

آنالیز حساسیت و عدم قطعیت ضریب تصحیح دانسیته گاز طبیعی بر اساس مدل سازی استاندارد AGA8 نسبت به پارامترهای عملیاتی و محیطی

فاطمه بشی پور^{۱*} و پوریا قادریان^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۹۷/۰۵/۲۲ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۰۱	محاسبه دقیق شدت جریان گاز طبیعی، عامل بسیار مؤثری در بخش اقتصادی، کنترل شرایط عملیاتی، نگهداری تجهیزات و... در صنایع گاز کشورهای وارد و صادرکننده آن است. امروزه در صنایع مرتبط با گاز کشور، برآورد شدت جریان گاز طبیعی به کمک محاسبه ضریب تصحیح دانسیته آن (NG-DCF) با استفاده از معادلات حالت به عنوان روشی مقرون به صرفه انجام می پذیرد. دسترسی همیشگی به اطلاعات ورودی مورد نیاز معادلات حالت، به ویژه ترکیب درصد کامل اجزای گاز، نیاز به هزینه های گزافی دارد؛ از این رو گاهی از اطلاعات تخمینی به عنوان عوامل ورودی مدل استفاده می شود. بنابراین با توجه به امکان تأثیرپذیری دقت محاسبه NG-DCF از این عوامل، شناخت و تحلیل روند اثرگذاری هریک از آنها بر خروجی مدل، بررسی میزان حساسیت پذیری خروجی مدل از داده های ورودی و نیز تعیین عدم قطعیت خروجی مدل، ضرورت دارد. در این مطالعه ابتدا NG-DCF توسط معادله حالت استاندارد AGA8-DCM به عنوان روشی دقیق، مدل شده، سپس برای محاسبه آنالیز حساسیت و عدم قطعیت NG-DCF از روش های مختلف تحلیلی و عددی استفاده شده است تا از نتایج حاصل برای احتراز از خطای تخمین آن سود جست. نتایج آنالیزهای حساسیت نشان داد که پس از فشار عملیاتی نسبی و دمای عملیاتی، ترکیب درصد متان، اتان و نیتروژن گاز طبیعی، مؤثرترین عوامل خطی بر NG-DCF است. همچنین تغییرات فشار محیط که غالباً مورد اغماض قرار می گیرد، به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر NG-DCF شناخته شد.
واژگان کلیدی: ضریب تصحیح دانسیته، گاز طبیعی، مدل سازی، استاندارد AGA8-DCM، آنالیز حساسیت، عدم قطعیت.	

۱- مقدمه

کم هزینه ترین روش انتقال این سوخت به نقاط مصرف، استفاده از خطوط لوله انتقال است [۱]. تغییر شرایط عملیاتی و محیطی حین انتقال گاز طبیعی، منابع متنوع استخراج گاز که موجب اختلاف در درصد ترکیبات اجزای آن می شود و نیز امکان اختلاط گاز در شبکه سراسری خطوط لوله منجر به تغییر خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی می شوند. از سوی دیگر اندازه گیری و محاسبه دقیق

گاز طبیعی به عنوان مخلوطی از گازهای هیدروکربنی و غیرهیدروکربنی یکی از مهم ترین منابع انرژی پاک و سازگار با محیط زیست در جهان محسوب می شود. با توجه به ذخایر عظیم گاز طبیعی در ایران، تقاضا برای استفاده از آن در بخش های خانگی، صنعتی، نیروگاهی، حمل و نقل و نیز صادرات آن همواره رو به افزایش است. ساده ترین و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: f.bashipour@razi.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی
۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه رازی

خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی از نظر اقتصادی بسیار مهم است؛ زیرا وجود یک خطای ناچیز در این امر منجر به ایجاد خطای حائز اهمیتی در مقیاس بالای میزان گاز خواهد شد. چنین رخدادی نه تنها زیانهای اقتصادی، بلکه ممکن است کنترل نامطلوب شرایط جریان گازی را در پی داشته باشد.

به طور کلی محاسبه خواص گاز طبیعی، بسیار سخت تر از خواص مربوط به فاز مایع است و نیاز به تجهیزات گران قیمت و نیروهای کاملاً متخصص دارد. از این رو برای ارزیابی خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، از معادلات حالت استفاده می شود. به معادلات حالت دقیق و پذیرفته شده برای محاسبات مربوط به گاز طبیعی، معادلات حالت استاندارد گفته می شود. به کمک معادلات حالت استاندارد و با استفاده از اطلاعاتی همچون دمای عملیاتی، فشار عملیاتی، ترکیب درصد اجزای گاز طبیعی، شرایط جوی محل اندازه گیری و در پاره ای موارد، خواصی از گاز در شرایط عملیاتی مینا، خواص فیزیکی و ترمودینامیکی گاز طبیعی قابل محاسبه هستند. تاکنون معادلات حالت بسیاری معرفی و ارائه شده اند؛ اما هریک از آن ها محدود به کارگیری، اطلاعات ورودی و دقت خاص خود را دارد؛ به طوری که گاهی از دقت کافی برخوردار نبوده، یا در محدوده شرایط عملیاتی، قابلیت استفاده را نخواهد داشت. از جمله معادلات حالت ارائه شده می توان به مطالعاتی که چارت معروف کاتز و استندینگ [۲] را مدل کردند، اشاره داشت [۳-۷]. امروزه معادلات حالت استاندارد AGA 19-NX و AGA 8-DCM که به ترتیب در سال های ۱۹۶۲ و ۱۹۹۲ ارائه شده اند [۸ و ۹] از جمله معادلات حالت پرکاربرد در واحدهایی از صنایع نفت و گاز، مانند واحد اندازه گیری، تجهیزات ابزار دقیق شامل فلومترها (جریان سنجها)، فلوکامپیوترها و همچنین تصحیح کننده های جریان گاز طبیعی هستند. از دیگر معادلات حالت، معادله حالت درجه سوم سه پارامتری هستند که از ترکیب معادلات $PR-RK^1$ برای پیش بینی دقیق تر خواص ترمودینامیکی مخلوط گاز طبیعی مصنوعی سبک توسط سیسموندی و همکارش [۱۰] ارائه شد که دقت کمتری نسبت به معادله حالت $AGA8-DCM^2$ از خود نشان می دهد. هو و همکارانش [۱۱] به بررسی رفتار

فازی و پارامترهای فیزیکی گاز طبیعی مخلوط شده با دی اکسید کربن پرداختند. ورزنده و همکارانش [۱۲] معادلات حالت $GERG^3$ و $SBWR^4$ را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند هر دو مدل، نتایج رضایت بخشی را برای پیش بینی دانسیته گاز طبیعی ارائه می دهند، اگرچه معادله حالت $GERG$ محدوده وسیع تری از دما و فشار را پوشش می دهد. اژوبایک و همکارانش نیز در مطالعه ای به بررسی آثار متغیرهای عملیاتی دما و فشار بر دانسیته گاز طبیعی پرداختند [۱۳]. احمدی و همکارانش [۱۴] با محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، نظیر دانسیته و سرعت صوت که به کمک معادلات حالت $GERG$ ، $AGA8-DCM$ ، $SBWR$ و PR انجام گرفت و مقایسه نتایج حاصل با مقادیر تجربی، بالاتر بودن دقت معادلات حالت استاندارد $GERG$ و $AGA8-DCM$ نسبت به انواع دیگر به کاررفته را نشان دادند. همچنین فرزانه گرد و همکارانش [۱۵] نشان دادند تخمین ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی به کمک معادله حالت $GERG$ در تمام محدوده دما و فشار مورد مطالعه، با دقت بالاتری نسبت به به کارگیری معادله حالت $AGA8-DCM$ صورت می پذیرد. از دیگر نتایج مهم آن ها این است که در محدوده دما و فشار کاربردی، معادله حالت $GERG$ ، مقادیر ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی را بیش از معادله حالت $AGA8-DCM$ تخمین می زند؛ این بدان معناست که در فروش گاز به صورت حجمی چنانچه از معادله حالت $GERG$ استفاده شود، تخمین مقدار کمتر ضریب تصحیح دانسیته گاز طبیعی نسبت به معادله حالت $AGA8-DCM$ باعث می شود این مبادله از نظر اقتصادی به نفع مصرف کننده و به ضرر فروشنده گاز طبیعی باشد.

در حال حاضر، شرکت ملی گاز ایران غالباً از تجهیزات اندازه گیری شدت جریان گاز طبیعی بر پایه استاندارد $AGA8-DCM$ که روش بسیار دقیقی به شمار می آید، استفاده می کند که عدد نهایی آن به کمک ضریب تصحیح دانسیته، تصحیح می شود. به منظور انجام محاسبات خواص گاز بر اساس استاندارد $AGA8-DCM$ ، نیازمند اطلاعاتی از قبیل دما و فشار عملیاتی، ترکیب درصد ۲۱ جزء گاز است. از آنجا که فشار مطلق گاز به عنوان پارامتر مورد نیاز محاسبات استانداردهای مذکور به کار می رود، میزان ارتفاع یک مکان از سطح دریا (یا به عبارتی فشار محیط) نیز

خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی از نظر اقتصادی بسیار مهم است؛ زیرا وجود یک خطای ناچیز در این امر منجر به ایجاد خطای حائز اهمیتی در مقیاس بالای میزان گاز خواهد شد. چنین رخدادی نه تنها زیانهای اقتصادی، بلکه ممکن است کنترل نامطلوب شرایط جریان گازی را در پی داشته باشد.

