

## بررسی دینامیکی پایداری کمپرسور C-2102 پتروشیمی خراسان در شرایط کنترل اجتناب از جهش ناگهانی

**مجید یساقی**

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران،  
majd.yasaqi@yahoo.com

**مهدی کریمی\***

استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران،  
mehdikarimi@um.ac.ir

**علی گرمودی اصیل**

استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران،  
a.garmroudi@ub.ac.ir

**جلال جوادنژاد**

کارشناس مهندسی شیمی، مهندس فرآیند واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان، بجنورد، ایران،  
javadnezhad@gmail.com

### چکیده

در این پژوهش، پایداری کمپرسور C-2102 پتروشیمی خراسان در شرایط کنترل اجتناب از جهش ناگهانی و با هدف کاهش مصرف انرژی، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. اجتناب از جهش ناگهانی، یکی از روش‌های رایج برای مقابله با پدیده جهش ناگهانی است که با جلوگیری از افت جریان در ورودی کمپرسور، مانع بروز جهش ناگهانی می‌گردد. در مقاله پیش‌رو، با بررسی شرایط عملیاتی و منحنی‌های عملکرد کمپرسور، سه نوع سیستم اجتناب از جهش ناگهانی طراحی شده است که با اندازه‌گیری سرعت عملیاتی، جریان حجمی و فشار ورودی به کمپرسور، نقطه عملیاتی کمپرسور را در فاصله ایمن تا خط جهش ناگهانی حفظ می‌کنند. مطابق نتایج، اگر جریان ورودی تا میزان ۱۰ درصد به صورت پله افت کند، سیستم کنترل جهش ناگهانی مانع نزدیک شدن به شرایط جهش ناگهانی می‌گردد و اگر اغتشاش به صورت تابع شیب وارد شود، سیستم کنترل عملکرد بهتری دارد و حتی در صورت افت ۴۰ درصدی جریان، نقطه عملیاتی کمپرسور در ناحیه پایدار حفظ می‌شود. در شرایطی که سیستم کنترل اجتناب از جهش ناگهانی فعال باشد، امکان افزایش فشار ورودی به کمپرسور وجود خواهد داشت که موجب کاهش توان مصرفی کمپرسور به میزان ۲۰ درصد خواهد گردید.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی دینامیکی، جهش ناگهانی، کمپرسور گریز از مرکز، کنترل جهش ناگهانی، پایداری کمپرسور، صرفه‌جویی انرژی.

### Dynamic Investigation of Khorasan Petrochemical C-2102 Compressor Stability in Surge Avoidance Control Condition

**M. Yasaqi**

Department of Chemical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

**M. Karimi**

Department of Chemical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

**A. Garmrodi Asil**

Department of Chemical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

**J. Javadnezhad**

Process Engineering Unit, Khorasan Petrochemical, Bojnord, Iran

### Abstract

In this research, the stability of Khorasan Petrochemical Feed Gas Compressor (C-2102) in surge avoidance control conditions with the aim of reducing energy consumption has been studied. Surge avoidance is one of the common methods to deal with the surge phenomenon, which prevents the onset of surge condition by preventing the flow drop in the suction side of compressor. In the present paper, by examining the operating conditions and performance curves of the compressor, three types of surge avoidance systems have been designed that maintain the compressor operating point at a safe distance to the surge line by measuring the operating speed, volume flow and suction pressure to the compressor. According to the results, in case the suction flow drops to 10% as a step function, the anti-surge control system prevents approaching the surge conditions, and in case the flow drop enters as a ramp function, the control system performs better and maintains the compressor operating point in the stable zone in the event of a 40% flow drop. According to the results, if the surge avoidance control system is activated, it will be possible to increase the suction pressure of the compressor, which will reduce the compressor power consumption by 20 percent.

**Keywords:** Dynamic simulation, Surge Control, Centrifugal Compressor, Compressor Stability, Surge, Power saving.

### ۱- مقدمه

شدن دبی جریان به داخل کمپرسور و در نتیجه نوسان فشار می‌گردد [۳]. ازدیاد سرعت دورانی کمپرسور باعث افزایش نوسانات در شرایط جهش ناگهانی می‌گردد [۴]. نوسانات ناشی از پدیده جهش ناگهانی تنش‌های بزرگی را به کمپرسور وارد می‌کند. در نتیجه، برای محافظت از کمپرسور در برابر آسیب مکانیکی و همچنین حفظ پایداری سیستم، باید از بروز جهش ناگهانی جلوگیری شود [۵]. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای محافظت از کمپرسور در برابر جهش ناگهانی، جلوگیری از نزدیک

پدیده جهش ناگهانی یک ناپایداری خود برانگیخته تناوبی است که کل سیستم کمپرسور را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱]. کاهش جریان جرمی ورودی به کمپرسور موجب ناپایداری آیرودینامیکی جریان و در نتیجه بروز شرایط جهش ناگهانی می‌گردد [۲]. در طی پدیده جهش ناگهانی عمیق، جریان نوسان می‌کند که این امر موجب معکوس

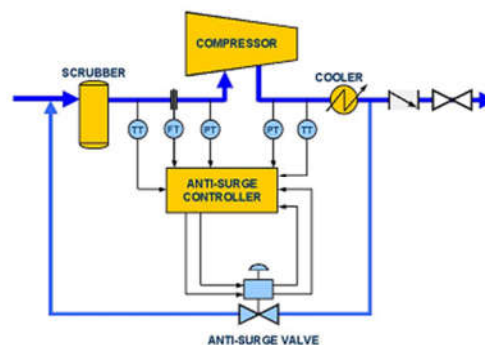
\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mehdikarimi@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۲/۰۹

شدن نقطه عملیاتی کمپرسور به ناحیه‌ای است که جهش‌ناگهانی اتفاق می‌افتد [۶].

یک سیستم اجتناب از جهش‌ناگهانی، به وسیله شیر کنترل جریان برگشتی که در حلقه کنترل کمپرسور تنظیم شده است، از کاهش جریان و ورود کمپرسور به ناحیه جهش‌ناگهانی جلوگیری می‌کند. این سیستم که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است، از یک کنترل کننده، فرستنده دما، فشار، جریان و یک شیر کنترل تشکیل شده است [۷].



شکل ۱- طرحواره سیستم کنترل اجتناب از جهش‌ناگهانی [۷]

اپستین و همکاران [۸]، برای اولین بار سیستم کنترل جهش‌ناگهانی فعال را معرفی کردند. در این روش، اغتشاشات درون سیستم که موجب بروز ناپایداری جهش‌ناگهانی می‌شوند، توسط یک سیستم کنترلی پسخور ابتدا شناسایی و سپس مهار می‌شوند. در نتیجه این روش، ناحیه پایدار کمپرسور گسترش پیدا می‌کند و نواحی ناپایدار کمپرسور حتی فراتر از خط اصلی جهش‌ناگهانی قابل دسترس خواهد بود.

در بررسی‌های سایمن و همکاران [۹] تاثیر انواع حسگر و فعال-کننده‌های مختلف در کنترل بهتر جهش‌ناگهانی بررسی شده است و بر طبق نتایج، سیستم متشکل از شیر کوپلی بسته<sup>۱</sup> و تزریق کننده به عنوان فعال کننده همراه با حسگر اندازه‌گیری جریان جرمی، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

پینسلی و همکاران [۱۰] با استفاده از مدل خطی کنترل فعال جهش‌ناگهانی، موفق به گسترش ناحیه پایدار کمپرسور و جایجایی خط جهش‌ناگهانی به اندازه ۲۵ درصد به سمت جریان‌های جرمی کمتر شده‌اند. با این وجود، بادموس و همکاران [۱۱] نیز با بکارگیری مدل کنترل غیر خطی فعال جهش‌ناگهانی، پاسخ دینامیکی بهتری به ویژه در شرایط تغییر سریع مقدار مقرر کنترل کننده در مقایسه با سیستم کنترل خطی دریافت کرده‌اند.

