

پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات های گازی با استفاده از روش سطح پاسخ

جواد صیاد امین^{۱*}، سمیه نیکخواه^۲

^۱ استادیار دانشگاه گیلان، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه گیلان، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی

چکیده

خطوط لوله اگرچه متداول ترین فناوری انتقال گاز است اما به واسطه عدم توجیه اقتصادی به خصوص در مسافت های طولانی مشکلاتی را نیز به همراه دارد. این مشکلات عموماً بخاطر تشکیل هیدرات های گازی می باشد. برای غلبه بر این مشکل مطالعه علت تشکیل هیدرات های گازی ضروری است. مقاله حاضر به بحث درباره کاربرد روش سطح پاسخ (RSM: Response Surface Methodology) در بررسی شرایط تشکیل هیدرات های گازی پرداخته است. با استفاده از روش سطح پاسخ دماهای تشکیل هیدرات به شکل تابعی از فشار و وزن مولکولی بیان شده است. مدل حاضر در محدوده دمایی ۲۶۰ تا ۲۹۸ درجه کلوین، وزن مولکولی گاز از ۱۶ تا ۲۹ و فشار بین ۱۲۰۰ تا ۴۰۰۰۰ کیلو پاسکال نتایج دقیقی را پیش بینی می کند. مدل از ضریب همبستگی بالایی برخوردار بوده و درصد خطای مطلق میانگین شرایط پیش بینی شده کمتر از ۰/۲۹٪ است، که در مقایسه با برخی مدل های موجود از دقت بالاتری برخوردار است.

کلمات کلیدی

هیدرات های گازی، روش سطح پاسخ، شرایط تشکیل هیدرات

نکات برجسته پژوهش

- تحلیل تشکیل هیدرات های گازی به کمک طراحی تجربی و تحلیل آماری
- ارائه فرمول تجربی بر اساس روش سطح پاسخ برای تشکیل هیدرات

۱- مقدمه

هیدرات های گاز طبیعی جامدهای بلوری هستند که ظاهری شبیه برف دارند و جز خانواده کلاتریت ها محسوب می شوند. حفره های شبکه آب (میزبان) که از طریق پیوند هیدروژنی بین مولکول های آب به هم متصل شده اند مولکول های گازی (مهمان) با وزن مولکولی کم را درون شبکه خود به دام می اندازند. نمونه بارز این مولکولهای گازی ترکیبات کوچکتر از پنتان موجود در گاز طبیعی از قبیل متان، اتان، پروپان و کربن دی اکسید می باشند [۱-۲].

هیدرات های گازی در ذخیره سازی و انتقال گاز اهمیت فراوانی دارند. با توجه به اینکه هیدرات های گازی در دمایی بالاتر از انجماد آب وجود دارند، می تواند باعث گرفتگی در خط لوله ها شوند [۲]. در سال ۱۹۳۴ همر اشمیت دلیل انسداد لوله های انتقال گاز را تشکیل هیدرات ها دانست [۳]. این کشف تاکیدی بر اهمیت مطالعه هیدرات های گازی و مقدمه ای برای مطالعه درباره روش های مختلف پیشگیری از آن بوده است.

بیشتر مطالعات انجام شده به شرایط دما و فشار تشکیل هیدرات ها پرداخته است. روش های مختلفی جهت پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات وجود دارد. این روش ها را می توان به دو دسته روشهای تجربی و مدل‌های ترمودینامیکی تقسیم بندی کرد. ساده ترین روش تجربی منحنی نسبی گاز بوده که توسط کتز ارایه شده است [۴] و برای پیش بینی فشار و دمای تشکیل هیدراتها به کار می رود.

برخی از این مدل های ترمودینامیکی عبارتند از: همر اشمیت [۳]، برگ [۵]، کوبایشی و همکاران [۶]، موتی [۷] و. تمامی این مدل ها شرایط تشکیل هیدرات (فشار و دما) را پیش بینی کرده اند. بهادری و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ با کمک ارتباط بین داده های آزمایشگاهی بایکدیگر تابع غیرخطی سهموی را جهت تخمین سریع تشکیل هیدرات ارائه نمودند. متغیرهای مستقل مورد استفاده در تابع دما و وزن های مولکولی گازهای مختلف بود. با توجه به اهمیت روز افزون هیدرات های گازی، استفاده از روش های مناسب ساده تر برای پیش بینی شرایط تشکیل هیدراتها ضروری بنظر می رسد.