به طور کلی محاسبه خواص گاز طبیعی، بسیار سخت تر از خواص مربوط به فاز مایع است و نیاز به تجهیزات گران قیمت و نیروهای کاملاً متخصص دارد. از این رو برای ارزیابی خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، از معادلات حالت استفاده می شود. به معادلات حالت دقیق و پذیرفته شده برای محاسبات مربوط به گاز طبیعی، معادلات حالت استاندارد گفته می شود. به کمک معادلات حالت استاندارد و با استفاده از اطلاعاتی همچون دمای عملیاتی، فشار عملیاتی، ترکیب درصد اجزای گاز طبیعی، شرایط جوی محل اندازه گیری و در پاره ای موارد، خواصی از گاز در شرایط عملیاتی مینا، خواص فیزیکی و ترمودینامیکی گاز طبیعی قابل محاسبه هستند. تاکنون معادلات حالت بسیاری معرفی و ارائه شده اند؛ اما هریک از آن ها محدود به کارگیری، اطلاعات ورودی و دقت خاص خود را دارد؛ به طوری که گاهی از دقت کافی برخوردار نبوده، یا در محدوده شرایط عملیاتی، قابلیت استفاده را نخواهد داشت. از جمله معادلات حالت ارائه شده می توان به مطالعاتی که چارت معروف کاتز و استندینگ [۲] را مدل کردند، اشاره داشت [۳-۷]. امروزه معادلات حالت استاندارد AGA 19-NX و AGA 8-DCM که به ترتیب در سال های ۱۹۶۲ و ۱۹۹۲ ارائه شده اند [۸ و ۹] از جمله معادلات حالت پرکاربرد در واحدهایی از صنایع نفت و گاز، مانند واحد اندازه گیری، تجهیزات ابزار دقیق شامل فلومترها (جریان سنجها)، فلوکامپیوترها و همچنین تصحیح کننده های جریان گاز طبیعی هستند. از دیگر معادلات حالت، معادله حالت درجه سوم سه پارامتری هستند که از ترکیب معادلات $PR-RK^1$ برای پیش بینی دقیق تر خواص ترمودینامیکی مخلوط گاز طبیعی مصنوعی سبک توسط سیسموندی و همکارش [۱۰] ارائه شد که دقت کمتری نسبت به معادله حالت $AGA8-DCM^2$ از خود نشان می دهد. هو و همکارانش [۱۱] به بررسی رفتار

³ European Gas Research Group

⁴ Soave Benedict Webb Rubin

¹ Peng-Robinson Redlich-Kwong

² American Gas Association- Detail Characterization Method

حساس‌ترین و مهم‌ترین متغیرهای ورودی شناسایی شوند. در واقع، آنالیز حساسیت، رابطه بین متغیرها و میزان تأثیر آن‌ها بر یکدیگر را مشخص کرده، پارامترهای مرتبط با متغیرهای خروجی را شناسایی و میزان تأثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر خروجی مدل را تعیین می‌کند [۱۶-۱۸]. بدیهی است با تمرکز بر پارامترهای تأثیرگذار و پیش‌بینی دقیق‌تر آن‌ها می‌توان ریسک افزایش خطای اندازه‌گیری و در پی آن، زیان‌های اقتصادی را کاهش داد. روش‌های آنالیز حساسیت بر مبنای گوناگونی طبقه‌بندی می‌شود که بر اساس یک طبقه‌بندی جامع، آن‌ها را در سه دسته ریاضی (تحلیلی)، آماری و ترسیمی تقسیم‌بندی می‌کنند. در مطالعه فری و پاتیل، به مقایسه روش‌های آنالیز حساسیت پرداخته شده است که هر یک کاربرد، مزایا و معایب خاص خود را دارند [۱۹]. در این مطالعه با توجه به مزایایی از قبیل امکان بررسی اثر متقابل پارامترهای ورودی، اعتبارسنجی روش، تشخیص اثرگذارترین پارامترها با به‌کارگیری روش آنالیز واریانس (ANOVA^۱) در روش سطح پاسخ (RSM^۲) استفاده شد. همچنین به منظور بررسی‌های بیشتر آنالیز حساسیت برای پیش‌بینی اثر هر فاکتور به طور مستقل بر مدل، روش بررسی تک‌متغیره (OFAT^۳) به کار گرفته شد. در ادامه، برای محاسبه عدم قطعیت پاسخ مدل و آنالیز حساسیت در نقطه متداول نسبت به عوامل ورودی، از روش عددی نیز استفاده به عمل آمد. در ادامه، روش‌های مذکور به طور خلاصه معرفی می‌شوند.

۲-۲- آنالیز حساسیت با به‌کارگیری ANOVA در RSM

RSM، ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید بوده، هدف آن بهینه‌سازی این پاسخ است. RSM به طور وسیعی در زمینه صنایع مختلف برای مطالعه اثرپذیری خروجی سیستم هنگام تغییر یک یا چند فاکتور استفاده می‌شود. اولین بار RSM توسط باکس و ویلسون [۲۰] ارائه شد که فرضیه اصلی در آن، استفاده از طراحی آزمایش و آنالیز رگرسیون است.

می‌تواند پارامتر اثرگذاری در گزارش محاسبات خواص گاز طبیعی، از جمله دانسیته گاز طبیعی، ضریب تصحیح دانسیته و... برای قرائت میزان مصرف باشد.

برای اندازه‌گیری هر یک از این اطلاعات ورودی، از سنسورها و روش‌های اندازه‌گیری ویژه خود استفاده می‌شود. عدم دقت کافی در اندازه‌گیری هر یک از این سنسورها، خطای روش، خطای اپراتور در اندازه‌گیری یا ورود اطلاعات با خطا توسط اپراتور می‌تواند منجر به رشد خطا در محاسبات خواص گاز توسط این معادلات شده، در پی آن منجر به ضرر و زیان‌های اقتصادی قابل توجهی برای خریدار یا فروشنده گاز طبیعی شود. از این رو با بررسی و تحلیل میزان تأثیر پارامترهای به‌کاررفته در روند محاسبات و نیز بررسی اثربخشی خطای اطلاعات ورودی این معادله حالت استاندارد بر خواص محاسبه‌شده و میزان خطای نهایی این خواص می‌توان کمک عمده‌ای به احتراز از خطا انجام داد. بنابراین پس از بررسی و تحلیل مذکور با انجام آنالیز حساسیت به‌عنوان یک روش علمی و مدون می‌توان مقدار اثر هر یک از پارامترهای ورودی را در خروجی محاسبات این معادلات حالت استاندارد، تعیین کرد.

جمع‌بندی مطالعات و معادلات حالت استاندارد ارائه‌شده نشان داد که در این میان، مطالعه و بررسی جامعی در زمینه تحلیل رفتار پارامترهای مؤثر بر خواص محاسبه‌شده گاز طبیعی به کمک مدل‌سازی معادله حالت استاندارد AGA8-DCM که در صنایع نفت و گاز بسیار پرکاربرد است و نیز آنالیز حساسیت پارامترهایی همچون دما و فشار عملیاتی نسبی، فشار محیط، ترکیب درصد اجزای سبک و سنگین و ناخالصی‌های گاز و... بر خواص مرتبط با اندازه‌گیری گاز طبیعی به‌ویژه ضریب تصحیح دانسیته، صورت نگرفته است؛ از این رو در این پژوهش به‌عنوان اهداف تحقیق دنبال می‌شوند.

۲- تئوری‌ها

۲-۱- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت روشی است که با استفاده از مدل‌سازی یک سیستم، روابط بین پارامترهای ورودی را تعیین کرده، تأثیر هر یک از این پارامترها را بر نتیجه و خروجی مدل می‌سنجد تا پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر نتیجه دارند، به‌عنوان

³ One Factor At a Time

¹ Analysis of Variance

² Response Surface Methodologies

مربعات استفاده می‌شود. در این روش کافی است حد پایین و بالا در هر فاکتور مشخص باشد. مدل‌های رویه پاسخ ارائه شده در این تحقیق توسط آزمون های تشخیص آماری عمومی، همانند F-value (تست فیشر)، P-value، ضریب تشخیص R^2 و R^2 تصحیح شده و آزمون t-value مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این آزمون‌های تشخیص بر مبنای ANOVA استوار بوده، معمولاً برای ارزیابی مناسب بودن و کیفیت برازش مدل و خطای آزمایش به کار می‌روند [۲۱-۲۴]. ANOVA ابزاری قدرتمند برای تشخیص معنی دار بودن اثرها است و به طور گسترده در تحلیل‌های آماری به کار گرفته می‌شود. در تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نکته مهم این است که مشخص شود آیا تغییرات مشاهده شده در پاسخ، ناشی از تغییرات سطوح در پارامتر های مورد نظر است یا این تغییرات صرفاً به خطاهای تصادفی انداز گیری‌ها مربوط می‌شوند [۲۵ و ۲۶]. پس از این آنالیزها چنانچه مشخص شود مدل به لحاظ آماری دارای اعتبار است، می‌توان آن را برای آنالیز و برآورد اثر سطوح مختلف متغیرها بر روی نتایج کار، مورد بررسی قرار داد.

