

Research Article



DOI: 10.22034/IJCHE.2021.269156.1088



DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.118.3.2



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

## Investigate the Possibility of Temporary Natural Gas Transportation Line Blocking by Using Hydrate Formation for Repairs

T. Ghezelgheshlaghi<sup>1</sup>, S. Zeinali Heris<sup>2\*</sup>, M. Norouzi Gaz-koh<sup>3</sup>, Y. Eslamian<sup>4</sup>

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, University of Tabriz

2- Professor of Chemical Engineering, University of Tabriz

3- Ph. D. Student of Chemical Engineering, University of Tabriz

4- M. Sc. in Chemical Engineering, East Azerbaijan Province Gas Company

Email: s.zeinali@tabrizu.ac.ir

### Abstract

Hydrate formation is often undesirable in gas transmission and distribution systems and is often prevented from forming by various methods. In this study, the possibility of interrupting the flow of gas through the formation of hydrates or the formation of ice (controlled) at the desired location pipelines for repairs, the method of doing this, as well as how to resolve it after completion of repairs and safety considerations has been considered and the best approach has been evaluated based on the best or the nearest operational and operational criteria. All experimental data for natural gas are collected and the hydration formation temperature is simulated using artificial neural networks of the RBF model in the software environment of MATLAB. These results are compared with the experimental data, the mean square error for these artificial neural networks are less than optimal. In this study, the effect of the presence of nanomaterials on the formation of natural gas hydrates on simulated temperature and pressure parameters using artificial neural networks RBF (time series) has been empirically derived from valid papers. In the following, one of the most practical cases has been studied and analyzed and expanded according to the formulation of mathematical constants and variables to be applied. For the simultaneous formation of hydrate and ice inside the tube, it is necessary to raise the temperature of natural gas from 60 °F to 32 °F, for this purpose, the cooling fluid of the device is nitrogen liquid at a temperature of -195.79 °C.

Received: 18 January 2021

Accepted: 19 June 2021

Page Number: 35-49

### Keywords:

Natural gas,  
Hydrate,  
Repairs,  
Ice Flow Breaker

### Please Cite this Article Using:

Ghezelgheshlaghi, T., Zeinali Heris, S., Norouzi Gaz-koh, M., Eslamian, Y., "Investigate the Possibility of Temporary Natural gas Transportation Line Blocking by Using Hydrate Formation for Repairs", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. 118, pp. 35-49, In Persian, (2022).

## بررسی امکان قطع موقت جریان گاز با استفاده از تشکیل هیدرات یا تشکیل یخ محل برای انجام تعمیرات

توحید قزلشلاقی<sup>۱</sup>، سعید زینالی هریس<sup>۲\*</sup>، ماریا نوروزی گزکوه<sup>۳</sup>، یاشار اسلامیان<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

۴- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، شرکت گاز منطقه ۱ تبریز

پیام نگار: s.zeinali@tabrizu.ac.ir

### چکیده

اغلب تشکیل هیدرات در سامانه‌های انتقال و توزیع گاز نامطلوب است و معمولاً به روش‌های مختلف از تشکیل آن جلوگیری می‌شود. در این پژوهش به بررسی امکان قطع موقت جریان گاز در خطوط از راه تشکیل هیدرات یا تشکیل یخ (به صورت کنترل شده) در محل مورد نظر از خطوط لوله گاز برای انجام تعمیرات، ارائه روش انجام این کار و نیز نحوه رفع آن پس از خاتمه عملیات تعمیرات و با در نظر گرفتن موارد ایمنی پرداخته شد و بهترین روش پیشنهادی بر اساس بهترین یا نزدیک‌ترین معیار عملیاتی و کاربردی شدن ارزیابی شد. کلیه داده‌های تجربی موجود برای گاز طبیعی جمع‌آوری و دمای تشکیل هیدرات با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل RBF (شبکه تابع پایه شعاعی) در محیط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و این نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شد. میانگین مربعات خطا برای این شبکه‌های عصبی مصنوعی کمتر از مقدار مطلوب است. در ادامه یکی از کاربردی‌ترین موارد بررسی شد و مورد تحلیل و بسط برحسب فرمول‌بندی ثابت‌ها و متغیرهای ریاضی برای کاربردی شدن قرار گرفت. برای تشکیل همزمان هیدرات و یخ در داخل لوله لازم است تا دمای گاز طبیعی از  $60^{\circ}\text{F}$  به  $32^{\circ}\text{F}$  رسانده شود؛ برای این منظور سیال خنک‌کننده دستگاه، مایع نیتروژن در دمای  $195/79^{\circ}\text{C}$  - ضروری است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۹

شماره صفحات: ۳۵ تا ۴۹

### کلیدواژه‌ها:

گاز طبیعی،

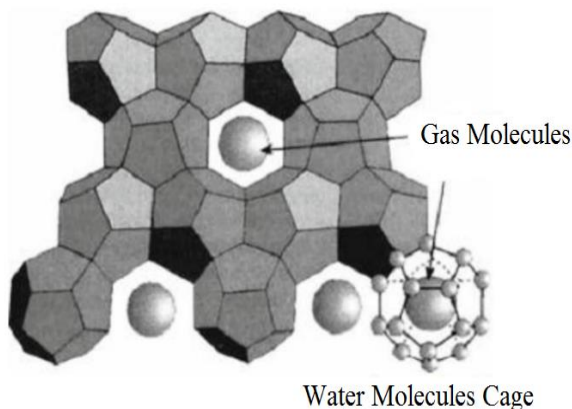
هیدرات، تعمیرات،

قطع‌کننده یخی جریان

\* تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، گروه مهندسی شیمی

### استناد به مقاله:

قزلشلاقی، ت.، زینالی هریس، س.، نوروزی گزکوه، م.، اسلامیان، ی.، "بررسی امکان قطع موقت جریان گاز با استفاده از تشکیل هیدرات یا تشکیل یخ محل برای انجام تعمیرات"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۸، صص. ۳۵-۴۹، (۱۴۰۰).



شکل ۱. قفسه هیدرات گاز [۴].

Figure 1. Gas hydrate cage [4].

مربوط است، تبدیل گاز به جامد تشریح خواهد شد [۱]:

- ۱) خط لوله<sup>۵</sup>
- ۲) گاز طبیعی مایع شده<sup>۶</sup> (LNG)
- ۳) تبدیل گاز به مایعات با ارزش<sup>۷</sup> (GTL)
- ۴) تبدیل گاز به الکتریسیته و انتقال آن<sup>۸</sup> (GTW)
- ۵) گاز طبیعی فشرده شده<sup>۹</sup> (CNG)
- ۶) گاز طبیعی جذب شده<sup>۱۰</sup> (ANG)
- ۷) تبدیل گاز به جامد<sup>۱۱</sup> (GTS)
- ۸) محصولات فناوری گاز<sup>۱۲</sup> (GTP)

گاز می‌تواند به صورت جامد (که جامد هیدرات گازی است) منتقل شود. هیدرات گاز طبیعی (NGH<sup>۱۳</sup>)، فرآورده مخلوط کردن گاز طبیعی با آب به منظور تشکیل بلورهای پایدار مواد شبه یخ است. انتقال NGH می‌تواند فرایند رقیبی برای LNG یا خطوط لوله برای انتقال گاز از تولید به بازار مصرف باشد. NGH شامل سه مرحله است: تولید، انتقال و تبدیل دوباره به گاز. هیدرات‌های گازی ترکیباتی جامد، شبیه به یخ هستند و زمانی تشکیل می‌شوند که مولکول‌های مهمان در داخل ساختار حفره‌مانند مولکول‌های آب (مولکول میزبان) به دام می‌افتند. حفره‌های توخالی که مولکول‌های

5. Pipeline  
 6. Liquefied Natural Gas  
 7. Gas to Liquids  
 8. Gas to Wire  
 9. Compressed Natural Gas  
 10. Adsorbed Natural Gas  
 11. Gas to Solids  
 12. Gas Technology Products  
 13. Natural Gas Hydrate

## ۱. مقدمه

شبکه‌های هیدرات گازی یا هیدرات‌های گازی<sup>۱</sup> ساختارهایی بلورین و غیر استوکیومتری هستند که از مولکول‌های آب یا میزبان<sup>۲</sup> و مولکول‌های گاز یا مهمان<sup>۳</sup> تشکیل یافته‌اند. هیدرات‌ها زمانی تشکیل می‌شوند که مولکول‌های آب با پیوندهای هیدروژنی به یکدیگر متصل شوند و قفسه‌ای را ایجاد کنند که توانایی پذیرایی از مولکول‌های سبک گاز را داشته باشد و این ساختار هنگامی که مولکول‌های گاز درون قفسه‌ها گرفتار می‌شوند و پیوند وان‌دروالسی بین مولکول‌های گاز و آب به وجود می‌آید به پایداری می‌رسد [۱-۲].

