

پیش بینی شرایط تجزیه هیدرات متان در حضور نمک‌ها به کمک شبکه خودباوری بیژین

جواد صیاد امین^۱، معصومه دهقانیان^۲، علیرضا لطفی^۲

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

چکیده

در کار حاضر یک مدل محاسباتی شبکه خودباوری بیژین^۱ برای تخمین فشار تعادلی تجزیه هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱ نمک‌های KCl ، K_2CO ، KBr ، $NaBr$ و $MgCl_2$ و همچنین غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱۵ نمک‌های $CaCl_2$ و $CaBr_2$ و غلظت وزنی ۰/۰۵ نمک $CaCl_2$ تهیه شد. از مشخصه‌های اصلی این مدل، توانایی آن در پیش بینی فشار تجزیه هیدرات متان در محدوده‌های مختلف دما و مقادیر متفاوت نمک می‌باشد. برای آموزش این شبکه، داده‌های تجربی برای شرایط تجزیه هیدرات متان در حضور برخی نمک‌ها از منابع مختلف جمع‌آوری شد. همچنین این مدل با استفاده از داده‌های تجربی مختلف تایید نیز شد. سپس نتایج پیش بینی شده توسط مدل با نتایج آزمایشگاهی موجود در منابع مورد مقایسه قرار گرفت. میزان میانگین درصد انحراف مطلق ۵/۱۴٪ نشان داد که توافق خوبی بین نتایج پیش بینی شده مدل بیژین با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد.

کلمات کلیدی

متان، تجزیه هیدرات، شبکه خودباوری بیژین

نکات برجسته پژوهش

- ارائه قوانین بیزی و قابلیت‌های آن
- تحلیل تجزیه هیدرات متان در حضور نمک‌ها با استفاده از روبری آماری
- نقش تئوری بیز در تخمین هیدرات متان حاوی بازدارنده

* sayyadamin@gmail.com

^۱ Bayesian Belief Network (BBN)

۱- مقدمه

هیدرات‌های گازی ترکیبات کریستالی جامدی هستند که از ترکیبات مختلف آب و گاز به وجود می‌آیند که در محدوده معینی از دماهای پایین و فشار بالا پایدار هستند. ذرات هیدرات در خطوط لوله تولید شده و باعث ایجاد گرفتگی در آن می‌گردد بنابراین علاقه مندی زیادی به مطالعه این پدیده در صنعت نفت و گاز وجود دارد. بیشتر مطالعات در این زمینه مربوط به جمع آوری اطلاعات شرایط دمایی و فشار تشکیل هیدرات بوده است. روشهای جلوگیری از تشکیل هیدرات عبارتند از کاهش میزان آب در مخلوط، بالا نگه داشتن دما، پایین آوردن فشار سیستم و تزریق مواد بازدارنده به سیستم. این ترکیبات موادی هستند که سبب می‌شوند هیدرات در فشار مشخص در دمای پایین تری تشکیل شود. الکل‌ها، گلیکل‌ها و نمک‌ها نمونه هایی از این مواد هستند [۱].

وجود داده های قابل اطمینان از شرایط تعادلی هیدرات در حضور و عدم حضور نمک در محلول آبی بمنظور جلوگیری از تشکیل آن ضروری است. هر چند بسیاری از داده های تجربی برای فاز تعادل هیدرات های گازی در حضور نمک ها وجود دارد اما این داده ها به منابع و محدوده خاصی از فشار و نمک‌ها محدود شده است. بنابراین، نیاز به داده های قابل اعتماد از شرایط تشکیل هیدرات معقول و منطقی به نظر می‌رسد.

روشهای مختلفی برای پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات و یا تجزیه آن ابداع شده اند. این روش ها را میتوان به دو دسته تقسیم کرد: ۱- روشهای تجربی و ۲- مدل‌های ترمودینامیکی. روشهای تجربی عمدتاً در گذشته در بخش صنعت مورد استفاده قرار می‌گرفتند و روز به روز از میزان استفاده از آنها با توجه به پیشرفت روش های مدل سازی کاسته شده است. روابط و مدل‌های ترمودینامیکی مختلفی برای پیش بینی شرایط تعادل تشکیل هیدرات متان در منابع مختلف ارائه شده است. واندروالس و پلاتیو، پاریش و پروزنیتز و همچنین مدل بکار رفته در نرم افزار CSMHYD توسط اسلن برای پیش بینی شرایط تعادل تشکیل هیدرات پیشنهاد شده است [۲]. هلدر و مک گان [۳] رابطه جدیدی برای محاسبه شرایط تشکیل هیدرات متان ارائه دادند. این مدل نیاز به پارامتر برای محاسبه تعادل فاز تشکیل هیدرات متان دارد. اما این مدل ها و روابط تنها قادر به برآورد طیف خاصی از فشار تعادلی تشکیل هیدرات متان می‌باشند.