۲-۳- آنالیز حساسیت تک‌متغیره در زمان (OFAT) [۱۶]

آنالیز حساسیت تک‌متغیره در زمان، مطالعه تأثیر تغییرات یک پارامتر (یک متغیر) بر روی مقادیر مورد انتظار در خروجی مدل است. مقدار این پارامتر (متغیر احتمالی) می‌تواند با نتایج خروجی مدل یا با یک رویداد تصادفی مرتبط باشد. برای انجام آنالیز حساسیت، ابتدا مقدار پایه همان متغیرها در ورودی مدل قرار داده شده، مقادیر مورد انتظار در خروجی محاسبه می‌شوند. وقتی آنالیز حساسیت انجام می‌گیرد، باید برای متغیرها، محدودیت‌های منطقی در نظر گرفته شود تا از اغراق آمیز شدن آن‌ها جلوگیری گردد. بنابراین برای هر متغیر یک دامنه قابل تغییر بین دو مقدار حداقل و حداکثر تعریف می‌شود. در طول محاسبات، مقادیر پایه متغیرها با مجموعه‌ای از مقادیر از کمترین تا بیشترین مقدار تعریف شده، جایگزین و برای هر کدام، مقادیر مورد انتظار در خروجی محاسبه می‌شود. در آنالیز حساسیت یک متغیره در هر بار محاسبه خروجی مدل فقط یک متغیر

در RSM از ترکیب سطوح متغیرها به عنوان ورودی و از پاسخ حاصل به عنوان خروجی سیستم استفاده می‌شود. این اطلاعات در یک تابع مناسب، مدل سازی می‌شوند تا معادله مربوط، رسم و نقطه بهینه در آن آشکار شود. در RSM معمولاً از طراحی مرکب مرکزی (CCD^۱) برای انتخاب آزمایش استفاده می‌شود. قبل از طراحی آزمایش‌ها، می‌توان سطوح انتخاب شده برای هر متغیر مستقل را کدگذاری کرد که این کدها به صورت اعداد صحیح (۰، ±۱ و ±۲...) هستند. با استفاده از واحدهای کدگذاری شده می‌توان اندازه ضرایب را با معیاری مشترک برای تعیین فاکتوری که بیشترین اثر را بر پاسخ دارد، با هم مقایسه کرد. هنگامی که از کدگذاری استفاده می‌شود، تعامد^۲ این امکان را فراهم می‌آورد که فاکتورهای مدل را به طور مستقل تخمین زد و آنالیز آسان تر شود. همچنین می‌توان فاکتورهایی از مدل را حذف کرد بدون اینکه در تخمین با مدل، مشکلی ایجاد شود. نحوه محاسبه مقدار متغیرهای مستقل در سطوح کدگذاری شده (Z_i) مطابق رابطه (۱) است:

$$Z_i = \frac{X_i - X_{i,c.p.}}{\Delta X} \quad (1)$$

که X_i مقدار واقعی متغیر مستقل، $X_{i,c.p.}$ مقدار واقعی متغیر مستقل در نقطه مرکزی^۱ و ΔX گام تغییرات X ها است.

روش رویه پاسخ قادر است متغیر پاسخ را به صورت تابع درجه دوم کامل از متغیرهای مستقل ارائه دهد؛ به طوری که متغیر خروجی فرایند یا پاسخ Y بر حسب متغیرهای مستقل کدگذاری شده Z_i به صورت رابطه (۲) حاصل می‌شود [۲۱]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i Z_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} Z_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_i \beta_j Z_i Z_j + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن، ε به عنوان خطای مشاهده شده در پاسخ Y است و سایر علائم $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ و β_{ij} به ترتیب عبارتند از ضرایب رگرسیون برای فاکتورهای ثابت، خطی، مربع و متقابل. برای برآورد ضرایب در تقریب چندجمله‌ای‌ها از روش حداقل

² Orthogonality

¹ Central composite design

Y به ازای X_{i+} معادل Y_+ به دست می‌آید و به همین ترتیب Y_- و $X_{i-} = \bar{X}_i - U_{X_i}$ نیز محاسبه می‌شود.

$$\Delta X_i = |X_{i+} - X_{i-}| = |2U_{X_i}| \quad (۸)$$

$$\Delta Y = |Y_+ - Y_-| \quad (۹)$$

به این ترتیب، آنالیز حساسیت بی‌بعد و عدم قطعیت بی‌بعد مدل به کمک روابط (۶) و (۷) حاصل خواهد شد.

۳- محاسبه NG-DCF^۳ به کمک معادله حالت AGA8-DCM

برای محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، از جمله NG-DCF با استفاده از معادله حالت AGA8-DCM، علاوه بر دما و فشار عملیاتی، باید درصد ترکیب اجزای بیست‌ویک‌گانه گاز طبیعی شامل متان، اتان، پروپان، نرمال بوتان، ایزوبوتان (۲-متیل پروپان)، نرمال پنتان، ایزوپنتان (۲-متیل بوتان)، نرمال هگزان، نرمال هپتان، نرمال اکتان، نرمال نونان، نرمال دکان، نیتروژن، اکسیژن، هیدروژن، کربن‌دی‌اکسید، کربن‌مونواکسید، هیدروژن سولفید، بخار آب، هلیوم و آرگون مشخص باشد [۹ و ۲۷]. معادله حالت AGA8-DCM به شکل رابطه (۱۰) است.

$$Z = 1 + Bd - (K^3 d) \times \sum_{n=1}^{18} C_n^o T^{-u_n} + \sum_{n=13}^{58} C_n^o T^{-u_n} (K^3 d)^{b_n} \times (b_n - c_n k_n (K^3 d)^{k_n}) \exp(-c_n (K^3 d)^{k_n}) \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، پارامترهای b_n ، c_n ، k_n ، u_n ضرایب ثابت هستند که همگی در مرجع [۹] موجودند. همچنین d دانسیته مولی، K پارامتر اندازه مخلوط و B ضریب دوم ویریا هستند که به ترتیب در روابط (۱۱) و (۱۲) بیان شده‌اند.

$$K = \left(+2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (K_{ij})^5 - 1 \right) (K_i K_j)^{\frac{5}{2}} \quad (۱۱)$$

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j E_{ij}^{-u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} B_{nij}^o \quad (۱۲)$$

تغییر می‌کند و پس از اینکه برای کلیه ورودی‌ها نمودار تغییرات در دامنه تعریف‌شده انجام شد و خروجی در هر مورد به دست آمد، می‌توان نتایج را بر روی نمودارهایی ترسیم و تحلیل کرد. از انواع این نمودارها می‌توان به نمودار عنکبوتی اشاره کرد.

۲-۴- عدم قطعیت و آنالیز حساسیت مدل به روش عددی [۱]

برای محاسبه عدم قطعیت یک مدل، به روش عددی نیاز است که متغیر ورودی مستقل را به صورت رابطه (۳) تعریف کرد:

$$X = \bar{X} + U_X \quad (۳)$$

که در آن، X ورودی مستقل، \bar{X} مقدار اسمی متغیر که برای مثال با اطمینان ۹۵٪ صحیح است و U_X عدم قطعیت متغیر X ناشی از خطای اندازه‌گیری یا نبود اطلاعات دقیق است. حال اگر $Y(X)$ پاسخ مسئله به ازای X باشد، U_Y عدم قطعیت پاسخ مسئله ناشی از عدم قطعیت متغیر X است. چنانچه Y یک تابع چندمتغیره باشد به طوری که $Y = Y(X_1, X_2, \dots, X_N)$ عدم قطعیت کلی پاسخ Y نسبت به تمامی متغیرهای مستقل به شکل رابطه (۴) خواهد بود.

$$U_Y = \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} U_{X_i} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (۴)$$

عدم قطعیت را به صورت ضریب بی‌بعد به صورت رابطه (۵) است.

$$\frac{U_Y}{\bar{Y}} = \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{\bar{X}_i}{\bar{Y}} \right) \left(\frac{U_{X_i}}{\bar{X}_i} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (۵)$$

لذا ضریب بی‌بعد حساسیت^۱ (NSC) و ضریب بی‌بعد عدم قطعیت^۲ (NU) به ترتیب به صورت روابط (۶) و (۷) هستند.

$$NSC_{X_i} = \left(\frac{\Delta Y}{\bar{Y}} \frac{\bar{X}_i}{\Delta X_i} \right)^2 \quad (۶)$$

$$NU_{X_i} = \left(\frac{U_{X_i}}{\bar{X}_i} \right)^2 \quad (۷)$$

برای استفاده از آنالیز حساسیت بدین روش باید ΔX_i و ΔY به دست آیند که به شکل روابط (۸) و (۹) هستند. بنابراین در ابتدا $X_{i+} = \bar{X}_i + U_{X_i}$ محاسبه می‌شود، سپس پاسخ

^۳ Natural Gas Density Correction Factor

^۱ Normalized Sensitivity Coefficient (NSC)

^۲ Normalized Uncertainty (NU)

۴- نتایج و بحث

قطعاً یک کاربر یا متخصص برای به کارگیری هرگونه ابزار، تجهیزات و نرم افزارهایی بر اساس معادلات حالت استاندارد به منظور کنترل شرایط، نگهداری تجهیزات، تشخیص عملکرد صحیح تجهیزات، میزان خطا در اطلاعات حاصل، تشخیص میزان حساسیت پذیری مدل‌ها از متغیرهای ورودی و مقایسه نتایج با مدل‌های قبلی، نیاز به شناخت و تحلیل روند اثرگذاری هریک از اطلاعات ورودی بر خروجی‌ها، میزان حساسیت‌پذیری خروجی‌ها از داده‌های ورودی یا به عبارتی تعیین پارامترهای بسیار اثرگذار، اثرگذار و بی‌اثر بر مدل دارد. از این رو، مطالعه آنالیز حساسیت و تحلیل رفتار پارامترهای مؤثر بر خواص گاز طبیعی به کمک مدل‌سازی استاندارد AGA8-DCM در این تحقیق مد نظر قرار گرفت. بدین منظور پس از مشخص کردن الگوریتم محاسبات، کدنویسی برنامه‌های مورد نیاز انجام پذیرفت و بسته نرم‌افزاری مطلوب مطابق شکل (۱) تهیه شد.