شریفی [۱۲] با تحلیل عددی معادلات غیر خطی مدل مور-گریترز [۱۳] و همچنین به کمک تقریب زدن منحنی عملکرد کمپرسور به صورت تابع درجه سوم، یک معیار طراحی جهت پیش‌بینی محدوده ناپایدار کمپرسور و در نتیجه اجتناب از آن ارائه کرده است. طبق نتایج در شرایطی که متغیر طراحی و بدون بعد B، کمتر از مقدار حدی ۰/۲۶ کنترل شود، کمپرسور وارد محدوده ناپایدار نخواهد شد.

بسام [۱۴]، با تنظیم انواع کنترل کننده‌های PI و PID توسط MATLAB Simulink و ارائه مدل بهبود یافته، موفق به کاهش ۵۰ درصد زمان پاسخ کنترل کننده جهش‌ناگهانی در مقایسه با کنترل کننده عادی شده است.

بطرس و هندرسون [۱۵]، با بررسی انواع سیستم‌های رایج کنترل جهش‌ناگهانی شامل اجتناب از جهش‌ناگهانی، کنترل فعال جهش‌ناگهانی و روش‌های مبتنی بر شناسایی و کنترل جهش‌ناگهانی، مزایا و معایب هر کدام از این تکنیک‌ها را مقایسه کرده‌اند و طبق نتایج، روش‌های کنترل اجتناب از جهش‌ناگهانی به دلیل سادگی و ایمنی بالاتر، کاربرد بیشتری دارند.

در مقاله حاضر نیز، برای جلوگیری از بروز شرایط جهش‌ناگهانی و حفظ پایداری کمپرسور، ۳ نوع سیستم کنترل اجتناب از جهش‌ناگهانی با استفاده از کنترل کننده‌ها و الگوریتم‌های کنترلی متفاوت در محیط نرم‌افزار Aspen Plus Dynamics طراحی شده است. سپس با در نظر گرفتن سناریوهای متفاوت، عملکرد این سیستم‌های کنترلی در شرایط مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- تجهیزات مورد مطالعه

شبیه‌سازی و تحقیق صورت گرفته در این مقاله بر اساس داده‌های عملیاتی (جدول ۱) واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان و منحنی‌های عملکرد (شکل‌های ۲، ۴ و ۶) کمپرسور C-2102 می‌باشد که توسط سازنده کمپرسور ارائه شده است.

کمپرسور C-2102 واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان، از نوع گریز از مرکز با محرک توربین بخار است که از قابلیت تغییر و تنظیم سرعت نیز برخوردار است. این کمپرسور که با سرعت ۱۰۱۰۰ rpm و توان مصرفی ۱۲۷۹ kW در حال عملیات است، وظیفه افزایش فشار گاز طبیعی ورودی به واحد را از مقدار ۱۶/۴۸ bar تا ۴۴ bar بر عهده دارد. به منظور دور شدن از شرایط جهش‌ناگهانی، شیر کنترل این کمپرسور در موقعیت ۶٪ باز قرار دارد که این امر موجب اتلاف انرژی می‌گردد. در ادامه به کمک شبیه‌سازی، پایداری کمپرسور در شرایطی که شیر کنترل در حالت بسته قرار دارد، بررسی می‌شود.

مشخصات جریان خوراک ورودی به این کمپرسور، طبق داده‌های عملیاتی دریافتی از پتروشیمی، در جدول ۱ نشان داده شده است:

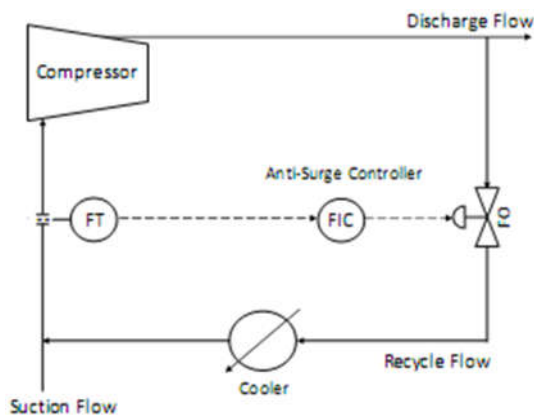
جدول ۱- شرایط عملیاتی گاز ورودی به کمپرسور C-2102

مشخصات	مقدار
فشار	۱۶/۴۸ bar
دما	۲۵°C
دبی جرمی	۲۰۶۹۰ kg/h
دبی حجمی واقعی	۱۶۸۰ m <sup>3</sup> /h
جرم مولکولی	۱۷/۹۷ g/gmol

## ۳- طراحی سیستم کنترل اجتناب از جهش‌ناگهانی

به منظور جلوگیری از ورود نقطه عملیاتی کمپرسور به ناحیه‌ای که جهش‌ناگهانی در آن رخ می‌دهد، روش‌های مختلفی در مقالات ارائه

<sup>۱</sup> Close-Coupled-Valve (CCV)



شکل ۳- اجزای تشکیل دهنده سیستم کنترل حداقل جریان

برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده سیستم اجتناب از جهش ناگهانی، به دلیل خطر ورود به شرایط خطرناک جهش ناگهانی نمی توان از روش های مدار بسته مبتنی بر نوسانات حدی استفاده کرد [۱۷]. در نتیجه، پارامترهای تنظیم کنترل کننده این سیستم، به کمک نرم افزار Aspen Plus Dynamics و با استفاده از روش پاسخ پله مدار باز محاسبه شده است. در این روش با قرار دادن کنترل کننده در حالت مدار باز و سپس اعمال تغییر پله به میزان ۵ درصد، یک مدل درجه اول همراه با زمان مرده مطابق رابطه (۱) حاصل می شود.

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + \tau s} \quad (1)$$

که در آن K بهره،  $t_0$  زمان مرده و  $\tau$  ثابت زمانی است. مقادیر پارامترهای محاسبه شده این روش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- محاسبه پارامترهای تنظیم کنترل کننده جریان با استفاده از روش IMC

پارامتر	مقدار
K	۰/۶۲۵۳
$t_0$	۰/۱ min
$\tau$	۰/۱۰۹۸ min

مطابق مقادیر مدل درجه اول همراه با زمان مرده و بر اساس روش IMC، پارامترهای تنظیم تناسبی انتگرالی (PI) کنترل کننده این سیستم در جدول ۳ محاسبه شده است [۱۸].

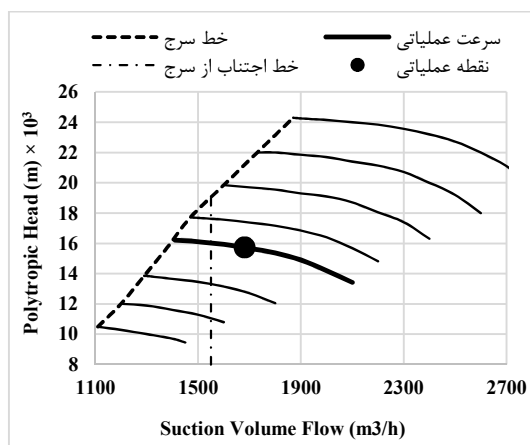
جدول ۳- محاسبه پارامترهای تنظیم کنترل کننده جریان با استفاده از روش IMC

پارامتر	مقدار
$K_c = \frac{\tau + t_0 / 2}{K \times 1.7t_0}$	۱/۵۱
$\tau_I = \tau + t_0 / 2$	۰/۱۶ min

شده است. در این پژوهش، با اندازه گیری متغیرهایی همچون سرعت عملیاتی، جریان حجمی و فشار ورودی به کمپرسور، سه نوع سیستم متفاوت اجتناب از جهش ناگهانی طراحی شده است و در ادامه سیستم رایج کنترل حداقل جریان با ۲ نوع سیستم طراحی شده جدید بررسی و مقایسه خواهد شد.