۲- طراحی تجربی و تحلیل آماری

روش سطح پاسخ (RSM: Response Surface Methodology) مجموعه ای از روش های ریاضی و آماری است. در بهینه سازی فرایندهایی که پاسخ مورد نظر تحت تاثیر تعدادی از متغیرها است کاربرد دارد. کاهش تعداد آزمایشات و قابل برآورد بودن ضرایب رگرسیون درجه دو و اثر متقابل فاکتورها از مزیت های این روش است. [9-10]

انتخاب مجموعه ای از متغیرهای مستقل موثر با توجه به هدف مسئله اولین گام در استفاده از روش سطح پاسخ می باشد. در گام بعد انتخاب طرح آزمایش و انجام آزمایش مطابق با روش طرح آزمایش است. در نهایت برازش تابع چند جمله ای و ارزیابی تناسب مدل می باشد. [10]

در روش سطح پاسخ رفتار سیستم بر اساس برازش یک معادله چند جمله ای درجه دو برای مجموعه ای از داده های تجربی بیان می شود.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i X_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} X_{ii}^2 + \sum_{1 \leq i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

که در آن Y متغیر پاسخ، $\beta_0, \beta_i, \beta_j, \beta_{ij}$ به ترتیب ضریب ثابت، ضریب خطی و ضریب درجه دو و ضریب اثر متقابل هستند.

X_i و X_j متغیرهای مستقل هستند. [11]

۱-۲- تعریف بعضی از اصطلاحات بکار رفته

قبل از بحث در باره کاربرد روش RSM در بهینه سازی داده های تجربی، تعریف بعضی از اصطلاحات کلیدی به این صورت است: فاکتور یا متغیر مستقل متغیرهای تجربی است که به شکل مستقل از یکدیگر میتوانند تغییر کند. سطح، مقادیر مختلف متغیری است که در آن آزمایش باید انجام شود. مقادیر اندازه گیری شده از نتایج حاصل از آزمایش پاسخ یا متغیر وابسته گفته می شود. [10]

۳- نتایج و بحث ها

۱-۳- برازش مدل و آنالیز آماری

پژوهش حاضر، به کاربرد روش سطح پاسخ در پیش بینی شرایط تشکیل هیدراتهای گازی پرداخته است. داده های بدست آمده از منحنی نسبی کتز [۴] که در محدوده دمایی ۲۶۰ تا ۲۹۸ درجه کلوین و وزن مولکولی ۱۶ تا ۲۹ بوده اند، به چهار دسته تقسیم شده اند. این تقسیم بندی در محدوده فشارهای کمتر از ۵ مگا پاسکال و بیشتر از ۵ مگا پاسکال و همچنین محدوده وزن مولکولی کمتر از ۲۳ و بیشتر از ۲۳ انجام یافته است. دماهای تشکیل هیدرات به صورت تابعی از فشار و وزن مولکولی بیان شده است. معادله چند جمله ای درجه دو برای پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات برای هر چهار محدوده پیشنهاد شده است. رابطه پیشنهادی به صورت زیر است:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 (X_1 X_2) \quad (2)$$

که در آن Y لگاریتم طبیعی دما، X_1 و X_2 متغیرهای مستقل هستند. X_1 وزن مولکولی گاز و X_2 لگاریتم طبیعی فشار است. ضرایب β_0 تا β_5 برای هر چهار محدوده ذکر شده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: ضرایب معادله (۲)

coefficient	Molecular weight less than 23; P≤5000	Molecular weight more than 23; P≤5000	Molecular weight less than 23; P>5000	Molecular weight more than 23; P>5000
β_0	2/75055	5/40944	3/69789	5/41563
β_1	0/234685	-0/0129135	0/132097	0/00914475
β_2	0/136758	0/0747925	0/132653	0/0171988
β_3	-0/00526993	0/000473230	-0/00270622	-7/40660 × 10 ⁻⁵
β_4	-0/00180764	-7/51186 × 10 ⁻⁴	-0/00310191	0/000543173
β_5	-0/00411141	-0/00137185	-0/00288800	-5.09203 × 10 ⁻⁴