از بین مدل هایی مانند مدل شبکه عصبی و بیژین که همگی متکی بر روش آموزش و تست هستند نیز نویسندگانی چون حیدری و همکاران [۴] و صیاد امین و همکاران [۵] و سایرین یک مدل شبکه عصبی نورال (Artificial Neural Network) را بمنظور پیش بینی شرایط تشکیل هیدرات ارائه دادند. بنابراین در این تحقیق سعی شد یک مدل جامع مبتنی بر اطلاعات برگرفته از داده‌های تجربی برای پیش بینی شرایط تجزیه هیدرات متان ارائه شود. روش ارائه شده، مدل شبکه خودباوری بیژین (BBN) برای پیش بینی فشار تعادل تجزیه هیدرات متان است. ۳۶۰ سری داده که از مراجع [۶-۸] جمع آوری شد که ۸۰ درصد از این داده ها برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفت.

۲- شبکه خودباوری بیژین

روش شبکه بیژین بر اساس تلاش ها و مطالعاتی که در اواخر قرن هجدهم توسط ریاضیدانی به نام توماس بیژ که بر روی تئوری احتمالات کار می‌کرد نام گذاری شده است که مجموعه تلاش های وی منجر به ارائه قوانینی به نام قوانین بیژ شد. به ساده ترین شکل می‌توان این قانون را به صورت زیر ارائه نمود [۹]:

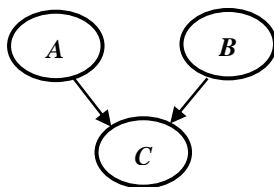
$$P(b|a) = \frac{P(a|b) \times P(b)}{P(a)} \quad (1)$$

که $P(a)$ احتمال وقوع پدیده a ، $P(a/b)$ احتمال وقوع پدیده b از میان احتمال وقوع پدیده a می‌باشد. شبکه‌های بیژین مدل‌های گرافیکی هستند که برای استدلال در مواردی که پیچیدگی و عدم قطعیت وجود دارد بکار می‌روند. گرافی است که متغیرهای تصادفی و وابستگی‌های آنها را نشان می‌دهد [۱۰]. در این گراف، گره‌ها نشانگر متغیر تصادفی گسسته یا پیوسته هستند و کمان‌های جهت‌داری که هر جفت از گره‌ها را به یکدیگر وصل می‌کنند وابستگی بین متغیرها را نشان می‌دهند. در واقع این شبکه گراف جهت‌داری است که در آن هیچ دوری وجود ندارد [۱۱]. در مورد ساختار شبکه بیژین اگر مجموعه‌ای شامل v متغیر به صورت $\{x_1, \dots, x_v\}$ داشته باشیم که هر x_i یک متغیر تصادفی باشد و گره‌های والد این متغیر با $parent(x_i)$ نشان داده شود، احتمال هر رویداد مانند $X=(x_1, \dots, x_v)$ به صورت

$$P(X) = \prod_{i=1}^v P(x_i | parent(x_i)) \quad (2)$$

محاسبه می‌شود [۱۲].

پس از ایجاد شبکه مقدار روابط بین گره‌های متصل به هم بدست می‌آید. مقدار احتمال‌های شرطی مربوط به هر متغیر در جدولی به نام جدول احتمال شرطی قرار می‌گیرد. هر گره یک جدول احتمال شرطی دارد که برای هر ترکیب از مقادیر والد هایش، احتمال شرطی هر کدام از این مقادیر را نگه می‌دارد [۱۳]. اکنون توضیح‌های احتمال بعدی برای هر گره محاسبه می‌شود که این توزیع احتمال، باور نامیده می‌شود. شکل ۱ نمایش گره‌ها و ارتباطات میان آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایش گره‌ها و ارتباطات میان آنها

از قابلیت‌های این روش می‌توان به:

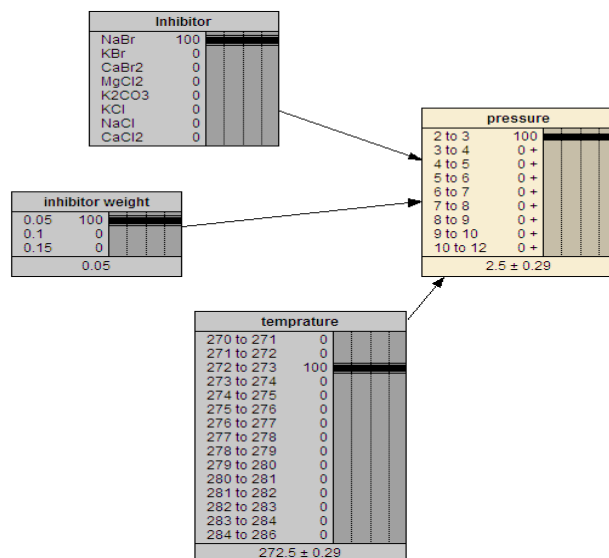
- نمایش متغیرها در یک مدل به صورت گره و روابط علت و معلولی به صورت ارتباطات میان این گره‌ها
- استفاده از اطلاعات گذشته به منظور پیش‌بینی وضعیت آینده
- تشخیص موقعیت فعلی یک مجموعه بر اساس موقعیت گذشته آن
- تحلیل مسائل با اطلاعات مبهم، ناکافی، متضاد و غیرقطعی هم در گذشته و هم در حال حاضر اشاره نمود [۹].

فشار تشکیل هیدرات متان در حضور بازدارنده، تابعی از دما، نوع بازدارنده و ترکیب درصد آن می‌باشد. در مدل حاضر، اطلاعات مربوط به این متغیر به عنوان ورودی از شبکه در نظر گرفته شده است.

$$P = (T, \text{inhibitor}, w\%)$$

شکل ۲ شبکه بیژین پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار *Netica* را نشان می‌دهد.

¹ Conditional Probability Ttable



شکل ۲: نحوه ی تاثیر متغیرها و ساخت شبکه در نرم افزار *Netica*

۳- مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده های تجربی

در جدول ۱ نتایج به دست آمده از شبکه بیژین برای پیش بینی فشار تجزیه هیدرات متان در حضور نمک های مختلف به عنوان ازدارنده با مقادیر تجربی موجود مقایسه گردیده است. همانگونه که مشاهده می شود، نتایج نزدیکی خوبی با داده های تجربی دارد. میانگین درصد انحراف مطلق نیز برابر ۵/۱۴٪ می باشد.

جدول ۱: مقایسه نتایج محاسبه شده فشار تجزیه هیدرات متان در حضور نمک های مختلف توسط شبکه بیژین با مقادیر

تجربی

بازدارنده	درصد وزنی	دمای تجربی (K)	فشار (MPa)	فشار محاسبه شده	درصد انحراف مطلق ^۱
<i>NaBr</i>	۰/۰۵	۲۷۲/۵	۸۵.۲	۲/۵	۱۲/۲۸
<i>NaBr</i>	۰/۰۵	۲۷۴/۳	۳۷.۳	۳/۵	۳/۸۵
<i>NaBr</i>	۰/۰۵	۲۷۶/۷	۴/۲۹	۴/۵	۴/۸۹
<i>NaBr</i>	۰/۰۵	۲۷۹/۹	۵/۹	۵/۵	۶/۷
<i>NaBr</i>	۰/۰۵	۲۸۲/۲	۷/۵۱	۸	۶/۵۲
<i>NaBr</i>	۰/۰۵	۲۸۵	۱۰/۱۲	۹/۵	۶/۱۲
<i>NaBr</i>	۰/۱	۲۷۴	۳/۶۵	۴	۹/۵۸
<i>NaBr</i>	۰/۱	۲۷۵/۷	۴/۴۸	۴/۵	۰/۴۴
<i>NaBr</i>	۰/۱	۲۷۶/۹	۵/۰۵	۴/۵	۱۹/۸
<i>NaBr</i>	۰/۱	۲۷۹/۱	۶/۲۹	۶/۵	۳/۳۳
<i>NaBr</i>	۰/۱	۲۸۰/۵	۷/۲۹	۷/۵	۲/۸۸
<i>NaBr</i>	۰/۱	۲۸۲	۸/۵۸	۹	۴/۸۹
<i>NaBr</i>	۰/۱	۲۸۴/۵	۱۱/۳۲	۱۱	۲/۸۲
<i>KBr</i>	۰/۰۵	۲۷۳/۱	۲/۸۹	۳	۳/۸