### ۳-۱- سیستم کنترل حداقل جریان

کنترل حداقل جریان، یکی از روش های ساده و ارزان برای جلوگیری از نزدیک شدن کمپرسور به شرایط جهش ناگهانی است. در این سیستم، حداقل جریان مجاز ورودی به صورت یک خط عمودی در منحنی هد-جریان کمپرسور (شکل ۲) مشخص می گردد و در صورت نزدیک شدن نقطه عملیاتی کمپرسور به این خط، شیر کنترل جریان برگشتی باز خواهد شد و از کاهش جریان جلوگیری می کند [۱۶].



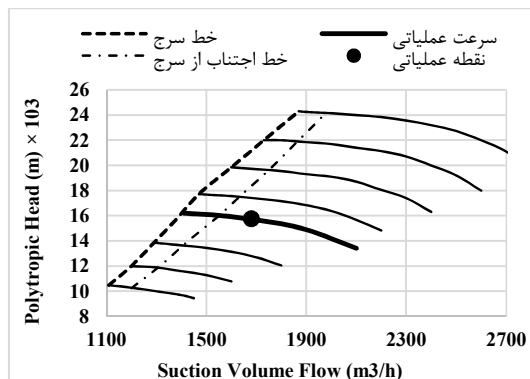
شکل ۲- تعیین خط اجتناب از جهش ناگهانی در منحنی کمپرسور C- 2102 طبق روش کنترل حداقل جریان

مطابق شکل ۲، این روش تنها قادر به کنترل نقطه عملیاتی کمپرسور در یک سرعت ثابت است و در صورت تغییر سرعت عملیاتی کمپرسور، دچار خطا در تنظیم فاصله از جهش ناگهانی می گردد [۱۶]. در شرایطی که سرعت کمپرسور کاهش پیدا کند، به دلیل اینکه فاصله از جهش ناگهانی بیشتر می شود، فعال شدن سیستم کنترل جهش ناگهانی منجر به اتلاف انرژی می گردد و در صورتی که سرعت کمپرسور بیشتر شود، این سیستم قادر به کنترل جریان نخواهد بود و امکان بروز شرایط جهش ناگهانی وجود دارد.

این سیستم که در شکل ۳ نشان داده شده است، متشکل از یک کنترل کننده جریان (FIC) و یک شیر کنترل می باشد که دبی حجمی جریان ورودی به کمپرسور را در یک مقدار مقرر ثابت و در فاصله مشخص نسبت به خط جهش ناگهانی کنترل می کند.

### ۲-۳- سیستم کنترل جریان همراه با اندازه‌گیری سرعت کمپرسور

با توجه به اینکه اکثر کمپرسورهای گریز از مرکز در سرعت‌های متفاوتی کار می‌کنند، در نتیجه برای جلوگیری از بروز شرایط خطرناک جهش‌ناگهانی، نیاز است تا در هر سرعتی از کمپرسور مقدار مقرر جدیدی تعریف شود. بدین منظور، خط کنترل اجتناب به صورت موازی با خط جهش‌ناگهانی رسم می‌گردد (شکل ۴) و جریان ورودی به کمپرسور، متناسب با سرعت کمپرسور و در فاصله مشخص (۱۰ درصد) تا خط جهش‌ناگهانی کنترل می‌شود.



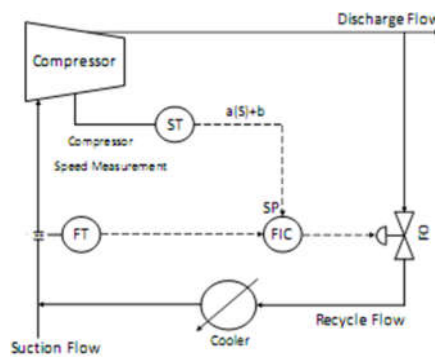
شکل ۴- تعیین خط اجتناب از جهش‌ناگهانی در منحنی کمپرسور C- 2102 طبق روش کنترل جریان همراه با اندازه‌گیری سرعت

معادله خط اجتناب از جهش‌ناگهانی در شکل ۴، بر اساس داده‌های دبی حجمی و سرعت کمپرسور، طبق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\text{VolumeFlow(m}^3/\text{h)} = a \times \text{Speed(rpm)} - b \quad (2)$$

مقادیر برازش شده در رابطه ۲ بر اساس منحنی عملکرد کمپرسور (شکل ۴) برابر با  $a = 0.19$  و  $b = 350$  می‌باشد.

در این سیستم که در شکل ۵ نشان داده شده است، علاوه بر کنترل جریان، جهت تعیین مقدار مقرر کنترل‌کننده لازم است تا سرعت عملیاتی کمپرسور اندازه‌گیری شود و سپس طبق رابطه (۲)، سرعت کمپرسور به دبی حجمی متناظر آن در فاصله مشخص شده (۱۰ درصد) تا خط جهش‌ناگهانی تبدیل شود.



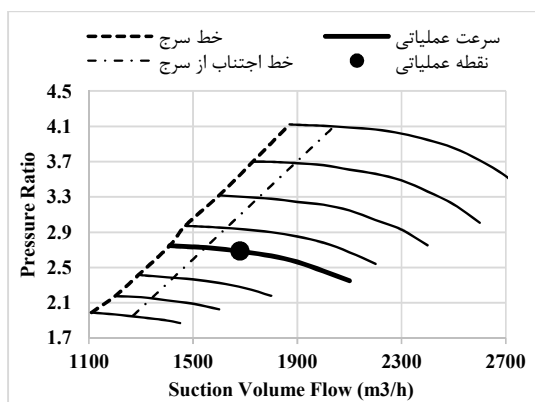
شکل ۵- اجزای تشکیل دهنده سیستم کنترل جریان همراه با اندازه‌گیری سرعت

در این سیستم چنانچه جریان حجمی ورودی اندازه‌گیری شده (متغیر کنترل)، کمتر از مقدار محاسبه شده بر اساس رابطه (۲) شود (مقدار مقرر)، شیرکنترل باز می‌شود و دبی جریان را در مقدار مقرر کنترل خواهد کرد.

با توجه به اینکه دینامیک این سیستم مشابه روش کنترل حداقل جریان است و تنها مقدار مقرر آن متفاوت است، لذا پارامترهای تنظیم این سیستم نیز برابر با حالت قبل خواهند بود.

### ۳-۳- سیستم کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان

در این روش که با نام کنترل نسبت نیز شناخته می‌شود، نسبت فشار خروجی به ورودی کمپرسور به عنوان متغیر کنترل‌شونده در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم نیز برای کنترل نقطه عملیاتی کمپرسور در فاصله مشخص نسبت به خط جهش‌ناگهانی، لازم است تا خط کنترل اجتناب از جهش‌ناگهانی به صورت موازی با خط جهش‌ناگهانی در منحنی نسبت فشار-جریان کمپرسور (شکل ۶) رسم شود.



شکل ۶- تعیین خط اجتناب از جهش‌ناگهانی در منحنی کمپرسور C- 2102 طبق روش کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان

معادله خط اجتناب از جهش‌ناگهانی در شکل ۶، بر اساس داده‌های دبی حجمی و نسبت تراکم فشار، طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$\text{PressureRatio}(P_2/P_1) = a \times \text{VolumeFlow(m}^3/\text{h)} - b \quad (3)$$

مقادیر برازش شده در رابطه (۳) بر اساس منحنی عملکرد کمپرسور (شکل ۶) برابر با  $a = 0.0278$  و  $b = 1/5751$  می‌باشد.