بعد از برازش رابطه مدل مورد استفاده برای پیش بینی، معنا دار بودن آن به وسیله آنالیز واریانس (ANOVA) مورد ارزیابی قرار گرفت. معنی دار بودن مدل به وسیله F-Test و P-Value مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر زیاد F و مقادیر کم P معنادار بودن مدل را به خوبی بیان میکنند. [12-13]

نتایج حاصل از آنالیز آماری در جدول ۲ نشان داده شده است. اگر مقدار P-value از ۰/۰۵ کمتر باشد، فاکتور مورد بررسی روی متغیر پاسخ موثر بوده است و پاسخ را در سطح ۰/۹۵ تحت تاثیر قرار می دهد [۱۲-۱۳]. از جدول ۲ مشاهده می شود که اثر خطی هر دو فاکتور در هر چهار محدوده در سطح ۵٪ معنا دار بوده است (مقدار P=۰/۰۰۰۵ به این معنا است که P<۰/۰۰۰۵

است). اثر متقابل دو فاکتور نیز از نظر آماری معنا دار بوده است. اما در مورد اثرات درجه دوم، مقدار P-value برای $(X_2 * X_2)$ در دو محدوده $(P < 5000; mw < 23)$ و $(P > 5000; mw > 23)$ از ۰/۰۵ بیشتر است، لذا جزء متغیر های موثر نیستند. معنا دار بودن مدل برازش یافته، با استفاده از ضریب همبستگی R^2 بررسی شده است. برای قابل قبول بودن مدل از نظر آماری R^2 ، تعدیل شده $(Adjusted R^2)$ و R^2 پیش بینی شده $(Predicted R^2)$ باید دارای بالاترین مقدار باشند. مدلی مناسب است که مقادیر $Adjusted R^2$ و $Predicted R^2$ آن کمتر از ۰/۲ از هم اختلاف داشته باشند. [۱۴ - ۱۵]

مقادیر R^2 ، $Adjusted R^2$ و $Predicted R^2$ در جدول ۳ آورده شده است. از جدول ۳ مشاهده می شود که مقادیر R^2 برای هر چهار محدوده نزدیک به یک است، در نتیجه مدل ارائه شده در توصیف تغییرات متغیر پاسخ تا حدود زیادی قابل قبول است. مقادیر بالا $Adjusted R^2$ و $Predicted R^2$ نشان دهنده این است که مدل توانایی خوبی برای برازش داده ها داشته است.

جدول ۲: نتایج آنالیز واریانس مدل سطح پاسخ

Source	P<5000; m<23		P<5000; m>23		P>5000; m<23		P>5000; mw>23	
	F	P	F	P	F	P	F	P
Linear	1374.28	0.000	990.26	0.000	8168.11	0.000	3845.41	0.000
X ₁	1774.13	0.000	113.54	0.000	6335.35	0.000	140.98	0.000
X ₂	1620.87	0.000	1878.10	0.000	6929.02	0.000	7533.89	0.000
Square	246.53	0.000	7.5	0.001	1110.99	0.000	5.69	0.005
X ₁ *X ₁	469.90	0.000	13.87	0.000	2141.33	0.000	10.87	0.001
X ₂ *X ₂	1.14	0.287	2.11	0.000	1110.99	0.000	1.96	0.172
Interaction	53.42	0.000	31.06	0.000	419.06	0.000	55.91	0.000
X ₁ *X ₂	53.42	0.000	31.06	0.000	419.06	0.000	55.91	0.000

جدول ۳: ضرایب همبستگی مدل.

Source	R^2	R_{Pred}^2	R_{Adj}^2
P<5000;mw<23	0.9565	0.9526	0.9548
P<5000;mw>23	0.9595	0.9557	0.9579
P>5000;mw<23	0.9920	0.9914	0.9917
P>5000;mw>23	0.9902	0.9887	0.9896

۲-۲- منحنی سطح پاسخ

با رسم منحنی های سطح پاسخ (surface plot) اثر هم زمان دو متغیر فشار و وزن مولکولی روی دمای تشکیل هیدرات ها بررسی شده است. شکل شماره ۱ منحنی سطح پاسخ برای چهار محدوده نام برده شده را نشان می دهد. از شکل های (A) و (C) مشاهده می شود، افزایش دو فاکتور فشار و وزن مولکولی با افزایش دما همراه است. شکل های (B) و (D) نمودار سطح پاسخ در محدوده وزن مولکولی بیشتر از ۲۳ را نشان می دهند. افزایش فشار و کاهش وزن مولکولی منجر به افزایش دما تا میزان بیشینه آن می شود.