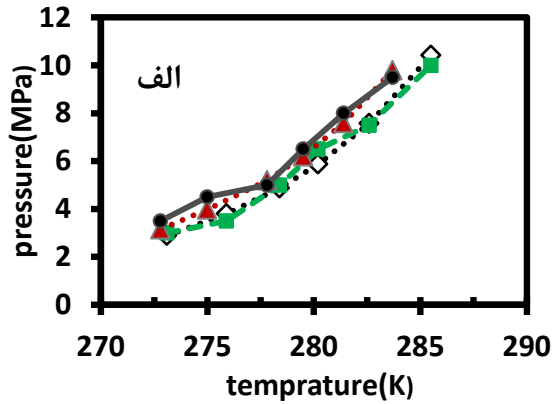
۷/۸۹	۳/۵	۳/۸	۲۷۵/۹	۰/۰۵	KBr
۲/۴۵	۵	۴/۸۸	۲۷۸/۴	۰/۰۵	KBr
۱۰/۷۳	۶/۵	۵/۸۷	۲۸۰/۲	۰/۰۵	KBr
۰/۹۲	۷/۵	۷/۵۷	۲۸۲/۶	۰/۰۵	KBr
۴/۰۳	۱۰	۱۰/۴۲	۲۸۵/۵	۰/۰۵	KBr
۱۱/۱۱	۳/۵	۳/۱۵	۲۷۲/۸	۰/۱	KBr
۱۳/۰۶	۴/۵	۳/۹۸	۲۷۵	۰/۱	KBr
۳/۶۶	۵	۵/۱۹	۲۷۷/۸	۰/۱	KBr
۴/۸۳	۶/۵	۶/۲	۲۷۹/۵	۰/۱	KBr
۵/۴	۸	۷/۵۹	۲۸۱/۴	۰/۱	KBr
۳/۰۶	۹/۵	۹/۸	۲۸۳/۷	۰/۱	KBr
۱۶/۲۷	۳/۵	۳/۰۱	۲۷۳/۶	۰/۰۵	CaBr ₂
۰	۴	۴	۴۰۲۷۶	۰/۰۵	CaBr ₂
۲/۸	۵/۵	۵/۳۵	۲۷۹/۳	۰/۰۵	CaBr ₂
۵/۰۴	۷/۵	۷/۱۴	۲۸۲	۰/۰۵	CaBr ₂
۱/۲۴	۹/۵	۹/۶۲	۲۸۴/۸	۰/۰۵	CaBr ₂
۴/۸۹	۳/۵	۳/۶۸	۲۷۲/۹	۰/۱۵	CaBr ₂
۶/۸۳	۵	۴/۶۸	۲۷۵/۲	۰/۱۵	CaBr ₂
۱/۳۵	۶	۵/۹۲	۲۷۷/۵	۰/۱۵	CaBr ₂
۲/۸۸	۷/۵	۷/۲۹	۲۷۹/۴	۰/۱۵	CaBr ₂
۲/۹۹	۱۱	۱۰/۶۸	۲۸۲/۸	۰/۱۵	CaBr ₂
۶/۰۶	۳/۵	۳/۳	۲۷۳/۳	۰/۰۵	MgCl ₂
۱/۵۳	۴/۵	۴/۵۷	۲۷۶/۳	۰/۰۵	MgCl ₂
۷/۴	۵/۵	۵/۹۴	۲۷۸/۹	۰/۰۵	MgCl ₂
۷/۳۸	۸	۷/۴۵	۲۸۱/۱	۰/۰۵	MgCl ₂
۶/۰۳	۹/۵	۱۰/۱۱	۲۸۳/۷	۰/۰۵	MgCl ₂
۷/۹۱	۴/۵	۴/۱۷	۲۷۲/۹	۰/۱	MgCl ₂
۳/۵	۵/۵	۵/۷	۲۷۵/۴	۰/۱	MgCl ₂
۳/۹۷	۷	۷/۲۹	۲۷۷/۷	۰/۱	MgCl ₂
۰	۹/۵	۹/۵	۲۸۰/۱	۰/۱	MgCl ₂
۱۸/۶۴	۳/۵	۲/۹۵	۲۷۳/۴	۰/۰۵	K ₂ CO ₃
۵/۱۴	۴/۵	۴/۲۸	۲۷۷/۱	۰/۰۵	K ₂ CO ₃
۱/۰۷	۵/۵	۵/۵۶	۲۷۹/۶	۰/۰۵	K ₂ CO ₃
۱۱/۲	۸	۷/۱۹	۲۸۲	۰/۰۵	K ₂ CO ₃
۰/۵۲	۹/۵	۹/۵۵	۲۸۴/۵	۰/۰۵	K ₂ CO ₃
۳/۰۴	۳/۵	۳/۶۱	۲۷۴/۱	۰/۱	K ₂ CO ₃
۰/۶۶	۴/۵	۴/۵۳	۲۷۶/۳	۰/۱	K ₂ CO ₃
۶/۶۲	۵/۵	۵/۸۹	۲۷۸/۸	۰/۱	K ₂ CO ₃
۷/۵۲	۸	۷/۴۴	۲۸۱	۰/۱	K ₂ CO ₃
۳/۴۸	۱۱	۱۰/۶۳	۲۸۴/۱	۰/۱	K ₂ CO ₃
۲/۱۸	۸/۵	۸/۶۹	۲۸۳/۲	۰/۰۵	KCl
۰/۷۵	۶/۵	۶/۶۱	۲۸۰/۷	۰/۰۵	KCl