۴-۱- به کارگیری روش ANOVA با استفاده از روش رویه پاسخ (RSM)

برای مطالعه پارامترهای مؤثر بر NG-DCF، آنالیز حساسیت به روش ANOVA با استفاده از روش رویه پاسخ روی مدل AGA8-DCM انجام شد. همان طور که اشاره شد، محاسبات مربوط به شدت جریان گاز طبیعی به کمک محاسبه NG-DCF نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای ورودی ارائه شده در شکل (۱) دارد. در انجام این امر، امکان بروز خطا از منابع مختلفی وجود دارد که می‌تواند ناشی از خطای فردی، دستگاه‌های اندازه‌گیری و ادوات ابزار دقیق مربوط به دما و فشار و همچنین عدم اطلاع از درصد ترکیبات دقیق اجزای گاز طبیعی باشد؛ زیرا درصد ترکیبات گاز طبیعی در پالایشگاه‌های گاز که به وسیله دستگاه‌های کروماتوگراف انجام می‌گیرد، معمولاً برای مدت زمانی خاص استفاده می‌شود و تغییرات آن مورد اغماض قرار می‌گیرد. از طرفی به دلیل آنکه گاز طبیعی از حوزه‌های مختلف به شبکه سراسری خطوط انتقال گاز تأمین می‌شود، اختلاط گاز طبیعی با ترکیبات مختلف، امری اجتناب‌ناپذیر است که قطعاً ایجاد خطا خواهد کرد. از این رو به منظور بررسی میزان تأثیر پارامترهای مربوط در محاسبات NG-DCF، آنالیز حساسیت به روش ANOVA با استفاده از روش رویه

در روابط فوق، i و j شمارنده سری، N تعداد اجزای مخلوط گاز طبیعی که برابر ۲۱ در نظر گرفته می‌شود، x_i ترکیب درصد مولی جزء i ، K_i پارامتر اندازه جزء i ، K_{ij} پارامتر اندازه متقابل دوگانه اجزای i و j ، E_{ij} پارامتر انرژی متقابل در ضریب دوم ویربال اجزای i و j ، ضریب ثابت B_{nij}^0 ضریب مشخصه دوگانه است که تمامی موارد مذکور در مرجع [۹] ارائه شده‌اند. در این معادله حالت ابتدا فرض می‌شود گاز ایدئال باشد؛ بنابراین دانسیته مولی به شکل رابطه (۱۳) است.

$$d_0 = \frac{P}{RT} \quad (13)$$

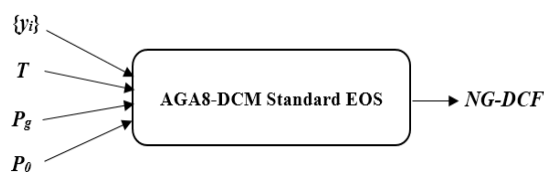
سپس با قرار دادن آن در رابطه (۱۰) و روش تکرار، دانسیته مولی گاز طبیعی مشخص می‌شود. برای تعیین دانسیته از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود که در آن، Mw و ρ به ترتیب جرم ملکولی و دانسیته جرمی گاز طبیعی است. به کمک روابط فوق و بهره‌گیری از روابط ترمودینامیکی، سایر خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی نیز قابل محاسبه‌اند [۲۸].

$$\rho = Mw \cdot d \quad (14)$$

NG-DCF مطابق رابطه (۱۵) از نسبت دانسیته جرمی گاز در شرایط عملیاتی به دانسیته گاز در شرایط مبنا (T_{base}) عبارت دیگر از نسبت شدت جریان حجمی گاز طبیعی در شرایط مبنا (Q_{base}) به شدت جریان حجمی گاز طبیعی در شرایط عملیاتی (Q) حاصل می‌شود.

$$NG - DCF = \frac{\rho(T, P)}{\rho_{base}(T_{base}, P_{base})} = \frac{Q_{base}(T_{base}, P_{base})}{Q(T, P)} \quad (15)$$

کلیه معادلات فوق به منظور محاسبه NG-DCF بر اساس معادله حالت استاندارد AGA8-DCM در نرم‌افزار MATLAB (Version.8.1.0.604) کدنویسی شد. نحوه عملکرد آن به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک محاسبه NG-DCF بر اساس استاندارد AGA8-DCM

از پارامترها در محدودهٔ مربوط، به پنج سطح طبقه‌بندی شد و طراحی آزمایش به روش CCD با در نظر گرفتن α برابر با ۲ و حالت محوری^۱ انجام گرفت.

پاسخ برای پارامترهای موجود در جدول ۱ که در آن محدودهٔ تغییرات آن‌ها از شرکت ملی گاز استعلام شده، به انجام رسیده است. این ترتیب، با استفاده از تکنیک RSM به کمک نرم‌افزار آماری (Minitab (Version 18.1) هر یک

جدول ۱- پارامترهای مورد مطالعه در روش ANOVA

کدگذاری متغیرهای مستقل آزمایش					ANOVA پارامتر در	پارامتر
-۲	-۱	۰	+۱	+۲		
۲۷۰/۱۵	۲۸۲/۱۵	۲۹۴/۱۵	۳۰۶/۱۵	۳۱۸/۱۵	A	$T (K)$
۰	۲۵۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰	B	$P_g (psi)$
۱۰/۸۵۵	۱۱/۴۲۳	۱۱/۹۹۱	۱/۵۵۹	۱۳/۱۲۷	C	$P_0 (psi)$
۰	۱/۷۵	۳/۵	۵/۲۵	۷	D	$N_2 (\%)$
۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	E	$C_4H_{10} (\%)$
۰	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۰/۳۷۵	۰/۵	F	$C_5H_{12} (\%)$
۰	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۰/۳۷۵	۰/۵	G	$C_6 + (\%)$
۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۸	H	$H_2O (\%)$
۰	۱/۷۵	۳/۵	۵/۲۵	۷	J	H_2S و $CO_2 (\%)$

اساس چنانچه ترکیب درصد سایر اجزای گازی مطابق طراحی آزمایش‌ها بر اساس سطوح کدبندی شده تغییر کند، ترکیب درصد گازهای سبک متان، اتان و پروپان به ترتیب با سهم ۸۰، ۵/۹۹۹۲ و ۲ درصد مقدار باقیمانده از کل گاز طبیعی فرض می‌شود. شایان ذکر است این‌گونه نحوه اختصاص درصد ترکیبات اجزا بر مبنای حالت‌های مشابه مذکور در مراجع است [۲۹-۳۱] که صرفاً برای بررسی میزان اثر پارامترهای گفته شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است. اثر مستقیم تغییر هر یک از اجزای سبک متان، اتان و پروپان بر متغیر پاسخ، در بخش ۴-۲ بررسی شده است.

به‌علاوه به دلیل آنکه مناطق مختلف، ارتفاع از سطح دریای مشابیهی ندارند، فشار جو محلی مناطق متفاوت است؛ بنابراین فشار مطلق مورد نیاز معادلهٔ حالت استفاده شده، به فشار نسبی خطوط انتقال گاز و فشار جو، تفکیک شده است ($P_{abs.} = P_g + P_0$) تا اثر فشار جو در منطقه‌ای که محاسبات در آنجا انجام می‌شود نیز مورد مطالعه قرار گیرد. پس از وارد کردن نتایج، آنالیز داده‌ها توسط نرم افزار Minitab صورت پذیرفت. نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها توسط ANOVA برحسب پارامترهای مذکور برای پیش‌بینی NG-DCF در جدول ۲ ارائه شده است.

بدین ترتیب ۱۵۶ آزمایش طراحی و جواب آزمایش‌های مفروض پارامترها توسط معادلهٔ حالت استاندارد AGA8-DCM تعیین شد. برای این کار از بسته نرم‌افزاری تهیه شده مذکور، استفاده گردید.

شایان ذکر است در این بخش از مطالعه، درصد ترکیبات منوکسید کربن، اکسیژن، هیدروژن، هلیوم و آرگون، صفر فرض شده؛ چون عمده‌تاً گاز طبیعی موجود در شبکهٔ سراسری گاز، عاری از این ترکیبات است. همچنین درصد ترکیبات اجزای سنگین نرمال هپتان، نرمال اوکتان، نرمال نونان و نرمال دکان نیز به دلیل ناچیز بودن، صفر لحاظ شده و مجموع درصد ترکیبات کلی C_6+ به طور کلی به نرمال هگزان اختصاص یافته است. فرض دیگر آن است که مقادیر مربوط به ایزومرهای بوتان و پنتان نیز به شکل مساوی بین ملکول خطی (نرمال) و شاخه‌دار (ایزو) تقسیم شده است. برای گازهای اسیدی به علت کم بودن میزان هیدروژن سولفید و مرکاپتان‌ها مقدار مربوط به آن‌ها $۰/۰۰۰۰۰۱$ کل مقدار گازهای اسیدی فرض شده؛ یعنی $۰/۹۹۹۹۹۹$ این مقدار دی‌اکسید کربن است. از آنجا که مجموع ترکیب درصد اجزای گازی باید یک باشد، ترکیب درصد مجموعه گازهای سبک (متان، اتان و پروپان) به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته نشده‌اند. بر همین

^۱ axial

۰/۹۳۱	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰	۱	F×G
۱/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰	۰/۰	۱	F×H
۰/۹۸۴	۰/۰۰	۰/۰	۰/۰	۱	F×J
۱/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۰	۰/۰	۱	G×H
۰/۹۴۷	۰/۰۰	۰/۰	۰/۰	۱	G×J
۰/۹۴۳	۰/۰۱	۰/۰	۰/۰	۱	H×J
		۰/۰	۰/۵	۱۰۱	خطا