۴- مقایسه مدل سطح پاسخ با سایر مدلها

در این بخش نتایج پیش بینی شده با روش سطح پاسخ با نتایج برخی از مدل های ترمودینامیکی مقایسه شد. جدول

(۴) مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج سایر مدل ها، در حالی که شرایط تشکیل هیدرات (دما، فشار و وزن مولکولی) یکسان بوده را نشان می دهد.
به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی با داده های تجربی از میانگین خطای مطلق که توسط رابطه (۳) نشان داده شده، استفاده شده است:

$$\text{Average Absolute Deviation} = \frac{\sum_{\# \text{ Data Points}} \frac{|T_{pred} - T_{exp}|}{T_{exp}}}{\# \text{ Data Points}} \times 100 \quad (3)$$

در معادله فوق T_{pred} دمای پیش بینی شده توسط مدل سطح پاسخ در این کار، T_{exp} نتایج تجربی حاصل از مقالات می باشند و مخرج کسر تعداد نقاط تجربی مورد استفاده در هر حالت است.
جدول ۵، مقایسه مقدار درصد خطای مدل حاضر با سایر مدل ها را نشان می دهد. از جداول ۴ و ۵ مشاهده می شود، دماهای تشکیل هیدرات پیش بینی شده با مدل سطح پاسخ با مقادیر تجربی آن تطابق نزدیکی دارد.
شکل ۲ مقایسه مقادیر تجربی با مقادیر پیش بینی شده با روش سطح پاسخ را نشان می دهد. تطابق نزدیک مدل حاضر با مقادیر تجربی نشان دهنده همبستگی بسیار خوب بین نتایج بدست آمده و مقادیر تجربی است. همانطور که جدول ۵ نشان می دهد، درصد میانگین خطای مطلق حدود ۰/۲۹٪ است. ضرایب جدید بدست آمده جهت تخمین شرایط تشکیل هیدرات نسبت به سایر مدل های موجود، البته به غیر از مدل بهادری و همکاران، خطاهای کمتری داشته است.

جدول ۴: نتایج بدست آمده از روش سطح پاسخ و مقایسه با مقادیر تجربی و سایر مدل ها

Pressure (kPa)	Gas molecular weight	Temperature (K)						
		Experimental temperature [۱]	Hammerschmidt [۳]	Berg [۵]	Kobayashi [۶]	Motiee [۷]	Bahadori [۸]	RSM correlations
3157.8	16	274.82	283.71	275.04	275.04	278.04	275.21	273.40
4136.85	16	277.59	285.98	277.65	277.71	280.26	277.33	276.47
5515.81	16	280.37	288.59	280.37	280.48	282.59	279.59	279.55
1723.69	17.4	277.59	279.21	272.43	277.21	275.43	277.56	277.04
3309.48	17.4	283.15	284.09	283.98	282.82	280.98	282.91	283.83
6756.86	17.4	288.71	290.59	291.65	288.37	286.48	288.91	287.86
18098.74	17.4	294.26	301.98	296.87	291.54	293.15	295.1	294.93
2688.96	18.85	283.15	282.43	284.37	285.09	281.71	284.42	286.30
14134.25	18.85	294.26	298.82	296.82	292.21	293.54	295.72	296.04
827.37	20.3	274.82	274.71	263.37	277.32	273.93	274.83	275.73
2344.2	20.3	283.15	281.43	284.09	285.82	282.71	283.57	283.63
4757.38	20.3	288.71	287.21	291.65	290.59	287.98	288.62	288.49
23442	20.3	297.04	305.54	298.32	286.59	297.87	297.61	297.40
496.42	23.2	272.04	272.09	252.82	274.04	273.15	272.72	271.05
1930.53	23.2	283.15	279.98	282.98	285.59	284.26	283.98	283.33
11721.09	23.2	294.26	296.54	296.93	291.04	295.82	294.64	294.73
758.42	26.1	277.59	274.26	265.93	278.32	278.87	277.45	275.96
1585.79	26.1	283.15	278.65	280.93	284.21	284.32	282.57	281.82
17926.37	26.1	297.04	301.87	298.15	282.93	297.93	296.74	297.15
413.69	29	274.82	271.26	250.59	273.87	274.71	275.7	274.95
1344.48	29	283.15	277.59	278.76	281.48	283.15	282.66	283.20
3033.69	29	288.71	283.37	289.65	286.43	288.04	289.66	288.68

