث می‌شود که کمپرسور از ناحیه سرچ خارج شود و سرچ بدین وسیله کنترل می‌شود. در مقاله [۵۱] سرچ در حضور عدم قطعیت به وسیله کنترل‌کننده مقاوم کنترل شده است که این کنترل‌کننده در مقابل اغتشاشات محیطی مقاوم بوده و نمی‌گذارد کمپرسور به سمت ناپایداری سرچ نزدیک شود. در مقاله [۵۲] مسئله سرچ کمپرسور به وسیله یک کنترل‌کننده شبکه عصبی کنترل می‌شود. در این مقاله با استفاده از ساختار شبکه عصبی و آموزشی که به آن داده می‌شود به وسیله کنترل درجه ورودی کمپرسور نمی‌گذارد که کمپرسور وارد ناحیه سرچ گردد. در جدول (۵) مزایا و معایب چند روش کنترلی در کمپرسورها بیان شده است.

در این مقاله مدل‌سازی کمپرسور، پدیده سرچ و انواع روش کنترل آن در کمپرسور بررسی شده است. از برجستگی‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- انواع مدل‌سازی کمپرسور از مدل مورگریتز تا مدل‌های هوشمند مانند شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک، یک بعدی و ... پرداخته شده است.

= منحنی عملکرد، پدیده سرچ و انواع کنترل سرچ بیان شده است.

- کنترل سرچ در کمپرسور به روش‌های کنترل فعال و غیر فعال تقسیم شده و مزایا و معایب آن بررسی شده است.

Table (4): Several compressor review articles

جدول (۴): تعدادی از مقالات مروری در زمینه کمپرسور

مرجع	خلاصه نتیجه‌گیری مرور
[۵۳]	تزریق هوا در کمپرسورهای محوری از نظر طراحی پارامترهای تزریق شده، افزایش پایداری، استفاده از کنترل فعال و خودگردش مجدد بر اساس تزریق هوا به کمپرسور بررسی شده است و نشان داده شده که با تزریق هوا قابل کنترل است. پارامترهای تزریق شده که می‌توانند بر روی پایداری تأثیر گذارند طبقه‌بندی شده و کاربردهای کنترل فعال با تزریق هوا به کمپرسورهای تک مرحله‌ای تک روتور بیان شده است.
[۵۴]	عملکرد پدیده‌های حرکتی کمپرسور بر پدیده سرچ بررسی شده و نشان داده می‌شود که اگر با زاویه‌های مناسب نسبت به یکدیگر قرار گرفته باشند می‌تواند حاشیه ایمنی عملکرد کمپرسور را افزایش می‌دهد که این عمل باعث جلوگیری از پدیده سرچ می‌شود.
[۵۵]	عملکرد سیستم‌های ترکیبی سلول‌های سوختی - گاستوربین مرور شده است که یکی از اجزای این سیستم کمپرسور است. نشان داده شده که حفظ جریان کافی و به سرچ نرفتن کمپرسور در دماهای بالا چالشی بزرگ است.
[۵۶]	مزیت‌های کمپرسورهای خطی بیان شده و مشخصات اصلی آنها شامل نوع موتور، افت کمپرسور، حسگر و کنترل پیستون شرح داده شده است. هزینه کنترل به سرچ نرفتن در این مدل از کمپرسورها به مراتب کمتر از مدل‌های دیگر کمپرسورها است.
[۵۷]	کنترل فشار کمپرسور در حل مسئله سرچ شامل چرخش استال، سرچ و بزرگتر کردن دامنه عملکردی با استفاده از روش‌های کنترل‌کننده بازخورد بررسی شده است. تحولات عمده در زمینه کنترل فعال با تمرکز بر مدل‌سازی و کنترل چشم‌اندازهای چرخش استال کمپرسورهای جریان محوری نیز بررسی شده است و نتایج شبیه‌سازی‌ها نمایش داده شده است.

Table (۵): Advantages and disadvantages of several control methods in the compressor

جدول (۵): مزایا و معایب چند روش کنترلی در کمپرسور

روش کنترل	مرجع	طراحی و پیاده‌سازی	نیاز به اطلاعات از دینامیک کمپرسور	تعداد پارامترهای قابل کنترل	کنترل سرج	تضمین پایداری	سرعت عملکرد	پایداری
متناسب - انتگرال‌گیر	[۵۸]	ارزان قیمت	ندارد	کم	کند	ندارد	سریع	ندارد
متناسب - انتگرال‌گیر - مشتق‌گیر	[۵۹] [۶۰]	ارزان قیمت	ندارد	کم	کند	ندارد	کند	ندارد
پیش‌بین	[۶۱] [۶۲] [۶۳] [۶۴]	گران قیمت	دارد	زیاد	سریع	دارد	سریع	دارد
فازی	[۶۵] [۶۶] [۶۷]	گران قیمت	ندارد	زیاد	سریع	دارد	سریع	ندارد

ساختار مقاله به این شرح است. پس از بیان تعریف انواع کمپرسور، مدل‌های کمپرسور و پدیده سرج در مقدمه و اشاره به چند مقاله مروری در زمینه کاربرد کمپرسورها و روش‌های کنترلی در کمپرسورها، در بخش دوم به بیان مدل‌های مورگرتز و هوشمند برای کمپرسور پرداخته می‌شود. در بخش سوم منحنی عملکرد کمپرسور که نشان دهنده محدوده عملیاتی و کاری کمپرسور است بیان شده است. در بخش چهارم مشخصه‌های وقوع و روش تشخیص پدیده سرج مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پنجم انواع پدیده سرج و در بخش ششم روش‌های کنترل سرج به دو قسمت فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند و روش‌های مختلف آن مانند PID، شبکه عصبی، فازی و ... اشاره شده است. در انتها در بخش هفتم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مدل‌سازی کمپرسور

مدل‌سازی سیستم به معنای به‌دست آوردن یک مدل ریاضی برای ارتباط بین ورودی و خروجی یک سیستم با استفاده از داده‌های ورودی، خروجی به‌دست آمده از یک آزمایش واقعی و عملی روی سیستم است [۶۸،۶۹]. بر این اساس انواع مدل‌سازی برای کمپرسور در ادامه این مقاله بررسی می‌شود.

۲-۱- مدل مورگرتز برای کمپرسور

مدل‌سازی کمپرسور با توجه به پیچیدگی‌هایی که دارد بسیار مهم است و تاکنون توسط محققان مختلفی بررسی شده است [۷۰،۷۱]. پرکاربردترین مدل پویا برای توصیف رفتار پایدار و ناپایدار فشار کمپرسور مدل مورگرتز است، که در سال ۱۹۷۶ ارائه شده است. این مدل برای اولین بار در همان سال به‌صورت آزمایشی بررسی گردید [۷۲]. در اصل، این مدل برای کمپرسورهای محوری ساخته شده اما می‌توان از آن برای کمپرسورهای گریز از مرکز هم استفاده کرد [۷۳،۷۴]. مدل مورگرتز به‌عنوان توصیف خوبی از پویایی جریان کمپرسور به‌طور گسترده‌ای پذیرفته شده است. در طول دهه ۱۹۹۰، تحقیقات گسترده‌ای برای اصلاح و بهبود مدل مورگرتز انجام شده است. مدل‌سازی کمپرسور با استفاده از مدل‌های ریاضی مبتنی بر مورگرتز همیشه در مقایسه با داده‌های تجربی بسیار چالش برانگیز است. مدل اصلی گرتز چهار بعدی است. با اصلاحات و در نظر گرفتن فرض‌هایی می‌توان این بعدها را کاهش داد [۷۵] و آن را به دو بعد تبدیل کرد [۷۶،۷۷]. فرض‌های در نظر گرفته شده برای مدل مورگرتز عبارتند از [۷۸]: (۱) جریان ثابت درون لوله‌های فشرده‌کننده یک بعدی است، از این-رو جریان توده فشاردهنده جریان جرم گاز ثابت و در طول جریان‌ها ثابت است. (۲) فشرده‌سازی بر اساس قوانین گازها در سیستم. (۳) دمای ثابت در کل سیستم فشرده‌سازی، (۴) فشار یکنواخت در کل زمان فشرده‌سازی، (۵) رفتار سوپاپ نیمه

ایستا و (۶) نیروی گرانش نادیده گرفته می‌شود. مدل اصلی گریتر شامل چهار معادله است، که معمولاً فقط از سه معادله آن استفاده می‌گردد.

تعیین پارامترها در این مدل از سیستم فشرده‌سازی گریز از مرکز واقعی به علت هندسه پیچیده‌ای که دارد ساده نیست. نویسندگان با بررسی پارامترهای مختلف متوجه شده‌اند که با تنظیم یکی از پارامترها تطبیق خوبی بین مدل پیش‌بینی شده و مدل واقعی می‌تواند به‌وجود آید و لازم نیست کلیه پارامترها تخمین زده شود [۷۹].

در مقاله‌های [۸۰] و [۸۱] با تنظیم یکی از پارامترها، تطبیق خوبی بین مدل پیش‌بینی شده و مدل واقعی به‌دست آمده است که با استفاده از این روش مسئله سختی طراحی پارامترهای مختلف مورگریتر را حل نموده‌اند. در مقاله [۸۲] مدلی را بر اساس مدل مورگریتر طراحی کرده‌اند که در آن پارامترهای این مدل را تخمین زده و با استفاده از این مدل جدید، طراحی کنترل-کننده‌ها برای کمپرسورهای با سرعت متغیر امکان‌پذیر شده است.

در مقاله [۸۳] مدل مورگریتر را با اثر فاصله زمانی تیغه‌ها اصلاح کرده‌اند. سپس از مدل اصلاح شده برای تثبیت یک کمپرسور محوری سه مرحله‌ای با سرعت پایین با میرایی امواج در دامنه کم در حال حرکت استفاده شد. پیش‌بینی پاسخ دینامیکی حلقه بسته و باز با استفاده از این مدل با نتیجه تجربی مطابقت دارد. در مقاله [۸۴] یک مدل تحلیلی ارائه شده که استال را به‌عنوان یک بسته موج در حال حرکت توصیف می‌کند، که با آزمایشی که در آن توانایی کاهش جریان را تا ۱۸ درصد نشان می‌دهد تأیید شده است. در مقاله [۸۵] یک مدل غیرخطی با نمایش پویایی جریان توسط معادله ناپایدار اولر توسعه داده شده است.

در مقاله [۸۶] یک مدل دینامیکی برای کمپرسور گریز از مرکز توسط گریتر پیشنهاد شده است. معادلات دینامیکی جریان هوا و فشار در مدل ساخته شده است و گشتاور محرک به‌عنوان یک متغیر کنترل در نظر گرفته می‌شود. در مقاله [۸۷] مدلی که سرعت را متغیر در نظر می‌گیرد برای مدل مورگریتر طراحی شده است. در این مدل سرعت به‌عنوان یک متغیر کنترل برای تحقیق در مورد تأثیر سرعت کمپرسور بر جریان هوا و فشار در نظر گرفته شده است. در مقاله [۸۸]، پارامترهای کمپرسور بر اساس یک الگوریتم تحقق تقریبی که ساختار یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان (LTI) را با استفاده از اطلاعات پاسخ پله سیستم با استفاده از پارامترهای مورگریتر تخمین زده شده‌اند. سپس با مقایسه نتایج ارائه شده در این طراحی و نتایج واقعی سیستم نشان داده شده که مدل بدست آمده دارای دقت بالایی است.

در مقاله [۸۹] پارامترهای کمپرسور را بر اساس یک الگوریتم تحقق تقریبی که ساختار یک سیستم LTI از اطلاعات پاسخ گام LTI را دارا است تخمین زده‌اند و پارامترهای گریتر را طراحی نموده‌اند و با مقایسه نتایج به‌دست آمده در این طراحی و نتایج واقعی سیستم به این نتیجه رسیدند که طراحی مناسب بوده و به‌خوبی عمل می‌کند.

واضح است که مدل مورگریتر در مقایسه با ماشین واقعی بسیار ساده است، برخی از فرضیات بسیار نادرست هستند. به همین دلیل است که محققان از مدل‌های هوشمند برای مدل‌سازی کمپرسور استفاده می‌کنند.

۲-۲- مدل‌سازی هوشمند برای کمپرسور

با گذشت زمان، نامعینی‌هایی از سیستم خود را در شرایط مختلف محیطی، زمانی و فرکانسی نشان می‌دهند، لذا مدل‌های مور-گریتر ممکن است دچار خطای تخمین شوند. این در حالی است که مدل‌های هوشمند ساختار سیستم را در همان لحظه تخمین زده و مدل را ارائه می‌کنند. در مورد کمپرسور، نامعینی‌های زیادی همچون تغییر درجه آزادی پروانه‌ها بر اثر گذشت زمان، مستهلک شدن آب‌بندی‌های قسمت‌های مختلف، تغییر دمای محیط در فصل‌های مختلف سال برای قسمت‌های گوناگون کمپرسور و ... در عمل وجود دارد که لزوم یافتن یک مدل هوشمند غیر خطی همه جانبه نسبت به مدل‌های موجود را نشان می‌دهد.

در مقاله [۹۰] به مدل‌سازی ترمودینامیکی و تجربی یک کمپرسور گریز از مرکز چند مرحله‌ای به منظور افزایش راندمان و بهینه‌سازی مصرف انرژی در آن پرداخته شده است و در نهایت توانسته‌اند با بهبود عملکرد خنک‌کن‌های کمپرسور، ۵ درصد مصرف انرژی را کاهش دهند. در مقاله [۹۱] به مدل‌سازی دقیق ترمودینامیکی یک کمپرسور خنک‌کن با استفاده از داده‌های تجربی و معادلات حاکم، جهت توسعه و ارتقای کارایی خنک‌کن‌های آن و راندمان این کمپرسور پرداخته شده است. در مقاله