*مجموع مربعات تنظیم شده (Adjusted sum of squares)

**میانگین مربعات تنظیم شده (Adjusted mean squares)

به منظور بررسی صحت مدل و میزان اهمیت هر پارامتر، از تست‌های P-value و F-value برای هر یک از پارامترهای مدل در جدول ۲ استفاده می‌شود. در این آزمون‌ها فرض صفر مبنی بر این است که برای هر یک از پارامترهای موجود در مدل، ضریب آن پارامتر در مدل برابر صفر است یا به عبارت دیگر، ترم در نظر گرفته شده، در مدل مؤثر نیست و باید از مدل حذف شود. در این آزمون، کمترین مقدار ممکن برای α که می‌توان بر اساس آن فرض صفر را رد کرد، محاسبه می‌شود و این مقدار را احتمال معنی‌دار بودن یا P-value می‌گویند. این مقدار هرچه کوچک‌تر از α باشد، دلالت بر رد قوی فرض صفر دارد. به طور معمول α را برابر ۰/۰۵ فرض می‌کنند؛ بنابراین در این آزمون چنانچه P-value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر قبول و در صورت کوچک‌تر بودن P-value از ۰/۰۵، فرض صفر رد می‌شود. بنابراین باید این آزمون برای هر کدام از پارامترها جداگانه انجام شود و الزام حضور هر یک از پارامترها در مدل یا عدم تأثیر و حذف شدن آن‌ها از مدل مشخص گردد. به این ترتیب می‌توان با توجه به P-value مربوط به هر یک از ضرایب مدل و حذف پارامترهایی که اثر چندانی بر آن ندارند، مدلی اصلاح شده و ساده‌تر با پارامترهای کمتر به دست آورد. اگر در هنگام اصلاح مدل، پارامتری با درجه بالاتر در مدل وجود دارد، مرتبه پایین‌تر آن پارامتر نیز باید در مدل نگه داشته شود [۳۲].

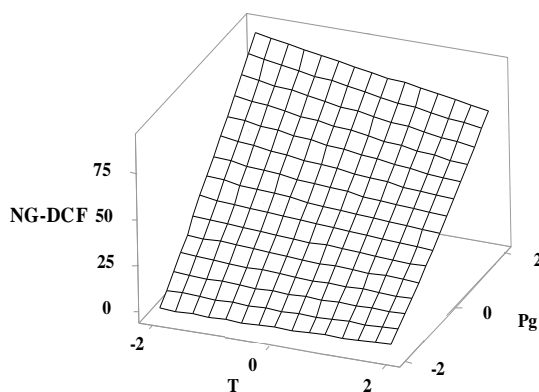
همان‌طور که نتایج جدول ۲ (جدول ANOVA) نشان می‌دهد، پارامترهای A, B, C, D, E, F, G, J, AA, BB, AB, AD, AE, AG, AJ, BD, BE, BF, BG, BJ پارامترهای حائز اهمیت و اثرگذار مدل هستند. همچنین از نتایج حاصل می‌توان دریافت آثار متقابل فشار محیط با سایر متغیرها و نیز آثار متقابل ترکیب درصد اجزای مختلف با یکدیگر، پارامترهایی حائز اهمیت برای مدل RSM پیش‌بینی‌کننده NG-DCF نیستند؛ از این رو می‌توان از آن‌ها در مدل چشم‌پوشی کرد. در شکل (۲) نیز میزان تأثیر

جدول ۲ - آنالیز ANOVA مدل RSM برای NG-DCF

منبع	درجه آزادی	Adj SS*	Adj MS**	F-value	P-value
مدل	۵۴	۵۵۰۱۱	۱۰۱۸	۱۹۷۵۳۴	۰/۰۰۰
خطی	۹	۵۴۷۱۷	۶۰۷۹	۱۱۷۸۸۶۹	۰/۰۰۰
A	۱	۷۰۴/۴	۷۰۴/۴	۱۳۶۵۸۹	۰/۰۰۰
B	۱	۵۴۰۰۹	۵۴۰۰۹	۱۰۴۷۲۵۴	۰/۰۰۰
C	۱	۰/۳	۰/۳	۵۴/۲۷	۰/۰۰۰
D	۱	۱/۶	۱/۶	۳۰۹/۰۷	۰/۰۰۰
E	۱	۰/۵	۰/۵	۹۷/۰۸	۰/۰۰۰
F	۱	۰/۲	۰/۲	۴۱/۵۰	۰/۰۰۰
G	۱	۰/۵	۰/۵	۸۸/۵۵	۰/۰۰۰
H	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹
J	۱	۰/۵	۰/۵	۱۰۶/۵۱	۰/۰۰۰
مربعات	۹	۳۳/۵	۳/۷	۷۲۲/۱۲	۰/۰۰۰
A×A	۱	۰/۸	۰/۸	۱۵/۵۳	۰/۰۰۰
B×B	۱	۲۴/۶	۲۴/۶	۴۷۶۱/۸۱	۰/۰۰۰
C×C	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۳۳	۰/۵۶۵
D×D	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۴۰	۰/۵۲۹
E×E	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۳۶	۰/۵۵۱
F×F	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۳۴	۰/۵۵۸
G×G	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۳۵	۰/۵۵۳
H×H	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۳۲	۰/۵۶۵
J×J	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۴۱	۰/۵۲۳
متقابل	۳۶	۲۶۰/۷	۷/۲	۱۴۰۴/۱۳	۰/۰۰۰
A×B	۱	۲۵۸/۲	۲۵۸/۲	۵۰۰۶/۰	۰/۰۰۰
A×C	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۲۷	۰/۶۰۳
A×D	۱	۰/۱	۰/۱	۱۵/۶۲	۰/۰۰۰
A×E	۱	۰/۰	۰/۰	۵/۷۸	۰/۰۱۸
A×F	۱	۰/۰	۰/۰	۲/۵۳	۰/۱۱۵
A×G	۱	۰/۰	۰/۰	۴/۸۳	۰/۰۳۰
A×H	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۹۸
A×J	۱	۰/۰	۰/۰	۶/۰۵	۰/۰۱۶
B×C	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۴۰	۰/۵۲۹
B×D	۱	۱/۱	۱/۱	۲۱۶/۰۱	۰/۰۰۰
B×E	۱	۰/۳	۰/۳	۶۶/۱۹	۰/۰۰۰
B×F	۱	۰/۱	۰/۱	۲۸/۲۵	۰/۰۰۰
B×G	۱	۰/۳	۰/۳	۵۹/۱۷	۰/۰۰۰
B×H	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۹۹
B×J	۱	۰/۴	۰/۴	۷۴/۵۰	۰/۰۰۰
C×D	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۷۱
C×E	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۸۴
C×F	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۸۹
C×G	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۸۵
C×H	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۹۹
C×J	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۸۲
D×E	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۸۲۲
D×F	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۸۸۱
D×G	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۸۲۴
D×H	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۶۹
D×J	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۰۷
E×F	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۲۴
E×G	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۸۹۸
E×H	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۶۰
E×J	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۱۸

معرفی شده برای فاکتور فشار نسبی گاز طبیعی در جدول ۱، افزایش سطح آن از ۲- تا ۲+ در دمای ثابت، منجر به کاهش ضریب تراکم‌پذیری گاز خواهد شد. به این ترتیب، علاوه بر افزایش فشار نسبی که کاهش حجم گاز را در پی دارد، کاهش ضریب تراکم‌پذیری نیز به دلیل نیروهای بین مولکولی گازها موجب افزایش دانسیته و در نتیجه، افزایش NG-DCF خواهد شد.

همان طور که نتایج آنالیز ANOVA نشان داد، اثر متقابل T-Pg از عوامل حائز اهمیت در مدل محاسبه NG-DCF است. شکل (۳) نیز نشانگر آن است که در فشارهای بالا (برای مثال سطح ۲ فاکتور B) اثر کاهشی افزایش دما بر متغیر پاسخ، تشدید می‌شود. دلیل این امر آن است که در فشارهای بالا مولکول‌های گاز بسیار به یکدیگر نزدیک‌ترند و نیروی دافعه مولکولی بر جاذبه غلبه یافته است. به این ترتیب، با افزایش دمای گاز، افزایش حجم بیشتری مشاهده می‌شود که کاهش بیشتر NG-DCF را موجب می‌گردد.

