

بهبود محدوده عملکرد کمپرسورهای گریز از مرکز گازی با تغییر خط کنترل سرچ با استفاده از کنترل فعال برمبنای منطق فازی

پژمان محمدی^(۱) - مریم جدی^(۲) - فرید شیخ الاسلام^(۳) - مصطفی غیور^(۴)

(۱) کارشناسی ارشد - شرکت گاز استان اصفهان

(۲) کارشناس ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امین فولادشهر اصفهان

(۳) دانشیار - دانشکده برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۴) دانشیار - دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۰

خلاصه: در این مقاله، نتایج جدیدی در زمینه کنترل سرچ کمپرسورهای گریز از مرکز ارائه می‌گردد. سرچ پدیده ناپایداری جریان گاز در کمپرسور است که خسارات بسیار شدیدی به تجهیزات کمپرسور وارد می‌کند. جلوگیری از پدیده سرچ امروزه یکی از مسائل مهم در صنعت نفت و گاز، به ویژه در هنگام کاهش فلو یا برگشت گاز در خطوط لوله سراسری انتقال گاز به شمار می‌رود و نشان داده می‌شود که روش کنترل فعال سرچ در مقابل روش کنترلی آنتی سرچ، دامنه پایداری را وسیع‌تر می‌کند. ایده‌ای که در این تحقیق به اجرا درآمده است، کنترل فعال سرچ بر اساس منطق فازی است. با استفاده از کنترل کننده فازی علاوه بر جلوگیری از ایجاد هرگونه ناپایداری در کمپرسور بهبود وضعیت کمپرسور و افزایش محدوده عملکرد کمپرسور نیز محقق شده است. نتایج شبیه‌سازی در خط سرچ‌های مختلف کاملاً رضایت بخش می‌باشد.

کلمات کلیدی: پایداری، سرچ، کنترل فعال سرچ، منطق فازی، کمپرسورهای گریز از مرکز.

۱- مقدمه

جریان گاز در کمپرسور برعکس خواهد شد و به داخل کمپرسور برمی‌گردد [۳].

در سالهای گذشته تحقیقات زیادی در جهت مقابله با سرچ کمپرسورها صورت گرفته است. در ابتدا روش کلاسیک آنتی سرچ یا جلوگیری از سرچ^۱ توسط وَن هِلوِیرت ارائه گردید [۴]. در این روش به منظور اجتناب از ورود کمپرسور به ناحیه ناپایدار، یک حاشیه امن قبل از خط سرچ ایجاد کرده و بدین وسیله از ورود کمپرسور به ناحیه ناپایدار جلوگیری می‌شود. اما این رویکرد بازه عملیاتی را محدود و راندمان کمپرسور را نیز کاهش می‌دهد.

بنابراین در نتیجه بروز این مشکلات کنترل فعال سرچ^۵ به عنوان یک روش جایگزین و بهینه معرفی گردید [۵]. به طوری که با امکان پایدار کردن عملکرد کمپرسور در آن سوی خط سرچ شرایط کاملاً مناسب‌تری را در کنترل سرچ کمپرسورها به وجود آورد. در حال حاضر تکنیک آنتی سرچ بر مبنای کنترل کننده‌های منطقی یا سیستم‌های

از کمپرسورهای گریز از مرکز غالباً برای انتقال گازها (نظیر خطوط انتقال گاز سراسری)، افزایش فشار گاز جهت انجام واکنش شیمیایی و تولید فراورده‌های پتروشیمی استفاده می‌شود [۱]. اگر کمپرسور در جریانی پایین‌تر از محدوده معین که خط سرچ^۱ نامیده می‌شود کار کند، کمپرسور به یک عملکرد ناپایدار می‌رسد که سرچ نامیده می‌شود.