هیدرات‌های گازی دارای دو بخش‌اند: (۱) شبکه (۲) حفره. مولکول‌های آب به وسیله پیوندهای هیدروژنی یکدیگر را نظم می‌دهند و شبکه را ایجاد می‌کنند. ساختار بلورین هیدرات تنها زمانی پایدار می‌شود که یک مولکول مهمان در حفره گرفتار شود و یک پیوند وان‌دروالسی ضعیف با مولکول‌های آب برقرار کند [۲-۳]. حفره‌های هیدرات باید با مولکول‌های هیدرات که اندازه‌ای کوچک‌تر از اندازه حفره دارند پر شوند؛ معمولاً قطرهای کمتر از ۳ Å اندازه‌های بسیار کوچک برای پر کردن حفره‌ها هستند [۱]. بر این اساس مولکول‌هایی مانند هلیوم، هیدروژن و نئون به علت اندازه بسیار کوچک توانایی پر کردن این حفره‌ها را ندارند. هیدروکربن‌های سبک (تا C4) و نیتروژن و سولفید هیدروژن و دی‌اکسید کربن از رایج‌ترین مولکول‌های مهمان در فرایند تشکیل هیدرات هستند. نسبت اندازه حفره به اندازه مولکول مهمان باید در حدود ۰/۹ تا ۱ باشد تا یک ساختار بلوری پایدار ایجاد شود [۱]. شکل (۱) ساختار هیدرات را نشان می‌دهد که مولکول‌های گاز درون قفسه آب به دام افتاده‌اند.

نخستین بار ویژگی ساختمان شبکه بلوری هیدرات با پرتو ایکس به وسیله مولر بررسی شده است. بر اساس نظرهای وی تا آن زمان دو نوع شبکه بلوری برای هیدرات شناسایی شده بود. هر دو ساختار، مکعبی و با عنوان ساختارهای I و II شناخته شده بوده‌اند [۱].

روش‌های مختلف انتقال و ذخیره‌سازی گاز<sup>۴</sup> طبیعی به شرح زیر است و با توجه به این که روش هیدرات‌های گازی به موضوع مورد بررسی

1. Gas Hydrate  
 2. Host Molecule  
 3. Guest Molecule  
 4. Gas Storage

آب به علت پیوند هیدروژنی تشکیل می‌دهند، می‌توانند با مولکول‌های مهمان در شرایط مناسب دما و فشار پر شوند. موادی نظیر دی‌اکسید کربن، متان، اتان، پروپان و سولفید هیدروژن می‌توانند در حضور آب تحت شرایط مناسب دما و فشار، تشکیل هیدرات دهند [۱]. هیدرات‌ها از گاز طبیعی در حضور آب مایع در هنگامی که فشار بالاتر و دما پایین‌تر از خط تعادل دیاگرام فازی آب مایع و گاز قرار می‌گیرد، تشکیل می‌شوند. عمدتاً در صنعت نفت و گاز، هیدرات‌های گازی پدیده‌ای مزاحم و نامطلوب و خطرناک از لحاظ ایمنی به حساب می‌آیند؛ چرا که هیدرات‌های گازی می‌توانند خط لوله را مسدود کنند.

در سال‌های اخیر استفاده از هیدرات‌های گازی برای انتقال گاز طبیعی بسیار طرفدار یافته است؛ اما در صنعتی شدن استفاده از این روش دو مانع اساسی وجود دارد که یکی بالابودن زمان القا<sup>۱</sup> (زمان تشکیل هیدرات) و دیگری پایین بودن حجم گاز به دام افتاده در بلورهای هیدرات است. برای بهبود جنبش‌شناسی و هم‌چنین افزایش نسبت گاز به آب در هیدرات‌های گازی از روش‌های مختلفی از جمله استفاده از فشار بالا، سورفکتانت‌ها<sup>۲</sup>، ذرات خردشده یخ، همزن‌های قدرتمند، بسپارهای با سطح زیاد و غیره استفاده شده است.

تاکنون از ایجاد اختلاط [۵] و افزودن مواد فعال سطحی [۶-۵] برای کاهش زمان تأخیر و درجه فوق سردی لازم برای بلورینگی و ارتقای افزایش نرخ رشد<sup>۳</sup> هیدرات‌های گازی استفاده شده است. با این وجود، در عمل محدودیت‌هایی در میزان تأثیر روش‌های بالا وجود دارد. البته روش‌های دیگری هم‌چون استفاده از میدان‌های مغناطیسی [۷] و التراسونیک (فراصوت) [۸] نیز مطالعه شده و تأثیرهای محسوس و چشمگیری از آن‌ها در تسهیل تشکیل هیدرات‌های گازی مشاهده شده است؛ اما استفاده از این روش‌ها نیز در عمل بسیار دشوار و در برخی موارد غیرممکن است.

اغلب تشکیل هیدرات در سامانه‌های انتقال و توزیع<sup>۴</sup> گاز نامطلوب است و معمولاً به روش‌های مختلف از تشکیل آن جلوگیری می‌شود؛ برای مثال از بازدارنده‌های جنبش‌شناختی و ترمودینامیکی برای این کار استفاده می‌کنند؛ اما در این تحقیق به بررسی امکان قطع

موقت<sup>۵</sup> جریان گاز در خطوط از راه تشکیل هیدرات یا یخ (به‌صورت کنترل‌شده) در محل مورد نظر از خطوط لوله گاز برای انجام تعمیرات ضروری<sup>۶</sup> پرداخته شد. ارائه روش انجام این کار، نحوه رفع آن پس از خاتمه عملیات تعمیرات و در نظر گرفتن موارد ایمنی با بهترین روش پیشنهادی بر اساس بهترین یا نزدیک‌ترین معیار عملیاتی و کاربردی شدن ارزیابی شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

برای این کار ابتدا شرایط تشکیل هیدرات با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای گاز طبیعی بررسی شد.

داده‌های تجربی از مقالات معتبر استخراج شد؛ در آخر یکی از کاربردی‌ترین موارد پس از بررسی، بر حسب فرمول‌بندی ثابت‌ها و متغیرهای ریاضی برای کاربردی شدن، بسط و بررسی و شد و نتیجه گزارش داده شد.

### ۲-۱ روش‌های تعیین شرایط تشکیل هیدرات

بهترین روش برای تعیین شرایط تشکیل هیدرات اندازه‌گیری آزمایشگاهی داده‌های دما، فشار و ترکیب مورد نظر است. از آن‌جا که تعداد نامحدودی از شرایط برای اندازه‌گیری مورد نیاز است، این کار غیرممکن است. بنابراین تعدادی روش‌های پیش‌بینی تشکیل هیدرات مورد نیاز است. اگرچه، تلاش‌های آزمایشگاهی نسبت به نیازهای صنعتی برای تعیین شرایط تشکیل هیدرات بسیار وقت‌گیر و گران هستند؛ اما گاهی با استفاده از درون‌یابی بین نتایج تجربی به‌طور ایده‌آل می‌توان به نتایج فراتر از آن برای تعیین شرایط رسید. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات (و یا تجزیه آن) ابداع شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به چند دسته تقسیم کرد: روش‌های تجربی، مدل‌های ترمودینامیکی و روش‌های جدید [۹].

### ۲-۲ شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل RBF

شبکه تابع پایه‌شعاعی<sup>۷</sup> روشی قدرتمند برای درون‌یابی در فضاهای چندین بعدی است و توانایی فراگرفتن روابط پیچیده بین ورودی و خروجی را داراست [۱۰]. این نوع شبکه‌ها، یک طبقه‌بندی‌کننده و

1. Induction Time
2. Surfactant
3. Growth Rate
4. Transportation and Distribution System

5. Temporary Blocking  
6. Emergency Repairment  
7. Radial Basis Function

یکسان و مشابهی برای ورودی‌هایی که در فاصله شعاعی ثابتی از مرکز هسته هستند، تولید می‌کند؛ به عبارت دیگر تابع پایه شعاعی  $\phi(\|x - c_i\|)$  مقدار مشابهی را برای ورودی‌هایی که به مرکز  $c_i$  بر روی فضای کروی چند بعدی<sup>۱</sup> ورودی واقع شده‌اند، ایجاد می‌کند. یک مثال دو بعدی در شکل (۳-۳) نشان داده شده است [۱۰].

$$y=f(x)=\sum_{i=1}^n w_i \phi(\|x-c_i\|_{K_i}) \quad (3)$$

در این جا  $K_i \in R^{n \times n}$  ماتریس ضریب وزن است و نوروم اقلیدسی به صورت زیر حساب می‌شوند:

$$\|x-c_i\|_{K_i}^2 = \|K_i(x-c_i)\|^2 = (x-c_i)^T K_i^T K_i (x-c_i) \quad (4)$$

در حالت ساده،  $K_i$  یک ماتریس قطری است:

$$K_i = \text{diag}[k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}] \quad (5)$$

عناصر قطر آن  $k_{ij}$  وزن خاصی را به هر یک از طبقات ورودی اختصاص می‌دهند (مانند شکل (۳-۳)). نقش این ماتریس زمانی مشخص تر خواهد شد که طبقات گوناگونی از ورودی در اختیار باشد [۱۰].