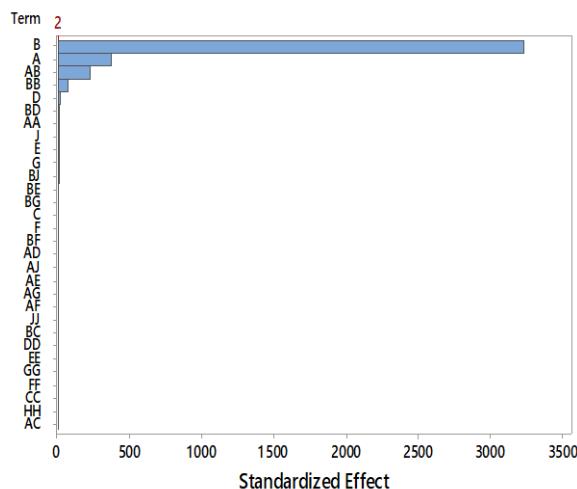


شکل ۳- نمودار سطحی نمایانگر اثرات دما و فشار نسبی بر NG-DCF

۴-۲- آنالیز حساسیت به روش OFAT

آنالیز حساسیت تک‌متغیره در زمان (OFAT)، مطالعه تأثیر تغییرات یک متغیر بر روی مقادیر مورد انتظار در خروجی مدل است؛ در حالی که سایر متغیرها ثابت فرض می‌شوند. برای مطالعه بررسی آثار هر متغیر بر NG-DCF به کمک آنالیز OFAT، متغیر مورد نظر مطابق جدول ۱ در پنج سطح کدبندی شده تغییر داده می‌شود، در حالی که سایر پارامترها در نقطه مرکزی خود به‌عنوان یک نقطه متداول مفروض‌اند. شایان ذکر است برای تعیین درصد ترکیبات اجزایی که در جدول ۱ ذکر نشده‌اند، مشابه بخش قبلی عمل شده است، با این تفاوت که این بار برای گازهای سبک متان، اتان و پروپان نیز به ترتیب محدوده

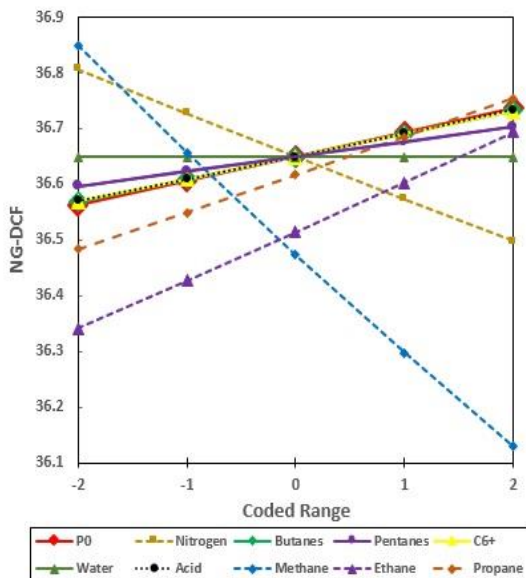
هریک از پارامترها به صورت انفرادی و متقابل بر NG-DCF نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار پارتو اثر پارامترهای انفرادی و متقابل بر NG-DCF

نتایج شکل (۲) حاکی از آن است که پارامتر B، یعنی فشار نسبی خط لوله انتقال گاز و پس از آن پارامتر A، یعنی دما، بیشترین اهمیت را در تعیین NG-DCF دارند؛ به عبارت دیگر، اثرگذاری آن‌ها بر مدل بیشتر از سایر پارامترهاست. این امر نشان‌دهنده آن است که متغیرهای عملیاتی، اثربخشی بسیار بیشتری نسبت به متغیرهای ماهیتی گاز و محیطی بر متغیر پاسخ NG-DCF دارند. این امر می‌تواند به دلیل محدوده عملکرد گسترده‌تر این متغیرها نیز باشد. پس از متغیرهای عملیاتی، این درصد نیتروژن گاز است که بیشترین اثربخشی را بر متغیر پاسخ داشته است؛ به طوری که درصد نیتروژن موجود در گاز طبیعی یا فاکتور D دارای بزرگ‌ترین ضریب خطی بعد از فاکتورهای دما و فشار نسبی است. همچنین منفی بودن این ضریب نشان از آن دارد که با افزایش D ضریب تصحیح گاز طبیعی کاهش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی است. از میان فاکتورهای خطی پس از فاکتور D، فاکتورهای J، E، G، و C به ترتیب دارای بیشترین اهمیت در مدل هستند.

با توجه به اهمیت تأثیر متقابل تغییرات دما و فشار نسبی بر مدل NG-DCF، در شکل (۳) با ثابت نگه داشتن سایر عوامل در نقاط مرکزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شکل مذکور حاکی از آن است که افزایش دما در فشار ثابت منجر به افزایش حجم گاز و در نتیجه، کاهش دانسیته یا به عبارت دیگر، NG-DCF خواهد شد. همچنین در محدوده



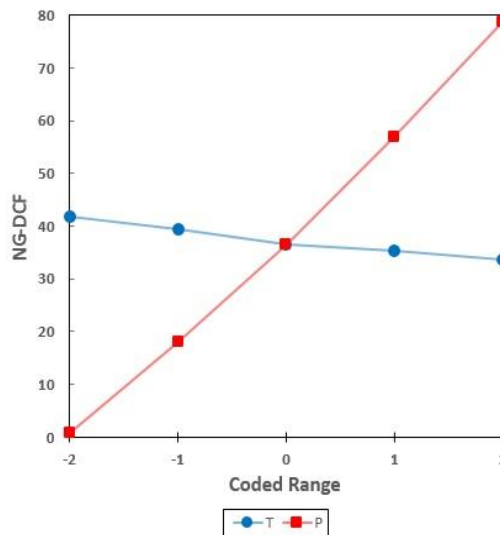
شکل ۵- تغییرات NG-DCF نسبت به فشار محیط و ترکیب درصد اجزای مورد مطالعه

به کمک شکل (۵) می‌توان به مقایسه میزان اثرپذیری NG-DCF از هریک از متغیرهای مورد نظر درست یافت که به ترتیب اثرگذاری بیشتر، در زیر آمده است:

- افزایش درصد مولی متان از ۸۰ به ۹۴٪، اتان از ۱ به ۷٪، نیتروژن از ۰ به ۷٪ و پروپان از ۰/۶ به ۰/۳ به ترتیب منجر به کاهش ۰/۲۲ واحدی، افزایش ۰/۳۵ واحدی، کاهش ۰/۳ واحدی و افزایش ۰/۲۷ واحدی در NG-DCF می‌شود. دلیل تغییرات NG-DCF، تغییر در نسبت اجزای سبک و سنگین یا به عبارت دیگر، جرم مولکولی و نیز ضریب تراکم‌پذیری مخلوط گازی است.
- افزایش فشار محیط، درصد ترکیبات ایزومری بوتان، درصد اجزای C6+ و سنگین‌تر و نیز درصد مجموع ترکیبات اسیدی در محدوده‌های کدبندی شده از ۲- به ۲+ در جدول ۱، هریک به صورت مجزا افزایش NG-DCF را در حدود ۰/۱۷ واحد در پی داشته است. از این رو نمی‌توان از اثرگذاری تغییرات این دست متغیرها بر NG-DCF اغماض کرد؛ چراکه می‌تواند تغییرات قابل ملاحظه‌ای در NG-DCF ایجاد کند که به‌ویژه از جنبه اقتصادی، حائز اهمیت است.
- افزایش میزان ایزومرهای پنتان از سطح ۲- به ۲+ منجر به افزایش تقریبی ۰/۱۱ واحد از NG-DCF خواهد شد که مجدداً قابل اغماض نیست.

تغییرات ۰/۶-۳٪ و ۱-۷٪، ۸۰-۹۴٪، کدبندی می‌شود. گفتنی است مقادیر مربوط به یک ترکیب که افزایش یا کاهش می‌یابد، به طور نرمالیز شده به ترتیب از سایر اجزا کسر یا به آن‌ها افزوده می‌شود.

همان‌گونه که در قسمت قبلی نیز مشاهده شد، مهم‌ترین و اثرگذارترین پارامترها بر NG-DCF، دما و فشار نسبی خطوط انتقال گاز است. استفاده از روش OFAT نیز نشان داد طبق انتظار، بیشترین محدوده تغییرات NG-DCF مربوط به تغییرات فشار نسبی و سپس دما است؛ به طوری که افزایش فاکتور فشار نسبی گاز از سطح ۲- به ۲+، ضریب تصحیح دانسیته گاز طبیعی را حدود ۷۸ واحد افزایش می‌دهد. این عدد برای افزایش دما از سطح ۲- به ۲+، حدود ۸/۳ واحد کاهش است. برای ملاحظه این آثار در شکل (۴) تنها چگونگی تغییرات ضریب تصحیح دانسیته گاز طبیعی با فشار نسبی و دما در محدوده‌های مربوط (ذکر شده در جدول ۱) رسم شده است. به دلیل تفاوت مقیاس تغییرات NG-DCF، نمودار تغییرات سایر پارامترها شامل فشار محیط، ترکیب درصد متان، اتان، پروپان، بوتان، پنتان، C6+، نیتروژن، بخار آب و گازهای اسیدی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییرات NG-DCF نسبت به دما و فشار عملیاتی نسبی

با مقایسه محدوده تغییرات NG-DCF در نمودار شکل های (۴) و (۵) به‌وضوح مشخص است که اثر تغییر ترکیب درصد اجزای گاز مورد مطالعه و فشار محیط در محدوده های معرفی شده، کمتر از اثر فشار نسبی و دما است.

روابط (۸) و (۹) در ابتدا $X_{i+} = \bar{X}_i + U_{X_i}$ محاسبه می‌شود، سپس پاسخ Y به‌ازای X_{i+} معادل Y_+ به دست می‌آید و به همین ترتیب، $X_{i-} = \bar{X}_i - U_{X_i}$ و Y_- نیز محاسبه شده، در روابط مذکور استفاده می‌شود.