[۹۲] به بهینه‌سازی یک سیکل خنک‌سازی در یک کمپرسور گریز از مرکز دو مرحله‌ای همراه با خنک‌کن میانی پرداخته‌اند و راندمان آن را افزایش داده‌اند. در مقاله [۹۳] تجزیه یک کمپرسور به عناصر ساده‌تر را توصیف می‌کند. عناصر مختلف سیستم را می‌توان توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه‌های فازی و روابط تجربی مدل‌سازی کرد. در این مقاله مزایا و ویژگی‌های این روش‌ها نشان داده شده است. در این مقاله، بازده مرحله کمپرسور با استفاده از شبکه‌های عصبی مدل‌سازی شده است. در مقاله [۹۴] یک مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کنترل کمپرسور طراحی نموده‌اند، که می‌تواند محرک اضافی را از بین ببرد و دارای پتانسیل بهره‌وری انرژی است. این مدل در برابر آزمایشات تست شده است. یک مدل برای پیش‌بینی عملکرد کمپرسور گریز از مرکز چند مرحله‌ای با استفاده از اطلاعات هندسی کمپرسور و سرعت با محاسبه مرحله‌بندی در هر مرحله ارائه شده است [۹۵]. مدل پیشنهادی ابزاری ارزشمند برای ارزیابی عملکرد کمپرسور گریز از مرکز چند مرحله‌ای فراهم می‌کند، این مدل مشکل تجزیه و تحلیل نقشه‌های کمپرسور برای توصیف جریان و بازده کمپرسورهای گریز از مرکز را بر طرف کرده است و این مدل بر اساس معادلات تعادل جرم، انرژی و آنتروپی برای مایعات قابل فشرده ساخته شده است. مدل‌های آیرودینامیکی یک بعدی، که روابط علیت بین متغیرهای ورودی و خروجی را تنظیم می‌کند که با استفاده از داده‌های عملیاتی مطابقت با کمپرسور واقعی تنظیم می‌شوند، برای کاربردهای صنعتی شبیه‌سازی و نظارت برای کمپرسور ارائه شده است [۹۶]. در مقاله [۹۷] از شبکه عصبی مصنوعی برای توسعه مدل استفاده می‌شود، تعداد زیادی از داده‌های آزمایشات اندازه‌گیری شده و برای آموزش مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی پارامترهای همکاری RV استفاده می‌شود. یک روش مدل‌سازی از طریق پیش‌بینی عملکرد کمپرسور در مقاله [۹۸] ارائه شده و انواع مختلف شبکه عصبی برای مقایسه نقشه عملکرد کمپرسور استفاده شده است. مرجع [۹۹] با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی مدل کمپرسور گریز از مرکز مبتنی بر دستگاه بردار پشتیبانی غیر قرینه را توسعه می‌دهد، این مدل برای تشخیص سرج استفاده شده و با استفاده از داده‌های عملی پدیده سرج به دست آمده است، که مدل طراحی شده در مقابل مدل واقعی تطابق خوبی دارد. به‌منظور بهبود دقت مدل کمپرسور از روش مدل-سازی داده‌ای ترکیبی مراجع [۱۰۰] و [۱۰۱] استفاده شده است. پیش‌بینی عملکرد اسمی کمپرسور با استفاده از یک مدل ترکیبی ANN-PLS، که با ۵ نورون پنهان و ۷ متغیر پنهان تعیین شده است، ANN-PLS مدل عملکرد بهتری نسبت به مدل ANN و مدل PLS دارد که به‌طور جداگانه کار می‌کنند [۱۰۲]. در مقاله [۱۰۳] با در نظر گرفتن هوا به‌عنوان گاز کامل و ثابت در نظر گرفتن توان حرارتی خنک‌کننده میانی با استفاده از روش لاگرانژ یک روش بهینه‌سازی برای کمپرسور صنعتی ارائه می‌شود و نشان داده شده که در صورت استفاده از این مدل توان کاری کمپرسور افزایش می‌یابد. در مقاله [۱۰۴] از یک روش یک بعدی (ID) در شبیه‌سازی فشار کمپرسور استفاده شده که تراکم هوا در لوله‌ها در نظر گرفته می‌شود و افزایش خفیف قبل از افزایش عمیق با موفقیت ثبت شده است. با این حال، در روش یک بعدی، مجموعه‌ای از داده‌های نقشه کمپرسور هنوز به‌عنوان ورودی برای مدل کمپرسور مورد نیاز است که نمی‌تواند به‌طور کامل تأثیر جریان‌های سه بعدی در کمپرسورها را نشان دهد. در مقاله [۱۰۵] به مدل‌سازی یک توربین گازی با استفاده از مدل نارکس^۵ به‌عنوان یک مدل جعبه سیاه اشاره شده است، از مدل‌سازی نارکس به دلیل در دست نداشتن اطلاعات داخلی از توربین استفاده می‌شود که نتایج به‌دست آمده از این مدل‌سازی نشان دهنده خطای حدود ۳/۵ درصدی بین مدل نارکس ارائه شده و واقعیت سیستم است، که با توجه به مقدار خطای کم نشان از مدل‌سازی دقیق نارکس خواهد بود. در مقاله [۱۰۶] با استفاده از روش شناسایی درخت مدل خطی محلی^۶ (LOLIMOT) یک کمپرسور گاز طبیعی مدل‌سازی شده و با بررسی نتایج به‌دست‌آمده در مدل واقعی سیستم و مدل طراحی شده نشان داده شده که مدل طراحی شده مدل خوبی بوده و شناسایی به‌درستی انجام شده است. در این مقاله بعد از مدل‌سازی کمپرسور با استفاده از داده‌های واقعی کنترل‌کننده‌ای طراحی نشده است که صحت مدل به‌دست آمده بررسی گردد. در مقاله [۱۰۷] از یک روش یک بعدی (ID) در شبیه‌سازی فشار کمپرسور استفاده شده است که تراکم هوا در لوله‌ها در نظر گرفته می‌شود. با این حال، در روش یک بعدی، مجموعه‌ای از داده‌های نقشه کمپرسور هنوز به‌عنوان ورودی برای مدل کمپرسور مورد نیاز است که نمی‌تواند به‌طور کامل تأثیر جریان‌های سه بعدی در کمپرسورها را نشان دهد. در مقاله [۱۰۸] سرج به‌وسیله دینامیک سیال محاسباتی برای یک کمپرسور جریان محوری سه بعدی (3D) شبیه‌سازی شده است. حوزه

محاسباتی سه بعدی شامل یک کمپرسور، یک محفظه احتراق و یک توربین است. نتایج نشان می‌دهد که نوسانات هلمولتز^{۱۷} که در ردیف‌های عقب کمپرسور است، باعث افزایش فشار کمپرسور و رفتن کمپرسور به ناحیه‌ی سرج می‌شود.

۳- منحنی عملکرد در کمپرسور

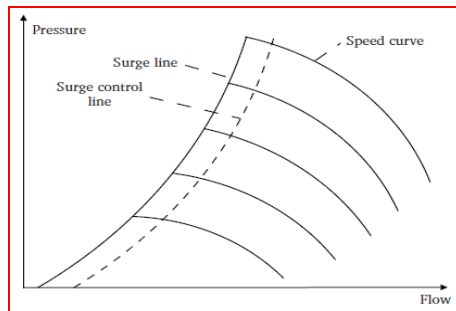
منحنی عملکرد هر کمپرسور^{۱۸} توسط شرکت سازنده تهیه می‌گردد. شکل (۳) انواع منحنی عملکرد کمپرسور را نشان می‌دهد که در قسمت اول منحنی عملکرد خط سرج همراه با حاشیه امنیت سرج، در قسمت دوم منحنی عملکرد با خطوط سرعت کمپرسور و در قسمت سوم منحنی عملکرد همراه با خط سرج و مشخصه‌های کمپرسور نشان داده شده است. این نمودارها از دو محور افقی، عمودی و همچنین یک دسته منحنی تشکیل شده که محور افقی میزان فلو (ظرفیت) گاز ورودی و محور عمودی هد^{۱۹} یا فشار گاز خروجی را نشان می‌دهد. دسته منحنی نیز بیانگر عملکرد کمپرسور در دوره‌های مختلف است. در این نمودار برای هر دوری یک نقطه حداقل و یک نقطه حداکثر ظرفیت (فلو) وجود دارد که بین این دو نقطه حداکثر ظرفیت (نقطه استون وال)^{۲۰} و حداقل ظرفیت (نقطه سرج) کارکرد کمپرسور پایدار و قابل پیش‌بینی است. برای تعیین خط سرج که مناطق پایدار و ناپایدار را در نقشه کمپرسور جدا می‌کند، حداقل سه متغیر سرعت روتور، نسبت فشار و جریان جرم باید در نظر گرفته شود که با توجه به روابط موجود برای کمپرسور در نقشه کمپرسور به یکدیگر متصل می‌شوند [۱۰۹، ۱۱۰]. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با اتصال نقاط سرج در دوره‌های مختلف خط حد سرج به دست می‌آید [۱۱۱]. اگر کمپرسور در سمت راست این خط کار کند در حالت پایدار و اگر در سمت چپ این خط کار کند در حالت ناپایدار یا سرج است [۱۱۲، ۱۱۳]. در مقاله‌های [۱۱۴] و [۱۱۵] اثر رطوبت بر منحنی عملکرد کمپرسور بررسی و نشان داده شده زمانی که رطوبت گاز بالا می‌رود فشار خروجی کم خواهد شد و بر روی عملکرد کمپرسور تأثیر گذاشته و کمپرسور را وارد ناحیه‌ی سرج می‌کند. در مقاله [۱۱۶] اثر حرکت پروانه‌ها و دفیوزها^{۲۱} بر عملکرد کمپرسور بیان می‌شود. اگر عملکرد پروانه‌ها و دفیوزها با زاویه مناسب، بدون خوردگی و بهینه باشند بر سرعت بالا رفتن فشار تأثیرگذار هستند و کمپرسور سریع‌تر می‌تواند خود را از ناحیه سرج خارج کند. در مقاله [۱۱۷] اثر تزریق آب بر منحنی عملکرد کمپرسور اشاره شده که در آن با تزریق آب در ورودی کمپرسور می‌توان عملکرد کمپرسور را افزایش داد و این باعث افزایش توان و بازدهی بهتر انرژی می‌گردد.

۴- روش‌های تشخیص پدیده سرج

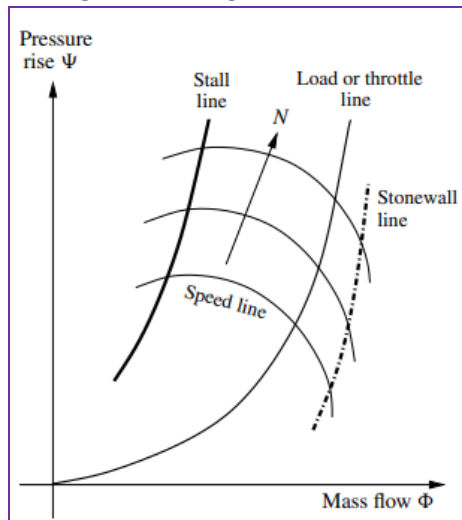
تاکنون مطالعات مختلفی در ارتباط با تشخیص پدیده سرج انجام شده است [۱۱۸، ۱۱۹]. وقوع سرج در کمپرسورها اغلب با مشخصه‌هایی همراه خواهد بود که عبارتند از: (۱) معکوس شدن سریع فلو^{۲۲} خروجی کمپرسور در حد میلی ثانیه، (۲) نوسانات شدید فشار، (۳) افزایش سریع دمای گاز عبوری، (۴) ارتعاشات بیش از حد کمپرسور که می‌تواند سبب خاموش شدن کمپرسور هم شود و (۵) سر و صدا و نویز زیاد.

شکل (۴) مشخصه وقوع سرج را نشان می‌دهد که در قسمت (الف) معکوس شدن فلو^{۲۳} خروجی کمپرسور، در قسمت (ب) نوسانات شدید فشار و قسمت (ج) افزایش سریع دمای گاز عبوری قابل مشاهده است. به‌طور کلی وقتی پدیده سرج اتفاق می‌افتد پیامدهایی همراه دارد که عبارتند از [۱۲۰، ۱۲۱]: (۱) ایجاد آشفستگی در فرایند، (۲) تحلیل رفتن بازده کلی کمپرسور، (۳) کاسته شدن از عمر کمپرسور به دلیل آسیب‌های مکانیکی وارده به آب‌بندها، یاتاقان‌ها، روتور و پروانه‌ها، (۴) از بین رفتن درجه آزادی‌های داخلی و حساس قطعات مکانیکی سیستم و (۵) پایین آمدن راندمان کمپرسور.

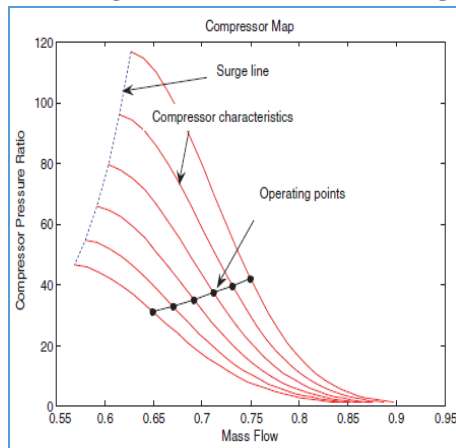
عوامل اصلی در رخداد پدیده سرج عبارت‌اند از [۱۲۲، ۱۲۳]: (۱) بالا بودن فشار در هدر خروجی در زمان به خط زدن یک کمپرسور، (۲) کاهش فلو^{۲۴} کمپرسور به هر علت (کاهش مصرف در پایین دست یا بسته شدن شیرهای بین‌راهی خطوط انتقال یا تریپ خوردن ایستگاه‌های بعدی)، (۳) افزایش فشار در هدر خروجی کمپرسور به علت بسته شدن مسیر در پایین دست، (۴) کاهش فشار گاز ورودی به کمپرسور به هر علت، (۵) تغییرات در جرم مولکولی سیال به علت تغییر در ترکیب گاز و (۶) کاهش سریع دور به هر علت (مثلاً توقف اضطراری).



الف - حاشیه سرچ (خط کنترل سرچ)



ب - منحنی عملکرد کمپرسور (خطوط بار، خط سرچ و با خطوط سرعت)



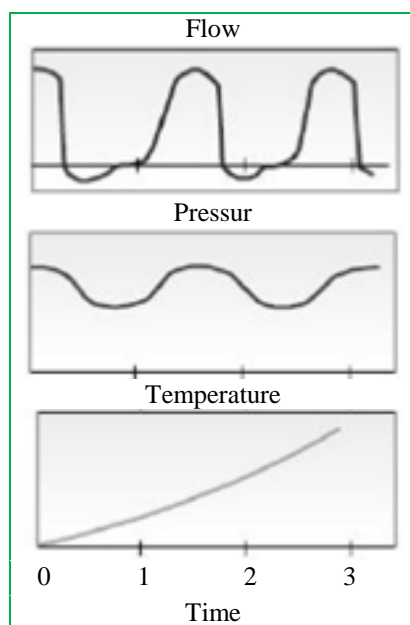
ج - نقاط عملکرد کمپرسور همراه با خط سرچ و مشخصه‌های کمپرسور

شکل (۳): انواع منحنی عملکرد

Figure (3): Types of performance curves, (a) Surge margin (surge control line), (b) Compressor performance curve (load lines, surge line and speed lines), (c) Compressor operating points along with surge line and compressor characteristics

۵- انواع پدیده سرچ

پدیده سرچ در حقیقت نوسان محوری جریان در کمپرسور است. نوسان در جریان عبوری از کمپرسور، معمولاً سبب القای نوسان در فشار نیز می‌شود. به‌طور کلی می‌توان سرچ را پدیده‌ای یک بعدی در نظر گرفت [۱۲۴]. نوسان سرچ در بیشتر کاربردها، پدیده نامطلوبی است. رفتار سیال در حالت سرچ به منحنی عملکرد کمپرسور و منحنی عملکرد هر وسیله‌ای که در پائین‌دست کمپرسور قرار دارد و با آن ترکیب شده مانند توربین و ... بستگی دارد. با توجه به نحوه رفتار سیال در حالت سرچ و نوسانات فشار ایجاد شده است.



شکل (۴): مشخصه‌های وقوع سرچ.

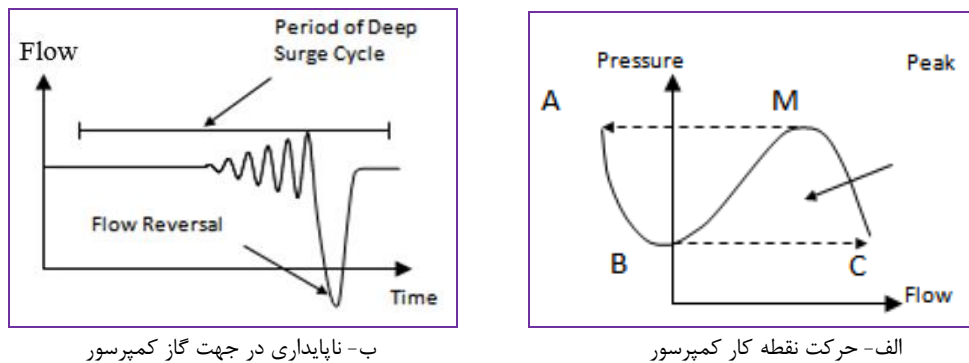
Figure (4): Characteristics of the occurrence of the surge.