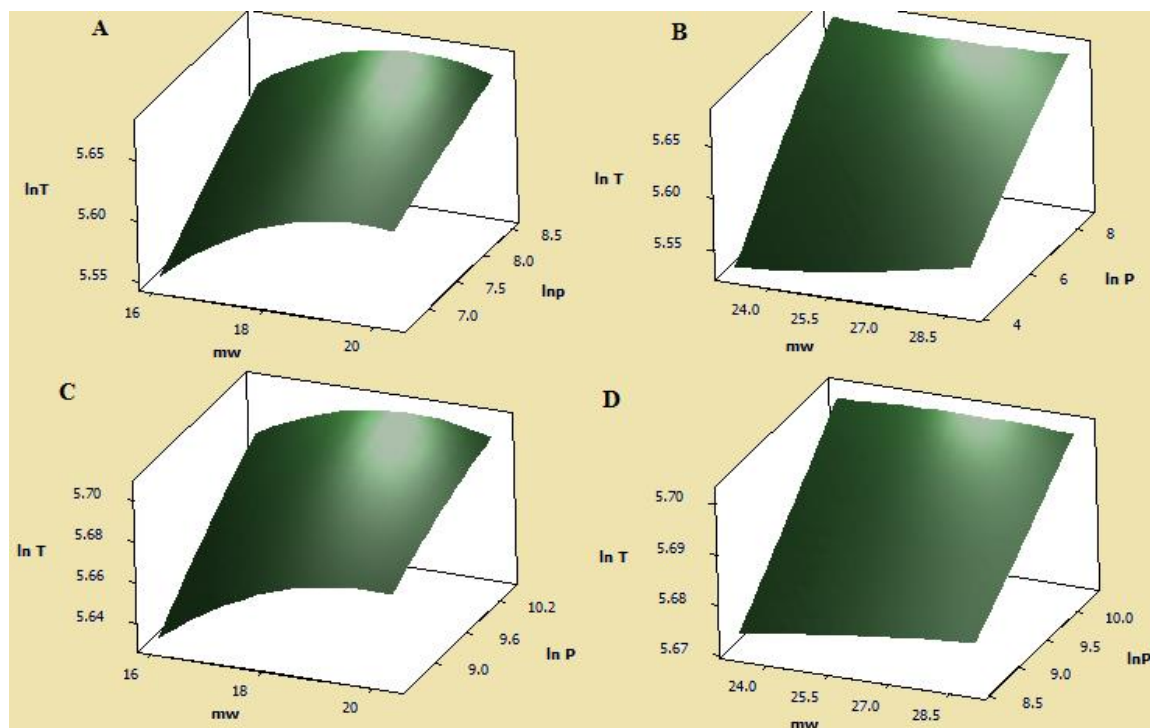
جدول ۵: مقایسه در صد خطای میانگین مدل فعلی با سایر مدل ها