تقریب‌ساز تابعی الگوست که به وسیله مک پاول ابداع شده است [۱۱].

این شبکه‌ها شاخه‌ای از شبکه‌های عصبی مصنوعی پیش خور چندلایه هستند؛ تابع پایه شعاعی یک تابع غیرخطی چند بعدی است که وابسته به فاصله بین بردار ورودی و بردار مرکز است. این نوع شبکه را که ورودی  $n$  بعدی  $x \in R^n$  و خروجی  $y \in R$  دارد می‌توان به صورت شکل (۲) نمایش داد.

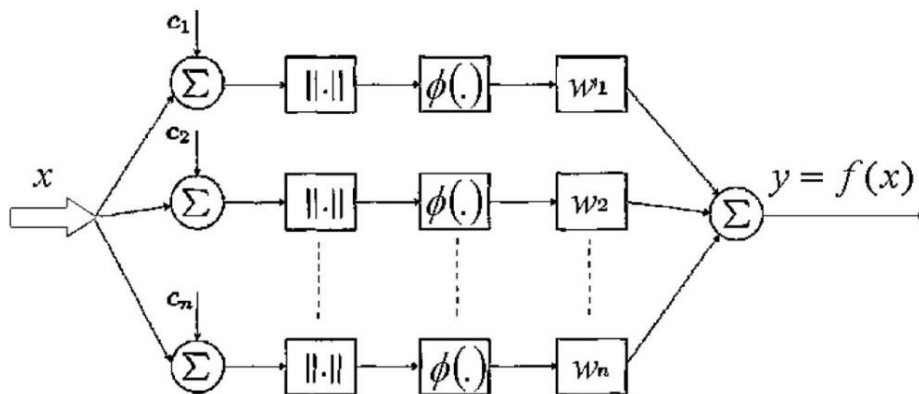
در اینجا  $\phi_i(\|\bar{x} - c_i\|)$  تابع پایه شعاعی  $x$  است:

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \phi_i(\|\bar{x} - c_i\|) \quad (1)$$

به منظور سهولت کار می‌توان برای تمام آرایه‌ها یک تابع پایه شعاعی مشابه انتخاب کرد که در این صورت معادله (۱) به صورت معادله (۲) درمی‌آید:

$$y=f(x)=\sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\bar{x} - c_i\|) \quad (2)$$

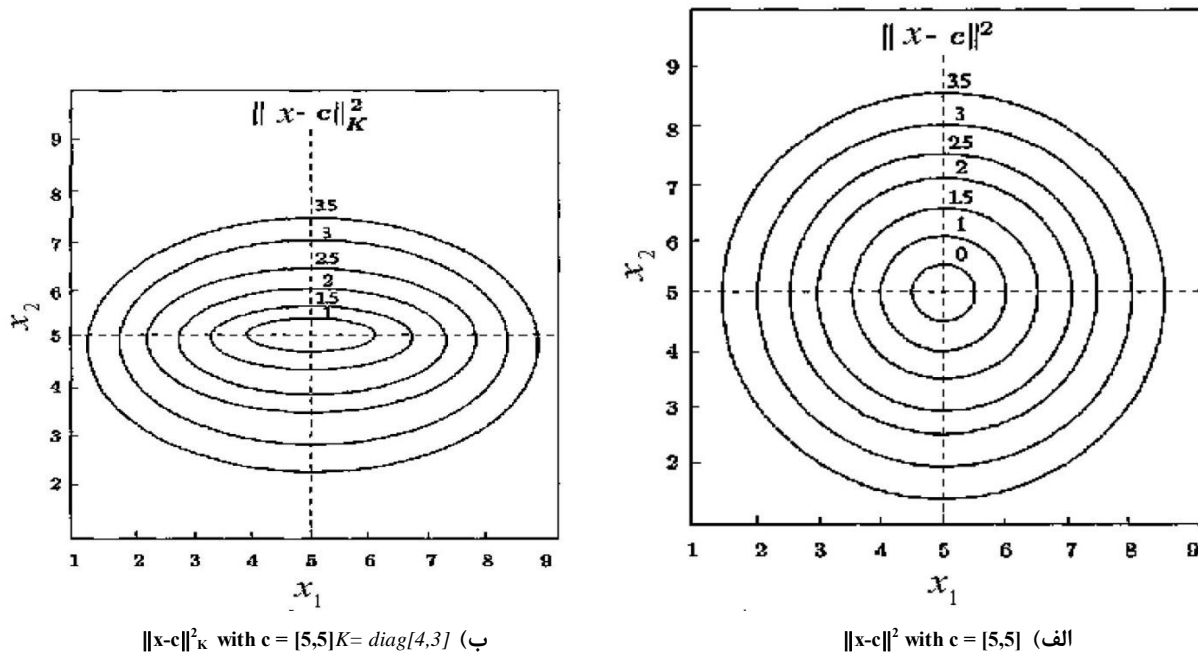
در این معادله  $\phi(\cdot)$ ، یک تابع غیرخطی است،  $\|\cdot\|$  دلالت بر نورم اقلیدسی دارد،  $c_i \in R^n$  مراکز تابع پایه شعاعی و  $w_i$  مؤلفه وزن است.  $\phi(\|x - c_i\|)$  زمانی که  $x = c_i$  است حد اکثر مقدار خود را خواهد داشت و به طور یک‌نواخت تا مقدار "صفر" کاهش پیدا می‌کند. تابع پایه شعاعی موجب تقارن شعاعی می‌شود؛ یعنی هر نورن، خروجی



شکل ۲. بلوک شبکه تابع پایه شعاعی با ورودی  $x \in R^n$  و خروجی  $y \in R$  [۱۰].

Figure 2. Grid block of radial base function with input  $x \in R^n$  and output  $y \in R$  [10].

1 hypersphere



شکل ۳. مثال دوبعدی برای  $\|x-c\|_K$  و  $\|x-c\|_K^2$  [۱۲].  
Figure 3. Two-dimensional example for  $\|x-c\|_K$  and  $\|x-c\|_K^2$  [12].

۲-۴ طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل RBF  
تعداد نرون‌ها در لایه مخفی و عرض<sup>۱</sup> تابع گوسی اصلی‌ترین مؤلفه‌هایی هستند که در حین شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل RBF در اختیار کاربر است و با اعمال تغییر در آن‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی شبکه بپردازد. تعداد نرون‌ها در تک لایه مخفی، عرض تابع گوسی و میزان خطای شبکه با یکدیگر مقایسه می‌شود. روند تکراری تعیین عرض تابع گوسی و تعداد نرون‌های لایه مخفی به شبکه عصبی اعمال می‌شود تا به بهترین ترکیب از این دو مؤلفه که موجب کمترین خطا شود، دست یابد.  
برای طراحی این نوع شبکه عصبی، ابتدا به صورت سعی و خطا تعداد نرون‌های لایه مخفی به نحوی در نظر گرفته شد که میانگین مربعات خطا، کمتر از حد مطلوب<sup>۲</sup> باشد. پس از تعیین نرون‌های بهینه، به صورت سعی و خطا عرض تابع گوسی تعیین شد. عرض تابع گوسی که حد اقل مقدار خطا را داشته باشد نیز به عنوان عرض بهینه شبکه خواهد بود.

این نوع از شبکه‌های عصبی هم توانایی تقریب‌زنی توابع و هم توانایی طبقه‌بندی را دارا هستند [۱۱].