معمولاً سرچ را به چهار دسته تقسیم می‌کنند که عبارتند از [۱۲۵]: (۱) سرچ خفیف^۳ (بدون برگشت جریان و شامل نوسانات خفیف فشار است) [۱۲۶]، (۲) سرچ کلاسیک^۴ (بدون برگشت جریان و شامل نوسانات فشار بیشتری نسبت به سرچ خفیف خواهد بود) [۱۲۷]، (۳) سرچ اصلاح شده^۴ (شامل سرچ کلاسیک و واماندگی چرخشی است) [۱۲۸] و (۴) سرچ عمیق^۵ (شامل سرچ کامل بوده و باعث ناپایداری کمپرسور به‌طور کامل خواهد شد) [۱۲۹].

سرچ عمیق در کمپرسور در شکل (۵) نشان داده شده است. در قسمت (الف) فرض می‌شود کمپرسور در نقطه پایدار کار می‌کند. با کاهش تقاضای گاز در کمپرسور، نقطه کار به سمت نقطه M (حد سرچ) خواهد رفت و با عبور نقطه کار از M، کمپرسور دیگر توانایی افزایش فشار دیس شارژ^۶ را نخواهد داشت. در این حالت فشار دیس شارژ کمتر از فشار پایین دست خواهد شد که باعث می‌شود جهت جریان هوا از طریق کمپرسور عکس شده و نقطه کار به A جهش پیدا کند. نقطه پایداری در کارکرد کمپرسور نیست. هنگامی که جریان هوای معکوس اتفاق می‌افتد فشار از طریق کمپرسور افت پیدا کرده و هم‌زمان، فلو به سمت مثبت شدن خواهد رفت تا اینکه نقطه کار به B برسد. در نقطه B میزان جریان هوا به اندازه‌ای نیست که قادر باشد فشار مورد نیاز برای بازگشت به نقطه M را آماده کند. در نتیجه نقطه کار به نقطه C، یعنی مکانی که میزان جریان هوا بیشتر از حدی است که بار تقاضا دارد می‌رود و بنابراین در خروجی دوباره فشار ساخته می‌شود تا به نقطه M برسد. در قسمت (ب) همان‌گونه که مشاهده می‌شود در جریان گاز کمپرسور ناپایداری حاصل شده و در نهایت کمپرسور از ناحیه پایداری خارج شده است. اگر تغییری در شرایط کمپرسور ایجاد نشود این عمل به‌صورت دوره‌ای در زمان‌های کم تکرار خواهد شد. در شکل (۶) سرچ خفیف نشان داده شده که در قسمت (الف) خط چین نشان‌دهنده خط پایدار کمپرسور است که فشار در حوالی نقطه پایدار کمپرسور کار می‌کند و در قسمت (ب) مشاهده می‌شود که در جریان گاز کمپرسور ناپایداری حاصل نمی‌شود و سرچ خفیف در عملکرد کمپرسور تأثیرگذار نیست.

۶- روش‌های کنترل سرچ

سابقه کنترل سرچ کمپرسور حداقل از سال ۱۹۱۷ تاکنون بوده است [۱۳۰]. این گذشته غنی همراه با طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی فشرده منجر به چندین طرح کنترل مختلف می‌شود حتی به‌صورتی که استراتژی‌های کنترل سرچ از دستگاه‌های ساده مکانیکی [۱۳۱] به کنترل جریان فعال بر پایه‌ی رایانه [۱۳۲] تبدیل شده‌اند، اما پژوهش در زمینه کنترل سرچ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

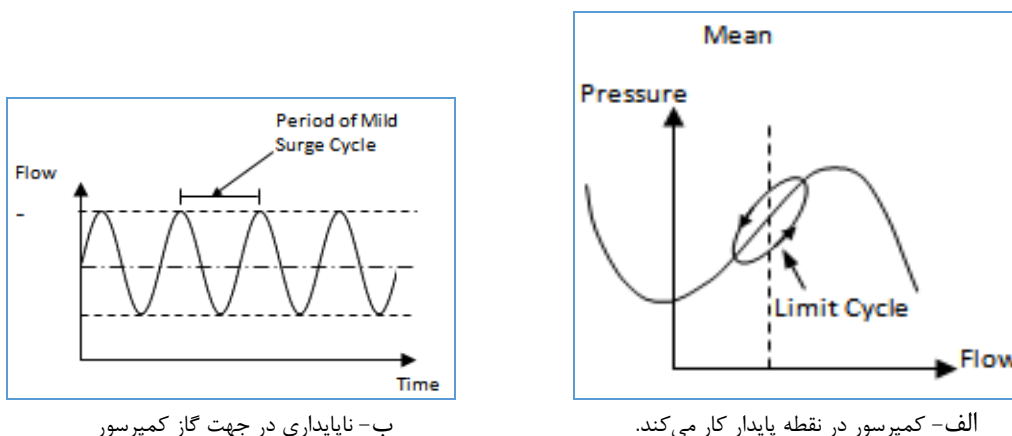


ب- ناپایداری در جهت گاز کمپرسور

الف- حرکت نقطه کار کمپرسور

شکل (۵): سرچ عمیق

Figure (5): Deep surge, (a) Moving the compressor working point. (b) Instability in the direction of the compressor gas



ب- ناپایداری در جهت گاز کمپرسور

الف- کمپرسور در نقطه پایدار کار می‌کند.

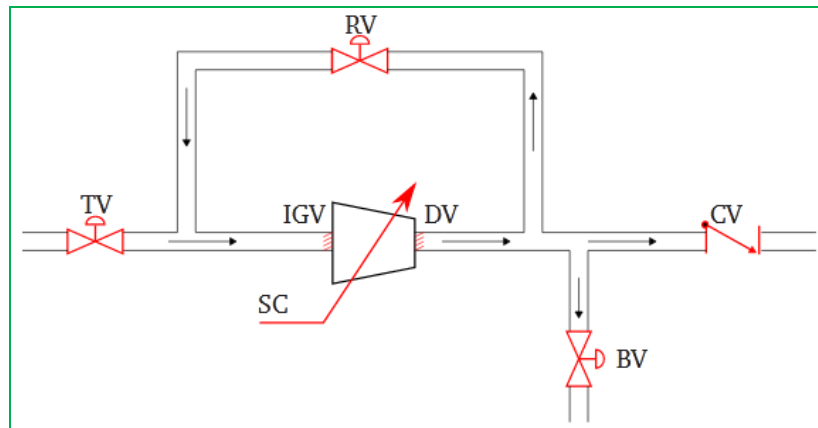
شکل (۶): سرچ خفیف

Figure (6): Mild surge, (a) The compressor operates at a stable point, (b) Instability in the direction of the compressor gas

این صنعت هنگام استفاده از فناوری جدید محافظه کار است؛ بنابراین، طرح‌های کنترلی نسبتاً قدیمی هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرند. کمپرسورها به‌طور طبیعی بر اساس شرایط کارکرد آن طراحی می‌شوند. با این حال، شرایط عملیاتی به دو صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت تغییر خواهند کرد و این امر لزوم معرفی کنترل‌کننده‌ها را می‌دهد که هنگام کار با یک کمپرسور، اساساً دو هدف کنترل متناقض حفاظت و عملکرد وجود دارد [۱۳۳]. حفاظت مربوط به جلوگیری از ورود کمپرسور به شرایط آسیب‌رسان، در اینجا به‌صورت پیشگیری از سرچ فرض می‌شود. منظور از عملکرد، عملکرد ارائه فشار و افزایش فشار مطلوب درحالی‌که حداکثر بهره‌وری انرژی را کمپرسور داشته باشد منظور شده است.

در صورتی که نقطه کار کمپرسور با فاصله از خط سرچ کار کند کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرچ نخواهد شد ولی از آنجا که ناحیه‌ی سرچ کمترین میزان مصرف انرژی و بالاترین بازده را در نقشه کمپرسور دارا است، بهتر است کمپرسور در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به خط سرچ به روشی کار کند که کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرچ نشود و پایداری خود را حفظ نماید در این صورت کمپرسور بهترین بهره‌وری را خواهد داشت.

چندین روش برای حفاظت از کمپرسور وجود دارد که در شکل (۷) نحوه قرار دادن رویکردهای مختلف آن نشان داده شده است. در این شکل TV نشان دهنده دریچه ورودی، RV نشان دهنده دریچه بازگشتی، BV نشان دهنده شیر تخلیه، CV نشان دهنده سوپاپ چک، IGV نشان دهنده تیغه‌های ورودی، DV نشان دهنده تیغه‌های پخش‌کننده و SC نشان دهنده کنترل سرعت است. این رویکردها لزوماً در همه‌ی کمپرسورها وجود ندارند و یک یا چند روش آن برای کنترل کمپرسور مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۷): رویکردهای کنترل کمپرسور
Figure (7): Compressor control approaches

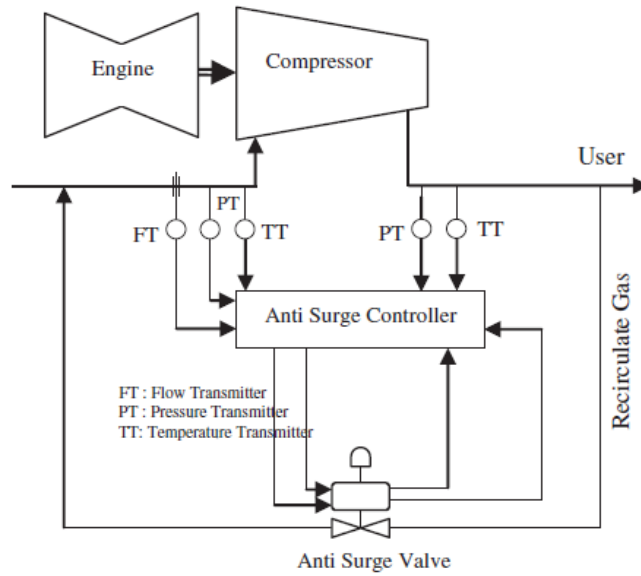
دریچه ورودی عمدتاً برای کنترل عملکرد استفاده می‌شود بدین صورت که با وارد شدن به ناحیه‌ی سرچ دریچه ورودی افزایش یافته و بر گاز برگشتی غلبه می‌کند و نمی‌گذارد که کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرچ شود [۱۳۴]. در تیغه‌های ورودی و تیغه‌های پخش‌کننده نیز تنظیم این تیغه‌ها باعث تغییر جریان در مقابل رابطه فشرده‌سازی می‌شود [۱۳۵، ۱۳۶]. توسط تیغه‌ها سرعت جریان عرضه در یک کمپرسور تعیین شده است. بار کمپرسور کاهش می‌یابد در نتیجه جریان کاهش می‌یابد. با این حال، حداقل برای جلوگیری از ورود کمپرسور به ناحیه سرچ لازم است تیغه‌های ورودی و پخش‌کننده سرعت و زاویه خود را تغییر دهند [۱۳۷، ۱۳۸]. کنترل‌کننده‌های سرعت کمپرسور نیز به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند و با تغییر سرعت کمپرسور نمی‌گذارند کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرچ شود [۱۳۹، ۱۴۰].

شیرهای بازگشتی و تخلیه و سوپاپ چک معمولاً باهدف محافظت از کمپرسور در برابر عملکرد سرچ نصب می‌شوند، به‌صورتی که برای جلوگیری از نرفتن به ناحیه سرچ باید حداقل جریان از طریق یک کمپرسور در نظر گرفته شده باشد. در صورتی که کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرچ شود این شیرها و سوپاپ‌ها عمل می‌کنند و کمپرسور به حالت معمولی باز خواهد گشت. کمپرسور همراه با شیر تخلیه در شکل (۸) نشان داده شده است. دریچه‌های تخلیه و بازگشتی کمپرسور را تخلیه می‌کنند در دریچه تخلیه گاز کامل تخلیه می‌شود ولی در دریچه بازگشتی گاز مجدد به ورودی کمپرسور باز می‌گردد. سوپاپ‌های چک به‌گونه‌ای نصب می‌شوند که جریان سیال هرگز در جهت معکوس قرار نگیرند [۱۴۱، ۱۴۲].

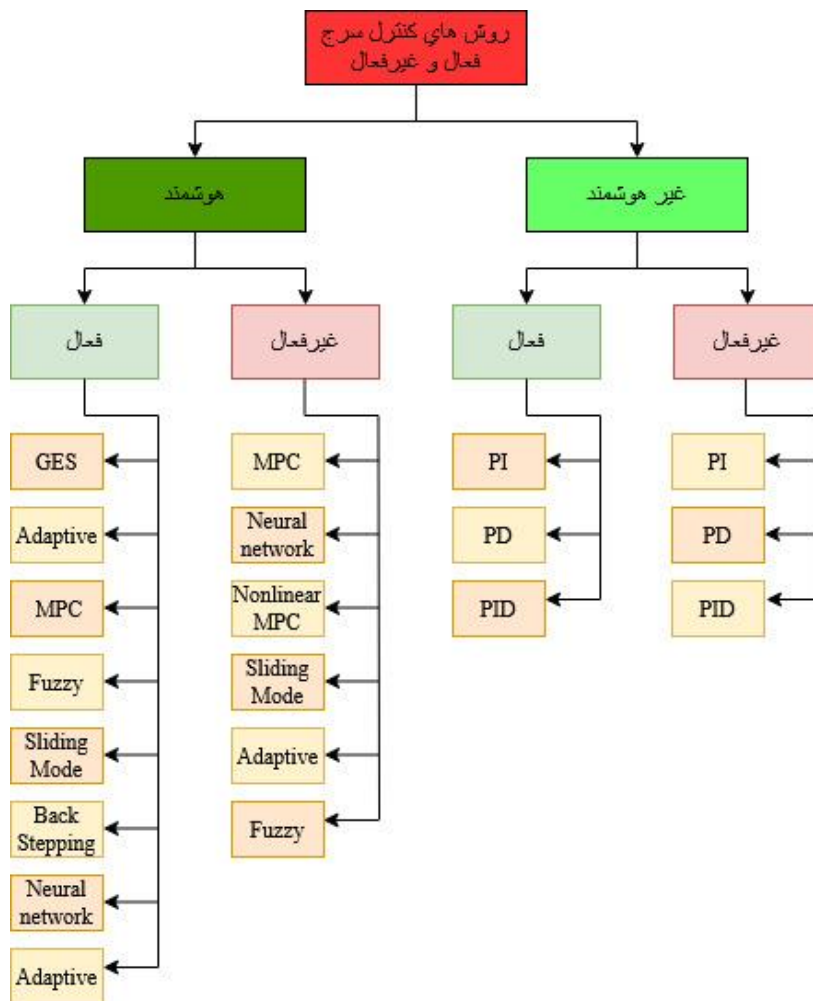
استراتژی‌های کنترلی موجود در این مقاله به دو گروه غیرفعال و فعال تقسیم می‌شوند که در شکل (۹) روندنا کنترل سرچ نشان داده شده است. در ادامه این مقاله به بررسی هریک از این دو روش به‌صورت کامل پرداخته می‌شود و مزایا و معایب هرکدام بیان شده است.