در این سیستم (شکل ۷)، نسبت فشار خروجی به ورودی به عنوان متغیر کنترل در نظر گرفته می‌شود و جهت تعیین مقدار مقرر کنترل‌کننده، ابتدا دبی حجمی جریان ورودی به کمپرسور اندازه‌گیری می‌شود و سپس طبق رابطه (۳)، دبی حجمی به نسبت فشاری متناظر آن در فاصله مشخص شده (۱۰ درصد) تا خط جهش‌ناگهانی تبدیل می‌گردد.

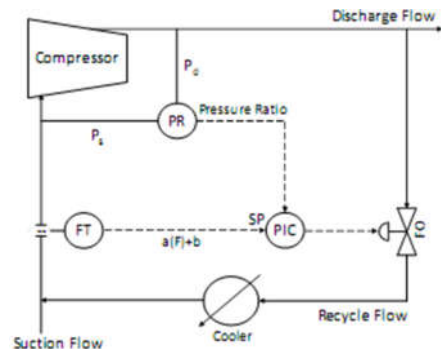
در این سیستم نیز اگر نسبت فشار اندازه‌گیری شده توسط ترنسمیترهای فشار در ورودی و خروجی کمپرسور (متغیر کنترل)، بیشتر از مقدار محاسبه شده در رابطه (۳) باشد، سیستم کنترل جهش‌ناگهانی فعال خواهد شد تا مانع افت جریان شود و نسبت فشار را در مقدار مقرر کنترل کند.

(دبی:  $1410 \text{ m}^3/\text{h}$ ) قرار دارد. سپس در شرایطی که ۱۰ درصد از دبی جرمی جریان ورودی به کمپرسور کاهش پیدا کند، سیستم اجتناب از جهش‌ناگهانی فعال خواهد شد و در طی یک دقیقه، دبی حجمی جریان را در مقدار مقرر ( $1550 \text{ m}^3/\text{h}$ ) کنترل می‌کند. اما در صورتی که بیشتر از ۱۰ درصد از جریان ورودی به صورت آنی (تابع پله) دچار افت شود، علی‌رغم فعال شدن سیستم کنترل جهش‌ناگهانی، دبی حجمی ورودی به کمپرسور تا  $1450 \text{ m}^3/\text{h}$  کاهش پیدا می‌کند و به خط جهش‌ناگهانی نزدیک می‌شود و سپس به مقدار مقرر می‌رسد. در حالتی که سرعت عملیاتی کمپرسور متغیر است، بر اثر افت جریان ورودی به کمپرسور، نقطه عملیاتی کمپرسور و در نتیجه موقعیت خط جهش‌ناگهانی نیز تغییر می‌کند. لذا، در سیستم کنترل جریان همراه با اندازه‌گیری سرعت کمپرسور (شکل ۹)، جریان حجمی ورودی به کمپرسور در مقادیر مقرر متفاوت و متناسب با اغتشاش وارد شده به سیستم کنترل شده است. در این سیستم، مقدار مقرر کنترل‌کننده بر اساس سرعت عملیاتی کمپرسور تنظیم می‌شود و همواره دبی حجمی ورودی به کمپرسور در فاصله مشخص تا خط جهش‌ناگهانی (۱۰ درصد)، کنترل می‌گردد.

سیستم کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان (شکل ۱۰)، واکنش سریعی در مواجهه با اغتشاش از خود نشان می‌دهد و حتی مانع افت جریان نسبت به مقدار مقرر کنترل‌کننده می‌گردد و از نزدیک شدن نقطه عملیاتی کمپرسور به خط جهش‌ناگهانی جلوگیری می‌کند. اما این پاسخ سریع ممکن است باعث بروز نوسان فشار در ورودی کمپرسور و در نتیجه ناپایداری سیستم شود. با توجه به اینکه در این حالت، سرعت عملیاتی کمپرسور ثابت است، در نتیجه خط جهش‌ناگهانی و مقدار مقرر کنترل‌کننده نیز تغییر نکرده است.

در اغتشاش به صورت تابع پله، جریان به صورت ناگهانی و در یک لحظه افت می‌کند. در نتیجه سیستم کنترل جهش‌ناگهانی زمان کافی برای پاسخ ندارد و دبی جریان کمی به خط جهش‌ناگهانی نزدیک می‌گردد. با توجه به اینکه در شرایط واقعی، این افت جریان در طی یک بازه زمانی رخ می‌دهد. در نتیجه به منظور بررسی عملکرد سیستم اجتناب از جهش‌ناگهانی در این شرایط، اغتشاش وارد شده به صورت تابع شیب تعریف شده است. نمودار پاسخ دینامیکی این سه روش، در شرایطی که دبی جرمی ورودی به کمپرسور به صورت تدریجی (تابع شیب) و به صورت آنی (تابع پله) افت کند، در شکل ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

با توجه به نمودار شکل ۱۱، در اثر افت تدریجی جریان جرمی به میزان ۴۰ درصد، دبی حجمی جریان ورودی به کمپرسور با شیب تندی کاهش پیدا می‌کند و پس از رسیدن به مقدار مقرر کنترل‌کننده ( $1550 \text{ m}^3/\text{h}$ )، سیستم اجتناب از جهش‌ناگهانی فعال می‌گردد و از افت جریان جلوگیری می‌کند. سپس با دفع اغتشاش وارد شده به سیستم، دبی حجمی ورودی به کمپرسور در مقدار مقرر کنترل می‌شود. سیستم کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان، در این شرایط نیز عملکرد بهتری دارد و مانع افت جریان می‌گردد. در شرایطی که جریان به صورت آنی ۲۰ درصد افت کند (شکل ۱۲)، علی‌رغم اینکه جریان افت کمتری نسبت به حالت الف داشته است اما دبی حجمی ورودی به کمپرسور تا نزدیک خط جهش‌ناگهانی ( $1480 \text{ m}^3/\text{h}$ ) کاهش پیدا کرده است و سیستم کنترل جهش‌ناگهانی عملکرد کندتری نسبت به حالت الف دارد.



شکل ۷- اجزای تشکیل دهنده سیستم کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان

پارامترهای تنظیم کنترل‌کننده این سیستم نیز همچون روش کنترل جریان، با استفاده از مدل درجه اول همراه با زمان مرده (رابطه ۱) و بر اساس روش IMC در جداول ۴ و ۵ محاسبه شده است.

جدول ۴- پارامترهای مدل درجه اول همراه با زمان مرده سیستم کنترل فشار

پارامتر	مقدار
K	۰/۱۲۶۹
$t_0$	۰/۱ min
$\tau$	۰/۱۱۰۸ min

جدول ۵- محاسبه پارامترهای تنظیم کنترل‌کننده فشار با استفاده از روش IMC

پارامتر	مقدار
$K_c = \frac{\tau + t_0}{2} / K \times 1.7t_0$	۷/۴۵
$\tau_I = \tau + t_0 / 2$	۰/۱۶ min