### ۲-۳ شبیه‌سازی شرایط تشکیل هیدرات

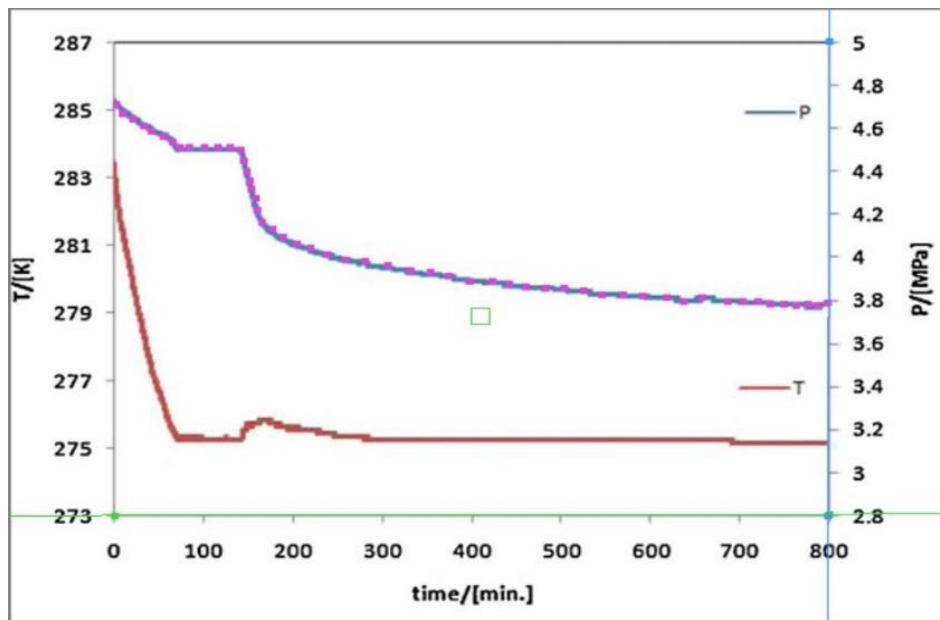
شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین شرایط تشکیل هیدرات با استفاده از نرم‌افزار متلب نیاز به داده‌های تجربی تشکیل هیدرات شامل دما، فشار و ترکیب اجزای مختلف گاز دارد.

۱. داده‌های تجربی از کتاب راهنمای مهندسی گاز طبیعی که جزء مراجع معتبر در زمینه داده‌های تجربی تشکیل هیدرات برای انواع گازهای مختلف است، استخراج شد [۱۲].

۲. چگالی مخصوص گاز در شرایط استاندارد (دمای  $60^\circ\text{F}$  و فشار  $14.7\text{ psia}$ ) در نظر گرفته شد [۱۳].

با استفاده از نرم‌افزار متلب، داده‌های تجربی موجود برای گاز طبیعی شیرین با شبکه‌های عصبی مصنوعی شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل شد. این داده‌های تجربی با استفاده از نرم‌افزار Get Data Graph Digitizer 2.24 برداشته شد. شکل (۴) نمونه‌ای از این نوع داده‌گیری برای گاز طبیعی با وزن مخصوص  $0.7$  است.

1. Spread  
2. Goal



شکل ۴. داده‌گیری از تغییرات فشار با زمان در هنگام تشکیل هیدرات.  
 Figure 4. Data of pressure changes with time during hydrate formation.

وارد شد و دما به دست آمد؛ که این دو سری دما (دماهای تجربی و دماهای شبکه‌های عصبی مصنوعی RBF) با استفاده از نرم‌افزار اکسل و مدل رگرسیون خطی مقایسه و نتایج برای چهار نوع گاز طبیعی با وزن‌های مخصوص متفاوت گزارش شد.

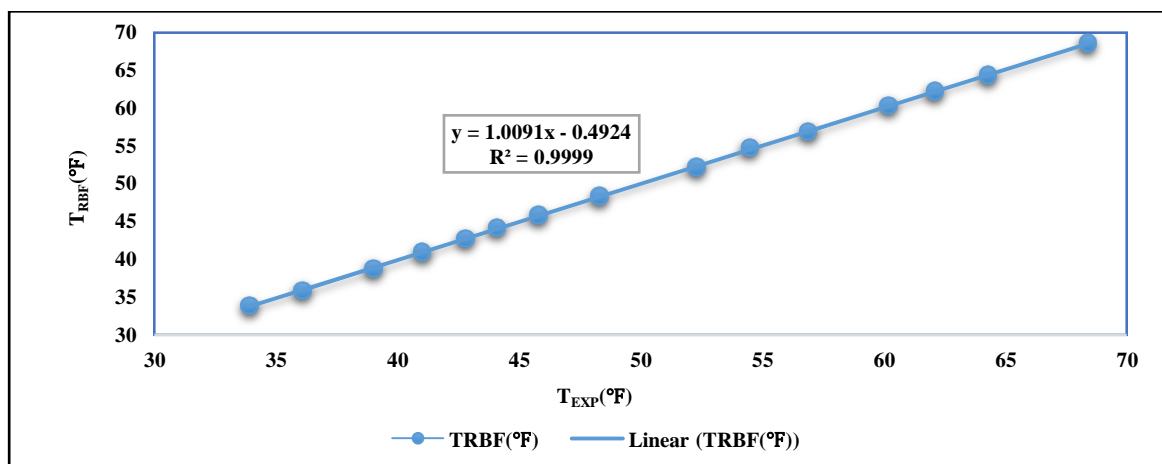
در شکل (۵)، دمای تخمینی تشکیل هیدرات حاصل از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی مدل RBF برای گاز طبیعی با وزن مخصوص ۰/۵۵۵ با داده‌های تجربی مقایسه شده است. در این نمودار ضریب زاویه برابر ۱/۰۰۹۱، عرض از مبدأ برابر ۰/۴۹۲۴- و ضریب رگرسیون  $R^2$  برابر ۰/۹۹۹۹ است.

در شکل (۶)، دمای تخمینی تشکیل هیدرات حاصل از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی مدل RBF برای گاز طبیعی با وزن مخصوص ۰/۶۰ با داده‌های تجربی مقایسه شده است. در این نمودار ضریب زاویه برابر ۰/۹۹۵، عرض از مبدأ برابر ۰/۱۹۵۲+ و ضریب رگرسیون  $R^2$  برابر ۱ است.

در شکل (۷)، دمای تخمینی تشکیل هیدرات حاصل از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی مدل RBF برای گاز طبیعی با وزن مخصوص ۰/۷۰ با داده‌های تجربی مقایسه شد. در این نمودار ضریب زاویه برابر ۱/۰۰۶۴، عرض از مبدأ برابر ۰/۱۱۶۷- و ضریب رگرسیون  $R^2$  برابر ۰/۹۹۹۶ است.

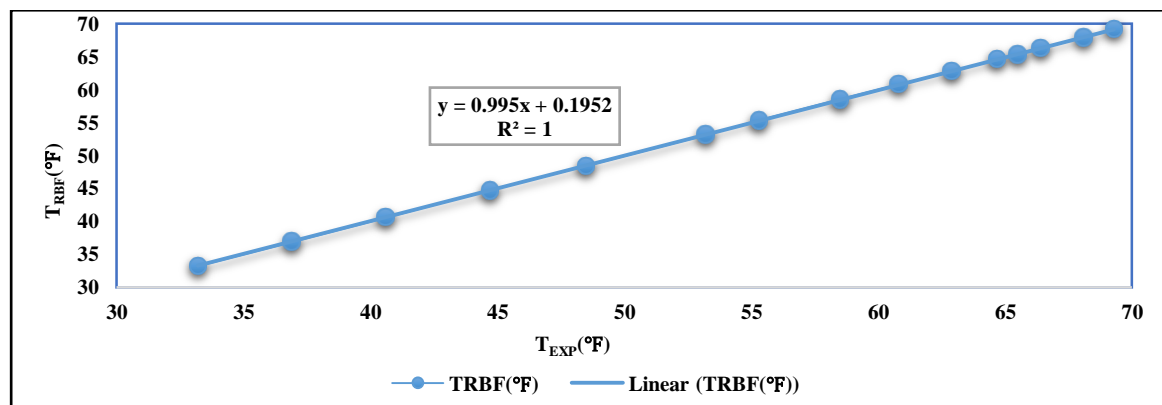
با توجه به این که امکان هم‌پوشانی نرون‌ها به وسیله یکدیگر وجود دارد، کم یا زیاد شدن حتی یک نرون ممکن است تأثیر زیادی در نتایج داشته باشد و برعکس افزایش یا کاهش تعداد زیادی از نرون‌ها تغییر قابل توجهی در نتایج نداشته باشد. در این مرحله باید با تکرار روند آموزش شبکه به بهترین ترکیب از تعداد نرون و عرض تابع گوسی که کمترین خطا را حاصل می‌کند، دست یافت. تابع محرک مورد استفاده در این مدل شبکه عصبی، تابع گوسی است. با توجه به این که مجموعه داده‌های تجربی جمع‌آوری شده برای گازهای مختلف نویزی نبود، از دستور newrb در شبیه‌سازی شبکه عصبی مدل RBF استفاده شده است.