۰/۹	۵/۵	۵/۵۵	۲۷۸/۸	۰/۰۵	<i>KCl</i>
۴/۴۷	۳/۵	۳/۳۵	۲۷۳/۹	۰/۰۵	<i>KCl</i>
۷/۷۴	۲/۵	۲/۷۱	۲۷۱/۶	۰/۰۵	<i>KCl</i>
۳/۶۲	۸/۵	۸/۸۲	۲۸۱/۵	۰/۱	<i>KCl</i>
۱۳/۱۸	۸/۵	۷/۵۱	۲۸۰	۰/۱	<i>KCl</i>
۰/۹	۶/۵	۶/۶۲	۲۷۸/۸	۰/۱	<i>KCl</i>
۷/۶۳	۵/۵	۵/۱۱	۲۷۶/۳	۰/۱	<i>KCl</i>
۲/۸	۴/۵	۴/۶۳	۲۷۵	۰/۱	<i>KCl</i>
۱۱/۹۴	۴/۵	۴/۰۲	۲۷۳/۷	۰/۱	<i>KCl</i>
۱۰/۰۷	۲/۵	۲/۷۸	۲۷۰/۱	۰/۱	<i>KCl</i>
۱/۰۴	۹/۵	۹/۶	۲۸۳/۶	۰/۰۵	<i>NaCl</i>
۲/۵۹	۷/۵	۷/۳۱	۲۸۱/۱	۰/۰۵	<i>NaCl</i>
۷/۷۹	۶/۵	۶/۰۳	۲۷۹	۰/۰۵	<i>NaCl</i>
۰	۵	۵	۲۷۷/۵	۰/۰۵	<i>NaCl</i>
۲/۲۳	۳/۵	۳/۵۸	۲۷۴/۲	۰/۰۵	<i>NaCl</i>
۰/۳۵	۸/۵	۸/۵۳	۲۸۳	۰/۰۵	<i>CaCl₂</i>
۰/۰۲	۷/۵	۷/۲۱	۲۸۱/۵	۰/۰۵	<i>CaCl₂</i>
۴/۵۱	۵	۵/۷۶	۲۷۹/۳	۰/۰۵	<i>CaCl₂</i>
۲/۰۴	۴/۵	۴/۴۱	۲۷۶/۷	۰/۰۵	<i>CaCl₂</i>
۲/۷۷	۳/۵	۳/۶	۲۷۴/۴	۰/۰۵	<i>CaCl₂</i>
۱۱/۰۳	۲/۵	۲/۸۱	۲۷۲	۰/۰۵	<i>CaCl₂</i>
۵/۴۳	۹/۵	۹/۰۱	۲۷۷/۴	۰/۱۵	<i>CaCl₂</i>
۱۰/۱	۸/۵	۷/۷۲	۲۷۶	۰/۱۵	<i>CaCl₂</i>
۱/۵۶	۶/۵	۶/۴	۲۷۴/۲	۰/۱۵	<i>CaCl₂</i>
۳/۳۸	۵/۵	۵/۳۲	۲۷۲/۳	۰/۱۵	<i>CaCl₂</i>
۰	۴/۵	۴/۵	۲۷۰/۸	۰/۱۵	<i>CaCl₂</i>
۵/۱۴	میانگین درصد انحراف مطلق ^۲				