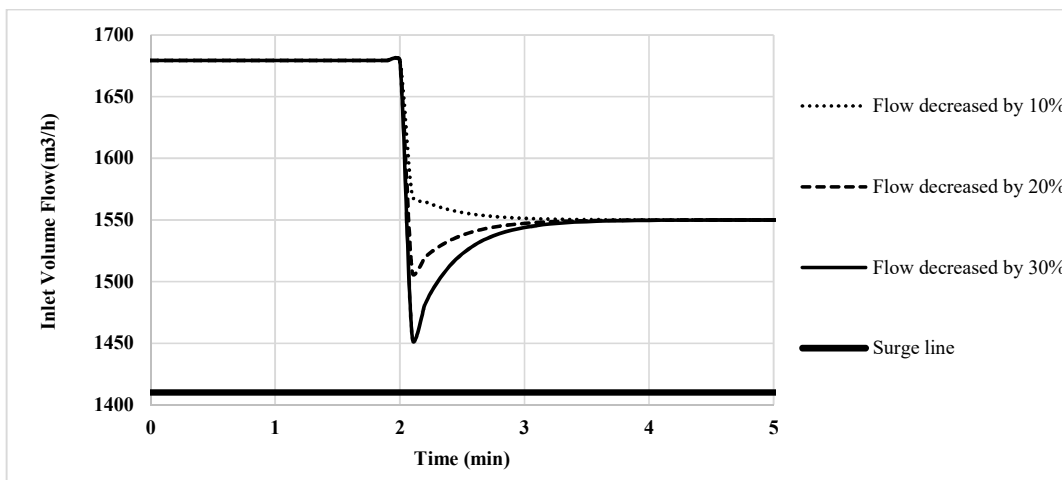
#### ۴- ارزیابی عملکرد سیستم کنترل جهش‌ناگهانی

یکی از دلایل اصلی بروز شرایط جهش‌ناگهانی، کاهش جریان حجمی ورودی به کمپرسور است که موجب نزدیک شدن نقطه عملیاتی کمپرسور به خط جهش‌ناگهانی می‌گردد. لذا، جهت بررسی عملکرد سیستم کنترل جهش‌ناگهانی، در ادامه دو نوع اغتشاش متفاوت که منجر به نزدیک شدن کمپرسور به ناحیه ناپایدار جهش‌ناگهانی می‌گردد، بررسی شده است.

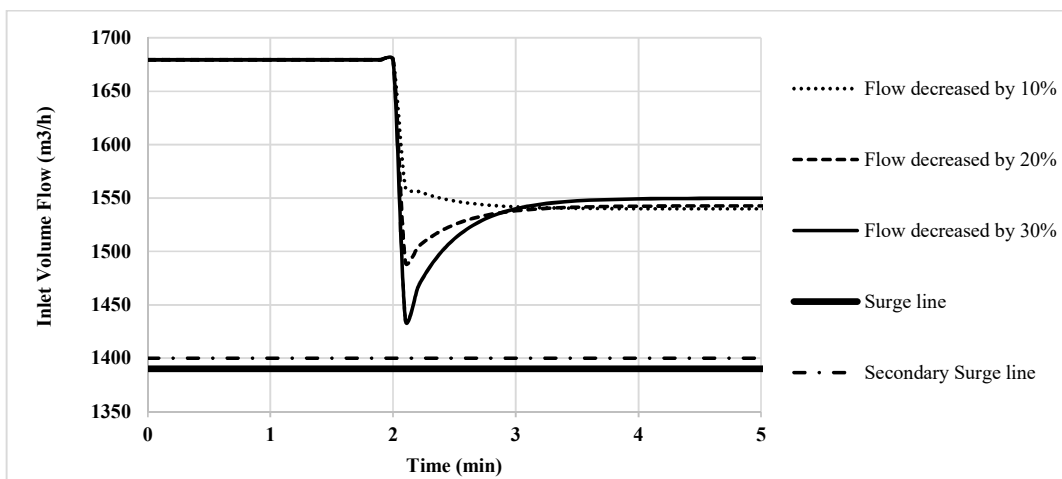
##### ۴-۱- افت دبی جرمی جریان ورودی به کمپرسور

افت دبی جرمی منجر به کاهش جریان حجمی ورودی به کمپرسور و در نتیجه نزدیک شدن به شرایط جهش‌ناگهانی می‌گردد. بدین منظور، جهت بررسی عملکرد سیستم‌های اجتناب از جهش‌ناگهانی طراحی شده در بخش قبل، سه اغتشاش به صورت تابع پله در جریان جرمی ورودی به کمپرسور اعمال شده است و نمودار پاسخ دینامیکی آن در شکل‌های ۸-۱۰ ارائه شده است.

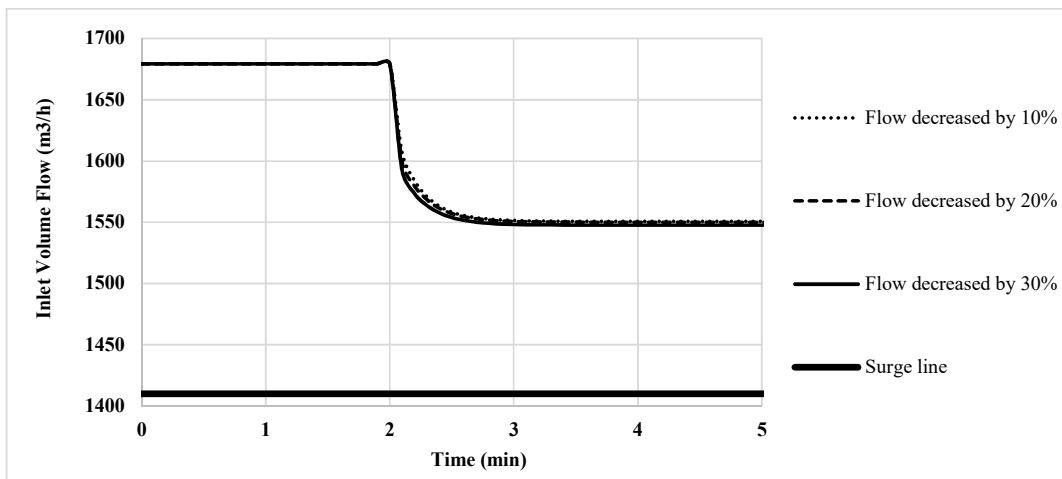
در سیستم کنترل حداقل جریان (شکل ۸)، کمپرسور در ناحیه پایدار (دبی:  $1680 \text{ m}^3/\text{h}$ ) و در فاصله ۲۰ درصد تا خط جهش‌ناگهانی



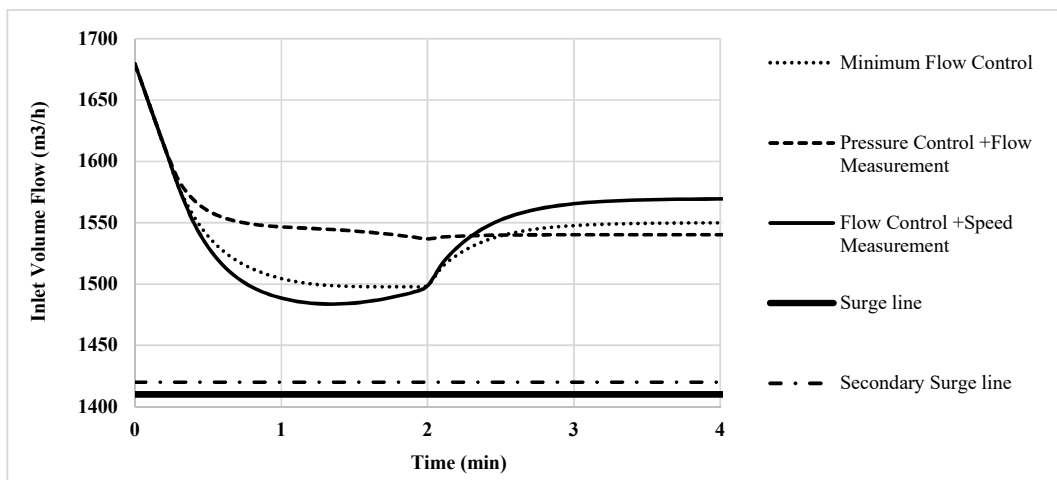
شکل ۸- پاسخ دینامیکی سیستم کنترل حداقل جریان در شرایط افت جریان