از آنجایی که بهترین روش تخمین دمای تشکیل هیدرات، روشی است که نمودار مقایسه‌ای دمای تخمینی با دمای تجربی تشکیل هیدرات به صورت خطی با ضریب زاویه یک، عرض از مبدأ صفر و  $R^2$  برابر یک باشد، بنابراین از مدل رگرسیون خطی و نمودارهای خطی استفاده شد. در نمودارهای خطی، ضریب زاویه، عرض از مبدأ و ضریب  $R^2$  برای شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل RBF تعیین شد. برای این کار ابتدا در ۱۵ فشار مختلف دماهای تجربی با استفاده از نرم‌افزار Get Data Graph Digitizer 2.24 به دست آمد، سپس با وارد کردن همین فشارها به شبکه عصبی خروجی مورد نظر



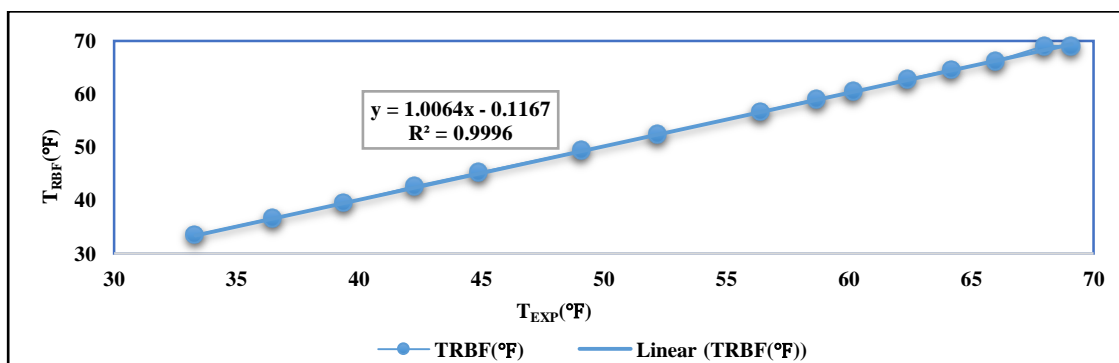
شکل ۵. مقایسه نتایج شبکه عصبی مدل RBF با داده‌های تجربی برای گاز طبیعی با  $S.G = 0.555$ .

Figure 5. Comparison of RBF model neural network results with experimental data for natural gas with  $S.G = 0.555$ .



شکل ۶. مقایسه نتایج شبکه عصبی مدل RBF با داده‌های تجربی برای گاز طبیعی با  $S.G = 0.60$ .

Figure 6. Comparison of RBF model neural network results with experimental data for natural gas with  $S.G = 0.60$ .



شکل ۷. مقایسه نتایج شبکه عصبی مدل RBF با داده‌های تجربی برای گاز طبیعی با  $S.G = 0.70$ .

Figure 7. Comparison of RBF model neural network results with experimental data for natural gas with  $S.G = 0.70$ .



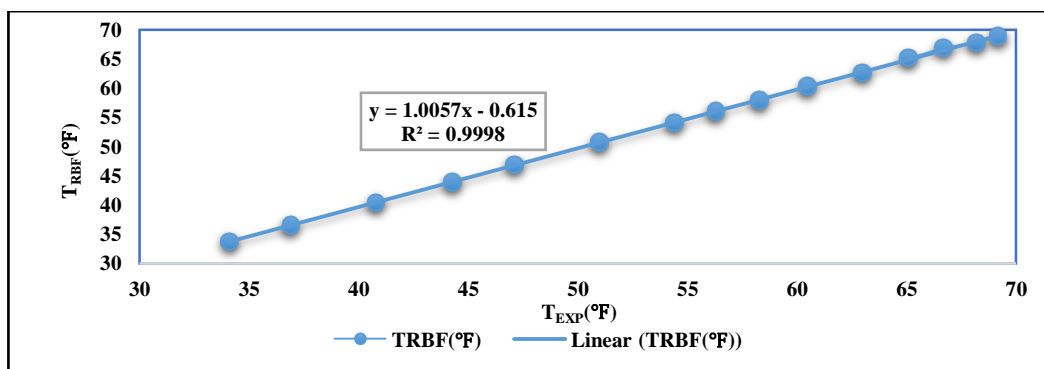
شیرآلات نصب شده روی خط لوله برای قطع جریان، هزینه اتلاف و از بین رفتن سیال، آسیب زیست محیطی و بهداشتی بر اثر انتشار سیال به محیط، خطرات ایمنی برای افراد درگیر در کار و ممکن نبودن کنترل موضع آسیب دیده به علت فاصله شیرها از هم. برای مثال؛ یکی از اداره‌های تعمیرات شرکت‌های گاز استانی در نظر دارد اقدام به جابه‌جایی انشعاب ۳/۴ اینچی یکی از مشترکین خود کند. در حال حاضر باید مسئول مربوطه پس از مراجعه به نقشه‌های فنی (آن هم در صورت وجود) محل تی سرویس یا قطع کن نصب شده روی خط برداشت انشعاب ۳/۴ را پیدا، سپس حفاری کند، شیر را قطع، سپس اقدام به برشکاری و جابه‌جایی انشعاب کند. با استفاده از اختراع مذکور می‌توان بدون یافتن شیر قطع کن، با حفاری پای علمک ۳/۴ اینچ نسبت به انجماد بالادست پای علمک اقدام و پس از قطع شدن جریان محل را برشکاری و ترمیم کرد، که علاوه بر جلوگیری از حفاری‌های مازاد، نیاز به نقشه‌های فنی و محاسبات نیست.

در شکل (۸)، دمای تخمینی تشکیل هیدرات حاصل از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی مدل RBF برای گاز طبیعی با وزن مخصوص ۰/۹۰ با داده‌های تجربی مقایسه شده است. در این نمودار ضریب زاویه برابر ۱/۰۰۵۷، عرض از مبدأ برابر ۰/۶۱۵ و ضریب رگرسیون  $R^2$  برابر ۰/۹۹۹۸ است.

بهترین روش تخمین دمای تشکیل هیدرات روشی است که نمودار مقایسه‌ای دمای تخمینی با دمای تجربی تشکیل هیدرات به صورت خطی با ضریب زاویه یک، عرض از مبدأ صفر و ضریب رگرسیون  $R^2$  برابر یک باشد؛ بنابراین تمامی مؤلفه‌ها برای مقایسه‌های انجام گرفته با داده‌های تجربی برای گاز طبیعی با وزن‌های مخصوص مختلف در جدول (۱) آورده شده است.

### ۳. قطع کننده یخی جریان سیالات داخل لوله

این قطع کننده یخی جریان<sup>۱</sup> برای حل مشکلات ناشی از تعمیرات و یا جابه‌جایی خطوط لوله حاوی سیالات طراحی و در نظر گرفته شده است. این مشکلات عبارتند از: احتمال عملکرد نادرست



شکل ۸. مقایسه نتایج شبکه عصبی مدل RBF با داده‌های تجربی برای گاز طبیعی با  $S.G = 0.90$ .

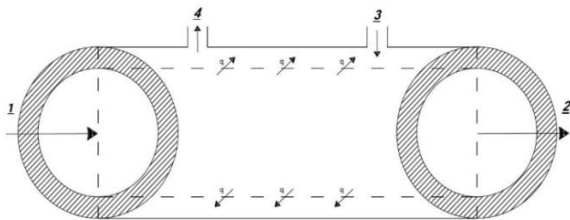
Figure 8. Comparison of RBF model neural network results with experimental data for natural gas with  $S.G = 0.90$ .

جدول ۱. مؤلفه‌های ضریب زاویه، عرض از مبدأ و ضریب رگرسیون  $R^2$  برای گازهای با وزن‌های مخصوص مختلف.

Table 1. Parameters of angle coefficient, width of origin and regression coefficient  $R^2$  for gases with different specific gravity.

$(R^2)$	Angle coefficient	Width of origin	(S.G) Specific Gravity
0.999	1.0091	-0.4924	0.555
1	0.995	0.1952	0.60
0.9996	1.0064	-0.1167	0.70
0.9998	1.0057	-0.615	0.90

۳-۳ طراحی و بهینه‌سازی دستگاه قطع‌کننده یخی جریان در شکل (۹) نمایی از دستگاه قطع‌کننده یخی جریان سیال نشان داده شده است. در لوله داخلی در مقطع شماره (۱) گاز طبیعی (سیال گرم) با دما و فشار مشخص وارد و از مقطع شماره (۲) با دمای پایین تر (دمای تشکیل هیدرات در همان فشار و ترکیب درصد اجزا) خارج می‌شود. مایع نیتروژن (سیال سرد) از ورودی شماره (۳) داخل ژاکت عایق شده، پس از گرفتن حرارت از گاز طبیعی و تبدیل به بخار در نقطه تبخیر از خروجی شماره (۴) خارج می‌شود.