این پدیده هم در کمپرسورهای گریز از مرکز و هم کمپرسورهای محوری رخ می‌دهد. سرچ به صورت یک سیکل نوسانی محدود است که با نمودار دبی جریان^۲ بر حسب فشار^۳ توصیف می‌شود. این نوسانات بعد از وقوع سرچ بر روی سرعت چرخش کمپرسور تاثیر گذاشته و به شکل قابل ملاحظه‌ای کارایی و عملکرد آن را کاهش می‌دهد و منجر به آسیب جدی به یاتاقانها و در نهایت ایجاد ارتعاشات شدید در کمپرسور می‌گردد [۲]. به عبارت دیگر هنگام بروز موارد فوق، جهت

پارامترهای مورد استفاده در مدل دینامیکی جهت شبیه سازی به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

(بدون بعد) دبی جریان گاز: Φ

(بدون بعد) تغییرات فشار: Ψ

مشخصه شیر تراشل: $\Phi_T(\Psi_p)$

مشخصه شیر کنترل: $\Phi_{cv}(\Psi_p)$

سرعت روتور کمپرسور: U

$as = 340$ m/s = سرعت صوت

(بدون بعد) $13/33 =$ طول موثر مسیر جریان کمپرسور و مجراها: l_c

$A_c = 0/01$ m² = سطح مقطع فلودر کمپرسور

$L_c = 3$ m = طول کمپرسور و نازل ها

بهره تراشل: K_T

$Vp = 1/5$ m³ = حجم مخزن

زمان واقعی: t

زمان متغیر (بدون بعد) $\xi = Ut/R$

پارامتر B-گرایتزر: $B = \frac{U}{2as} \sqrt{\frac{Vp}{AcLc}}$

حال بر اساس مدل گرایتزر^۹ [۹] و معادلات دینامیکی سیستم ارائه شده در [۱۰] معادلات زیر را توصیف می کنیم.

$$\frac{d\phi_c(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{l_c} (\psi_c(\phi_c) - \psi_p(\xi)) \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_p(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{4\beta^2 l_c} (\phi_c(\xi) - \phi_T(\psi_p)) \quad (2)$$

معادلات ذیل طبق مدل ویلمز و بدون بعد در نظر گرفته شده است.

$$\frac{d\phi_c(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{l_c} (\psi_c(\phi_c) - \psi_p(\xi)) \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_p(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{4\beta^2 l_c} (\phi_c(\xi) - \phi_T(\psi_p) - \phi_{cv}(\psi_p)) \quad (4)$$

توصیف دو شیر کنترل و شیر تراشل به ترتیب به صورت زیر می باشد.

$$K_T = C_T U_T > 0 \quad \text{و} \quad \phi_T(\psi_p) = K_T \sqrt{\psi_p} \quad (5)$$

$$K_{cv} = C_{cv} U_{cv} > 0 \quad \text{و} \quad \phi_{cv}(\psi_p) = K_{cv} \sqrt{\psi_p} \quad (6)$$

U_T و U_{cv} مقدار ظرفیت اندازه گیری از شیر کاملاً باز و C_{cv} و C_T یک نسبت، از مقدار باز شدن شیر است، به طوری که این مقدار بین صفر (کاملاً بسته) و یک (کاملاً باز) می باشد. رابطه بین ψ_c و ψ_p یک رابطه کاملاً غیر خطی است و به عنوان یک رابطه شاخص در عملکرد کمپرسور شناخته می شود که به صورت معادله مکعبی زیر توصیف می گردد.

$$\psi_c(\phi_c) = \psi_{c0} + H \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\phi_c}{W} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\phi_c}{W} - 1 \right)^3 \right] \quad (7)$$

که در آن پارامترهای ψ_{c0} و H و W مقادیر ثابت بوده و از منحنی کمپرسور به دست می آیند [۱۱].

برای کنترل سرچ از سیگنال جریان گاز به عنوان یک سیگنال برگشتی از کنترل کننده استفاده شده است که با کاهش فلو شیر کنترلی فعال

DCS^۶ در ایستگاههای تقویت فشار گاز هنوز هم مورد استفاده قرار می گیرد و البته همه ی محدودیت های فوق الذکر را نیز دارا می باشد.

اولین بار ایشستین و همکارانش استفاده از کنترل فعال را برای پایدارسازی سیستم تراکمی کمپرسور تحت ناپایداریهای آیرودینامیک مطرح نمودند [۵]. از آن پس کنترل فعال کمپرسورها در نواحی ناپایدار جایگاه ویژه ای پیدا کرد [۶،۷].