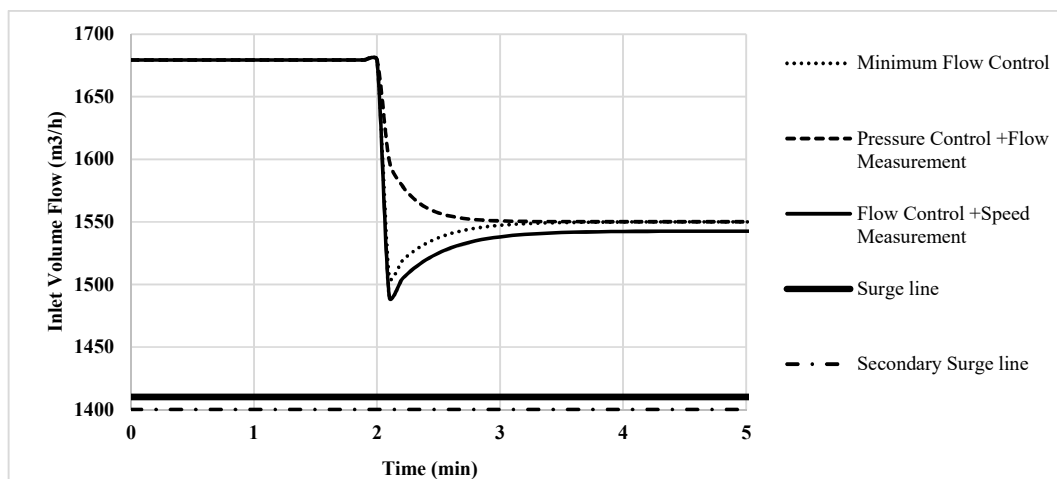
شکل ۹- پاسخ دینامیکی سیستم کنترل جریان همراه با اندازه‌گیری سرعت کمپرسور در شرایط افت جریان



شکل ۱۰- پاسخ دینامیکی سیستم کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان در شرایط افت جریان



شکل ۱۱- پاسخ دینامیکی سیستم‌های کنترل اجتناب از جهش ناگهانی در شرایط افت ۴۰٪ جریان ورودی (تابع شیب)



شکل ۱۲- پاسخ دینامیکی سیستم‌های کنترل اجتناب از جهش ناگهانی در شرایط افت ۲۰٪ جریان ورودی (تابع پله)

به کمپرسور دارد و در روش‌های کنترل حداقل جریان و کنترل جریان همراه با اندازه‌گیری سرعت، دبی حجمی ورودی به کمپرسور تا نزدیک خط جهش ناگهانی ( $1435 \text{ m}^3/\text{h}$ ) دچار افت می‌شود. با توجه به اینکه در این شرایط سرعت کمپرسور ثابت است، این دو روش عملکرد مشابهی دارند. در روش کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان، با وجود اینکه همزمان فشار ورودی و خروجی کمپرسور تغییر می‌کند، این سیستم دچار خطا نمی‌شود و دبی جریان را در مقدار مقرر کنترل می‌کند.

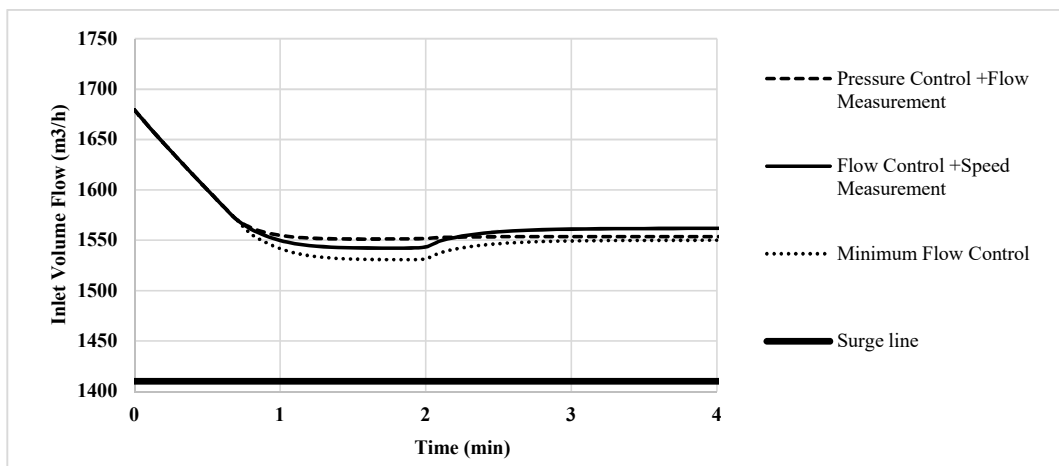
در حالی که سرعت عملیاتی کمپرسور تغییر می‌کند و فشار خروجی ثابت است. در اثر افزایش فشار ورودی که منجر به کاهش جریان حجمی می‌گردد، سرعت کمپرسور نیز کاهش می‌یابد تا فشار خروجی ثابت بماند. در این شرایط اگرچه نقطه عملیاتی کمپرسور به سمت چپ منحنی عملکرد حرکت می‌کند، اما با توجه به افت سرعت عملیاتی کمپرسور، خط جهش ناگهانی نیز به سمت چپ منتقل می‌شود. نمودار پاسخ دینامیکی سیستم‌های اجتناب از جهش ناگهانی در شرایط سرعت متغییر و افزایش فشار ورودی به میزان ۲۰ درصد در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

#### ۲-۴- افزایش فشار جریان ورودی به کمپرسور

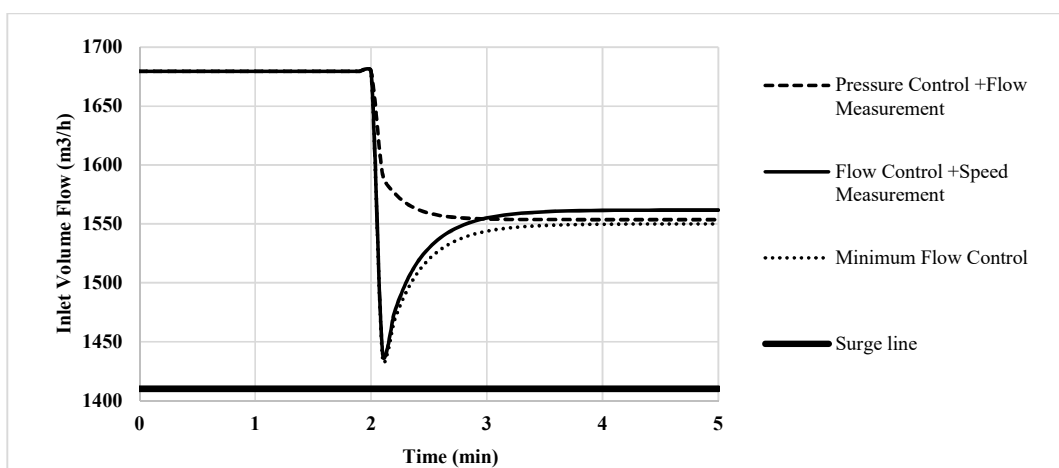
تغییرات فشار ورودی کمپرسور، یکی از عوامل ایجاد شرایط جهش ناگهانی در کمپرسورهای دینامیکی می‌باشد. در شرایطی که سرعت عملیاتی کمپرسور ثابت است، افزایش فشار جریان ورودی منجر به کاهش دبی حجمی و افزایش فشار خروجی کمپرسور می‌گردد. در این شرایط نقطه عملیاتی کمپرسور به سمت چپ منحنی عملکرد حرکت می‌کند و به ناحیه ناپایدار نزدیک می‌شود. نمودار پاسخ دینامیکی روش‌های اجتناب از جهش ناگهانی در شرایط افزایش فشار ورودی به میزان ۲۰ درصد در شکل ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

در اثر افزایش فشار ورودی کمپرسور به صورت تابع شیب (شکل ۱۳)، هر ۳ روش اجتناب از جهش ناگهانی عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند و مانع نزدیک شدن نقطه عملیاتی کمپرسور به خط جهش ناگهانی می‌گردند. در این تغییر، دبی حجمی ورودی به کمپرسور حداکثر تا  $1530 \text{ m}^3/\text{h}$  کاهش می‌یابد و به خط جهش ناگهانی نزدیک نمی‌شود.