۱-۶- روش غیرفعال کنترل پدیده سرچ کمپرسور

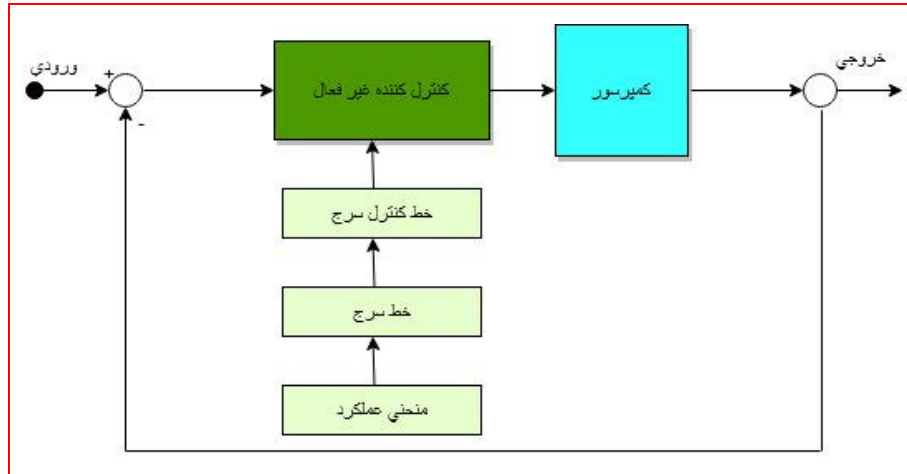
در روش غیرفعال هدف جلوگیری از افزایش سرچ، جلوگیری از افزایش سرچ با دورنگه داشتن نقطه کار از ناحیه سرچ است. معمولاً یک خط کنترل استاتیک یا پویا در ارتباط با خط سرچ ایجاد می‌شود که باعث افزایش منطقه عملکرد می‌شود و نمی‌گذارد که کمپرسور وارد ناپایداری سرچ شود [۱۴۳]. استاندارد خط کنترل سرچ اختلاف بین ۱۰ الی ۱۵ درصدی از خط سرچ کمپرسور است [۱۴۴، ۱۴۵]. در شکل (۱۰) بلوک دیاگرام روش غیرفعال نشان داده شده که کنترل‌کننده با استفاده از منحنی سرچ، خط سرچ و خط کنترل سرچ کمپرسور را کنترل می‌نماید. از مزیت‌های این روش بسیار ساده و ارزان بودن است، عیب این روش محدود کردن منطقه کار و بهره‌وری کمتر کمپرسور است.



شکل (۸): کمپرسور همراه با شیر تخلیه [۱۴۶].
Figure (8): Compressor with anti-surge valve



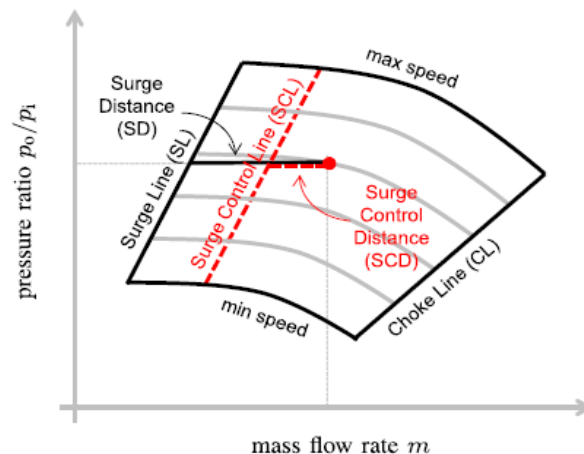
شکل (۹): روندنما کنترل سرچ
Figure (9): Surge control flowchart



شکل (۱۰): بلوک دیاگرام روش غیرفعال

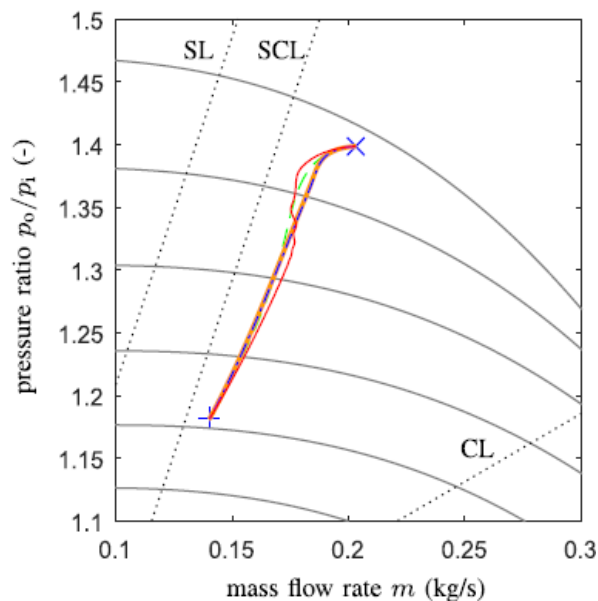
Figure (10): Block diagram of the passive method

در مقاله [۱۴۷] کنترل سرج یک کمپرسور را طراحی نموده که مسئله اصلی طراحی این است که کمپرسور نباید تحت هیچ شرایطی به ناحیه‌ی سرج وارد شود. برای این منظور محققان یک خط کنترل سرج قبل از خط اصلی سرج قرارداده‌اند که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است. برای کنترل کمپرسور از چهار کنترل کننده PID، پیش‌بین خطی، پیش‌بین غیرخطی و SQP^۳ پیش‌بین استفاده کرده‌اند که با در نظر گرفتن نقطه کار کمپرسور در سمت راست خط سرج همه کنترل کننده‌ها به خوبی عمل می‌کند [شکل (۱۲)]. در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که نقطه کار روی خط کنترل سرج در نظر گرفته‌اند که کنترل کننده‌های پیش‌بین غیرخطی و SQP پیش‌بین به خوبی عمل کرده ولی کنترل کننده‌های PID و پیش‌بین خطی، خط کنترلی را رد کرده ولی خط سرج را رد نکرده است. در مرحله بعد نقطه کار را بین خط سرج و کنترل سرج در نظر گرفته شد که فقط کنترل کننده PID خط سرج را رد کرده ولی بقیه کنترل کننده‌ها مشکلی ایجاد نکرده است [شکل (۱۴)]. در این مقاله نویسندگان امیدوار به پیاده‌سازی عملی کنترل کننده‌های طراحی شده هستند. در مقاله [۱۴۸] با استفاده از کنترل کننده چند مرجع که شامل دو پارامتر سرعت کمپرسور و تیغه‌های پخش کننده است، سه خط کاری با اضافه کردن حاشیه امنیت به خط سرج طراحی شده است که بسته به فشار مورد نظر نقطه کار کمپرسور بر روی یکی از خط‌ها قرار خواهد گرفت و عملکرد پایدار کمپرسور را تضمین می‌کند که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است. در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود که زمانی که کمپرسور بر روی خط دو اتمسفر قرار دارد زمانی که کمپرسور نزدیک خط سرج می‌شود سرعت تیغه‌های پخش کننده کم می‌شود و نمی‌گذارد کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرج گردد. با طراحی این کنترل کننده توانسته‌اند هم مسئله سرج و هم مسئله فشار ثابت کمپرسور را حل نمایند.

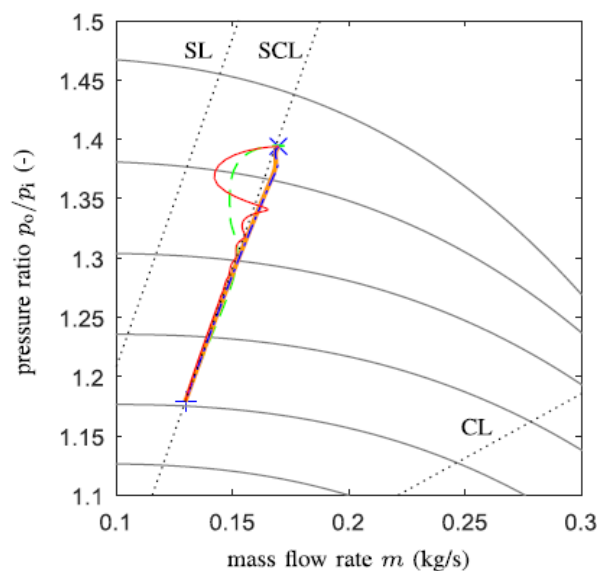


شکل (۱۱): خط قرمز کنترل سرج و خط مشکی خط سرج.

Figure (12): Surge line control red and surge line black line

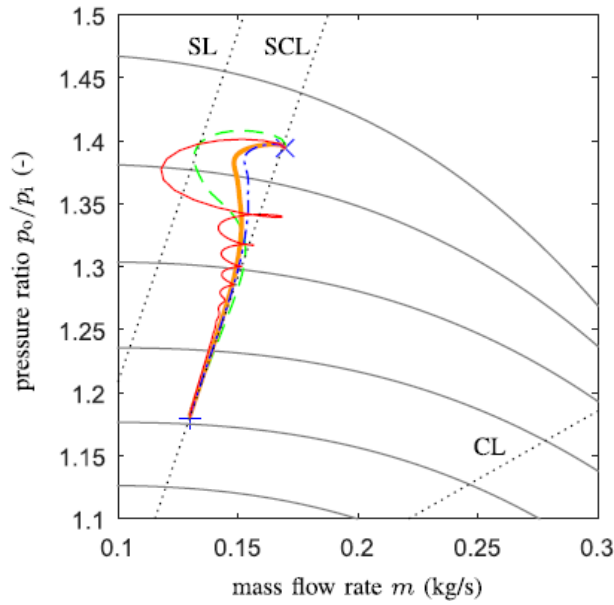


شکل (۱۲): خط کار سمت راست خط کنترل سرچ، قرمز: PID، سبز: پیش‌بین خطی، آبی: پیش‌بین غیرخطی و نارنجی: SQP پیش‌بین
Figure (12): Surge Control Line Right Line, Red: PID, Green: Linear MPC, Blue: Nonlinear MPC and Orange: SQP MPC

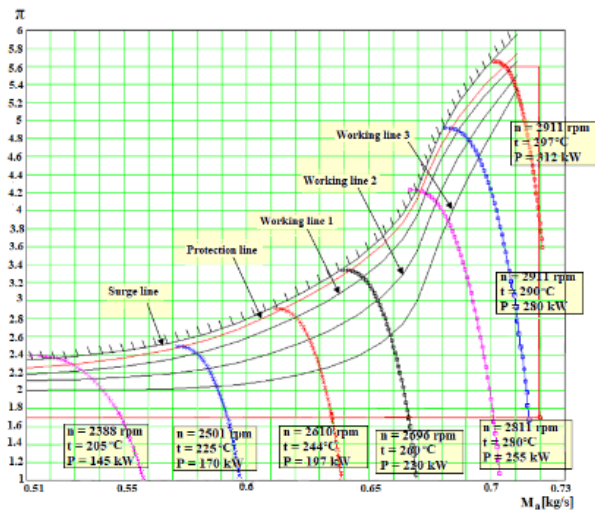


شکل (۱۳): خط کار روی خط کنترل سرچ، قرمز: PID، سبز: پیش‌بین خطی، آبی: پیش‌بین غیرخطی و نارنجی: SQP پیش‌بین
Figure (13): Surge Control Line, Red: PID, Green: Linear MPC, Blue: Nonlinear MPC, and Orange: SQP MPC

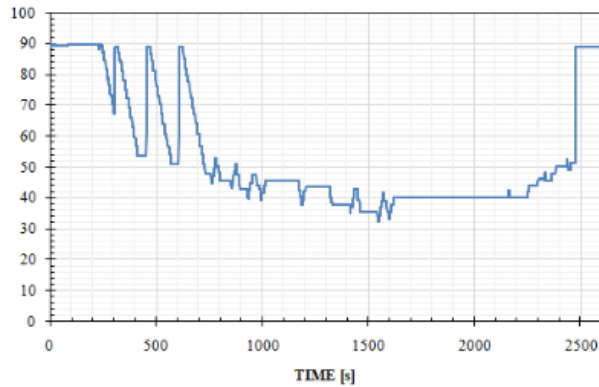
در مقاله [۱۴۹] با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین توانسته‌اند با اضافه کردن حاشیه امنیت به خط سرچ کمپرسور را کنترل نمایند ولی کنترل‌کننده طراحی شده در سرعت‌های بالا به خوبی پاسخ نداده و کمپرسور به حالت سرچ رفته و شیر تخلیه کمپرسور باز خواهد شد. در مقاله [۱۵۰] با استفاده از خط کنترل سرچ و کنترل دریچه ورودی در کمپرسورهای سانتریفیوژ توانسته‌اند مسئله سرچ و فشار ثابت را حل نمایند، بدین صورت که در صورت نزدیک شدن به خط سرچ دریچه کمپرسور باز شده و هوای ورودی بیشتری به کمپرسور وارد می‌شود و نمی‌گذارد کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرچ شود. عیب این روش این است که اگر دریچه ورودی حداکثر باز باشد و کمپرسور نزدیک ناحیه‌ی سرچ شود کنترل‌کننده نمی‌تواند به خوبی عمل کند و کمپرسور تریپ خواهد خورد. در مقاله [۱۵۱] از طریق آزمایش کمپرسور سانتریفیوژ با سرعت جریان مختلف کمترین میزان دبی را شناسایی کرده و با استفاده از روش حد سرچ، حاشیه ایمنی طراحی شده که ۱۰ درصد با حد سرچ فاصله دارد محققین در این مقاله توانسته‌اند کمپرسور را کنترل نموده و از وارد شدن به ناحیه‌ی سرچ جلوگیری کنند.



شکل (۱۴): خط کار بین خط کنترل سرج و خط سرج، قرمز: PID، سبز: پیش‌بین خطی، آبی: پیش‌بین غیرخطی و نارنجی: SQP پیش‌بین
 Figure (14): Surge Control Line and Surge Line, Red: PID, Green: Linear MPC, Blue: Nonlinear MPC, and Orange: SQP MPC



شکل (۱۵): منحنی عملکرد با سه خط کنترل سرج
 Figure (15): Performance curve with three lines control surge.



شکل (۱۶): حرکت تیغه‌های پخش‌کننده
 Figure (16): Movement of the diffuser blades

تعدادی دیگر از روش‌های سرج غیرفعال کمپرسور که در پژوهش‌های مختلف پیشنهاد شده همراه با مزیت و عیب روش در جدول (۶) آمده است که با توجه به مزایا و معایب بیان شده ضعیف‌ترین کنترل‌کننده، کنترل‌کننده PI و بهترین کنترل‌کننده، کنترل‌کننده پیش‌بین در این روش است. برای حل محدود نکردن کار کمپرسور و حداکثر استفاده از کمپرسور روش سرج فعال در ادامه بیان می‌شود.