جدول ۳- پارامترهای مورد مطالعه و عدم قطعیت آن‌ها

پارامتر i	مقدار اسمی (\bar{X}_i)	عدم قطعیت (U_{X_i})
$T(K)$	۲۹۴/۱۵	$\pm 0/۱۵$
$P_g(MPa)$	۱/۷۲۳۶۸۹	$\pm 0/۰۱۶$
$P_0(MPa)$	۰/۰۸۲۶۷۵	$\pm 0/۰۰۰۲$
$CH_4(\%)$	۸۹/۹۵	$\pm ۳/۱۵$
$C_2H_6(\%)$	۳/۲۰	$\pm ۱/۲$
$C_3H_8(\%)$	۰/۹۵	$\pm 0/۷۵$
$C_4H_{10}(\%)$	۰/۴۵	$\pm 0/۳۵$
$C_5 + (\%)$	۰/۳۰	$\pm 0/۲$
$N_2(\%)$	۴/۲۵	$\pm ۱/۵۵$
$CO_2(\%)$	۰/۸۰	$\pm 0/۷$
$H_2O(\%)$	۰/۰۵	$\pm 0/۰۵$
$H_2S(\%)$	۰/۰۵	$\pm 0/۰۵$

مقادیر محاسبه شده ضرایب بی‌بعد حساسیت و عدم قطعیت در جدول ۴ ارائه شده است. با بررسی نتایج این جدول مشخص خواهد شد که در شرایط معمول درون لوله‌های انتقال گاز (جدول ۳)، حساسیت NG-DCF نسبت به دما بیش از فشار است؛ زیرا ضریب حساسیت بی‌بعد (NSC) مربوط به دما $1/3$ و فشار $0/98$ را نشان می‌دهد. همان طور که روابط نشان می‌دهد، فاکتور NSC از تقسیم ترم $\frac{\Delta Y}{Y}$ به $\frac{\Delta X_i}{X_i}$ حاصل می‌شود. با بررسی نتایج در عدم قطعیت‌های مختلف X_i می‌توان گفت مقدار NSC مستقل از ΔX_i است؛ زیرا برای مثال، افزایش ترم $\frac{\Delta X_i}{X_i}$ منجر به افزایش ترم $\frac{\Delta Y}{Y}$ خواهد شد؛ به طوری که تقریباً اثر آن را خنثی می‌کند. به‌عنوان مثال، چنانچه اثر عدم قطعیت ± 1 درصدی برای دما و فشار را در نقطه مرکزی آن‌ها بررسی شود، همچنان حساسیت بی‌بعد دما ($NSC_T = 1.276$) را بیش از فشار ($NSC_P = 1.07$) نشان می‌دهد. از این مباحث می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این نوع آنالیز بیش از مقدار عدم قطعیت هر فاکتور، متأثر از نقطه مرکزی مورد استفاده است.

بررسی‌های بیشتر نشان داد چنانچه در سطوح بالاتر (+۲) و پایین‌تر (-۲) دما و فشار این محاسبات تکرار شود، به طوری که در هر یک از حالات، سایر فاکتورها در نقطه

• افزایش میزان بخار آب موجود در گاز طبیعی از سطح ۲- به ۲+ ارائه شده در جدول ۱، تأثیری در NG-DCF نخواهد داشت و قابل چشم‌پوشی است.

نتایج فوق نشان از آن دارد که بررسی حساسیت‌پذیری NG-DCF نسبت به متغیرهای عملیاتی و محیطی بسیار حائز اهمیت است. همان طور که پیش از این اشاره شد، در این مطالعه، NG-DCF با استفاده از معادله حالت AGA8-DCM محاسبه شد؛ اما نباید از آن غافل شد که انتخاب معادله حالت نیز، خود بر نتایج تخمین NG-DCF اثرگذار است. مطالعه فرزانه گرد و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۸ به‌وضوح نشان می‌دهد در محدوده شرایط عملیاتی کاربردی NG-DCF تخمین زده شده توسط معادله حالت GERG کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله حالت AGA8-DCM است که از نظر اقتصادی موجب خواهد شد خرید گاز طبیعی به صورت حجمی به نفع مصرف‌کننده تمام شود. این نشان می‌دهد که بهتر است به جای حجم گاز طبیعی، ارزش حرارتی آن، مبنای فروش گاز قرار گیرد.

۳-۴ روش محاسبه عددی آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل

در این بخش، آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل به روش عددی نیز برای پارامترهای مختلف دخیل در تعیین NG-DCF انجام شده است. بدین منظور مقادیر پارامترهای مورد مطالعه در یک حالت معمولی و علاوه بر آن، میزان عدم قطعیت هر یک از آن‌ها به صورت جدول ۳ استعمال و ارائه شده است [۱]. برای سایر ترکیب‌ها درصد اجزایی مانند اکسیژن، هیدروژن، کربن‌مونوکسید، هلیوم، آرگون و هیدروکربن‌های هگزان و سنگین‌تر صفر لحاظ شده است. مقدار بوتان نیز به طور برابر بین ایزوبوتان و نرمال بوتان تقسیم‌بندی شده است.

در روش عددی محاسبه آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل $Y(X)$ به‌عنوان پاسخ مسئله به‌ازای X ، U_Y عدم قطعیت پاسخ مسئله ناشی از عدم قطعیت متغیر X است. حال اگر Y یک تابع چندمتغیره باشد، به طوری که $Y = Y(X_1, X_2, \dots, X_N)$ عدم قطعیت کلی پاسخ Y نسبت به تمامی متغیرهای مستقل (X_i) به صورت رابطه (۴) و شکل بی بعد آن به صورت رابطه (۵) خواهد بود. بر اساس این روابط ضرایب بی‌بعد آنالیز حساسیت و عدم قطعیت با توجه به روابط (۶) و (۷) حاصل می‌شود [۱]. بنابراین با توجه به

باشند، ۱۸/۰۸ خواهد بود، عدم قطعیت کلی برابر ۰/۱۷۳، یعنی حدود $\pm 1\%$ از مقدار متغیر پاسخ محاسبه شده است.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

محاسبه شدت جریان گاز طبیعی به واسطه NG-DCF با استفاده از معادله حالت AGA8-DCM، روشی دقیق و نسبت به روش‌های اندازه‌گیری به کمک تجهیزات، مقرون به صرفه است؛ اما استفاده از این معادله حالت، نیازمند اطلاعات جزئی، از جمله ترکیب درصد ۲۱ جزء تشکیل‌دهنده گاز طبیعی است. اغلب به دلیل در دسترس نبودن برخط این اطلاعات، از داده‌های تخمینی به‌عنوان ورودی مدل استفاده می‌شود. از این رو، در این پژوهش به مطالعه آنالیز حساسیت و عدم قطعیت NG-DCF بر اساس استاندارد AGA8-DCM نسبت به متغیرهای دما و فشار نسبی عملیاتی در خط لوله، فشار محیط و ترکیب درصد ۲۱ جزء گاز طبیعی پرداخته شد. مطالعه آنالیز حساسیت به سه روش ANOVA با استفاده از RSM، OFAT و عددی انجام شد. آنالیز ANOVA با به‌کارگیری ۱۵۶ داده حاصل از مدل AGA8-DCM در روش RSM نشان داد عوامل فشار نسبی، دما، ترکیب درصد گازهای سبک (متان، اتان و پروپان)، ترکیب درصد نیتروژن و ترکیب درصد گازهای اسیدی (H_2S و CO_2)، به ترتیب دارای بیشترین آثار خطی در مدل تعیین NG-DCF هستند. از میان آثار متقابل عوامل نیز فشار نسبی- دما، فشار نسبی- فشار نسبی، فشار نسبی- ترکیب درصد نیتروژن، به ترتیب دارای بیشترین اهمیت و اثرگذاری بر مدل هستند. آنالیز حساسیت به روش OFAT در نقاط مرکزی طراحی آزمایش استفاده شده در روش ANOVA آثار خطی عوامل مذکور را تأیید کرد. نتایج این آنالیز نشان از آن دارد که با افزایش یک عامل از سطح ۲- به ۲ و ثابت نگه داشتن سایر عوامل در نقطه مرکزی، میزان اهمیت عوامل ترکیب درصد بوتان، C_6+ و حتی P_0 نیز تقریباً به اندازه ترکیب درصد ایزومرهای بوتان، منجر به افزایش NG-DCF خواهند شد. این نتیجه را مقادیر F-value نزدیک به هم آنالیز ANOVA برای این عوامل تأیید می‌کند. هر دو آنالیز مذکور نشان از آن دارد که تغییر ترکیب درصد بخار آب در محدوده اعلام شده بر NG-DCF اثرگذار نیست. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت عددی، حاکی از آن است که میزان حساسیت‌پذیری بدون بعد NG-DCF به ترتیب

مرکزی خود باقی بمانند، مجدداً NSC_T بیش از NSC_{P_g} است؛ اما با تکرار محاسبات در دمای بالا $60^\circ C$ و فشار اتمسفریک، در ازای تغییر یک درصدی دما و فشار NSC_{P_g} ، ۴ برابر NSC_T حاصل شد. این امر نشان از آن دارد که در دمای بالا و فشار پایین، حساسیت ضریب تصحیح دانسیته گاز طبیعی نسبت به فشار بیش از دما است.

جدول ۴- نتایج محاسبه عددی آنالیز حساسیت و عدم قطعیت

NG-DCF

پارامتر i	NU_{X_i}	NSC_{X_i}
T	$7 \times 10^{-2/6}$	۰/۳۰۱۹۹۲
P_g	$5 \times 10^{-8/62}$	۰/۹۸۰۴۱۹
P_0	$6 \times 10^{-5/85}$	۰/۰۰۲۲۵۵
CH_4	۰/۰۰۱۲۲۹	۰/۰۰۱۴۳۹
C_2H_6	۰/۴۳۰۶۶۴	6×10^{-6}
C_3H_8	۰/۶۲۳۲۶۹	$6 \times 10^{-1/75}$
C_4H_{10}	۰/۶۰۴۹۳۸	$7 \times 10^{-8/37}$
$C_5 +$	۰/۴۴۴۴۴۴	$7 \times 10^{-6/4}$
N_2	۰/۱۳۳۰۱	$6 \times 10^{-3/81}$
CO_2	۰/۷۶۵۶۲۵	$8 \times 10^{-6/69}$
H_2O	۱	$11 \times 10^{-6/58}$
H_2S	۱	$10 \times 10^{-8/45}$

از مزایای آنالیز حساسیت عددی نسبت به سایر روش‌ها مانند ANOVA آن است که در روش مذکور به طور دقیق مشخص می‌شود حساسیت به کدام فاکتور بیشتر است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد پس از دما و فشار، فاکتورهای فشار محیط و درصد مولی متان، بیشترین حساسیت را از خود نشان می‌دهند. کمترین میزان NSC مربوط به درصد مولی بخار آب در گاز طبیعی است.