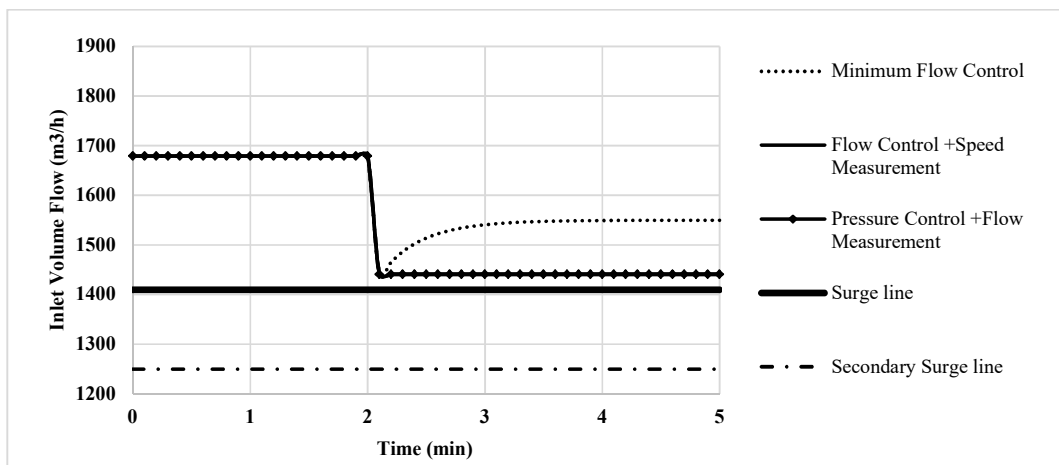
مطابق شکل ۱۴، در حالی که اغتشاش به صورت تابع پله وارد می‌شود، افزایش فشار ورودی اثر شدیدی بر روی دبی حجمی ورودی



شکل ۱۳- پاسخ دینامیکی سیستم‌های کنترل اجتناب از جهش ناگهانی در شرایط افزایش فشار ورودی و سرعت ثابت (تابع شیب)



شکل ۱۴- پاسخ دینامیکی سیستم‌های کنترل اجتناب از جهش ناگهانی در شرایط افزایش فشار ورودی و سرعت ثابت (تابع پله)



شکل ۱۵- پاسخ دینامیکی سیستم‌های کنترل اجتناب از جهش ناگهانی در شرایط افزایش فشار ورودی و سرعت متغیر (تابع پله)

عملیاتی کمپرسور قرار دارد، در نتیجه سیستم‌های کنترل جریان و کنترل فشار، در این حالت فعال نشده است. اما در سیستم کنترل حداقل جریان، با توجه به اینکه مقدار مقرر کنترل‌کننده ( $1550 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ثابت می‌باشد و مستقل از شرایط عملیاتی ورودی به کمپرسور است. لذا

همانطور که در نمودار پاسخ دینامیکی شکل ۱۵ مشخص است، در اثر افزایش فشار ورودی، دبی حجمی جریان ورودی به کمپرسور نیز افت می‌کند. اما با توجه اینکه موقعیت خط جهش ناگهانی نیز تغییر کرده است و در شرایط عملیاتی جدید در فاصله ۱۵ درصد تا نقطه



## ۷- نتیجه گیری

مطابق نتایج، در صورتی که افت دبی حجمی ورودی به کمپرسور منجر به عبور نقطه عملیاتی کمپرسور از خط اجتناب از جهش ناگهانی شود، سیستم کنترل جهش ناگهانی فعال خواهد شد. در این شرایط چنانچه اغتشاش وارد شده به صورت تابع پله باشد، دبی جریان افت زیادی خواهد کرد و خطر بروز ناپایداری جهش ناگهانی وجود خواهد داشت. لیکن در صورتی که اغتشاش به صورت تابع شیب وارد شود، سیستم کنترل جهش ناگهانی مانع افت جریان حجمی ورودی به کمپرسور می‌گردد.

در بین سه روش پیشنهادی اجتناب از جهش ناگهانی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت، با وجود اینکه روش کنترل فشار همراه با اندازه‌گیری جریان، عملکرد بهتری در شرایط فعلی دارد. اما به دلیل اینکه این سیستم در صورت تغییر شرایط عملیاتی ورودی به کمپرسور از جمله جرم مولکولی، دچار خطا در تنظیم مقدار مقرر کنترل‌کننده می‌شود و نمی‌تواند نقطه عملیاتی کمپرسور را در فاصله مشخص شده تا خط جهش ناگهانی حفظ کند، در نتیجه برای جلوگیری از احتمال بروز شرایط جهش ناگهانی، این سیستم پیشنهاد نمی‌شود.

اگرچه سیستم کنترل حداقل جریان، ساده‌ترین روش اجتناب از جهش ناگهانی می‌باشد و به تجهیزات کمتری نیاز دارد. اما به دلیل اینکه مقدار مقرر کنترل‌کننده در این سیستم ثابت است، لذا در صورت تغییر شرایط عملیاتی ورودی به کمپرسور، نیاز است تا مقدار مقرر کنترل‌کننده مجدداً تنظیم گردد. در شرایطی که سرعت عملیاتی کمپرسور کاهش پیدا کند و فاصله از خط جهش ناگهانی بیشتر شود، فعال شدن این سیستم موجب اتلاف انرژی می‌گردد و در صورتی که سرعت کمپرسور افزایش یابد، ریسک ورود به شرایط خطرناک جهش ناگهانی در این سیستم وجود خواهد داشت.

سیستم پیشنهادی کنترل جریان همراه با اندازه‌گیری سرعت کمپرسور، نه تنها در صورت تغییر شرایط عملیاتی ورودی به کمپرسور دچار خطا نمی‌شود، بلکه حتی در مواجهه با اغتشاش وارد شده به سیستم نیز عملکردی متناسب با مقدار اغتشاش خواهد داشت. لذا در این سیستم، نقطه عملیاتی کمپرسور همواره در فاصله مشخص شده تا خط جهش ناگهانی کنترل می‌شود و در مقایسه با سیستم کنترل حداقل جریان، به دلیل برگشت مقدار کمتری از جریان، انرژی کمتری مصرف می‌گردد.

## ۸- نمادها

فرستنده جریان	FT
فرستنده سرعت کمپرسور	ST
فرستنده فشار	PR
مقدار مقرر	SP
نشانهگر کنترل‌کننده جریان	FIC
نشانهگر کنترل‌کننده فشار	PIC

در این روش، سیستم اجتناب از جهش ناگهانی فعال شده است و دبی جریان ورودی مطابق با خط جهش ناگهانی اولیه کنترل شده است. با توجه به اینکه در طی این تغییر، کمپرسور همچنان در ناحیه پایدار قرار دارد و فاصله زیادی با خط جهش ناگهانی دارد، در نتیجه فعال شدن سیستم کنترل جهش ناگهانی در این حالت، نشانگر یکی از نقاط ضعف اصلی روش کنترل حداقل جریان می‌باشد.