Table (6): Advantages and disadvantages of passive compressor methods

جدول (۶): مزایا و معایب روش‌های غیرفعال کمپرسور

روش کنترل	مرجع	اثبات پایداری	تعداد پارامترها	پاسخ سریع و مطلوب	عدم قطعیت	هزینه پیاده‌سازی	نیاز به آگاهی دینامیک	نوع طراحی
متناسب- انتگرال‌گیر	[۱۵۲]	ندارد	کم	ندارد	ندارد	کم	ندارد	ساده
متناسب- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر	[۱۵۳]	ندارد	کم	دارد	ندارد	کم	ندارد	ساده
پیش‌بین	[۱۵۴]	دارد	زیاد	دارد	دارد	زیاد	دارد	پیچیده
مد لغزشی	[۱۵۵]	دارد	زیاد	دارد	دارد	زیاد	ندارد	پیچیده

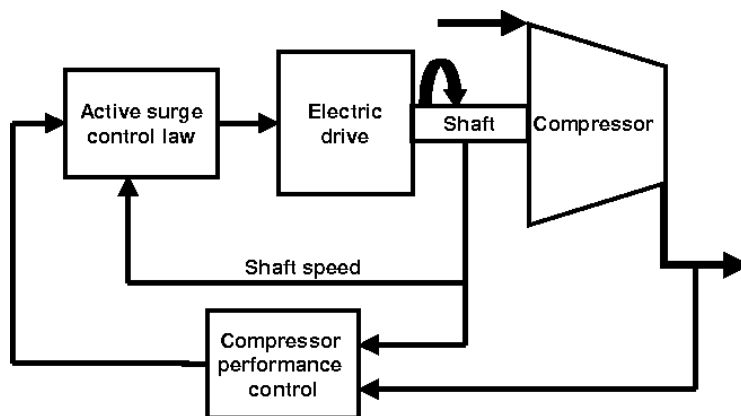
۲-۶- روش فعال کنترل پدیده سرج کمپرسور

در روش‌های کنترل سرج فعال، سرج به صورت اغتشاش تشخیص داده می‌شود [۱۵۶]. موفق‌ترین روش‌ها برای تشخیص شروع اغتشاش مبتنی بر تغییرات فشار و دما یا مشتق زمان آن‌ها و فرکانس نوسان در ورودی یا خروجی کمپرسور است. این اندازه-گیری‌ها با مقادیر مورد انتظار در شرایط سرج ذخیره شده در کامپیوتر کنترل و مقایسه می‌شوند. هنگامی که سرج تشخیص داده می‌شود، اقدامات اصلاحی اعمال می‌شود [۱۵۷]؛ بنابراین، روش‌های تشخیص و جلوگیری از افزایش سرج را می‌توان به‌عنوان یک استراتژی حلقه بسته طبقه‌بندی کرد. در شکل (۱۷) بلوک دیاگرام روش فعال سرج قابل مشاهده است که کنترل‌کننده با استفاده از تغییرات فشار، تغییرات دما و فرکانس نوسان در ورودی یا خروجی کمپرسور را کنترل می‌نماید. مزیت روش فعال سرج این است که تعریف حاشیه ایمنی زیاد ضروری نیست و بنابراین کمپرسور می‌تواند نزدیک به خط موج کار کند. از معایب این روش نیاز به نیروهای کنترل بزرگ و یک سیستم کنترل بسیار سریع برای جلوگیری از رشد ناپایداری‌ها در سرج است؛ بنابراین، سنسورها و محرک‌ها باید ثابت و تأخیر کمی داشته باشند.

در مقاله [۱۵۸] از مدل مور-گریتز برای مدل‌سازی و دو کنترل‌کننده PID و PI فازی برای کنترل سرج کمپرسور استفاده شده است، که با بررسی زمان پایداری سیستم با کنترل‌کننده که برای کنترل‌کننده‌های PID و PI فازی به ترتیب سه و دو ثانیه هستند. برتری کنترل‌کننده PI فازی نسبت به کنترل‌کننده PID نشان داده شده است. در مقاله [۱۵۹]، با استفاده از کنترل-کننده فعال PID توانسته‌اند مسئله سرج در کمپرسور را به‌وسیله تعیین پارامترهای کنترل‌کننده حل نمایند ولی چون کمپرسور یک سیستم به‌شدت غیرخطی است بهتر است از کنترل‌کننده‌های هوشمند استفاده شود که در ادامه نمونه‌های از آن بیان می‌شود. در مقاله [۱۶۰] از کمپرسورهای گریز از مرکز استفاده شده است که به‌وسیله یک کنترل‌کننده شبکه عصبی کنترل می‌شود و نتیجه نهایی با یک کنترل‌کننده PI مقایسه می‌شود که نشان‌دهنده توانایی کنترل‌کننده طراحی شده است. در این مقاله از یک شبکه عصبی دولایه که در لایه اول ۱۵ نرون و در لایه دوم از ۸ نرون استفاده شده است و در نهایت کنترل‌کننده خود را به صورت عملی تست کرده و نشان می‌دهند که کنترل‌کننده طراحی شده در عمل هم به‌خوبی پاسخ می‌دهد ولی نتایج عمل در حد آزمایشگاهی بوده و در صنعت تست نشده است. در مقاله [۱۶۱]، کنترل‌کننده فشار کمپرسور فعال بر اساس فازی نوع II ارائه شده است که انعطاف‌پذیری بیشتری در پیشرفت طراحی، پتانسیل بالاتر برای کنترل و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها فراهم می‌کند. کنترل فشار پیشنهادی انحراف نقطه کار کمپرسور را از نقطه افزایش مشخص و کنترل می‌کند. اگر این انحراف موج کاهش یابد، بنابراین این کنترل‌کننده دستورات سیستم کنترل ظرفیت را اصلاح می‌کند و با باز کردن یک سوپاپ ضد ولتاژ، سرعت جریان کمپرسور را در حداقل مقدار قابل قبول نگه می‌دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که

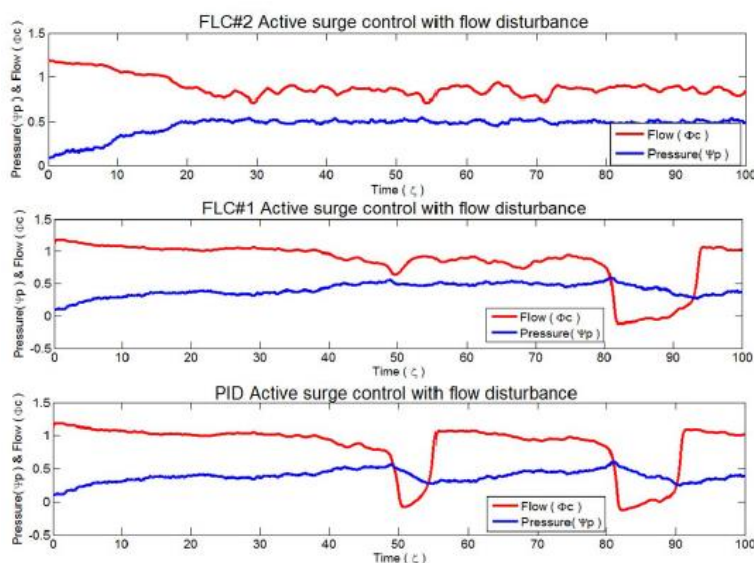
کنترل‌کننده فشار نوع II فازی بهتر از کنترل‌کننده‌های بازخورد فازی نوع I و PID در برابر عدم قطعیت و آشفتگی به‌ویژه حرکات خط سرچ عمل می‌کند. برای بهبود قابلیت اطمینان و مقبولیت کنترل‌کننده، از یک کنترل‌کننده افزایش بازخورد با روش جلوگیری از افزایش سرچ به‌عنوان پشتیبان برای کنترل‌کننده فشار فعال استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود کنترل‌کننده فازی نوع II در قسمت اول با کمترین نوسان نسبت به کنترل‌کننده‌های نوع فازی I و PID در زمان تغییرات جرمی هوا قرار دارد و توانسته اغتشاشات جرمی هوا را کنترل نماید.

در شکل (۱۹) کنترل‌کننده فازی نوع II در برابر اختلال فشار مقاومت می‌کند و از افزایش فشار کمپرسور جلوگیری می‌شود. ولی کنترل‌کننده‌های بازخورد فازی I و PID قادر به این کار نبوده و کمپرسور وارد ناحیه‌ی سرچ می‌شود. در مقاله [۱۶۲] از یک سیستم چند سطحی فشار فعال استفاده شده است. در این مقاله کمپرسور مورد استفاده از نوع شعاعی بوده و هدف کنترلی به‌صورت حلقه بسته در نظر گرفته شده که فشار خروجی با توجه به تنظیم دریچه ورودی هوا است، به-عبارت دیگر هرچه دریچه ورودی بسته شود فشار کم خواهد شد. در مقاله [۱۶۳] سرچ فعال با استفاده از کنترل فیدبک خروجی فشار، سرچ در یک کمپرسور تک مرحله‌ای کنترل شده است به‌این صورت که اگر اختلاف فشار از یک اتمسفر بیشتر شده باشد کنترل‌کننده وارد عمل می‌شود و کمپرسور را از ناحیه سرچ خارج می‌کند.



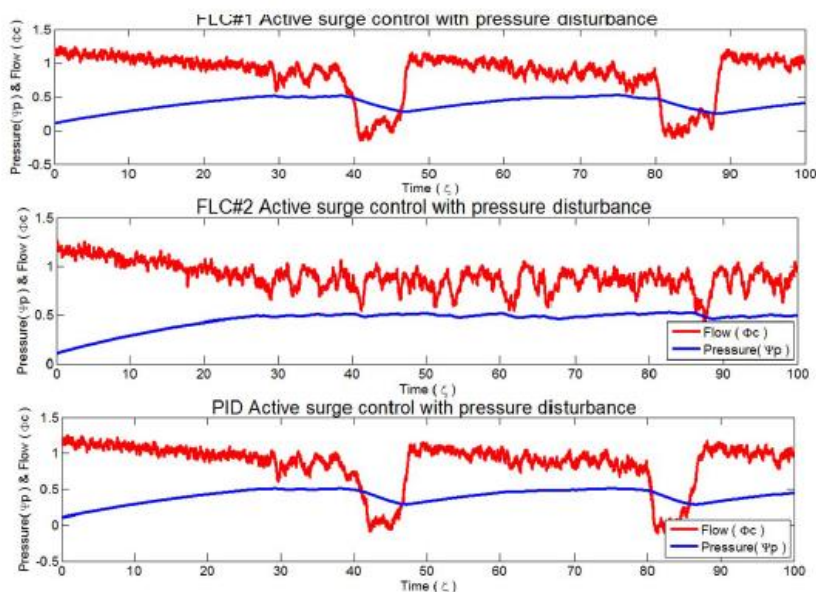
شکل (۱۷): بلوک دیاگرام روش فعال

Figure (17): Active method block diagram



شکل (۱۸): نتایج شبیه‌سازی، اختلال در جریان جرمی در کنترل فعال افزایش فشار فازی نوع ۲، نوع ۱، PID

Figure (18): The simulation results are a mass flow disturbance in the active control of fuzzy pressure increase type 2, type 1, PID



شکل (۱۹): نتایج شبیه‌سازی اختلال در فشار بر روی کنترل فعال شدن افزایش فازی نوع ۲، نوع ۱، PID
Figure (19): Pressure Disorder Simulation Results on Fuzzy Increase Activation Control Type 2, Type 1, PID

در مقاله [۱۶۴] نویسندگان با استفاده از روش کنترل فعال مد لغزشی مرتبه دوم توانسته‌اند کمپرسوری را در شبیه‌سازی کنترل کنند که به‌صورت پایدار کار کند. در مقاله [۱۶۵] با استفاده از روش مد لغزشی مرتبه دوم و کنترل شیر نزدیک به کمپرسور فرآیند سرج در کمپرسور را کنترل کرده و اعتبار سنجی مدل پیشنهادی را با استفاده از شبیه‌سازی در متلب نشان داده است. تعدادی دیگر از روش سرج فعال کمپرسور که در مقاله‌ها بیان شده در جدول (۷) آمده است که با توجه به مزایا و معایب بیان شده ضعیف‌ترین کنترل‌کننده، کنترل‌کننده PI و بهترین کنترل‌کننده، کنترل‌کننده تطبیقی و فازی در این روش است. تفاوت اصلی بین روش‌های مختلف سرج در منطقه تشخیص وضعیت جریان گاز و در ابزار دقیق مورد استفاده برای این کار به‌وجود می‌آید. ابزار دقیق باید تا حد ممکن محدود باشد تا هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری محدود شود.

۷- نتیجه‌گیری

کمپرسور ماشینی است که برای افزایش فشار انواع گازها استفاده می‌شود. دستیابی سریع به مدل پیش‌بینی دقیق و قابل اطمینان عملکرد، برای بهینه‌سازی عملیات کنترل‌کننده کمپرسور بسیار مهم است. همان‌طور که بیان شد در پژوهش‌های ذکر شده، نویسندگان مدل مور-گریتز و مدل‌های هوشمند را مورد استفاده قرار داده‌اند با توجه به این که با گذشت زمان نامعینی-هایی از سیستم خود را در شرایط مختلف محیطی، زمانی و فرکانسی نشان داده، مدل‌های مور-گریتز ممکن است دچار خطای تخمین فاحش شوند. این در حالی است که مدل‌های هوشمند ساختار سیستم را در همان لحظه تخمین‌زده و مدل را ارائه می‌کنند و این امر اهمیت استفاده از مدل‌های هوشمند را بیشتر می‌کند. وقوع پدیده سرج بر ناحیه‌ی کاری سیستم کمپرسور تأثیر گذار است و باعث کاهش راندمان آن می‌شود و در نهایت به کل سیستم آسیب جدی می‌رساند. در این مقاله یک مرور کلی از پدیده سرج و روش‌های کنترل آن ارائه شده است. سرج باعث ناپایداری عملکردی کمپرسور می‌شود و برای کنترل آن دو روش سرج فعال و سرج غیرفعال بررسی شده که در روش سرج فعال نیاز به منحنی عملکرد نخواهد بود ولی در سرج غیرفعال نیاز به منحنی عملکرد است که در این مقاله به بررسی این روش‌ها پرداخته شد و مزیت‌ها و معایب آن‌ها بیان شده است. در کنترل غیرفعال هرچه حاشیه کنترل کمتر باشد عملکرد کمپرسور بالاتر و بهینه‌تر خواهد بود ولی معمولاً حاشیه امنیت با فاصله ۱۰ الی ۱۵ درصدی از خط سرج انتخاب می‌شود. در کنترل فعال زمانی که کمپرسور نزدیک ناحیه سرج گردد کنترل-کننده اقدامات اصلاحی را انجام می‌دهد. با توجه به این که در روش فعال کمپرسور نزدیک‌تر به ناحیه سرج می‌تواند کار کند این روش نسبت به روش غیرفعال بهینه‌تر خواهد بود.