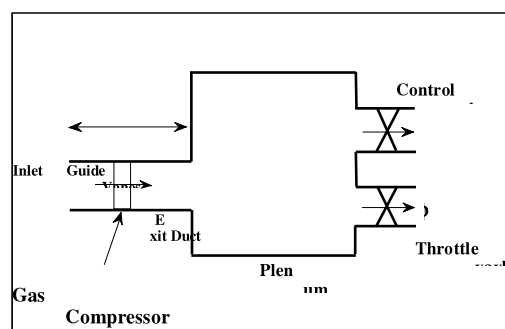
به عبارت دیگر، مسئله مهم در کنترل فعال سرچ در کمپرسورهای گریز از مرکز مسئله تغییر دینامیک سیستم در هنگام عبور از ناحیه پایدار به ناپایدار و بالعکس می باشد. ماهیت غیرخطی رفتار کمپرسور برای کارکرد پایدار آن در حوالی ناپایدار، استفاده از روش های غیرخطی را اجتناب ناپذیر نموده است.

بنابراین مسئله ی غیرخطی بودن عملکرد کمپرسور، یکی از مسائل مهم در زمینه ی کنترل فعال سرچ می باشد. این مهم با پایدار کردن قسمتی از منطقه ناپایدار کمپرسور اتفاق می افتد. در حال حاضر کنترل فعال به یک موضوع تحقیقی بسیار مهم تبدیل شده است. به طوری که همه تحقیقات صورت گرفته تا به امروز در بحث جلوگیری از سرچ بر پایه این ایده است.

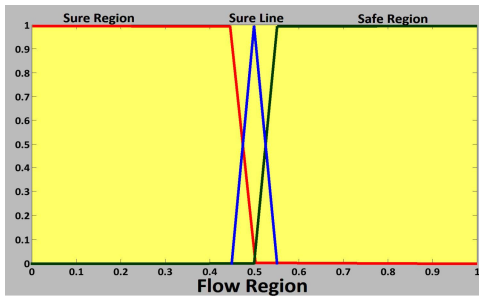
با ارائه نظریه فازی در سال ۱۹۶۵ توسط پروفیسورزاده، استفاده از این نظریه جهت سیستم های کنترلی که به نوعی دچار تغییرات و عدم قطعیت می باشند کاربرد فراوانی پیدا نمود. یکی از مزایای مهم استفاده از کنترل کننده های فازی برای جلوگیری از سرچ کمپرسورها طراحی ساده کنترل کننده های غیرخطی بر اساس منطق فازی در جهت بهبود عملکرد آنهاست. لازم به ذکر است کنترل کننده فازی به صورت موفقیت آمیزی در صنایع دیگر مورد استفاده قرار گرفته اند.

۲- مدل دینامیکی کمپرسور گاز

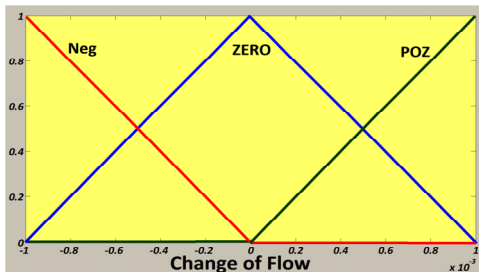
مدل ارائه شده برای یک کمپرسور گریز از مرکز شامل یک کمپرسور گاز، مخزن فشار و یک شیر تراشل^۷ و مجراهای رابط می باشد. با کمی تغییرات، مدل مذکور توسط ویلمز [۸] با قرار دادن یک شیر کنترلی^۸ به عنوان یک عامل مؤثر در کنترل سرچ مطابق شکل (۱) مورد بررسی و تأیید قرار گرفت.



