

## استفاده از هیدرات گازی دی اکسید کربن به عنوان عامل خاموش کننده آتش

سید علیرضا طباطبائی نژاد<sup>۱</sup>، محسن هوپناه<sup>\*</sup>، الناز خداپناه<sup>۲</sup>، سید مرتضی کلکچی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، دانشگاه صنعتی سهند- پژوهشکده نفت و گاز سهند  
<sup>۲</sup>محقق، دانشگاه صنعتی سهند- پژوهشکده نفت و گاز سهند  
<sup>۳</sup>استادیار، دانشگاه صنعتی سهند- پژوهشکده نفت و گاز سهند  
<sup>۴</sup>دانشجو، دانشگاه صنعتی سهند- پژوهشکده نفت و گاز سهند

### چکیده

خاموش کردن آتش با استفاده از روش‌های متداول نیازمند اطلاع از نوع آتش سوزی است و یافتن ماده‌ای که در همه نوع آتش سوزی یا بیشتر موارد، مورد استفاده قرار گیرد، امری اجتناب ناپذیر است. هم اکنون استفاده از آب و دی اکسید کربن بسیار متداول و مرسوم بوده و بعضاً صرف نظر از نوع آتش سوزی به علت در دسترس بودن مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر کدام از این دو روش مزایا و معایبی دارند و در این کار تحقیقاتی سعی بر این شده است که با تولید و استفاده از هیدرات دی اکسید کربن به عنوان یک روش ترکیبی و با قابلیت‌های افزوده جهت حذف معایب تزریق آب و دی اکسید کربن به تنهایی مورد استفاده قرار گیرد. هیدرات‌های گازی ترکیباتی غیر استوکیومتری به شکل جامدهای کریستالی متشکل از مولکول‌های گاز (مهمان) و آب (میزبان) هستند. آزمایش‌ها با درصد ترکیبات مختلف جهت تشکیل هیدرات و برای خاموش کردن آتش نوع A و B انجام شده و مقایسه گردیده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که هیدرات گازی دی اکسید کربن قابلیت بالایی جهت خاموش کردن آتش در مقایسه با آب دارد.

### کلمات کلیدی

خاموش کننده‌های آبی؛ خاموش کننده‌های دی اکسید کربن؛ هیدرات گاز دی اکسید کربن؛ گازهای اشتعال ناپذیر؛ زمان القا

### نکات برجسته پژوهش

- مروری بر روش‌های مختلف برای خاموش کردن آتش و ارائه روشی جهت حذف معایب خاموش کننده‌های آب و گاز.
- ارائه قابلیت‌ها و مکانیسم‌های هیدرات گازی گازهای اشتعال ناپذیر مانند CO<sub>2</sub> برای خاموش کردن آتش.
- ارائه روش‌هایی جهت نگهداری هیدرات و استفاده در موارد ضروری.

## ۱- مقدمه

با توجه به کاربرد متفاوت خاموش‌کننده‌ها و از طرفی با توجه به متفاوت بودن کلاس مواد در حال احتراق، مواد اطفا حریق نیز، متفاوت می‌باشند. پنج نوع ماده اطفا حریق با کاربردهای متفاوت در خاموش‌کننده‌ها وجود دارد. خاموش‌کننده‌های محتوی آب، دی‌اکسیدکربن، پودر، کف و ترکیبات هالوژنی. انواع آتش‌سوزی‌ها نیز، شامل مورد زیر می‌گردد.

گروه A: آتش‌سوزی‌های متداول از قبیل چوب، کاغذ، لاستیک، پلاستیک و غیره

گروه B: مایعات اشتعال‌پذیر از قبیل نفت، گازوئیل، بنزین و غیره

گروه C: تجهیزات الکترونیکی

گروه D: فلزات اشتعال‌پذیر مگنزیوم، سدیم، پتاسیم و لیتیوم

خاموش‌کننده‌های آب و دی‌اکسیدکربن، بیشترین کاربرد را در خاموش کردن آتش دارند. آتش‌سوزی نوع A متداول‌ترین نوع آتش‌سوزی بوده که در آن معمولاً از آب و یا ترکیباتی از آب و مواد دیگر برای پایین آوردن دما و خاموش کردن آتش استفاده می‌گردد. استفاده از آب در انواع آتش‌سوزی‌های دیگر به شدت خطرناک بوده و منجر به گسترش آن می‌گردد. در این گونه موارد استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن توصیه می‌گردد [۱، ۲].