Table (7): A number of review articles on the active method of the compressor

جدول (۷): مزایا و معایب روش‌های فعال کمپرسور

روش کنترل	مرجع	اثبات پایداری	تعداد پارامترها	پاسخ سریع و مطلوب	عدم قطعیت	هزینه پیاده- سازی	نیاز به آگاهی دینامیک	نوع طراحی
متناسب- انتگرال‌گیر	[۱۶۶]	ندارد	کم	ندارد	ندارد	کم	ندارد	ساده
تطبیقی	[۱۶۷] [۱۶۸]	دارد	زیاد	دارد	دارد	زیاد	ندارد	پیچیده
شبکه عصبی	[۱۶۹]	دارد	زیاد	دارد	دارد	زیاد	ندارد	پیچیده
پیش‌بین	[۱۷۰] [۱۷۱]	دارد	زیاد	دارد	دارد	زیاد	دارد	پیچیده
فازی	[۱۷۲] [۱۷۳]	ندارد	زیاد	دارد	ندارد	زیاد	ندارد	پیچیده
مد لغزشی	[۱۷۴] [۱۷۵] [۱۷۶]	دارد	زیاد	دارد	دارد	زیاد	ندارد	پیچیده
پایدار نمایی جهانی ^{۲۹} (GES)	[۱۷۷]	دارد	زیاد	دارد	ندارد	زیاد	دارد	پیچیده
پسگام	[۱۷۸]	دارد	زیاد	دارد	ندارد	کم	دارد	پیچیده
PID فازی	[۱۷۹]	ندارد	کم	دارد	ندارد	کم	دارد	پیچیده
فازی تطبیقی	[۱۸۰]	ندارد	زیاد	دارد	ندارد	زیاد	دارد	پیچیده
غیرخطی	[۱۸۱]	دارد	زیاد	دارد	ندارد	کم	دارد	پیچیده

References

مراجع

- [1] L. Esteki, A.A. Zamani, S.M. Kargar, S.A. Mousavi, "Automatic generation control of multi-area power system using a fuzzy wavelet neural network load frequency controller combined with shuffled frog leaping algorithm", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 55-63, Dec. 2013.
- [2] S.H. Mozafarpour-Khoshrodi, G. Shahgholian, "Improvement of perturb and observe method for maximum power point tracking in wind energy conversion system using fuzzy controller", *Energy Equipment and Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 111-122, Autumn 2016 (doi: 10.22059/EES.2016.23031).
- [3] G. Shahgholian, "An overview of hydroelectric power plant: Operation, modeling, and control", *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 7, no. 3, pp. 14-28, Summer 2020 (doi: 10.30501/JREE.2020.22-1567.1087).
- [4] E. Hosseini, G. Shahgholian, "Partial- or full-power production in WECS: A survey of control and structural strategies", *European Power Electronics and Drives*, vol. 27, no. 3, pp. 125-142, Dec. 2017 (doi: 10.1080/0-9398368.2017.1413161).
- [5] H. U. Fruttschi, "Closed-cycle gas turbines: Operating experience and future potential", ASME Press, pp. 9-77, 2005 (doi: 10.1115/1.802264).
- [6] Z. Tian, B. Jiang, A. Malik, Q. Zheng, "Axial helium compressor for high-temperature gas-cooled reactor: A review", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 130, pp. 54-68, Aug. 2019 (doi: 10.1016/j.anucene.2019.02.032).
- [7] M.H. Ahmadi, M.A. Nazari, R. Ghasempour, F. Pourfayaz, M. Rahimzadeh, T.A. Ming, "A review on solar-assisted gas turbines", *Energy Science And Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 658-674, Dec. 2018 (doi: 10.1002/ese3.238).
- [8] S.M. Kargar, A.A. Zamani, M. Mohamadi, "The fuzzy controller design with imperialist competitive algorithm for the compressor system with gas turbine", *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 25-29, June 2012.
- [9] A.A. Bazmi, G. Zahedi, "Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply- A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 3460-3500, Oct. 2011 (doi: 10.1016/j.rser.2011.05.003).

- [10] S. Nazari, J. Siegel, A. Stefanopoulou, "Optimal energy management for a mild hybrid vehicle with electric and hybrid engine boosting systems", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3386-3399, April 2019 (doi: 10.1109/TVT.2019.2898868).
- [11] J.H. Marais, "An integrated approach to optimise energy consumption of mine compressed air systems", Ph.D Thesis, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, North-West University, Potchefstroom, South Africa, 2012.
- [12] J. Vermeulen, C. Cilliers, J.H. Marais, "Cost-effective compressor control to reduce oversupply of compressed air", *Proceeding of the IEEE/ICUE*, Cape Town, South Africa, pp. 1-7, Aug. 2017 (doi: 10.23919/ICUE.2017.8068013)
- [13] Z. He, X. Yang, D. Li, W. Wu, "Dynamic characteristics of a swing compressor for an air conditioning system at different discharge pressures", *International Journal of Refrigeration*, vol. 112, pp. 125-135, April 2020 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.12.021).
- [14] S. Woo, M. Pecht, D. L. O'Neal, "Reliability design and case study of the domestic compressor subjected to repetitive internal stresses", *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 193, Article Number. 106604, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.res.2019.106604).
- [15] M. M. Tanveer, C. R. Bradshaw, "Quantitative and qualitative evaluation of various positive-displacement compressor modeling platforms", *International Journal of Refrigeration*, Vol:119, pp. 48-63, 2020 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.07.009)
- [16] I.H. Bell, D. Ziviani, V. Lemort, C.R. Bradshaw, M. Mathison, W.T. Horton, J.E. Braun, E.A. Groll, "PDSim: A general quasi-steady modeling approach for positive displacement compressors and expanders", *International Journal of Refrigeration*, vol. 110, pp. 310-322, 2020 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.09.002)
- [17] I.H. Bell, E.A. Groll, J.E. Braun, W. Travis Horton, "A computationally efficient hybrid leakage model for positive displacement compressors and expanders", *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 7, pp. 1965-1973, Nov. 2013 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.01.005).
- [18] Z. Deng, H. Shen, K. Wang, H. Jin, "Vibration improvement and dynamic balance automatic optimization of rotor compressor", *Proceeding of the IEEE/WCMEIM*, pp. 224-228, Shanghai, China, Nov. 2019 (doi: 10.1109/WCMEIM48965.2019.00049)
- [19] H. Sheng, W. Huang, T. Zhang, "Output feedback control of surge and rotating stall in axial compressors", *Asian Journal of Control*, vol. 19, no. 2, pp. 599-605, March 2017 (doi: 10.1002/asjc.1384).
- [20] N. Fujisawa, T. Inui, Y. Ota, "Evolution process of diffuser stall in a centrifugal compressor with vaned diffuser", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 141, No. 4, pp. 1-10, April 2019 (doi: 10.1115/1.4042249).
- [21] T. Nehler, "Linking energy efficiency measures in industrial compressed air systems with non-energy benefits- A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 72-87, June 2018 (doi: 10.1016/j.rser.2018.02.018)
- [22] K. Srinivasan, "Identification of optimum inter-stage pressure for two-stage transcritical carbon dioxide refrigeration cycles", *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 58, no. 1, pp. 26-30, Aug. 2011 (doi: 10.1016/j.supflu.2011.04.015)
- [23] G. Wang, X. Zhang, "Thermoeconomic optimization and comparison of the simple single-stage transcritical carbon dioxide vapor compression cycle with different subcooling methods for district heating and cooling", *Energy Conversion and Management*, vol. 185, pp. 740-757, April 2019 (doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.024).
- [24] F. Willems, B. Jager, "Modeling and control of compressor flow instabilities", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 8-18, Oct. 1999 (doi: 10.1109/37.793434).
- [25] A. Khosravi, A. Chatraei, G. Shahgholian, S.M. Kargar, "Modeling of K-250 compressor using NARX and hierarchical fuzzy model", *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 191-198, Autumn 2020 (in Persian).
- [26] M. Righi, V. Pachidis, L. Könözy, L. Pawsey, "Three-dimensional through-flow modeling of axial flow compressor rotating stall and surge", *Aerospace Science and Technology*, vol. 78, pp. 271-279, July 2018 (doi: 10.1016/j.ast.2018.04.021).
- [27] Y.J. Jung, H. Jeon, Y. Jung, K.J. Lee, M. Choi, "Effects of recessed blade tips on stall margin in a transonic axial compressor", *Aerospace Science and Technology*, vol. 54, pp. 41-48, July 2016 (doi: 10.1016/j.ast.2016.04.009).
- [28] G. Shahgholian, "Review of power system stabilizer: Application, modeling, analysis and control strategy", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, vol. 5, No. 3, pp. 41-52, Sept. 2013.
- [29] G. Shahgholian, "Modeling and simulation of a two-mass resonant system with speed controller", *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 448-452, Sept. 2013 (doi: 10.7763/IJIEE.2013.V3.355).

- [30] G. Shahgholian, P. Shafaghi, "State space modeling and eigenvalue analysis of the permanent magnet DC motor drive system", *Proceeding of the IEEE/ICECT*, pp. 63-67, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2010 (doi: 10.1109/ICECTECH.2010.5479987).
- [31] G. Shahgholian, J. Faiz, P. Shafaghi, "Analysis and simulation of speed control for two-mass resonant system", *Proceeding of the IEEE/ICCEE*, pp. 666-670, Dubai, United Arab Emirates, Dec. 2009 (doi: 10.1109/ICCEE.2009.41).
- [32] T.K. Ibrahim, M.M. Rahman, A.N.A. Alla, "Study on the effective parameter of gas turbine model with intercooled compression process", *International Journal of Scientific Research and Essays*, vol. 23, pp. 3760-3770, 2010 (doi: 10.2298/tsci11016143i).
- [33] I. Komargodski, M. Naor, E. Yogev, "White-box vs. black-box complexity of search problems: Ramsey and graph property testing", *Journal of the ACM*, vol. 66, July 2019 (doi: 10.1145/3341106).
- [34] A. Fonti, G. Comodi, S. Pizzuti, A. Arteconi, L. Helsen, "Low order grey-box model for short-term thermal behavior prediction in buildings", *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2107-2112, May 2017 (doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.592).
- [35] K. Ažman, J. Kocijan, "Application of gaussian processes for black-box modelling of biosystemes", *ISA Transactions*, vol. 46, pp. 443-457, Oct. 2007 (doi: 10.1016/j.isatra.2007.04.001).
- [36] M. Rampazzo, D. Tognin, M. Pagan, L. Carniello, A. Beghi, "Modelling simulation and real-time control of a laboratory tid generation system", *Control Engineering*, vol. 83, pp. 165-175, Feb. 2019 (doi: 10.1016/J.CONENGP.2018.10.016).
- [37] O.O. Badmus, S. Chowdhury, K.M. Eweker, C.N. Net, "Control-oriented high-frequency turbomachinery modeling: Single-stage compression system one-dimensional model", *Journal of Turbomachinery*, vol. 117, no. 1, pp. 47-61, Jan. 1995 (doi: 10.1115/1.2835643).
- [38] E. Aghadavoodi, G. Shahgholian, "A new practical feed-forward cascade analyze for close loop identification of combustion control loop system through RANFIS and NARX", *Applied Thermal Engineering*, vol. 133, pp. 381-395, March 2018 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.075).
- [39] T. Iura, W.D. Rannie, "Observations of propagating stall in axial-flow compressor", *Trans. ASME*, vol. 76, pp. 463-471, 1954 (doi: 10.1007/BF01600530).
- [40] F.E. Marble, "Propagation of stall in a compressor blade row", *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 22, no. 8, pp. 541-554, 1953 (doi: 10.2514/8.3395).
- [41] E.M. Greitzer, "Surge and rotating stall in axial flow compressors, Part I: Theoretical Compression System Model", *Journal of Engineering for Gas Turbin and Power*, vol. 98, no. 2, pp. 190-198, April 1976 (doi: 10.1115/1.3446138).
- [42] F.K. Moore, E.M. Greitzer, "A theory of post-stall transients in axial compression systems: Part II-application", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 108, pp. 231-239, 1986 (doi: 10.1115/1.3239893).
- [43] D. Hanbay, A. Baylar, M. Batan, "Prediction of aeration efficiency on stepped cascades by using least square support vector machines", *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 4248-4252 2009 (doi: 10.1016/j.eswa.2008.03.003).
- [44] J. Kohonen, S. Reinikainen, K. Aaljoki, "Non-linear PLS approach in score surface", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 97, pp. 159-163, 2009 (doi: 10.1016/j.chemolab.2009.03.010).
- [45] H. Saxen, F. Pettersson, "Nonlinear prediction of the hot metal silicon content in the blast furnace", *ISIJ International*, vol. 47, no. 12, pp. 1732-1737, 2007 (doi: 10.2355/isijinternational.47.1732).
- [46] J. Chen, "A predictive system for blast furnaces by integrating a neural network with qualitative analysis", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 14, pp. 77-85, 2001 (doi: 10.1016/S0952-1976(00)00062-2).
- [47] H. Sun, H. Haitao, W. Jingwei, D. Guoliang, L. Geping, W. Xuyang, L. Zhongyuan, "A theory-based explicit calculation model for variable speed scroll compressors with vapor injection", *International Journal of Refrigeration*, vol. 88, pp. 402-412, April 2018 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.01.016).
- [48] K. Liang, "Analysis of oil-free linear compressor operated at high pressure ratios for household refrigeration", *Energy*, vol. 151, pp. 324-331, May 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2018.03.068).
- [49] J. Helvoirt, B. Jager, M. Steinbuch, J. Smeulders, "Modeling and identification of centrifugal compressor dynamics with approximate realizations", *Proceedings of the IEEE/CCA*, Toronto, Canada, Aug. 2017 (doi: 10.1109/CCA.2017.1507335).
- [50] J. Li, J. Du, C. Nie, H. Zhang, "Review of tip air injection to improve stall margin in axial compressors", *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 106, pp. 15-31, April 2019 (doi: 10.1016/j.paerosci.2019.01.005).
- [51] X. Zheng, Z. Li, "Blade-end treatment to improve the performance of axial compressors: An overview", *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 88, pp. 1-14, Jan. 2017 (doi: 10.1016/j.paerosci.2016.09.001).

- [52] M.A. Azizi, J. Brouwer, "Progress in solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power systems: System design and analysis, transient operation, controls and optimization", *Applied Energy*, vol. 215, pp. 237-289, April 2018 (doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.098).
- [53] K. Liang, "A review of linear compressors for refrigeration", *International Journal of Refrigeration*, vol. 84, pp. 253-273, Dec. 2017 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.08.015).
- [54] G. Gu, A. Sparks, S. S. Banda, "An overview of rotating stall and surge control for axial flow compressors", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 7, no. 6, pp. 639-647, Nov. 1999 (doi: 10.1109/87.799-664).
- [55] C. He, H. Li, Z. Li, X. Zhao, "An improved bistable stochastic resonance and its application on weak fault characteristic identification of centrifugal compressor blades", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 442, pp. 677-697, March 2019 (doi: 10.1016/j.jsv.2018.11.016).
- [56] L. Der-Cherng, S. Chau-Chung, H. Jeng-Tze, "Robust stabilization of a centrifugal compressor with spool dynamics", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 12, pp. 966-972, 2004 (doi: 10.1109/TCST.2-004.833611).
- [57] P. Aaslid, "Modelling of variable speed centrifugal compressors for anti-surge control", Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, June 2009.
- [58] D. Zhao, B. Blunier, F. Gao, M. Dou, A. Miraoui, "Control of an ultrahigh-speed centrifugal compressor for the air management of fuel cell systems", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 2225-2234, May/June 2014 (doi: 10.1109/TIA.2013.2282838).
- [59] X. Ma, S. Zheng, K. Wang, "Active surge control for magnetically suspended centrifugal compressors using a variable equilibrium point approach", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 12, pp. 9383 - 9393, Dec. 2019 (doi: 10.1109/TIE.2019.2891412).
- [60] C. Yue-yan, L. Shao-zhong, S. Xing-ke, "The research of antisurge control on air separation compressor", *Proceeding of the IEEE/ICISE*, pp. 1613-1616, Hangzhou, China, Dec. 2010 (doi: 10.1109/ICISE.2010.56-91419).
- [61] H. Imani, M. R. Jahed-Motlagh, K. Salahshoor, A. Ramezani, A. Moarefianpur, "A novel tube model predictive control for surge instability in compressor system including piping acoustic", *Journal Cogent Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 1-16, Dec. 2017 (doi: doi.org/10.1080/23311916.2017.1409373).
- [62] A. Cortinovisa, H.J. Ferreaau, D. Lewandowskib, M. Mercangöz, "Experimental evaluation of MPC-based anti-surge and process control for electric driven centrifugal gas compressors", *Journal of Process Control*, vol. 34, pp. 13-25, Oct. 2015 (doi: 10.1016/j.jprocont.2015.07.001).
- [63] M. Ghanavati, A. Chakravarthy, "Demand-side energy management by use of a design-then-approximate controller for aggregated thermostatic loads", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 4, pp.1439-1448, July 2018 (doi: 10.1109/TCST.2017.2705157).
- [64] C. Wang, C. Shao, Y. Han, "Centrifugal compressor surge control using nonlinear model predictive control based on LS-SVM", *Proceeding of the IEEE/ISSCAA*, pp. 466-471, China, Harbin, June 2010 (doi: 10.110-9/ISSCAA.2010.5633206).
- [65] H. Sheng, Q. Chen, J. LiZefan, L. Wang, T. Zhang, "Robust adaptive backstepping active control of compressor surge based on wavelet neural network", *Aerospace Science and Technology*, vol.106, Article Number: 106139, Nov. 2020 (doi: 10.1016/j.ast.2020.106139).
- [66] R.S. Shehata, H.A. Abdullah, F.F.G. Areed, "Fuzzy logic surge control in constant speed centrifugal compressors", *Proceeding of the IEEE/CCECE*, pp. 653-658, Niagara Falls, ON, Canada, May 2008 (doi: 10-1109/CCECE.2008.4564616).
- [67] S. Lin, C. Yang, P. Wu and Z. Song, "Fuzzy logic surge control in variable speed axial compressors", *Proceeding of the IEEE/ICCA*, pp. 1178-1183, China, Hangzhou, June 2013 (doi: 10.1109/ICCA.2013.6565118).
- [68] G. Shahgholian, "Modelling and simulation of low-head hydro turbine for small signal stability analysis in power system", *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 3, no. 3, pp. 11-20, Summer 2016 (doi: 10.30501/JREE.2016.70088).
- [69] I. Calero, C.A. Cañizares, K. Bhattacharya, "Implementation of transient stability model of compressed air energy storage systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 4734-4744, Nov. 2020 (doi: 10.1109/TPWRS.2020.2995787).
- [70] A Kiani, B. Fani, G Shahgholian, "A multi-agent solution to multi-thread protection of DG-dominated distribution networks", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 130, Article Number: 106921, Sept. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106921).
- [71] R. Mehrad, S.M. Kargar, "Integrated model predictive fault-tolerant control, and fault detection based on the parity space approach for a reverse osmosis desalination unit", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, no. 10, pp. 1882-1894, June 2020 (doi: 10.1177/0142331219898942).