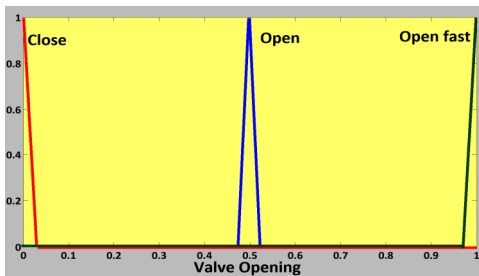
شکل (۱): مدل یک کمپرسور گریز از مرکز با اضافه کردن یک شیر کنترلی
Fig. 1: The compression system with an additional control valve



شکل (۳): توابع عضویت ناحیه فلو در 3 منطقه
Fig. 3: Degree of membership of the flow regions



شکل (۴): توابع عضویت تغییرات فلو روی خط سرج
Fig. 4: Degree of membership of the change of flow on the surge line



شکل (۵): توابع عضویت شیر کنترل در خروجی کنترل کننده فازی
Fig. 5: Degree of membership of the valve opening

Change of Flow	Flow Region		
	Surge Region	Surge Line	Safe Region
POZ	Close	Close	Close
ZERO	Close	Close	Close
NEG	Open Fast	Open	Close

شکل (۶): ۹ قاعده فازی کنترل کننده
Fig. 6: Fuzzy controller rules

۲-۳- قوانین فازی

در شکل (۷) یک سیکل نوسانی از سرج به همراه نمودار مشخصه کمپرسور ارائه شده است. فلو نیز به صورت رفت و برگشتی طبق نمودار ارائه شده تغییر می کند.

می شود. در نقطه کار مطلوب شیر کنترلی بسته است و فقط هنگامی که از مقدار نقطه تعادل مطلوب خارج شد، شیر کنترلی به صورت درصدی باز می شود.

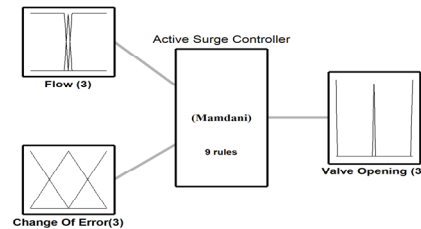
۳- طراحی کنترل کننده فازی

به طور کلی جهت تحلیل و بررسی سیستم های غیرخطی می بایست از کنترل کننده های غیرخطی استفاده نمود که در این مطالعه، از یک کنترل کننده فازی استفاده شده است. انگیزه اصلی که در انتخاب این کنترل کننده وجود دارد امکان طراحی و پیاده سازی آسان کنترل کننده های غیرخطی بر اساس الگوی منطق فازی است.

در این مقاله، با توجه به دینامیک غیرخطی کمپرسور و به منظور پایدارسازی سرج در این سیستم از یک مدل فازی معروف تحت عنوان مدل فازی ممدانی استفاده شده است [۱۲]. در این روش، کنترل کننده سیستم غیر خطی با استفاده از تعدادی دستور اگر- آنگاه فازی و بر اساس رابطه خطی بین ورودی و خروجی، مدل سازی می شود.

۳-۱- ساختار کنترل کننده

ساختار کنترل کننده شامل دو ورودی و یک خروجی است که در شکل (۲) نشان داده شده است.



Active Surge Controller: 2 inputs, 1 outputs, 9 rules

شکل (۲): ساختار کلی کنترل کننده فازی

Fig. 2: General structure of the fuzzy controller

یکی از ورودی ها، ناحیه فلو را در سه منطقه امن، خطر و خط سرج مشخص می کند، شکل (۳). ورودی دیگر تغییرات فلو را بر روی خط سرج نشان می دهد شکل (۴).

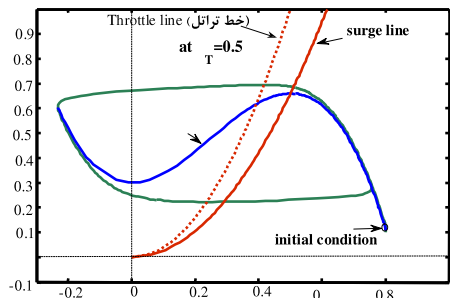
خروجی کنترل کننده سیگنالی است که مقدار باز یا بسته شدن شیر کنترلی را به میزانی که جهت پایداری سیستم نیاز است تعیین می کند (شکل (۵)).