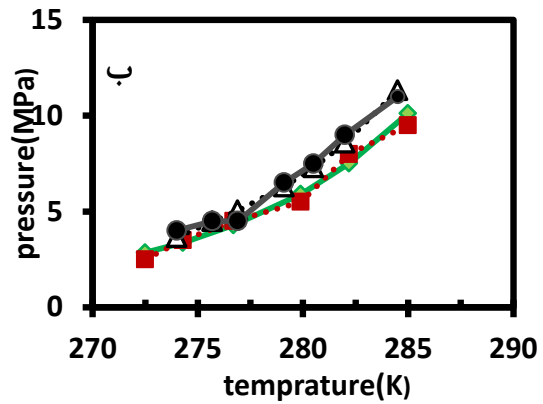
^۱Absolute deviation percent

^۲Average absolute deviation present

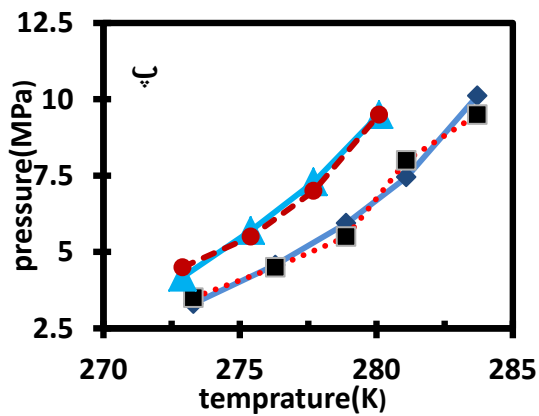
مقادیر تجربی فشار تجزیه هیدرات متان بر حسب دما و همچنین مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه خودباوری بیژین در حضور نمک‌های مختلف در شکل ۳ آورده شده است. شکل ۳الف مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱ نمک *KBr*، شکل ۳ب مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱ نمک *NaBr*، شکل ۳پ مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱ نمک *MgCl₂*، شکل ۳ت مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱۵ نمک *NaBr*، شکل ۳ث مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱ نمک *KCl*، شکل ۳ج مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱ نمک *K₂CO₃*، شکل ۳چ مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ نمک *NaCl*، شکل ۳ح مربوط به هیدرات متان در حضور غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱۵ نمک *CaCl₂* به‌مراه مقادیر آزمایشگاهی آنها می‌باشد [۸-۶].



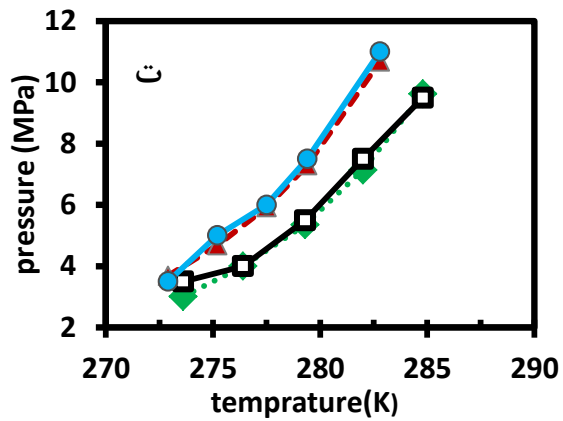
●◇●● KBr 0.05% exp -■- KBr 0.05% BBN
 ●●▲●● KBr 0.1% exp -●- KBr 0.1% BBN



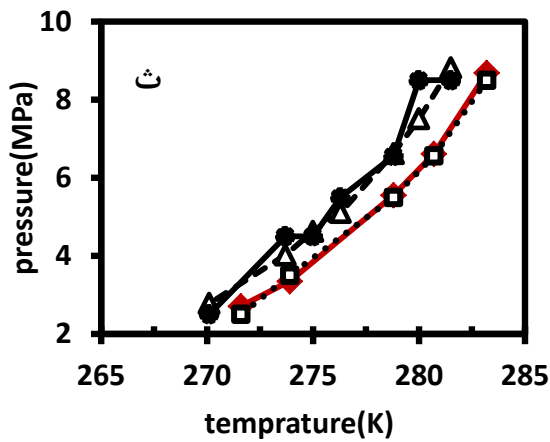
●◇●● NaBr 0.05% exp -■- NaBr 0.05% BBN
 ●●▲●● NaBr 0.1% exp -●- NaBr 0.1% BBN