- [72] A. Guyen, J. Lauber, M. Dambrine, "Robust H_∞ control for the turbocharged air system using the multiple model approach", *Proceeding of the IEEE/IECON*, pp. 2464-2469, Montreal, QC, Canada, Oct. 2012 (doi: 10.1109/IECON.2012.6388860).
- [73] K.E. Hansen, P. Jorgensen, P.S. Larsen, "Experimental and theoretical study of surge in a small centrifugal compressor", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 10, no. 3, Sept. 1981 (doi: 10.1115/1.3240796).
- [74] C. Meuleman, "Measurement and unsteady flow modelling of centrifugal compressor surge", Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven: Eindhoven, The Netherlands, 2002 (doi: 10.6100/IR557873).
- [75] D. Fink, N. Cumpsty, E.M. Greitzer, "Surge dynamics in a free-spool centrifugal compressor system", *Journal of Turbomachinery*, vol. 114, no. 2, pp. 321-332, April 1992 (doi: 10.1115/1.2929146).
- [76] S.Y. Yoon, Z. Lin, C. Goynes, P.E. Allaire, "An enhanced Greitzer compressor model with pipeline dynamics included", *Proceedings of the IEEE/ACC*, pp. 4731-4736, San Francisco, CA, USA, June/July 2011 (doi: 10.1109/ACC.2011.5991119).
- [77] F. Willems, A.G. Jager, de, "Modeling and control of compressor flow instabilities", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 8-18, Oct. 1999 (doi: 10.1109/37.793434).
- [78] A. Jaeschke, K. Kabalyk, F. Grapow, G. Liskiewicz, "Analysis of unstable plenum in system volume: Mathematical modelling and experimental results", *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, Oslo, vol. 2, 2018 (doi: 10.1115/GT2018-76727).
- [79] L. Horodko, "Time-frequency analysis of the surge onset in the centrifugal blower", *Symkom*, pp. 299-306, 2015 (doi: 10.1515/eng-2015-0040).
- [80] G.L. Arnulfi, P. Giannattasio, C. Giusto, A.F. Massardo, D. Micheli, P. Pinamonti "Multistage centrifugal compressor surge analysis: Part II—Numerical simulation and dynamic control parameters evaluation". *Journal of Turbomachinery*, vol. 121, no. 2, pp. 312-320, April 1992.
- [81] F. Willems, W. P. M. H. Heemels, B. de Jager, A. A. Stoorvogel, "Positive feedback stabilization of centrifugal compressor surge", *Automatica*, vol. 38, no. 2, pp. 311-318, Feb. 2002 (doi: 10.1016/S0005-1098(01)00202-3).
- [82] J.T. Gravdahl, F. Willems, B. de Jager, O. Egeland, "Modeling of surge in free-spool centrifugal compressor: Experimental validation", *Journal of Propulsion and Power*, vol. 20, no. 5, pp. 849-857, Sept./Oct. 2004 (doi: 10.2514/1.10052).
- [83] J.T. Gravdahl, O. Egeland, "A Moore-Greitzer model with spool dynamics", *Proceeding of the IEEE/CDC*, pp. 0191-2216, San Diego, CA, USA, Dec. 1997 (doi: 10.1109/CDC.1997.64975).
- [84] J.M. Haynes, G.J. Hendricks, A.H. Epstein, "Active stabilization of rotating stall in a three-stage axial compressor", *ASME Journal of Turbomachinery*, vol. 116, no. 2, pp. 226-239, April 1994 (doi: 10.1115/1.2-928357).
- [85] J.D. Paduano, "Modeling for control of rotating stall", *Automatica*, vol. 30, no. 9, pp. 1357-1373, Sept. 1994 (doi: 10.1016/0005-1098(94)90001-9).
- [86] G.J. Hendricks, J.S. Sabnis, M.R. Feulner, "Analysis of instability inception in high-speed multistage axial-flow compressors", *ASME Journal of Turbomachinery*, vol. 119, no. 4, pp. 714-722, Oct. 1997 (doi: 10.1115/1.2841181).
- [87] E. M. Gruber, C. Bordons, and A. Oliva, "The stability of pumping systems- The 1980 freeman scholar lecture", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 103, no. 2, pp. 193-242, Jun. 1981 (doi: 10.1115/1.3241725).
- [88] J.T. Gravdahl, O. Egeland, S.O. Vatland, "Drive torque actuation in active surge control of centrifugal compressors", *Automatica*, vol. 38, no. 11, pp. 1881-1893, Nov. 2002 (doi: 10.1016/S0005-1098(02)00113-9).
- [89] J.T. Gravdahl, O. Egeland, "Centrifugal compressor surge and speed control", *IEEE Trans. on Control Systems. Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 567-579, Sept. 1999 (doi: 10.1109/87.784420).
- [90] J.T. Gravdahl, F. Willems, B. Jager, O. Egeland, "Modeling of surge in free-spool centrifugal compressors: Experimental validation", *Journal of Propulsion and Power*, vol. 20, no. 5, pp. 849-857, May 2012 (doi: 10.2514/1.10052).
- [91] K. Song, C. Jeong, C. Han, "Hybrid compressor model for optimal operation of CDA system", *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 889-894, 2010 (doi: 10.1016/S1570-7946(10)28149-X).
- [92] T. Turunen-Saaresti, P. Røyttä, J. Honkatukia, J. Backman, "Predicting off-design range and performance of refrigeration cycle with two-stage centrifugal compressor and flash intercooler", *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, no. 6, pp. 1152-1160, Sept. 2010 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.04.008).
- [93] T. Turunen-Saaresti, P. Røyttä, J. Honkatukia, "Optimising the refrigeration cycle with a two-stage centrifugal compressor and a flash intercooler", *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 6, pp. 1366-1375, Sept. 2009 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.01.006).
- [94] D. Popova, "Neuro-fuzzy modeling of compressor unit performance", *Proceeding of the IEEE/IPC*, pp. 1-3, Vladivostok, Russian, Aug. 2018 (doi: 10.1109/IPC.2018.8482214).

- [95] J.T. Gravdahl, F. Willems, B. Jager, O. Egeland, "Modeling for surge control of centrifugal compressors: Comparison with experiment", *Proceeding of the IEEE/CDC*, vol. 2, pp. 1341–1346, Sydney, NSW, Australia, Dec. 2002 (doi: 10.1109/CDC.2000.912043).
- [96] F. Chu, F. Wang, X. Wang, S. Zhang, "A model for parameter estimation of multistage centrifugal compressor and compressor performance analysis using genetic algorithm", *Science China Technological Sciences*, vol. 55, no. 11, pp. 3163–3175, 2012 (doi: 10.1007/s11431-012-5029-9).
- [97] M. Ciccotti, D.P. Xenos, A.E. Bouaswaig, N.F. Thornhill, R.F. Martinez-Botas, "Physical modelling of industrial multistage centrifugal compressors for monitoring and simulation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 229, pp. 3433–3448, Mar. 2015 (doi: 10.1177/0954406215572433).
- [98] S. Sanaye, M. Dehghandokht, H. Mohammadbeigi, S. Bahrami, "Modeling of rotary vane compressor applying artificial neural network", *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, no. 3, pp. 764–772, May 2011 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.12.007).
- [99] K. Ghorbanian, M. Gholamrezaei, "An artificial neural network approach to compressor performance prediction", *Applied Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1210–1221, July/Aug. 2009 (doi: 10.1016/j.apenergy.2008.06.006).
- [100] X. Wu, Y. Li, "Self-learning based centrifugal compressor surge mapping with computationally efficient adaptive asymmetric support vector machine", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 134, no. 5, Article Number: 051008, Sept. 2012 (doi: 10.1115/1.4006219).
- [101] J. Fei, N. Zhao, Y. Shi, Y. Feng, Z. Wang, "Compressor performance prediction using a novel feed-forward neural network based on Gaussian kernel function", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2016 (10.1177/1687814016628396).
- [102] S. Chen, S. A. Billings, P. M. Grant, "Recursive hybrid algorithm for nonlinear identification using radial basis function networks", *International Journal of Control*, vol. 55, no. 5, pp. 1051–1070, Oct. 2007 (doi: 10.1080/00207179208934272).
- [103] Z. Tian, B. Gu, L. Yang, Y. Lu, "Hybrid ANN—PLS approach to scroll compressor thermodynamic performance prediction", *Applied Thermal Engineering*, vol. 77, pp. 113–120, Feb. 2015 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.023).
- [104] J.D. Lewins, "Optimizing an intercooled compressor for an ideal gas model", *International Journal of Mechanical Engineering Education*, vol. 31, no. 1, pp. 190–200, July 2003 (doi: 10.7227/IJMEE.31.3.1).
- [105] R. Dehner, A. Selamet, P. Keller, M. Becker, "Simulation of deep surge in a turbocharger compression system", *Journal Turbomach*, vol. 138, no. 11, Article Number: 111002, 2016 (doi: 10.1115/1.4033260).
- [106] H. Sun, H. Haitao, W. Jingwei, D. Guoliang, L. Geping, W. Xuyang, L. Zhongyuan, "A theory-based explicit calculation model for variable speed scroll compressors with vapor injection", *International Journal of Refrigeration*, vol. 88, pp. 402–412, April 2018 (doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.01.016).
- [107] N. Daroogheh, "Centrifugal compressor identification using lolimot", *Proceeding of the IEEE/CCDC*, pp. 771–774, Guilin, China, June 2009 (doi: 10.1109/CCDC.2009.5191867).
- [108] R. Dehner, A. Selamet, P. Keller, M. Becker, "Simulation of mild surge in a turbocharger compression system", *SAE International Journal Engines*, vol. 3, no. 2, pp. 197–212, Jan. 2010 (doi: 10.4271/2010-01-2142).
- [109] S. Teramoto, "Analysis of the entire surge cycle of a multi-stage high-speed compressor", *Annual Research Briefs, Center for Turbulence Research, Stanford University*, pp. 205–218, 2008.
- [110] C. Robinson, M. Casey, "An optimization technique for radial compressor impellers", *ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, pp. 2401–2411, Aug. 2009 (doi: 10.1115/GT2008-50561).
- [111] K. Do Won, K. Tong Seop, "Model-based performance diagnostics of heavy-duty gas turbines using compressor map adaptation". *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1345–1359, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.126).
- [112] J.W. Yoon, S. Wilailak, J. Bae, C. Lee, I. Kim, "Surge analysis in a centrifugal compressor using a dimensionless surge number", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 164, pp. 240–247, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.cherd.2020.10.004).
- [113] Q. Huang, M. Zhang, X. Zheng, "Compressor surge based on a 1D-3D coupled method – Part 2: Surge investigation", *Aerospace Science and Technology*, vol. 90, pp. 289–298, July 2019 (doi: 10.1016/j.ast.2019.04.042).
- [114] K. M. Arthur, H. Basu, S. Y. Yoon, "Stabilization of compressor surge in systems with uncertain equilibrium flow", *ISA Transactions*, vol. 93, pp. 115–124, Oct. 2019 (doi: 10.1016/j.isatra.2019.03.004).
- [115] Y. Xu, H. Guo, X. Zhang, X. Lin, L. Wang, Y. Zhang, H. Chen, "Comprehensive exergy analysis of the dynamic process of compressed air energy storage system with low-temperature thermal energy storage",