Pressure (kPa)	Gas molecular weight	Error percentage						
		Experimental temperature [°C]	Hammerschmidt [°C]	Berg [°C]	Kobayashi [°C]	Motiee [°C]	Bahadori [°C]	RSM correlations
3157.8	16	274.82	3.23	0.08	0.08	1.17	0.14	0.52
4136.85	16	277.59	3.02	0.02	0.04	0.96	0.1	0.40
5515.81	16	280.37	2.93	0	0.04	0.79	0.28	0.29
1723.69	17.4	277.59	0.58	1.86	0.14	0.78	0.01	0.20
3309.48	17.4	283.15	0.65	0.29	0.12	0.77	0.07	0.24
6756.86	17.4	288.71	0.65	1.02	0.12	0.77	0.07	0.29
18.098.74	17.4	294.26	2.62	0.89	0.93	0.38	0.29	0.23
2688.96	18.85	283.15	0.26	0.43	0.69	0.51	0.45	1.11
14134.25	18.85	294.26	1.55	0.87	0.7	0.25	0.5	0.61
827.37	20.3	274.82	0.04	4.16	0.91	0.32	0	0.33
2344.2	20.3	283.15	0.61	0.33	0.94	0.16	0.15	0.17
4757.38	20.3	288.71	0.52	1.02	0.65	0.25	0.03	0.08
23442	20.3	297.04	2.86	0.43	3.52	0.28	0.19	0.12
496.42	23.2	272.04	0.02	7.07	0.74	0.41	0.25	0.36
1930.53	23.2	283.15	1.12	0.06	0.86	0.39	0.29	0.06
11721.09	23.2	294.26	0.77	0.91	1.1	0.53	0.13	0.16
758.42	26.1	277.59	1.2	4.2	0.26	0.46	0.05	0.59
1585.79	26.1	283.15	1.59	0.78	0.37	0.41	0.2	0.47
17926.37	26.1	297.04	1.63	0.37	4.75	0.3	0.1	0.04
413.69	29	274.82	1.29	8.81	0.34	0.04	0.32	0.05
1344.48	29	283.15	1.63	0.37	0.59	0.3	0.1	0.02
3033.69	29	288.71	1.85	0.33	0.79	0.23	0.33	0.01
Overall error			30.62	42.49	18.68	10.46	4.05	6.35
Average error in percentage			1.39	1.93	0.84	0.48	0.18	0.29

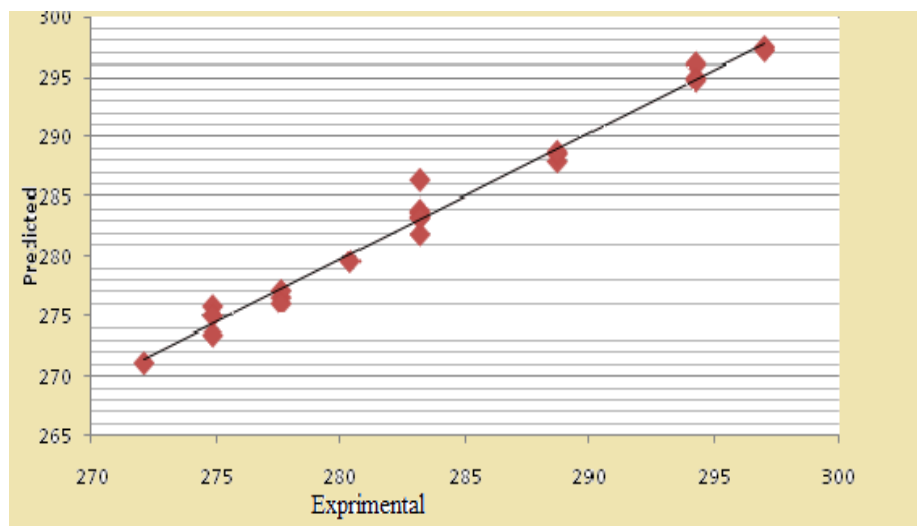
۵- نتیجه گیری

این مطالعه به کاربرد روش RSM در بررسی شرایط تشکیل هیدرات های گازی اشاره دارد. ضریب همبستگی بالا آن حاکی از این است که مدل ریاضی بدست آمده می تواند بخوبی شرایط تشکیل هیدرات های گازی را پیش بینی کند. مدل حاضر در محدوده دمایی ۲۶۰ کلوین تا ۲۹۸ کلوین، وزن مولکولی ۱۶ تا ۲۹ و فشار بین ۱۲۰۰ تا ۴۰۰۰۰ کیلو پاسکال نتایج دقیقی را پیش بینی کرد. مدل حاضر با درصد میانگین خطای مطلق حدود ۲۹٪ نسبت به مدل های موجود دقت بیشتری داشته است. با این حال خطای مدل ارایه شده از میزان خطای مدل بهادری و همکاران بیشتر بوده، هر چند این میزان قابل توجه نیست. RSM با ارایه یک معادله چند جمله ای درجه دو، روشی ساده برای پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات ها می باشد. حل معادلات خطی سهموی ارایه شده در مدل بهادری و همکاران وقت گیر بوده است.