هیدرات‌های گاز طبیعی جامدات یخی شکل، سرسخت و پایداری هستند که ابتدا در آزمایشگاه شناخته شدند، ولی بعد در یخ‌زدگی لوله‌های انتقال نفت و گاز مشاهده شدند و با یافت شدن در طبیعت به عنوان ذخایر هیدراته مورد توجه قرار گرفتند. هیدرات‌های گازی همواره به عنوان یک معضل در عملیات تولید مطرح بوده‌اند، اما امروزه چنین گمان می‌رود که پتانسیل عظیمی به عنوان منبع انرژی و نیز، به عنوان روشی برای انتقال گاز طبیعی در آینده، در خود پنهان کرده‌اند [۳، ۴].

هیدرات دی‌اکسیدکربن ماده برفی شکل و سفید رنگی است که در دمای کمتر از ۲۸۳ کلوین و در بازه فشاری گسترده‌ای می‌تواند وجود داشته باشد. این هیدرات به شکل ساختار SI کریستالیزه می‌شود که یک واحد سلولی آن متشکل از ۴۶ مولکول آب و تا ۸ مولکول دی‌اکسیدکربن بوده و دارای حفرات کوچک و بزرگ با نسبت ۱:۳ است [۵]. هر چند شواهد آزمایشگاهی در مورد نوع sII در دمای نزدیک به نقطه ذوب یخ وجود دارد [۶-۸].

خاموش کردن آتش با کمک هیدرات دی‌اکسیدکربن ترکیبی از دو روش خاموش‌کننده آب و گاز است که با حذف معایب این دو روش، مزیت‌های بهتر و گسترده تری نسبت به آن‌ها دارد.

## ۲- خاموش‌کننده‌های آبی:

خاموش‌کننده‌های آب تحت فشار دستی معمولاً دارای ظرفیت ۹ لیتری یا بیشتر آب خالص می‌باشند و برای استفاده در آتش‌سوزی‌های گروه A مورد استفاده قرار می‌گیرند. قدرت پرتاب این نوع خاموش‌کننده حداکثر ۱۰ متر تعیین گردیده است و علاوه بر این تبخیر آب قبل از رسیدن به مرکز آتش، اثر خاموش‌کنندگی آن را کم می‌کند [۲]. همچنین در این سیستم خاموش‌کنندگی، تخریب اموال باقیمانده توسط آب پاش‌ها اجتناب‌ناپذیر است [۹]. از این نوع خاموش‌کننده می‌توان بصورت متناوب استفاده نمود. مدت زمان تخلیه آن بصورت مداوم حدود ۶۰ ثانیه می‌باشد. فشار مورد نیاز برای تخلیه از هوای فشرده شده در درون خاموش‌کننده تأمین می‌گردد. این نوع خاموش‌کننده در زمان شارژ کامل دارای ۱۵۰ PSI فشار می‌باشد و چون بدنه این نوع سیلندر تحت فشار مداوم قرار دارد باید مقاومتی برابر با ۶۰۰ PSI را دارا باشد [۲].