## ۵- اعتبار سنجی نتایج

با توجه به اینکه کمپرسور C-2102 پتروشیمی خراسان در شرایط عملیاتی واحد قرار دارد، امکان اضافه کردن اغتشاش به سیستم کمپرسور و دریافت پاسخ دینامیکی در شرایط واقعی وجود نخواهد داشت. اما با توجه به تطابق نتایج شبیه‌سازی در حالت پایا با داده‌های عملیاتی واحد در شرایط واقعی (جدول ۶)، پیش‌بینی می‌شود در حالت دینامیکی نیز این تطابق وجود داشته باشد.

## ۶- بررسی میزان صرفه‌جویی در انرژی

در اثر باز بودن شیر کنترل جهش ناگهانی، دبی جریان حجمی ورودی به کمپرسور از  $1680 \text{ m}^3/\text{h}$  تا  $1785 \text{ m}^3/\text{h}$  افزایش پیدا می‌کند و همانطور که پیش‌تر اشاره شد، توان مصرفی کمپرسور در چنین حالتی برابر با  $1279 \text{ kW}$  است.

مطابق نتایج شبیه‌سازی در شرایطی که شیر کنترل جهش ناگهانی بسته شود، کمپرسور همچنان در ناحیه پایدار قرار خواهد گرفت و در صورت افت جریان حجمی نیز سیستم کنترل اجتناب از جهش ناگهانی مانع ورود کمپرسور به ناحیه ناپایدار جهش ناگهانی می‌گردد. در اثر بستن شیر کنترل جهش ناگهانی، دبی حجمی ورودی کمپرسور به اندازه  $105 \text{ m}^3/\text{h}$  کاهش خواهد یافت که این امر منجر به افت سرعت عملیاتی کمپرسور و در نتیجه کاهش توان مصرفی به میزان  $72 \text{ kW}$  خواهد شد.

با توجه به اینکه نقطه عملیاتی کمپرسور C-2102 در فاصله  $20\%$  تا خط جهش ناگهانی قرار دارد، در نتیجه امکان افزایش فشار ورودی با هدف کاهش مصرف انرژی نیز وجود خواهد داشت.

در اثر افزایش فشار ورودی کمپرسور به مقدار  $20\%$  درصد، دبی حجمی جریان ورودی به میزان  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  افت می‌کند و نقطه عملیاتی کمپرسور نیز در فاصله  $15\%$  تا خط جهش ناگهانی قرار خواهد گرفت. در طی این تغییر انرژی مصرفی کمپرسور به اندازه  $170 \text{ kW}$  کاهش خواهد یافت و با احتساب بستن شیر کنترل، در مجموع  $242 \text{ kW}$  در مصرف انرژی کمپرسور صرفه‌جویی خواهد شد.

مطابق جدول مشخصات توربین C-2102 که توسط سازنده ارائه شده است، نسبت بخار مصرفی توربین به ازای توان تولید شده برابر با  $5/25 \text{ kg/kWh}$  می‌باشد. با احتساب  $360$  روز کاری و در نظر گرفتن قیمت تولید هر تن بخار در پتروشیمی خراسان برابر با  $275,584$  ریال، میزان هزینه صرفه‌جویی شده در طی این تغییرات در جدول ۷ برآورد شده است.

جدول ۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های عملیاتی کمپرسور C-2102 در شرایط واقعی

مشخصات	دمای ورودی	فشار ورودی	سرعت کمپرسور	دمای خروجی	فشار خروجی
داده‌های عملیاتی	۲۵°C	۱۶/۴۸ bar	۱۰۱۰۰ rpm	۱۲۸°C	۴۴/۲ bar
شبیه‌سازی	۲۵°C	۱۶/۴۸ bar	۱۰۱۱۵ rpm	۱۲۵°C	۴۴/۲ bar

جدول ۷- میزان هزینه صرفه‌جویی شده در اثر کاهش انرژی مصرفی کمپرسور C-2102

شرایط	توان مصرفی صرفه‌جویی شده	دبی جرمی بخار صرفه‌جویی شده	هزینه صرفه‌جویی شده در یک سال (ریال)
بستن شیر کنترل چپش‌ناگهانی	۷۲ kW	۳۲۶۵ ton/year	۱,۹۰۸,۱۹۵,۴۰۸
افزایش فشار	۷۲+۱۷۰= ۲۴۲ kW	۱۰۹۷۷ ton/year	۶,۴۱۳,۶۵۶,۷۸۸

## ۹- مراجع

مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۱۸۳-۱۹۱، ۱۴۰۰.

[13] Moore F. K., Greitzer E. M., A Theory of Post-Stall Transients in Axial Compression Systems: Part I: Development of Equations. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, No.1, pp. 68-76, 1986.

[14] Bassam Ahmed MA-K, Design and development of enhanced anti surge control by using smith predictor method, MSc. Thesis, University of Malaya, 2017.

[15] Botros K., Henderson J. F., Developments in Centrifugal Compressor Surge Control—A Technology Assessment. *Journal of Turbomach*, Vol. 116, No. 2, pp. 240-249, 1994.

[16] McMillan GK., *Centrifugal and Axial Compressor Control*, Pittsburgh: Instrument Society of America, 1983.

[17] Lipták B. G., *Instrument Engineers' Handbook, Volume Two: Process Control and Optimization*, 4th ed, CRC press, 2006.

[18] Rivera D. E, Morari M., Skogestad S., Internal model control: PID controller design. *Industrial & engineering chemistry process design and development*, Vol. 25, No.1, pp. 252-265, 1986.

[1] Fink D. A., Cumpsty N. A., Greitzer E. M., Surge Dynamics in a Free-Spool Centrifugal Compressor System. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 114, No.2, pp. 321-332, 1991.

[۲] رگنی لموکی ج. و اکبری ن.، مدل سازی ناپایداری های آیرودینامیکی جریان در موتورهای هوایی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۳۶۷-۳۷۱، ۱۳۹۶.

[3] De Jager B., Rotating stall and surge control: a survey, In *Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, LA, USA, 1995.

[۴] تقوی ر.، حسامی ا.، سلکی ا.، و اشجعی ب.، ارزیابی تجربی رفتار جریان در یک کمپرسور گریز از مرکز در شرایط چپش‌ناگهانی با بهره‌گیری از جریان سنج سیم داغ. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۸، ش. ۱، ص ۹۵-۱۰۳، ۱۳۹۷.

[5] Tamaki H., Experimental Study on Surge Inception in a Centrifugal Compressor. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 2, No.4, pp. 409-417, 2009.

[6] Bøhagen B., Gravdahl J. T., Active surge control of compression system using drive torque. *Automatica*, Vol. 44, No.4, pp. 1135-1140, 2008.

[7] White R. C., Kurz R., Surge avoidance for compressor systems. In *Proceedings of the 35th Turbomachinery Symposium*, Texas, A&M University, 2006.

[8] Epstein A. H., Ffowc J., Greitzer E. M., Active suppression of compressor instabilities. In *10th Aeroacoustics Conference*, Virginia, USA, 1986.

[9] Simon J. S., Valavani L., Epstein A. H., Greitzer E. M., Evaluation of Approaches to Active Compressor Surge Stabilization. *Journal of Turbomach*, Vol. 115, No.1, pp. 57-67, 1993.

[10] Pinsley J. E., Guenette G. R., Epstein A. H., Greitzer E. M., Active Stabilization of Centrifugal Compressor Surge. In *Volume 1: Turbomachinery*, 1991.

[11] Badmus O., Chowdhury S., Nett C. N., Nonlinear control of surge in axial compression systems. *Automatica*, Vol. 32, No.1, pp. 59-70, 1996.

[۱۲] شریفی ن.، تحلیل عددی معادلات مور-گرایتزر برای اجتناب از بروز ناپایداری های چپش‌ناگهانی و واماندگی گردان در کمپرسورهای محوری.