پدیده تشکیل هیدرات های گازی در بخش های مختلف نفت و گاز در فرایندهای پایین دستی موجب توقف یا کاهش تولید فرآورده ها می شود. روش RSM با پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات می تواند کمک موثری در مسائل مربوط به تشکیل هیدرات های گازی نموده و همچنین از اتلاف هزینه ها جلوگیری کند.



شکل ۱. نمودار سطوح پاسخ: (A) نمودار سطح پاسخ ($P < 5000; mw < 23$), (B) نمودار سطح پاسخ ($P < 5000; mw > 23$), (C) نمودار سطح پاسخ ($P > 5000; mw < 23$), (D) نمودار سطح پاسخ ($P > 5000; mw > 23$).



شکل (۲). نمودار مقایسه مقادیر تجربی دما با مقادیر پیش بینی شده

مراجع

[۱] Sloan, E.D., Koh, C.A., *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, 3rd edition, Chemical Industries, CRC Press, USA, 2008.

[۲] Khosravani, E. Moradi, Gh., Sajjadifar, S., "An accurate thermodynamic model to predict phase behavior of clathrate hydrates in the absence and presence of methanol based on the genetic algorithm", *J. Chem. Thermodynamics*, Vol.57, pp. 286-294, 2013

- [۳] Hammerschmidt, E. G., "Formation of Gas. Hydrates in Natural Gas Transmission Lines", Ind Eng Chem , Vol. 26, 851-855, 1934.
- [۴] Katz, D. L., "Prediction of Conditions for Hydrate Formation in Natural Gases", Trans AIME, Vol.160, pp.140-149, 1945.
- [۵] Berge, B. K., Norsk Hydro, *Hydrate Prediction on A Microcomputer*. SPE 15306, presented at the Society of Petroleum Engineers Symposium on Petroleum Industry Applications. Colorado, USA: Silvercreek, 1986
- [۶] Kobayashi, R., Song, K, Sloan E. *Phase Behavior of Water/ Hydrocarbon Systems*, In: Bradley H B, Gipson Fred W, ed. Petroleum Engineering Handbook. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 1987.
- [۷] Motiee, M., "Hydrocarbon Process", Int Ed, Vol.70, pp.98-103, 1991.
- [۸] Bahadori, A., Vuthaluru, H. B. "A novel correlation for estimation of hydrate forming condition of natural gases", Natural Gas Chemistry, Vol.18,453-457 ,2009.
- [۹] Ghosal, A ., Manna, A. "Response surface method based optimization of ytterbium fiberl aser parameter during machining of Al/Al2O3-MMC ", Optics & Laser Technology, Vol.46, pp. 67-76, 2013.
- [۱۰] Bezerra, M. A. , Santelli, R., Oliveira ,E.P., Villar ,L.S., Escalreira,L.A., " Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry", Talanta, Vol.76, pp. 965-977, 2008.
- [۱۱] Chang, S. W., Shaw, J. F., Yang, K. H., Chang, S. F. Shieh, C. J., " Studies of optimum conditions for covalent immobilization of *Candida rugosa* lipase on poly(c-glutamic acid) by RSM ", Bioresource Technology, Vol.99 ,pp. 2800–2805, 2008.
- [۱۲] Khayet M, Zahrim A. Y, Hilal N. "Modeling and optimization of coagulation of highly concentrated industrial grade leather dye by response surface methodology", Chemical Engineering Journal, Vol.167, pp,77-83,2011.
- [۱۳] Ghorbani, F., Younesi, H., Ghasempouri, M., Zinatizadeh, A., Amini, M., Daneshi, A., "Application of response surface methodology for optimization of cadmium Biosorption in an aqueous solution by *Saccharomyces cerevisiae*", Chemical Engineering Journal, 145, pp.267–275, 2008.
- [۱۴] Madaeni, S.S, Arast, N., Rahimpour, F., Arast, Y., "Fabrication optimization of acrylonitrile butadiene styrene (ABS)/polyvinylpyrrolidone (PVP) nanofiltration membrane using response surface methodology", Desalination, Vol.280, pp, 305-313, 2011.
- [۱۵] Khayet M., Cojocar C. "Air gap membrane distillation modeling and optimization", Desalination, Vol.287, pp.138-145, 2012.