- Applied Thermal Engineering, vol. 147, pp. 684-693, Jan. 2019 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.11-5).
- [116] J. Sun, Z. Zuo, Q. Liang, X. Zhou, W. Guo, H. Chen, "Theoretical and experimental study on effects of humidity on centrifugal compressor performance", Applied Thermal Engineering, vol. 147, Article Number: 115300, June 2020 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115300).
- [117] M. Mojaddam, K.R. Pullen, "Optimization of a centrifugal compressor using the design of experiment technique", Applied Sciences, vol. 9, no. 2, Article Number: 291, Jan. 2019. (doi: 10.3390/app9020291)
- [118] J. Sun, J. Zhao, K. Wang, "Online surge detection method based on axial displacement sensor of MSCC", IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 15, pp. 6029-6036, Aug. 2019 (doi: 10.1109/JSEN.2019.29093-11).
- [119] H. Jiang, Z. Li, K. Liang, "A novel sensorless stroke detection technique using low-cost inductive coil for resonant free-piston machines", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 68, no. 2, pp. 1087-1094, Feb. 2021 (doi: 10.1109/TIE.2020.2965468).
- [120] J.H. Horlock, "Compressor performance with water injection", Proceeding of the ASME Turbo Expo, New Orleans, Louisiana, June 2001 (doi: 10.1115/2001-GT-0343).
- [121] A. Cortinovis, D. Pareschi, M. Mercangoez, T. Besselmann, "Model predictive anti-surge control of centrifugal compressors with variable-speed drives", IFAC Proceedings Volumes, vol. 45, pp. 251-256, 2012 (doi: 10.3182/20120531-2-NO-4020.00052).
- [122] A.J. White, A.J. Meacock, "An evaluation of the effects of water injection on compressor performance", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, pp. 748-754, Oct. 2004 (doi: 10.1115/1.1765125).
- [123] Y. Zhang, S. Zheng, Q. Chen, J. Fang, "Surge detection approach for magnetically suspended centrifugal compressors using adaptive frequency estimator", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 65, no. 7, pp. 5733-5742, July 2018 (doi: 10.1109/TIE.2017.2774728)
- [124] G. Torrisi, S. Grammatico, M. Morari, R. S. Smith, "Model predictive control approaches for centrifugal compression systems", Proceeding of the IEEE/CDC, pp. 4320-4325, Japan, Osaka, 2015 (doi: 10.1109/CDC.2015.7402893)
- [125] J.T. Gravidahl, O. Egeland, "Compressor surge and Rotating stall modeling and control", Springer, 1999 (ISBN: 978-1-4471-0827-6).
- [126] S. Tavakoli, I. Griffin, P. Fleming, "An overview of compressor instabilities: Basic concepts and control", IFAC Proceedings Volumes, vol. 37, pp. 523-528, June 2004 (doi: 10.1016/S1474-6670(17)32228-0).
- [127] R. Dehner, A. Selamet, P. Keller, M. Becker, "Simulation of mild surge in a turbocharger compression system", SAE International Journal of Engines, vol. 3, no. 2, pp.197-212, 2010 (doi: 10.4271/2010-01-2142).
- [128] M.G. Rose, K. Irmeler, M. Schleer, D. Stahlecker, R.S. Abhari, "Classic surge in a centrifugal compressor", Journal ASME, pp. 729-740, Feb. 2009 (doi: 10.1115/GT2003-38476).
- [129] Z. Wang, J. Li, K. Fan, W. Ma, H. Lei, "Prediction method for low speed characteristics of compressor based on modified similarity theory with genetic algorithm", IEEE ACCESS, vol. 6, pp. 36834-36839, June 2018 (doi: 10.1109/ACCESS.2018.2846049).
- [130] I. Shahin, M. Gadala, M. Alqaradawi, O. Badr, "Large eddy simulation for a deep surge cycle in a high-speed centrifugal compressor with vaned diffuser", Journal of Turbomachinery, vol. 137, no. 10, Article Number: 101007, Oct. 2015 (doi: /10.1115/1.4030790).
- [131] K.K. Botros, J.F. Henderson, "Developments in centrifugal compressor surge control- A technology assessment", Journal of Turbomachinery, vol. 116, pp. 240-349, April 1994 (doi: 10.1115/1.2928358).
- [132] J.O. Lamell, T. Trumbo, T.F. Nestli, "Offshore platform powered with new electrical motor drive system", Proceeding of the IEEE/PCICON, pp. 259-266, Denver, Co, USA, Sept. 2005 (doi: 10.1109/PCICON.2005.1524562)
- [133] G. Torrisi, S. Mariétoz, R.S. Smith, M. Morari, "Comparison of the efficiency of different magnetization strategies for a variable speed induction machine drive", Proceeding of the EPE, pp. 1-15, Switzerland, Geneva, Sept. 2015 (doi: 10.1109/EPE.2015.7309387).
- [134] H.P. Bloch, "A practical guide to compressor technology", John Wiley and Sons, 2006 (ISSN: 9780471727934).
- [135] F. Blanchini, P. Giannatasio, P. Pinamonti, D. Micheli, "Experimental evaluation of a high-gain control for compressor surge suppression", ASME Journal of Turbomachinery, vol. 124, no. 1, pp. 27-35, Jan. 2002 (doi: 10.1115/1.1413475).
- [136] A.H. Epstein, E.F. Williams, E.M. Greitzer, "Active suppression of aerodynamic instabilities in turbomachinery", Journal of Propulsion and Power, vol. 5, no. 2, pp. 204-211, 1989 (doi: 10.2514/3.23137)..
- [137] C. Rodgers, "Centrifugal compressor inlet guide vanes for increased surge margin", Journal of Turbomachinery, pp. 696-702, Oct. 1991 (doi: 10.1115/1.2929136).

- [138] A.J.M. Van Tonder, "Automation of compressor networks through a dynamic control system", Ph.D Thesis, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, North-West University, Potchefstroom, South Africa, 2014.
- [139] K. O. Boinov, E. A. Lomonova, A. J. A. Vandenput, A. Tyagunov, "Surge control of the electrically driven centrifugal compressor", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 42, no. 6, pp. 1523-1531, Nov./Dec. 2006 (doi: 10.1109/TIA.2006.882683).
- [140] B. Nail, B. Bekhiti, V. Puig, "Internal stability improvement of a natural gas centrifugal compressor system based on a new optimal output feedback controller using block transformation and grey wolf optimizer", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 85, Article Number: 103697, Jan. 2021 (doi: 10.1016/j.jngse.2020.103697).
- [141] S.D.P. Ramdoss, J. Wu J. Feng, V. Patel, "Application of dynamic simulation in the design, operation, and troubleshooting of compressor systems", *Proceeding of the TS*, pp. 95-106, USA, Texas 2007 (doi: 10.21423/R1TM0X).
- [142] C. J. R. Kriel, J. H. Marais, and M. Kleingeld, "Modernising underground compressed air DSM projects to reduce operating costs", *Proceeding of the IEEE/ICUE*, pp. 1-6, Cape Town, South Africa, Aug, 2014 (doi: 10.1109/ICUE.2014.6904169).
- [143] J. Cheng, R. Li, F.F. Choobineh, Q. Hu, S. Mei, "Dispatchable generation of a novel compressed-air assisted wind turbine and its operation mechanism", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 2201-2210, Oct. 2019 (doi: 10.1109/TSTE.2018.2883068).
- [144] A. Hafaifa, B. Rachid, G. Mouloud, "Modelling of surge phenomena in a centrifugal compressor: experimental analysis for control", *Systems Science and Control Engineering*, vol. 2, pp. 632-641, 2014 (doi: 10.1080/21642583.2014.956269).
- [145] B. bohagen, J.T. Gravdahl, "Active surge control of compressor system using drive torque", *Journal of Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 1135-1140, April 2008 (doi: 10.1016/j.automatica.2007.11.002).
- [146] J. Galindo, J. Serrano, C. Guardiola, C. Cervello, "Surge limit definition in a specific test bench for the characterization of automotive turbochargers", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 30, no. 5, pp. 449-462, May 2006 (doi: 10.1016/j.expthermflusci.2005.06.002).
- [147] J. T. Gravdahl, O. Egeland, "Compressor surge and rotat-ing stall: Modeling and control", London: Springer Verlag, 1999.
- [148] G. Torrisi, S. Grammatico, A. Cortinovis, M. Mercangöz, M. Morari, R.S. Smith, "Model predictive approaches for active surge control in centrifugal compressors", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 6, pp. 1947-1960, Nov. 2017 (doi: 10.1109/TCST.2016.2636027).
- [149] A. Stoicescu, O. Dumitrescu, G. Fetea, "Automated multi-reference control for centrifugal compressor", *Proceeding of the IEEE/CIEM*, pp. 167-171, Timisoara, Romania, Oct. 2019 (doi: 10.1109-/CIEM46456.2019.8937654).
- [150] S. Gao, X. Qian, Y. Wang, X. He, J. Yin, "LS-SVM based anti-surge predictive control of centrifugal compressor", *Proceeding of the IEEE/CCDC*, pp. 618-621, Yinchuan, China, May 2016 (doi: 10.1109/CCDC.2016.7531059).
- [151] T. Hirano, T. Uchida, H. Tsujita, "Control of surge in centrifugal compressor by using a nozzle injection system: Universality in optimal position of injection nozzle", *International Journal of Rotating Machinery*, Article ID: 259293, Nov. 2012 (doi: 10.1155/2012/259293).
- [152] API Standard 617, "Axial and centrifugal compressors and expander-compressors for petroleum, chemicals and gas industry services", American Petroleum Institute, Washington, DC, 7th Edition, July 2002.
- [153] N. Branley Shaun, K. Narayanan, "A total integrated approach", Conoco Phillips, Australia PTY LTD, Tech. Rep., West Perth, WA, Australia, 2012.
- [154] F. Laaouad, M. Bouguerra, A. Hafaifa, A. Iratni, "Nonlinear Sensitive Control of Centrifugal Compressor", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 167-172, 2007.
- [155] N. Dukle, K. Narayanan, "Validating anti-surge control systems", *Petroleum technology quarterly*, vol. 8, pp. 87-96, Summer 2003.
- [156] J. S. Simon and L. Valavani, "A Lyapunov based nonlinear controlscheme for stabilizing a basic compression system using a close-coupled control valve", *Proceeding of the IEEE/ACC*, pp. 2398-2406, Boston, MA, USA, June 1991 (doi: 10.23919/ACC.1991.4791832).
- [157] M.D. Hathaway, G. Herrick, "Unsteady simulation of the stall inception process in the compression system of a US army helicopter gas turbine engine- final year progress", *Proceeding of the IEEE/DOD-UFC*, pp. 160-173, Nashville, TN, USA, June 2005 (doi: 10.1109/DODUGC.2005.72).
- [158] H. Tamaki, "Experimental study on surge inception in a centrifugal compressor", *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 409-417, 2009 (doi: 10.5293/IJFMS.2009.2.4.409).

- [159] B. Chetate, R. Zamoum, A. Fegriche, M. Boumdin, "PID and novel approach of PI fuzzy logic controllers for active surge in centrifugal compressor", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 38, pp 1405–1414, 2013 (doi: 10.1007/s13369-013-0601-6).
- [160] A. khsheem, "Active control of surge compressor system", *Journal of Electrical and Electronic Systems*, pp. 1-5, 2018 (doi: 10.4172/2332-0796.1000267).
- [161] M. Asadzadeh, F. Shabani "Centrifugal compressor active surge controller design based on fuzzy type II", *Proceeding of the IEEE/TPEC*, College Station, TX, USA, Feb. 2018 (doi: 10.1109/TPEC.2018.831207-9).
- [162] D. Zhao; B. Blunier; F. Gao, M. Dou, A. Miraoui, "Control of an ultrahigh-speed centrifugal compressor for the air management of fuel cell systems", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 2225-2234, May/June 2014 (doi: 10.1109/TIA.2013.2282838).
- [163] G. Quartarone, N. Anglani, "Simulation and performance comparison of a real-time controller for a fixed-speed multipressure compressor", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp.744-752, Jan./Feb. 2015 (doi: 10.1109/TIA.2014.2332641).
- [164] H. J. Ahn, M. S. Park, D. Sanadgol, I. H. Park, D. C. Han, E.H. Maslen, "A pressure output feedback control of turbo compressor surge with a thrust magnetic bearing actuator", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, pp 1406–141, 2009 .
- [165] G. Bartolini, A. Muntoni, A. Pisano, E. Usai, "Compressor surge suppression by second-order sliding mode control technique", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 6238-6244, July 2008 (doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.2469).
- [166] M. Ghanavati, K. Salahshoor, M. R. J. Motlagh, A. Ramazani, A. Moarefianpour, "A novel combined approach for gas compressors surge suppression based on robust adaptive control and backstepping", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, pp. 823-833, 2018.
- [167] M.T. Ziabari, M.R. Jahed-Motlagh, K. Salahshoor, A. Ramezani, A. Moarefianpur, "Robust adaptive control of surge instability in constant speed centrifugal compressors using", *Cogent Engineering*, vol. 4, no. 1, Article Number: 1339335, July 2017 (doi: 10.1080/23311916.2017.1339335)
- [168] N. Zhang, M. Malekgoudarzi, "Compressor surge control using a new robust adaptive method in the presence of uncertainty and unmatched disturbance", *Systems Science and Control Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 405-412, July 2020 (doi: 10.1080/21642583.2020.1785970).
- [169] A. Neverlien, S. Moe, J. T. Gravdahl, "Compressor surge control using lyapunov neural networks", *Modeling, Identification and Control*, vol. 41, no. 2, pp. 41-48, 2020 (doi: 10.4173/mic.2020.2.1).
- [170] H. Imani, M.R. Jahed-Motlagh, K. Salahshoor, A. Ramezani, A. Moarefianpur, D. Pham, "Robust decentralized model predictive control approach for a multi-compressor system surge instability including piping acoustic". *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, Article Number: 1483811, Aug. 2018 (doi: 10.1080/233-11916.2018.1483811).
- [171] C. J. Backi, D. Krishnamoorthy, A. Verheyleweghen, S. Skogestad, "Combined nonlinear moving horizon estimation and model predictive control applied to a compressor for active surge control", *Proceeding of the IEEE/CCTA*, pp. 1552-1557, Copenhagen, Denmark, Aug. 2018 (doi: 10.1109/CCTA.2018.851159-6).
- [172] S. Lin, Ch. Yangn, P. Wun, Z. Song, "Active surge control for variable speed axial compressor", *ISA Transactions*, vol. 53, pp. 1389-1395, 2014 (doi: 10.1016/j.isatra.2013.12.031).
- [173] H. Sheng, W. Huang, T. Zhang, X. Huang, "Active/passive hybrid control system for compressor surge based on fuzzy logic", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 136, no. 9, Article Number: 092601, Sept. 2014 (doi:10.1115/1.4026953).
- [174] Y. Ren, L. Zhang, Y. Ye, W. Liang, H. Yang, "Reliability assessment of anti-surge control system in centrifugal compressor", *Proceeding of the IEEE/ICCIS*, pp. 1240-1243, Chongqing, China, Aug. 2012 (doi: 10.1109/ICCIS.2012.218).
- [175] J.J. Moghaddam, M.H. Farahani, N. Amanifard, "A neural network-based sliding-mode control for rotating stall and surge in axial compressors", *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 1, pp. 1036-1043, Jan. 2011 (doi: 10.1016/j.asoc.2010.02.002).
- [176] H.M. Harrison, N.L. Key, "A new approach to modeling slip and work input for centrifugal compressors", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 143, no. 2, Article Number: 021013, 2021 (doi: 10.1115/1.4049412).
- [177] B. Bohagen, J.T. Gravdahl, "On active surge control of compressors using a mass flow observer", *Proceedings of the IEEE/CDC*, vol. 4, pp. 3684-3689, Las Vegas, NV, USA, Dec. 2002 (doi: 10.1109/CDC-2002.1184936).
- [178] G. Torrisi, V. Jaramillo, J.R. Ottewill, S. Mariétoz, M. Morari, R.S. Smith, "Active surge control of electrically driven centrifugal compressors", *Proceeding of the IEEE/ECC*, pp. 1614-1619, Linz, Austria, July 2015 (doi: 10.1109/ECC.2015.7330768).

- [179] H. Sheng, W. Huang, T. Zhang, "Output feedback control of surge and rotating stall in axial compressors", *Asian Journal of Control*, vol. 19, no. 2, pp. 599-605, March 2017 (doi: 10.1002/asjc.1384).
- [180] H. Sheng, W. Huang, T. Zhang, X. Huang, "Robust adaptive fuzzy control of compressor surge using backstep-ping", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 39, pp. 9301-9308, 2014 (doi: 10.10-07/s13369-014-1448-1)
- [181] M. Shafieian, M. Zavar, M. Rahmanian, "Simulation and control of surge phenomenon in centrifugal compressors", *Traitement du Signal*, vol. 36, no. 3, pp. 259-264, Sept. 2019 (doi: 10.18280/ts.360309).

زیر نویس ها

1. Compressor
2. Positive displacement
3. Dynamic
4. Axial compressors
5. Reciprocating
6. Screw
7. Centrifugal
8. Surge
9. White box
10. Gray box
11. Black box
12. Partial Least Squares
13. Nonlinear time series
14. Neural network
15. NARX
16. Locally linear model tree
17. Fluctuations helmholtz
18. Map Compressor
19. Head
20. Stonewall
21. Diffusers
22. Mild surge
23. Classic surge
24. Modified surge
25. Deep surge
26. Discharge
27. Sequential quadratic programming
28. Neuron
29. Globally exponentially stable