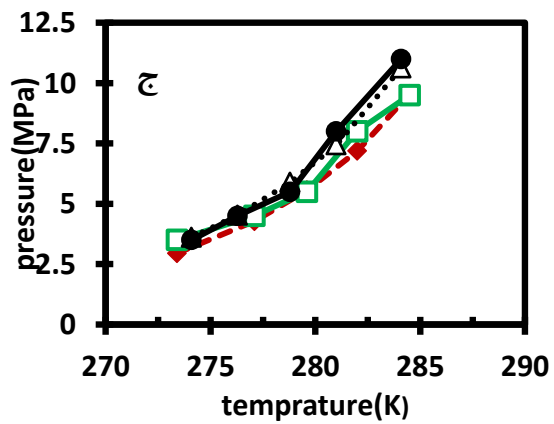
●◇●● MgCl2 0.05% exp -■- MgCl2 0.05% BBN
 ●●▲●● MgCl2 0.1% exp -●- MgCl2 0.1% BBN



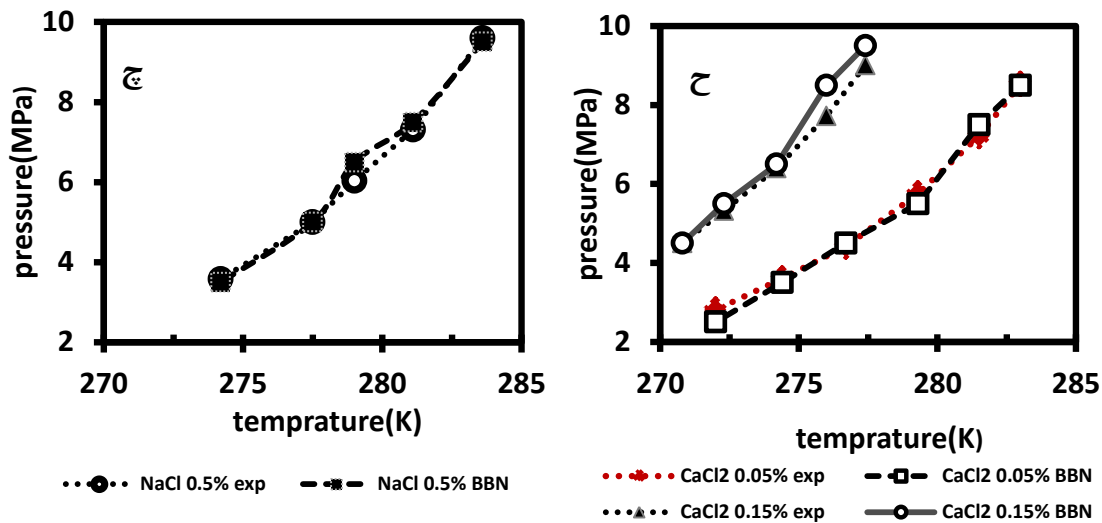
●◇●● CaBr2 0.05% exp -■- CaBr2 0.1% BBN
 ●●▲●● CaBr2 0.1% exp -●- CaBr2 0.1% BBN
 ●●▽●● CaBr2 0.15% exp -●- CaBr2 0.15% BBN



●◇●● KCl 0.05% exp -■- KCl 0.05% BBN
 ●●▲●● KCl 0.1% exp -●- KCl 0.1% BBN

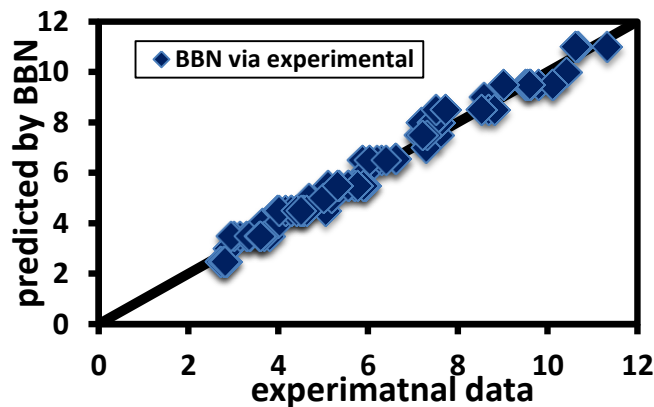


●◇●● K2CO3 0.05% exp -■- K2CO3 0.05% BBN
 ●●▲●● K2CO3 0.1% exp -●- K2CO3 0.1% BBN



شکل ۳: مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط مدل بیژین شرایط تجزیه هیدرات متان در حضور نمک های $NaBr$, KBr , $CaCl_2$, $NaCl$, K_2CO_3 , KCl , $NaBr$, $MgCl_2$

شکل ۴ نمودار داده های پیش‌بینی شده توسط شبکه بیژین بر حسب داده های تجربی می باشد. خط وسط بیانگر بهترین داده های خروجی می باشد، در نتیجه به هر میزان که داده ها به خط میانه نزدیک تر باشند، دقت مدل مورد نظر بیشتر می باشد.