ناحیه عملکرد کمپرسور به صورت بدون بعد در بازه ای بین صفر تا یک در نظر گرفته شده و نتایج شبیه سازی به گونه ایست که حساسیت بالای کنترل کننده نسبت به تغییرات فلو را نشان می دهد. لذا جهت عملکرد مناسب کنترل کننده، محدوده تغییرات فلو در بازه ای بین $0/001 -$ تا $0/001 +$ در نظر گرفته می شود. این محدوده بسیار کوچک، در شرایطی برای کنترل کننده منظور شده که بتواند ماکزیمم پایداری لازم را بر روی سیستم ایجاد کند. در شکل (۶) قواعد فازی کنترل کننده به صورت کامل توصیف شده است.

۴-۱- شبیه سازی حلقه باز

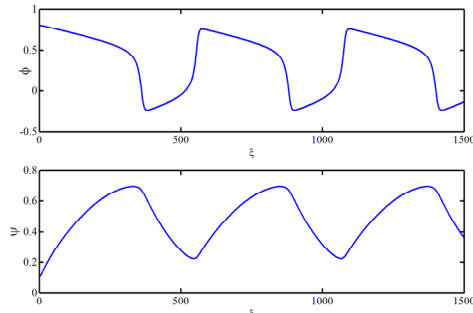
جهت ارائه و نمایش رفتار سیستم بدون کنترل کننده در منطقه ناپایدار کمپرسور، بهره شیرتراتل ($K_T = C_T V_T$) با مقدار 0.5 منظور گردیده است. (که این مقدار معادل $\phi = 0.3945$ می باشد). شرایط اولیه دبی جریان و نوسانات فشار به ترتیب به مقدار 0.8 و 0.1 لحاظ شده است.

در این تحلیل به علت عدم وجود کنترل کننده شیر کنترلی در تمام شبیه سازی بسته می ماند. ($C_{CV} = 0$) و در نهایت همان طور که انتظار می رفت، کمپرسور وارد مرحله سرچ می شود. در شکل (۹) سیکل سرچ ایجاد شده در سیستم در نمودار عملکرد کمپرسور نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی به صورت بدون بعد برحسب زمان ζ در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۹): ایجاد سرچ در کمپرسور بدون کنترل کننده

Fig. 9: Surge cycle in compressor map view without controller



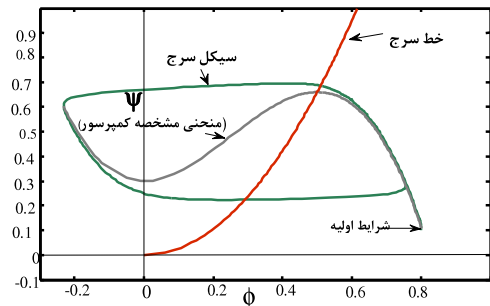
شکل (۱۰): وضعیت فلو و فشار در اثر ایجاد سرچ برحسب ζ به صورت بدون بعد

Fig. 10: Mass flow and pressure fluctuation against nondimensional time ζ

۴-۲- شبیه سازی حلقه بسته

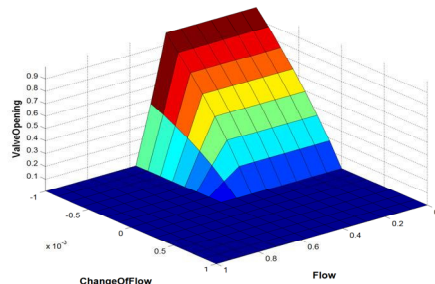
حال اگر کنترل کننده فازی را به سیستم فشار اضافه کنیم نتایج به صورت شکل (۱۱) به دست می آید. سیستم با مقدار بهره شیر تراتل $K_T = 0.5$ ($\phi = 0.3945$) در نظر گرفته شده و پس از سوئیچ شدن کنترل کننده در نقطه کار که متناسب با مقدار K_T می باشد، موقعیت کنترل کننده در جهت پایداری سیستم در نقطه کار جدید یعنی $\psi = 0.6187$ و $\phi = 0.3945$ تغییر و تثبیت می شود.