در بیشتر مدل‌هایی که برای سیستم‌های مختلف ارائه می‌شود، پارامترهای غیرقطعی وجود دارد که پیش‌بینی رفتار آن‌ها برای تضمین آینده اقتصادی طرح و مدیریت صحیح آن، ضروری به نظر می‌رسد. در این موارد سعی می‌شود با بررسی رفتار این پارامترها که تغییر کم آن‌ها روی خروجی مدل، تأثیری بسزا دارد، ریسک طرح را کاهش داده، در جهت بهبود رفتار سیستم گام برداشت [۱۶]. در همین زمینه، عدم قطعیت بی‌بعد NG-DCF مورد مطالعه قرار گرفت. به این ترتیب با جایگزینی مقادیر جدول‌های ۳ و ۴ در رابطه ۵، مقدار عدم قطعیت کلی NG-DCF به صورت بی‌بعد برابر ۰/۰۰۹۵۷ است و با توجه به اینکه مقدار NG-DCF هنگامی که تمامی متغیرها در مقدار نامی خود

دقیق ضریب تصحیح دانسیته گاز طبیعی و متعاقباً مقدار قرائت شده از کنتور (شدت جریان حجمی گاز در شرایط مبنای Q_{base}) است. همچنین این امر متأثر از دسترسی به آنالیز دقیق و برخط گاز طبیعی و فشار جو است تا بتوان خطای اندازه گیری را حتی الامکان کاهش داد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان، مراتب تشکر و سپاس خود را از واحد پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران، استان اصفهان به عنوان حامی مالی این پژوهش، اعلام می دارند.

نسبت به متغیرهای دما، فشار خط لوله، فشار محیط و درصد مولی متان، بیشترین مقادیر را نشان می دهد؛ از این رو، صرف نظر کردن از تغییرات فشار محیط در محاسبه NG-DCF جایز نیست. همچنین با استفاده از روش عددی، عدم قطعیت NG-DCF محاسبه شده با معادله حالت AGA8-DCM با توجه به متوسط عدم قطعیت های هریک از عوامل ورودی مدل، مقدار $\pm 1\%$ محاسبه شد. از این رو با توجه به نتایج حاصل، دقیق بودن تجهیزات اندازه گیری دما و فشار خط لوله انتقال گاز و کالیبراسیون به موقع آن ها امری ضروری و بسیار حائز اهمیت در تخمین

مراجع

- [1] امیرحسین مرادی، مصطفی مافی و منصور خانگی، «آنالیز حساسیت چرخه های مایع سازی گاز طبیعی با کاربری قله سایی نسبت به متغیرهای محیطی و عملیاتی»، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۶، شهریور ۱۳۹۴، صفحه ۲۸۷-۲۹۸.
- [2] M.B. Standing and D. L. Katz, "Density of Natural Gases", Transactions of the AIME, Vol. 146, December 1942, pp. 140-149.
- [3] D. Beggs and J. Brill, "A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes", Journal of Petroleum Technology, Vol. 25, No. 5, 1973, pp. 607-617.
- [4] K.R. Hall and L.J. Yarborough, "A new equation-of State for z-factor Calculations", Oil and Gas Journal, 1973, pp. 82-92.
- [5] P.M. Dranchuk, R.A. Purvis and D.B. Robinson, "Computer Calculations of Natural Gas compressibility factors Using the Standing and Katz Correction", Institute of Petroleum Technical Series, No. IP 74-008, 1974.
- [6] P.M. Dranchuk and J.H. Abu-Kassem, "Calculation of z-factors for Natural Gases Using Equation-of-State", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 14, 1975, pp 34-36.
- [7] R.W. Hankinson, L.K. Thomas and K.A. Phillips, "Predict Natural Gas Properties", Hydrocarbon Processing, 1969, pp. 106-108.
- [8] B. Berry, AGA Calculations – 1985 Standard VS 1992 Standard, ABB Automation, Totalflow Bartlesville, OK, 1992.
- [9] American Gas Association, Compressibility Factor of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases, Operating Section 1515, Wilson Boulevard Arlington Virginia 22209, Catalog No. XQ9212, 2nd ed., 1992.
- [10] M. Cimondi and J. Mollerup, "Development and application of a three parameter RK_PR Equation of state", Fluid phase Equilibria, Vol. 232, 2005, pp.74-89.
- [11] D. Hou, H. Deng, H. Zhang, K. Li, L. Sun, and Y. Pan, "Phase Behavior and Physical Parameters of Natural Gas Mixture with CO₂", Journal of Chemistry, Vol. 2015, Article ID 873718, 2015.
- [12] F. Varzandeh, E.H. Stenby and W. Yan, "Compartment of GERG-2008 and simpler EoS models in calculation of phase equilibria and physical properties of natural gas related systems", Fluid Phase Equilibria, Vol. 434, 2016, pp.21-43.
- [13] I.I. Azubuike, S.S. Ikiensikimama and O.D. Orodu, "Natural Gas Compressibility Factor Measurement and Evaluation for High Pressure High Temperature Gas Reservoirs", International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 7, No. 7, July 2016, pp. 1173-1181.
- [14] P. Ahmadi, A. Chapoy, B. Tohidi, "Density, speed of sound and derived thermodynamic properties of a synthetic natural gas", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 40, 2017, pp. 249-266.
- [15] M. Farzaneh-Gord, B. Mohseni-Gharyehsafa, A. Toikka and I. Zvereva, "Sensitivity of Natural Gas Flow Measurement to AGA8 or GERG2008 Equation of State Utilization", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 57, 2018, pp. 305-321.

[۱۶] حسین بدیعی، احمد امامی، رئوف غلامی و مهیار یوسفی، «استنتاج پارامترهای تأثیرگذار در شاخص سودآوری پروژه‌های سرمایه گذاری ریسک‌پذیر صنعتی و معدنی با استفاده از تحلیل»، مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، دوره ۲، شماره ۸، پاییز ۱۳۹۰، صفحه ۱۵۵-۱۶۹.

[17] F. Pianosi, T. Wagener, "Distribution-based sensitivity analysis from a generic input-output sample", *Environmental Modelling and Software*, Vol. 108, 2018, pp. 197-207.

[۱۸] محمدمهدی جلیلی، سعید ابراهیمی و ندا همت، «شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت ارتعاشات غیرخطی حرکت غلت شناور»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۲۵-۱۳۷.

[19] H. Christopher Frey and S.R Patil, "Identification and review of sensitivity analysis methods", *Risk analysis*, Vol. 22, No. 3, 2002, pp.553-578.

[20] G.E. Box and K. Wilson, "On the experimental attainment of optimum conditions", *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol. 13, 1951, pp. 1-45.

[21] R.H. Myers, D.C. Montgomery and C.M. Anderson-Cook, *Response surface methodology, Process and product optimization using designed experiments*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2009.

[۲۲] پرویز تاجداری و کیانوش فتحی واجارگاه، مقدمه‌ای بر آمار، انتشارات انا، ایران، ۱۳۸۸.

[23] A. Balaram Naik, A. Chennakeshava Reddy, *Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA)*, Vol. 8, 2018, pp. 327-339.

[۲۴] علی‌رضا نگهبان، پردازش داده‌ها با Minitab نگارش ۱۳، انتشارات جهاد دانشگاهی فارس، ایران، ۱۳۸۰.

[25] F. Bashipour and S.M. Ghoreishi, "Response surface optimization of supercritical CO₂ extraction of α -tocopherol from gel and skin of Aloe vera and almond leaves", *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 95, November 2014, pp. 348-354.

[۲۶] منصور مرد علی‌زاده، محمدرضا سلیمانی یزدی و محمدعلی سفرخانین، «مدل‌سازی و بررسی پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با استفاده از روش رویه پاسخ»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال دوازدهم، شماره ۳۸، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۰۳-۱۱۶.

[27] M. Farzaneh-Gord and H. Rahbari, "Developing novel correlations for calculating natural gas thermodynamic properties", *Chemical and Process Engineering*, Vol. 32, No. 4, 2011, pp. 435-452.

[۲۸] سیفالله سعدالدین و سعید رستگار، «تحلیل آگرژی در ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی دروازه شهری»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال هشتم، شماره ۲۲، تابستان ۱۳۸۹، صفحه ۱۳-۲۰.

[29] C.A. Hwang, P.P. Simon, H. Hou, K.R. Hall, J.C. Holste and K.N. Marsh, "Burnett and pycnometric (P, V_m, T) measurements for natural gas mixtures", *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 29, No. 12, 1997, pp.1455-1472.

[30] L. Čapla, P. Buryan, J. Jedelský, M. Rottner and J. Linek, "Isothermal PVT measurements on gas hydrocarbon mixtures using a vibrating-tube apparatus", *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 34, No. 5, 2002, pp. 657-667.

[31] P. Patil, S. Ejaz, M. Atilhan, D. Cristancho, J.C. Holste and K.R. Hall, "Accurate density measurements for a 91% methane natural gas-like mixture", *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 39, No. 8, 2007, pp.1157-1163.

[32] B.Ozcelik and T.Erzurumlu, "Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 3, 2006, pp. 437-445.