شکل ۴: نمودار داده های پیش‌بینی شده توسط شبکه بیژین بر حسب داده های تجربی

۴- نتیجه گیری

از شبکه خودباوری بیژین به منظور پیش‌بینی فشار تجزیه هیدرات متان به کار گرفته شده است. متغیرهای ورودی به شبکه دما، درصد وزنی نمک و نام نمک بود. روابط علت و معلولی بین متغیرها بر اساس اطلاعات حاصل از ترمودینامیک فرآیند بنا شد. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیژین با مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با توجه به میزان میانگین درصد انحراف مطلق ۵/۱۴٪، این شبکه عل و معلول آموزش داده شده به خوبی قادر است شرایط مربوط به تجزیه هیدرات متان را در حضور نمکها با درصد وزنی مشخص پیش‌بینی نماید.

مراجع

- [1] صادقی بالاجورشری ، اعظم، مدلسازی تشکیل هیدرات گازی در سیستم های شامل ترکیب بهبود دهنده ساختمان هیدرات، درجه عالی، دانشگاه اصفهان، ۲۲، سال ۸۸.
- [2] Duan, Z., Li, D., Chen, Y., Sun, R., "The influence of temperature, pressure, salinity and capillary force on the formation of methane hydrate", *GEOSCIENCEFRONTIERS*, Vol. 2, pp.125–135, 2011.
- [3] Elgibaly, A. A. ., Elkamel, A. M. ., "A new correlation for predicting hydrate formation conditions for various gas mixtures and inhibitors", *Fluid Phase Equilibria* Vol.152, pp. 23–42, 1998.
- [۴] Heydar, A., Shayesteh, K., Kamalzadeh, L., "PREDICTION OF HYDRATE FORMATION TEMPERATURE FOR NATURAL GAS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK", <http://www.ogbus.ru/eng/>
- [5] SayyadAmin, J., Alimohamadi, S., "Comparison between thermodynamic and neural network model in methane hydrate formation process", 3rd Technical Conference Of Thermodynamics, Rasht, Iran, 2-3 October, 2011.
- [6] Mohammadi, A. H. ., Kraouti, I., Richon, D., "Methane hydrate phase equilibrium in the presence of NaBr, KBr, CaBr₂, K₂CO₃, and MgCl₂ aqueous solutions: Experimental measurements and predictions of dissociation conditions", *J. Chem. Thermodynamics* , Vol.41, pp.779–78, 2009.
- [7] Sloan, E.D. ., Koh, C.A. ., *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, third ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2007, pp. 461–467.
- [8] Mohammadi, A. H. ., Afzal, W., Richon, D., "Gas hydrates of methane, ethane, propane, and carbon dioxide in the presence of single NaCl, KCl, and CaCl₂ aqueous solutions: Experimental measurements and predictions of dissociation conditions", *J. Chem. Thermodynamics* , Vol.40, pp. 1693–1697, 2008.
- [9] طباطبایی، سیدعباس ، دشتی زاده، پوریا ، معرفی شبکه های عصبی Bayesian و کاربرد آنها در نگهداری پل ها.
- [۱۰] Korb, Kevin. B., Nicholson, Ann., *Bayesian Artificial Intelligence*, Chapman & Hall/CRC, A CRC Press Company, 2004.
- [۱۱] Heckerman, D., "Bayesian Networks for Data Mining" *Data Mining and Knowledge Discovery* 17, 1–111 (111), 111, Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands.
- [۱۲] Grossman, D., Domingos, P., "Learning Bayesian Network Classifiers by Maximizing Conditional Likelihood" Seattle, WA 19115-2350, USA.
- [۱۳] Charles, Twardy. R., Nicholson, Ann. E., Korb, Kevin. B., "Data mining cardiovascular Bayesian networks" Monash University, Clayton, Vic. 3900, Australia.