خط سرچ به صورت یک سهمی در شکل منطقه پایدار (سهم راست سهمی) را از منطقه ناپایدار (سمت چپ سهمی) جدا می کند. در منطقه پایدار، نیازی به فعالیت کنترل کننده نمی باشد. اما از طرف دیگر اگر به نقطه تعادل (محل برخورد نمودار سرچ با ماکزیمم نقطه نمودار مشخصه کمپرسور) نزدیک شویم، کنترل کننده جهت جلوگیری از ایجاد سرچ شروع به فعالیت می کند. با فعال شدن کنترل کننده شیر کنترلی به مقدار لازم باز شده و مقداری از گاز را جهت ایجاد یک فلوی مناسب به ورودی کمپرسور انتقال می دهد. با این کار هم از ایجاد سرچ جلوگیری شده است و هم فلوی مطلوب با توجه به نقطه تعادل تثبیت می شود. با توجه به شکل (۷) اگر مقدار $\phi < 0.4955$ و تغییرات فلو نیز منفی باشد، کنترل کننده شروع به کار خواهد کرد. اگر $\phi > 0.4955$ باشد، کمپرسور ذاتاً پایدار است و شیر کنترلی نیز کاملاً بسته می باشد. همچنین هرگاه تغییرات فلو مثبت باشد شیر کنترلی بسته خواهد ماند و کمپرسور به کنترلی جهت جلوگیری از بروز پدیده سرچ نیاز ندارد. نکته ای که در شکل (۸) کاملاً مشهود می باشد ماکزیمم سطح کنترلی می باشد که برابر مقدار عددی یک است. به عبارت دیگر شیر کنترلی کاملاً باز است و کمترین میزان سطح کنترل نیز برابر مقدار عددی صفر است و به این معنی است که شیر کنترلی کاملاً بسته است.



شکل (۷): سیکل سرچ و منحنی مشخصه کمپرسور

Fig. 7: Surge cycle in compressor map view

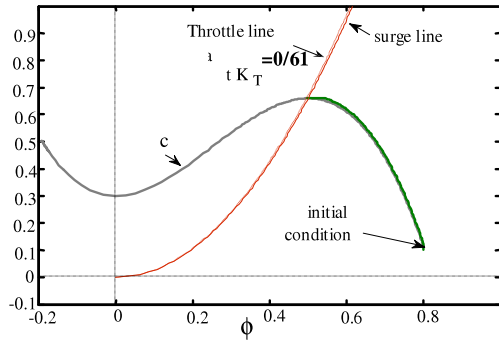


شکل (۸): سطح کنترل در کنترل کننده فازی

Fig. 8: Control surface for the fuzzy control

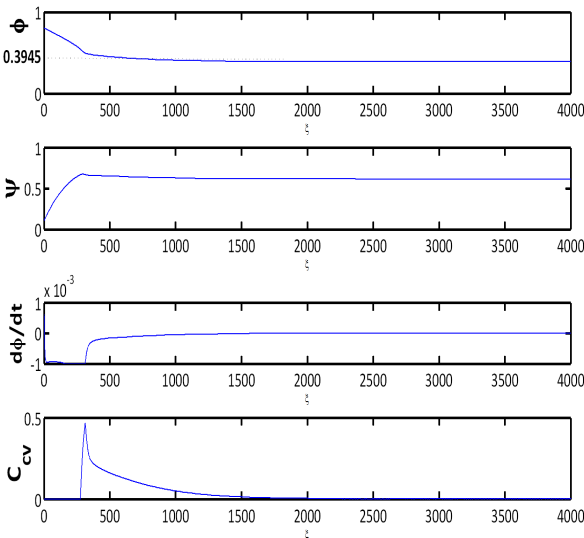
۴- نتایج شبیه سازی

کلیه شبیه سازیها با استفاده از نرم افزار Matlab صورت گرفته و پارامترهای مورد استفاده جهت شبیه سازیهای کنترل کننده در این بخش مطابق پارامترهای مدل گراوداهل^{۱۱} می باشد.