شکل ۹. نمایی از دستگاه قطع‌کننده یخی جریان سیال داخل لوله.

Figure 9. Schematic of the icy line blocker of fluid flow inside the pipe.

گاز طبیعی از داخل لوله‌ای با قطر اسمی ۳/۴ جریان دارد که جنس لوله از نوع فولاد 2012-API 5L Grade B استاندارد است. ابعاد قطر داخلی و خارجی لوله در جدول (۲) آورده شده است [۱۴].

جدول ۲. ابعاد قطر داخلی و خارجی لوله [۱۴]

Table 2. Dimensions of inner and outer diameter of the pipe [14].

Pipe Dimension	(ft)	(in)
Inner Diameter	0.062	0.742
Outer Diameter	0.088	1.050

ضریب رسانندگی گرمایی<sup>۱</sup> فولاد API 5L نیز  $55 \text{ [W/m.K]}$  یا  $0.0089 \text{ [BTU/s.ft.}^\circ\text{F]}$  است [۱۵]. مشخصات گاز طبیعی شهری داخل لوله طبق اطلاعات شرکت گاز استان آذربایجان شرقی در جدول (۳) آورده شده است.

با توجه به مقایسه داده‌های تجربی و داده‌های گرفته‌شده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و همچنین ضرایب موجود در جدول (۱) برای گازهای با وزن‌های مخصوص مختلف می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین شرایط تشکیل هیدرات ابزار بسیار مناسبی است.

### ۱-۲ مواد و قطعات مورد نیاز

۱. کپسول مایع نیتروژن

۲. ژاکت یا محفظه عایق‌شده انبساط مایع نیتروژن

۳. لوله‌های رابط کپسول به ژاکت

### ۲-۳ فرایند قطع‌کننده یخی جریان سیالات داخل لوله

تکنیک استفاده‌شده در این روش بدین صورت است که پس از متصل کردن ژاکت یا محفظه انبساط نیتروژن مایع به منبع یا کپسول نیتروژن مایع از راه لوله‌های لاستیکی (بسته به نوع عملیات یک یا دو عدد ژاکت در قسمت بالادست و پایین‌دست محل آسیب‌دیده روی لوله جایگذاری می‌شود)، با بازکردن شیر منبع نیتروژن و تبدیل مایع نیتروژن به گاز، در ژاکت انبساط گاز به وجود می‌آید و افت شدید حرارتی را در پی خواهد داشت که باعث انجماد داخل ژاکت و سطح لوله حاوی سیال می‌شود و انتقال حرارت بین لوله و سیال جاری موجب انجماد سیال و بنابراین ایجاد سد در مقابل جریان سیال می‌شود که این قطع جریان مانند شیر عمل می‌کند و موجب انسداد کامل جریان سیال در لوله می‌شود. پس از قطع جریان با برشکاری محل و ایجاد تغییرات فنی لازم بسته به نوع فرایند و مکانیک لوله، جوشکاری مجدد انجام و محل آسیب‌دیده یا نیازمند جابه‌جایی ترمیم می‌شود. جریان مایع نیتروژن از کپسول به ژاکت می‌تواند به وسیله یک شیر سلنوئیدی با کنترل دمای لوله و محفظه ژاکت کنترل شود که این مورد برای بهبود و تکمیل اختراع در آینده است. پس از ایجاد تغییرات تعمیراتی لوله، شیر کپسول بسته می‌شود و مدتی بعد در اثر ذوب‌شدن انجمادهای سطح و داخل لوله، جریان سیال دوباره برقرار می‌شود و خط لوله به حالت بهره‌برداری و آماده استفاده باز می‌گردد.

1. Thermal Conductivity

جدول ۴. اطلاعات و ترکیبات گاز طبیعی [۱۶].

Table 4. Information and compounds of natural gas [16].

Row	Values	Information and compounds of natural gas	
1	90.09048	Methane	Gas compounds (%)
2	3.33703	Ethane	
3	0.93636	Propane	
4	0.43429	Pentane	
5	0.10337	C <sub>5</sub> <sup>+</sup>	
6	4.45827	Nitrogen	
7	0.63067	Carbon Dioxide	
8	0.00955	Oxygen	
9	2.026	Hydrogen Sulfur	Sulfur (mg/SCM)
10	3.991	Mercaptan Sulfur	
11	11.742	Total Sulfur	
12	9019.511	Gross Calorific Value (kcal/SCM)	
13	8182.38	Net Calorific Value (kcal/SCM)	
14	0.6135	Relative Density	

$\rho_{NG}$ : چگالی گاز طبیعی S. وزن مخصوص  $\rho_{Air}$ : چگالی هوا در سطح دریا در دمای (15°C)

بنابر شرایط عملیاتی دما و فشار گاز طبیعی در داخل لوله و وزن مخصوص گاز، باید دمای گاز حد اقل به (32 °F) برسد تا هم هیدرات و هم یخ تشکیل و موجب انسداد خط لوله شود [۱۶].

برای رساندن دمای گاز طبیعی به (32 °F) از ژاکت خنک کننده که به بدنه لوله نصب است، استفاده می شود. به طوری که مایع نیتروژن مطابق شکل از ورودی شماره (۳) وارد ژاکت و حرارت سیال داخل لوله به آن منتقل می شود و در نقطه تبخیر خود تغییر فاز می دهد و از خروجی شماره (۴) خارج می شود. اطلاعات مربوط به نیتروژن مایع در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات گاز طبیعی شهری داخل لوله [۱۶].

Table 3. Specifications of natural gas inside the pipe [16].

Natural Gas Specification	Max. Velocity (ft/s)	Density (lbm/ft <sup>3</sup> )	P (psig)	T (°F)
Value	70	0.046	60	60

دبی جرمی گاز طبیعی عبوری از داخل لوله با استفاده از سطح مقطع داخلی لوله حساب می شود [۱۷]:

$$A_{c,i} = \pi \times (D_i^2 / 4) = \pi \times ((0.062)^2 / 4) = 0.003 \text{ (ft}^2\text{)} \quad (6)$$

$A_{c,i}$ : سطح مقطع داخلی لوله  $D_i$ : قطر داخلی لوله

$$\dot{m}_{h,1} = \rho v A_{c,i} = 0.0046 \times 70 \times 0.003 = 0.00966 \text{ (lb}_m\text{/s)} \quad (7)$$

$\dot{m}_{h,1}$ : دبی جرمی گاز طبیعی داخل لوله،  $\rho$ : چگالی گاز طبیعی،  $v$ : بیشینه سرعت گاز طبیعی در داخل لوله  
 ظرفیت گرمایی ویژه<sup>۱</sup> گاز طبیعی بنا به ترکیب درصد گاز و دما و فشار برابر است با [۱۸-۱۹]:

$$c_{p,h} = 2 \text{ (J/g.K)} = 0.4778 \text{ (BTU/lbm.}^\circ\text{F)}$$

مقدار آب<sup>۲</sup> موجود در داخل گاز طبیعی (mg/SCM) ۶ و بیشینه مقدار آن (mg/SCM) ۱۱۰ است و وزن مخصوص<sup>۳</sup> گاز طبیعی بین بیشینه و کمینه مقدار خود در بازه [۰/۵۵ و ۰/۷۰] قرار دارد.

چگالی هوا در سطح دریا در دمای 15°C برابر با 1/225 (kg/m<sup>3</sup>) یا 0.075 (lbm/ft<sup>3</sup>) است؛ بنابراین چگالی گاز بنابه چگالی نسبی داده شده؛ برابر است با:

$$\rho_{NG} = S.G \times \rho_{Air} = 0.6135 \times 0.075 = 0.046 \text{ (lb}_m\text{/ft}^3\text{)} \quad (8)$$

1. Specific Heat Capacity
2. Water Content
3. Specific Gravity

4. Specific Gravity

جدول ۵. مشخصات نیتروژن مایع [۲۰]

Table 5. Liquefied nitrogen characteristics [20].