شکل (۱۳): عملکرد سیستم با استفاده از یک کنترل کننده تناسبی
Fig. 13: Performance of a proportional controller

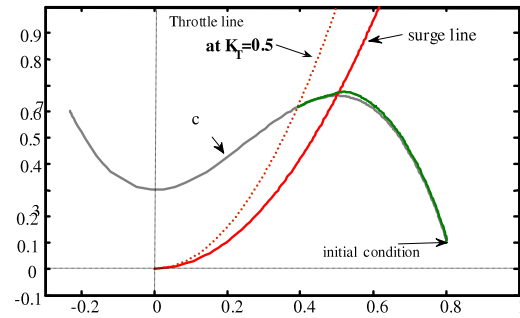
در طراحی این کنترل کننده فازی به صورت مشخص سعی شده است مقادیری که نقاط تعادل کوچکتر از نقطه تعادل خط سرج می‌باشند، مورد بررسی قرارگیرد. به طوری که نتایج این مساله در شکل (۱۴) برای مقادیر $K_T = 0.4$ یا $K_T = 0.2907$ تا حد $K_T = 0.2$ یا $(\phi = 0.1198)$ ارائه شده است. نکته‌ای که همچنین از کنترل سرج فعال با استفاده از منطق فازی مشاهده می‌شود، این است که مقدار خروجی از 1 فراتر نمی‌رود و با ایجاد پایداری در سیستم به سمت مقدار صفر میل می‌کند.



شکل (۱۴): عملکرد کنترل کننده برای مقدار K_T های کوچکتر 0.616
Fig. 14: The controller's performance at smaller values of the throttle gain ($K_T < 0.616$)

۵- نتیجه گیری

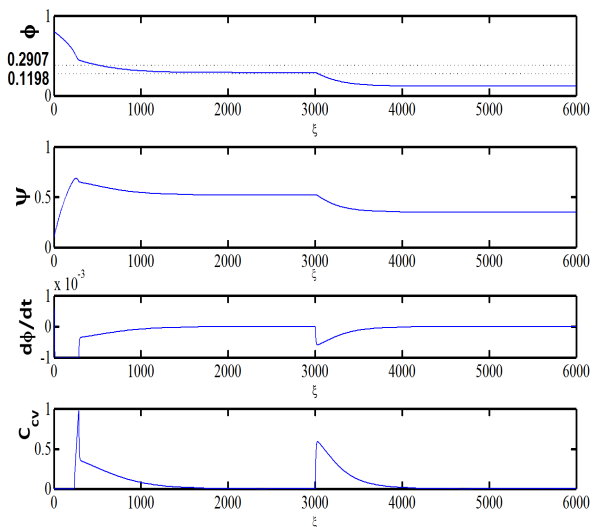
در این مقاله با استفاده از منطق فازی روشی جهت کنترل پدیده سرج در کمپرسورهای گریز از مرکز ارائه شد. هدف اصلی تغییر خط کنترل سرج جهت افزایش راندمان و افزایش محدوده عملکرد کمپرسور گاز بوده و انگیزه از طراحی این کنترل کننده بر پایه منطق فازی، فقدان استفاده از کنترل کننده‌های هوشمند در این زمینه بوده است.



شکل (۱۱): پایداری سیستم با استفاده از کنترل کننده فازی
Fig. 11: The stabilized system with fuzzy controller

با نظر به اینکه سیستم در سمت چپ خط سرج قرار گرفته است. با فرض $U_{CV} = 0.45$ کنترل فعال به گونه‌ای است که در شکل (۱۲) شیرکنترلی به تدریج بسته می‌شود. در شکل (۱۳) نقطه کاری که ماکزیمم پایداری را برای سیستم ایجاد می‌کند، توسط یک کنترل کننده تناسبی نشان داده شده است. البته در همین مدل کمپرسور، نقطه کار پایدار ساز سیستم معادل $K_T = 0.61$ یا $(\phi = 0.4872)$ است. لذا هر K_T ای کمتر از 0/61 سیستم را به سرج خواهد برد.

به عبارت دیگر اصلاً مهم نیست که مقدار بهره چقدر باشد زیرا کمپرسور نمی‌تواند با یک کنترل کننده تناسبی و ایجاد یک نقطه تعادل در سمت چپ خط سرج، باعث پایداری سیستم گردد. بررسی این مساله در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. از مقایسه شکل (۱۱) و (۱۳) می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار محدوده پایدار کنترل کننده فازی خیلی بیشتر از یک کنترل کننده تناسبی است. برای کسب اطلاعات بیشتر راجع به کنترل سرج با استفاده از کنترل کننده‌های تناسبی به [۱۳] مراجعه نمایید.



شکل (۱۲): نمودار وضعیت فلو، فشار، تغییرات فلو و شیر کنترل
Fig. 12: The relationship between the controller output and inputs (stabilized system)

- کنترل کننده فازی، با استفاده از مدل ممدانی طراحی شده و شامل 9 پی نوشت:
- 1-Surge Line
 - 2- Mass Flow
 - 3- Pressure Rise
 - 4- Surge Avoidance
 - 5- Active Surge Control
 - 6- Distributed Control System
 - 7- Control Valve
 - 8- Greitzer
 - 9- Throttle Valve
 - 10- Gravidahl

قاعده می باشد که دارای دو ورودی و یک خروجی است که پس از شبیه سازی، اهداف مورد نظر به بهترین شکل از نتایج شبیه سازی به دست آمد و کنترل کننده پیشنهادی توانایی پایداری سیستم را در یک محدوده گسترده و در نقاط تعادل مختلف حتی در بخشی از محدوده ناپایدار (سمت چپ خط سرج) به وجود آورده است.

سپاس گزاری

در پایان لازم می دانیم از شرکت گاز استان اصفهان به جهت فراهم آوردن امکانات تحقیق، بازدید و حمایت مالی از این پروژه تشکر و قدردانی ویژه نماییم.

مراجع

- [1] H.P. Bloch, "A practical guide to compressor technology", New York: McGraw-Hill, 1995.
- [2] D.A. Fink, N.A. Cumpsty, E.M. Greitzer, "Surge dynamics in a free-spool centrifugal compressor system", Jou. of Tur. Trans. of the Asme., pp.321-332, 1992.
- [3] K.H. Lüdtke, "Process centrifugal compressors", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- [4] J.V. Helvoirt, "Centrifugal compressor surge, modeling and identification for control", Ph.D Disse., Tech. Univ. of Eindhoven, 2007.
- [5] A.H. Epstein, J.E.F. Williams, E.M. Greitzer, "Active suppression of aerodynamic instabilities in turbomachines", Jou. of Propu. and Pow., Vol.5, pp.204-211, 1989.
- [6] A.J. Strazisar, M.M. Bright, S. Throp, D.E. Culley, K.L. Suder, "Compressor stall control through end-wall recirculation", ASME Turbo Expo, Vol.5 A, 2004.
- [7] B.A. Bohagen, J.T. Gravidahl, "Active surge control of compression system using drive torque", Automatica, 44(4), pp.1135-1140, 2008.
- [8] F. Willems, "Mechanical engineering", Eindhoven University of Technology, 2000.
- [9] F.K. Mooreand, E.M. Greitzer, "A theory of post-stall transients in axial-compression systems", Development of Equations, Jou. of Engi. for Gas Turb. and Pow.-Trans. of the Asme., 108, pp.68-76, 1986.
- [10] S.H.T. Al-Mavali, J. Zhang, "A fuzzy approach to active surge control of centrifugal compressors", Proc. Int. Conf. Con., Glasgow, Scotland, UK, 2006.
- [11] F. Willems, W.P.M.H. Heemels, B. de Jager, A.A. Stoorvogel, "Positive feedback stabilization of centrifugal compressor surge", Automatica, No.38, pp.311-318, 2002.
- [12] E.H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", Proc. of the Ins. of Elec. Engi. London, No.121, pp.1585-1588.
- [13] J.T. Gravidahl, "Department of engineering cybernetics", Norwegian Uni. of Sie. and Tech., Trondheim, 1998.
- [14] J.S. SimonL, L. Valavani, A.H. Epstein, E.M. Greitzer, "Evaluation of approaches to active compressor surge stabilization", Jou. of Turb. Trans. of the Asme., No.115, pp.57-67, 1993.