Specification	Normal Boiling Point	Atomic weight	Specific Heat	Latent Heat
Liquefied Nitrogen	-195.79(°C)	14.0067 (g/mol)	1040 (J/kg.K)	5.56 (kJ/mol)
	(°F)-320.42	0.0309 (lbm/mol)	29.124 (J/mol.K)	5.275 (BTU/mol)

اختلاف دما بین سیال گرم و سرد در قسمت ورودی (۱) و خروجی (۲) طبق معادلات زیر به دست می‌آید:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_4 = 60 - (-320.42) = 380.42 \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (11)$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_3 = 32 - (-320.42) = 352.42 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

اختلاف دمای میانگین لگاریتمی  $\Delta T_{lm}$  از رابطه زیر حساب می‌شود [۱۷]:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{380.42 - 352.42}{\ln(380.42 / 352.42)} = 366.24 \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (12)$$

بنابراین عبارت UA از معادله زیر حساب می‌شود [۱۷]:

$$UA = \frac{Q}{\Delta T_{lm}} = \frac{0.129}{366.24} = 0.00035 \text{ (} \frac{\text{BTU}}{\text{s} \cdot \text{F}} \text{)} \quad (13)$$

U: ضریب کلی انتقال گرما بر حسب (BTU/ft<sup>2</sup>.s.°F)  
برای مبدل‌های گرمایی لوله‌ای معادله زیر به منظور محاسبه ضریب کلی انتقال حرارت استفاده می‌شود [۱۷]:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k l} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (14)$$

که در آن اندیس‌های i و o، به ترتیب، برای سطوح داخلی و خارجی‌اند ( $A_o = \pi D_o L$ ,  $A_i = \pi D_i L$ )، که ممکن است در معرض سیال گرم یا سرد باشند.

$R_{fi}$  و  $R_{fo}$ : ضرایب گرفتگی سطوح داخلی و خارجی بر حسب (s.ft<sup>2</sup>.°F/BTU)

$h_i$  و  $h_o$ : ضرایب انتقال گرمای جابه‌جایی سطوح داخلی و خارجی بر حسب (BTU/s.ft<sup>2</sup>.°F)

در حقیقت با یک مبدل گرمایی لوله‌ای هم‌مرکز (همسو یا ناهمسو) دمای گاز کاهش داده خواهد شد و برای این کار برخی از فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۱۸]:

۱. مبدل گرمایی از اطراف خود عایق شده است و در این حالت، تبادل گرما فقط بین سیالات گرم و سرد است.
۲. رسانش محوری در امتداد لوله‌ها ناچیز است.
۳. گرماهای ویژه سیالات ثابت‌اند.
۴. ضریب کلی انتقال گرما ثابت است.

دمایی که گاز طبیعی در فشار ۷۴/۷ (psia) باید به آن نقطه برسد تا عمل انسداد انجام شود، برابر با ۳۲ (°F) است که در این دما علاوه بر تشکیل هیدرات امکان تشکیل یخ نیز وجود دارد [۱۹]. بنابراین مقدار گرمایی که گاز باید از دست بدهد طبق معادله (۹) به دست می‌آید [۱۷]:

$$Q = m_{NG} c_{p,h} \Delta T = 0.00966 \times 0.4778 \times (60 - 32) = 0.129 \text{ (BTU/s)} \\ = 136.1 \text{ (W)} \quad (9)$$

که در آن  $m_{NG}$  دبی گاز طبیعی،  $c_{p,h}$  ظرفیت گرمایی ویژه گاز طبیعی و  $\Delta T$  اختلاف دمای ورودی و خروجی گاز طبیعی است. با توجه به این که مقدار گرمایی که گاز از دست می‌دهد با مقدار گرمایی که مایع نیتروژن می‌گیرد، برابر است؛ بنابراین دبی جرمی مورد نیاز مایع نیتروژن نیز از معادله زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$m_{N_2} = Q/h_{fg} = (0.129/171.18) = 0.00075 \text{ (lb}_m\text{/s)} \quad (10)$$

$h_{fg}$ : گرمای نهان تبخیر مایع نیتروژن بر حسب (BTU/lbm)

$$f = (0.790 \ln Re_D - 1.64)^{-2} = (0.790 \ln(33660) - 1.64)^{-2} = 0.023 \quad (19)$$

عدد پراتل  $(Pr)^3$  نیز از معادله ۲۰ به دست می‌آید و برای تبدیل ساعت به ثانیه در عدد ۳۶۰۰ ضرب شده است [۱۶]:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_{NG}} = \frac{0.4778 \times 69.13 \times 10^{-7} \times 3600}{0.0165} = 0.72 \quad (20)$$

ضریب رسانندگی گرمایی گاز طبیعی  $(k_{NG})$  با  $(BTU/hr.ft.^{\circ}F)$   $0.165$  برابر است [۱۹].

بنابراین با توجه به معادله زیر ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی گاز طبیعی نیز به دست می‌آید [۱۷]:

$$h = \frac{Nu_D k_{NG}}{D} = \frac{78.06 \times (0.0165/3600)}{0.062} = 0.0058 \text{ (BTU/s.ft}^2\text{.}^{\circ}F) \quad (21)$$

جمله دوم  $(R''_{fi} / A_i)$ : ضریب گرفتگی برای سطح داخلی جمله سوم مربوط به مقاومت حاصل از رسانندگی فولاد است که با توجه به قطر داخلی و خارجی لوله و ضریب رسانندگی گرمایی حساب می‌شود.

جمله چهارم مربوط به ضریب گرفتگی مایع نیتروژن است و با توجه به این که مایع نیتروژن سیال بدون رسوب بوده و از دستگاه مقطعی استفاده می‌شود، از این جمله صرف نظر می‌شود.

جمله پنجم مربوط به مقاومت حاصل از ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی سیال نیتروژن است و با توجه به این که نیتروژن از حالت مایع به بخار تبدیل می‌شود، یعنی تغییر فاز اتفاق می‌افتد؛ بنابراین دمای سطح خارجی لوله با سیال یکسان خواهد بود، پس از این جمله نیز صرف نظر می‌شود.

با جای گذاری تمام معلومات در معادله مقدار  $L$  مورد نیازی که دما را به  $32^{\circ}F$  برساند، به دست می‌آید:

$$L = UA \left[ \frac{1}{\pi h_i D_i} + \frac{R''_{fi}}{\pi D_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{st}} \right] = 0.00035 \times \left[ \frac{1}{\pi \times 0.0058 \times 0.062} + \frac{4.077}{\pi \times 0.062} + \frac{\ln\left(\frac{0.088}{0.062}\right)}{2 \times \pi \times 0.0089} \right] = 0.32 \text{ (ft)} \quad (22)$$

3. Prandtl Number

$k$ : رسانندگی گرمایی بر حسب  $(BTU/s.ft.^{\circ}F)$

بنابراین برای بررسی جملات سمت چپ معادله (۱۴) به ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

جمله اول  $(1/h_i A_i)$ : مربوط به مقاومت ناشی از ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی گاز طبیعی در درون لوله است که  $h_i$  با استفاده از روابط مربوط به جریان‌های داخلی به دست می‌آید. مقدار  $\mu$  گاز طبیعی نیز برابر است با [۱۹]:

$$\mu = 0.0106 \text{ (cp)} = 69.13 \times 10^{-7} \text{ (lb}_m\text{/ft.s)} \quad (15)$$

هنگام بررسی جریان‌های داخلی، عدد رینولدز جریان در لوله دایره‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{0.046 \times 70 \times 0.062}{61.13 \times 10^{-3}} = 32.66 \times 10^3 = 33660 \quad (16)$$

که در آن  $u_m$  سرعت متوسط سیال در مقطع عرضی و  $D$  قطر لوله است.

در جریان کاملاً فراگیر، عدد رینولدز بحرانی برای شروع تلاطم عبارت است از [۱۸]:

$$Re_{D,c} \approx 2300 \quad (17)$$

البته برای برقراری شرایط کاملاً متلاطم، عدد رینولدز باید خیلی بزرگ‌تر باشد  $(Re_D \approx 10000)$ .

بنابراین با توجه به مقدار به دست آمده در معادله (۱۷) جریان گاز طبیعی داخل لوله جریانی ناآرام یا متلاطم<sup>۱</sup> است.

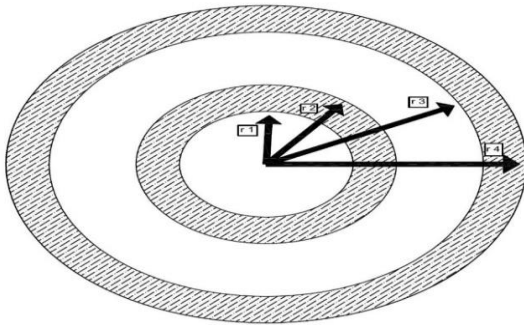
برای یافتن عدد ناسلت<sup>۲</sup>  $(Nu)$  از معادله زیر استفاده می‌شود [۱۷]:

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{1/3} - 1)} = \frac{(0.023/8) \times (33660 - 1000) \times 0.72}{1 + 12.7 \times (0.023/8)^{1/2} \times (0.72^{1/3} - 1)} = 78.06 \quad (18)$$

که این رابطه برای شرایط  $(0.5 < Pr < 2000)$  و  $(104 < Re_D < 5 \times 10^6)$  کاربرد دارد و ضریب اصطکاک  $f$  برای لوله‌های صاف از معادله زیر به دست می‌آید و برای شرط  $(3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6)$  برقرار است [۱۷]:

1. Turbulent  
2. Nusselt Number

پس طول واقعی یا طول صنعتی این دستگاه ۰/۹۷ فوت یا ۲۹/۵۷ سانتی‌متر است.



شکل ۱۰. ناحیه تشکیل هیدرات و یخ در داخل لوله.

Figure 10. The area of hydrate and ice formation inside the tube.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی امکان قطع موقت جریان گاز در خطوط از راه تشکیل هیدرات یا یخ (به صورت کنترل شده) در محل مورد نظر از خطوط لوله گاز برای انجام تعمیرات ضروری پرداخته شد. ارائه روش انجام این کار، نحوه رفع آن پس از خاتمه عملیات تعمیرات و در نظر گرفتن موارد ایمنی با بهترین روش پیشنهادی بر اساس بهترین یا نزدیک‌ترین معیار عملیاتی و کاربردی شدن ارزیابی شد. برای این کار ابتدا شرایط تشکیل هیدرات با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای گاز طبیعی بررسی شد. با توجه به مقایسه داده‌های تجربی و داده‌های گرفته شده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و همچنین ضرایب موجود برای گازهای با وزن‌های مخصوص مختلف می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین شرایط تشکیل هیدرات ابزار بسیار مناسبی است. نتایج بررسی امکان‌پذیری استفاده از قطع‌کننده یخی جریان را برای قطع موقت مسیرهای داخل شهری در خطوط لوله توزیع گاز - در صورت طراحی صحیح و استفاده از تجهیزات مناسب - در مواقع اضطراری نشان داد.

#### مراجع

- [1] Sloan, E. D., Koh, C. A., Koh, C., "Clathrate hydrates of natural gases", Third edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, London, 752, (2007).

$D_o$  و  $D_i$ : قطر داخلی و خارجی لوله برحسب ft  
 بنابراین طول مورد نیاز دستگاه برای رساندن دمای گاز طبیعی داخل لوله به  $32^\circ\text{F}$ ، برابر  $0.32$  ft یا  $9.8$  cm است.

پس از عبور گاز طبیعی از ناحیه اول دستگاه، هیدرات و یخ از جداره داخلی لوله شروع به رشد می‌کنند و در آن ناحیه عمل انسداد انجام می‌شود؛ بنابراین برای انسداد کامل لوله و جلوگیری از ذوب ناحیه انسداد بر اثر گرمای محیط، باید دستگاه امتداد داشته باشد. پس سطح مقطع دستگاه نصب‌شده روی لوله در ناحیه دوم دستگاه همراه با تشکیل هیدرات به صورت شکل (۲) است:

در شکل (۱۰) شعاع‌های  $r_1$ ،  $r_2$ ،  $r_3$  و  $r_4$  به ترتیب مربوط به شعاع هیدرات تشکیل شده در داخل لوله، شعاع داخلی لوله، شعاع خارجی لوله و شعاع دستگاه است.

برای محاسبه طول ناحیه دوم از معادله زیر استفاده می‌شود [۱۸]:

$$Q = \frac{T_{NG} - T_{N_2}}{\frac{1}{\pi D_1 L h_1} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi k_{H_1} L} + \frac{\ln(D_3/D_2)}{2\pi k_{S_1} L} + \frac{1}{\pi D_3 L h_3}} \quad (23)$$

$Q$  مقدار گرمای مبادله شده در ناحیه دوم است که با گرمای مبادله شده در ناحیه اول یکسان در نظر گرفته شده است.  $T_{NG}$  دمای گاز طبیعی در ناحیه دوم،  $T_{N_2}$  دمای تبخیر نیتروژن،  $L$  طول ناحیه دوم دستگاه،  $D_1$  قطر هیدرات تشکیل شده،  $D_2$  قطر داخلی لوله،  $D_3$  قطر خارجی لوله،  $h_1$  ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی گاز طبیعی داخل لوله،  $h_3$  ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی سیال نیتروژن داخل ژاکت،  $k_H$  ضریب رسانندگی گرمایی هیدرات و  $k_{S_1}$  ضریب رسانندگی گرمایی فولاد است.

پس از اعمال شرایط، طول ناحیه دوم دستگاه  $0.52$  ft یا  $15.85$  cm به دست می‌آید؛ بنابراین طول کل دستگاه برابر  $0.84$  ft یا  $25.65$  cm است. با توجه به ضریب ایمنی یا عامل بیشینه طراحی پیشنهادی در نظر گرفته شده برای مبدل‌های حرارتی (متغیرهای مهم در طراحی عملیاتی: دماها، گرانروی، هدایت حرارتی و متغیرهای مهم در ابعاد و ظرفیت: شدت جریان، مساحت انتقال حرارت) که تقریباً برابر با ۱۵ درصد است، طول صنعتی دستگاه به دست آمد [۱۷]:

$$L_{act} = 0.84 + 0.15 \times 0.84 = 0.97 \text{ (ft)} \cong 29.57 \text{ cm} \quad (24)$$

- [2] Sloan, E. D., "Fundamental principles and applications of natural gas hydrates", *Nature*, 426(6964), pp. 353-363, (2003).
- [3] Demirbas, A., "Methane gas hydrate", Springer Publications. London, p. 186, (2010).
- [4] Mokhtari, B., Kazempour, M., "Gas hydrates (concepts and definitions)", Offshore Oil Company Publications (Research and Development Unit), Tehran, 188, In Persian, (2007).
- [5] Ganji, H., Manteghian, M., Sadaghianizadeh, K., Omidkhah, M. R., Rahimi Mofrad, H., "Effect of different surfactants on methane hydrate formation rate, stability and storage capacity", *Fuel*, 86, pp. 434-441, (2007).
- [6] Ganji, H., Manteghian, M., Rahimi Mofrad, H., "Effects of mixed compounds on methane hydrate formation and dissociation rates and capacity", *Fuel Processing Technology*, 88, pp. 891-895, (2007).
- [7] Liu, Y., Gou, K., Liang, D., Fan, S., "Refrigerant gas hydrate growth under influence of magnetic field", *Science in China (Series B)*, 33(1), pp. 89-96, (2003).
- [8] Liu, Y., Gou, K., Liang, D., Fan, S., "Experimental study on crystallizing process of HCFC-141b hydrate by ultrasonic", *Journal of Wuhan University of Technology (China)*, 24(12), pp. 21-3, (2003).
- [9] Niknam, M., "Simulation and estimation of hydrate formation conditions in gas transmission lines and facilities", Master Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 55, In Persian, (2011).
- [10] Gupa, M., Jin, L., Homma, N., "Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory", 1st edition, John Wiley and Sons Inc., New Jersey, U.S.A, 722, (2003).
- [11] Jourabian, M., Hooshmand, R., "Fuzzy logic and neural networks of concepts and applications", First edition, Shahid Chamran University of Ahvaz, 318, In Persian, (2002).
- [12] Katz, D. L., "Handbook of Natural Gas Engineering", McGraw-Hill Publishing Company, New York, 802, (1959).
- [13] Elgibaly, A. A., Elkamel, A. M., "A new correlation for predicting hydrate formation conditions for various gas mixtures and inhibitors", *Fluid Phase Equilibria*, 152(1), pp. 23-42, (1998).
- [14] Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", 4th edition, McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1008, (1991).
- [15] Antonino, T. D. S., Guimarães, P. B., Alécio, R. A., Yadava, Y. P., Ferreira, R. A. S., "Measurements of the Thermophysical Properties of the API 5L X80", *Materials Sciences and Applications*, 624, pp. 617-627, (2014).
- [16] Iranian Gas Standards, IGS-M-CH-033(0) ,Pipeline Quality Natural Gas, (2004).
- [17] Incropra, F. P., Dwight, D. P., "Introduction to Heat Transfer", (Translator: Bahram Pousti). Publication of academic books, Tehran, 690, In Persian, (2003).
- [18] Farzanehgard, M., Bayat, Y., Hashemi M., "Shahram. Calculation of constant pressure and constant volume heat capacities and isotropic power of natural gas mixtures using AGA 8 method for Shanol gas field", 17th Annual International Conference on Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran-Iran. In Persian, May (2009).
- [19] Katz, D. L., "Handbook of Natural Gas Engineering", McGraw-Hill Publishing Company, New York, 802, (1959).
- [20] Bennett, H., "The Chemical Formulary", D. Van Nostrand Company, INC, New York, 650, (1933).