### ۳- خاموش کننده های گاز دی اکسید کربن:

گاز دی اکسید کربن از گذشته دور تاکنون به عنوان یک گاز ضد حریق در دستگاه های ثابت اتوماتیک مورد استفاده قرار می گرفته است. این گاز غیر قابل اشتعال، بدون بو، خنثی، غیر سمی، باعث فساد نشده، هادی جریان الکتریسیته نبوده، وزن آن ۱/۵ برابر وزن هوا می باشد و به همین دلیل در موقع اطفاء به نحوی سطح آتش را پوشانده و جانشین اکسیژن می شود که در نتیجه آن، عمل اطفاء حریق به نحو احسن انجام می گردد. این گاز در سیلندر خاموش کننده، تحت فشاری در حدود ۷۰۰۰ psi چون بدنه خاموش کننده می بایست فشار زیادی را متحمل شود، بنابراین آن را یک تکه و بدون درز و جوش می سازند. اگر جنس آن فولاد باشد وزن کلی آن افزایش می یابد؛ اما در صورتی که جنس آن از آلومینیوم باشد، وزن آن نسبتاً کمتر خواهد بود. انواع دستی این خاموش کننده با ظرفیت های ۱ تا ۶ کیلوگرم ساخته می شود. در ظرفیت های بیشتر به صورت چرخ دار و یا دستگاه های ثابت اتوماتیک طراحی و مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل این که این گاز در محل مصرف هیچ اثری از خود به جای نمی گذارد؛ بیشتر در محل های سر بسته و جهت اطفاء حریق کلاس های B، C و D مورد استفاده قرار می گیرد [۲]. اگرچه دی اکسید کربن سمی نیست؛ اما وقتی به میزان زیاد در فضای بسته مورد استفاده قرار گیرد، میزان اکسیژن هوا را تقلیل داده و هر شخصی که در محل مذکور حضور داشته باشد، دچار کمبود اکسیژن شده و در نتیجه احساس خفگی به وی دست خواهد داد [۹]. حداکثر پرتاب آن ۲ متر می باشد و زمان تخلیه این خاموش کننده حداکثر ۲۰ ثانیه گزارش شده است. در هر دو نوع کپسول آب و دی اکسید کربن، بازدید ماهانه از وضعیت ظاهری و در صورت افت فشار، معمولاً دو بار در سال شارژ مجدد صورت می پذیرد [۲].

### ۴- خاموش کننده های هیدرات دی اکسید کربن:

پیدا کردن روش ها و مواد جایگزین ارزان تر و موثرتر برای خاموش کردن آتش امری ضروری و حیاتی است. هیدرات های گازی ترکیبات کریستالی شبیه یخ می باشند که تحت دمای پایین (۸ تا ۱۵ درجه سانتی گراد) و فشار مناسب (۶۰ تا ۱۵۰ بار) تهیه می گردند. ۱ متر مکعب هیدرات گازی قادر است ۱۷۵ متر مکعب گاز را در خود ذخیره کند. خاصیت خودنگهدارندگی و گرمای نهان تبخیر بالا (۱/۷ برابر یخ) امکان انتقال آنها را تحت فشار اتمسفریک میسر می سازد. مزیت استفاده از هیدرات گاز دی اکسید کربن، استفاده هم زمان از دو ماده اصلی رایج در خاموش کردن آتش می باشد؛ آب و دی اکسید کربن، ویژگی قابل توجه آن، گرمای نهان تبخیر بسیار بالا و در نتیجه امکان بیشتر جهت رسیدن به مرکز آتش می باشد. انتقال آن به صورت یک ماده جامد تحت فشار اتمسفریک و حذف هزینه های تهیه کپسول های فشار بالا در این روش دیگر مزیت بزرگ آن نسبت به کپسول های حمل آب و گاز دی اکسید کربن می باشد و تنها نیازمند محیطی سرد جهت نگهداری تجهیزات آتش نشانی می باشد [۹].

بزرگترین مزیت استفاده از هیدرات گازی دی اکسید کربن، مخصوصاً به شکل گلوله های جامد هم اندازه، به کار بردن حداقل مواد ممکن جهت خاموش کردن آتش می باشد. استفاده از گاز دی اکسید کربن در آتش سوزی های رخ داده در اماکن مسکونی منجر به خفگی مصدومان و پرسنل آتش نشانی شده و استفاده از آب در اماکن مسکونی و جنگل ها نیز، منجر به تخریب اموال باقیمانده می شود؛ در حالی که در هیدرات های گازی مقدار گاز آزاد شده کمتر از حد مجاز بوده و آب باقیمانده پس از تجزیه تبخیر می گردد [۹].

هیدرات کاملاً مقاوم به دما است و تجزیه آن توسط آتش در مدت زمان بیشتری انجام می‌شود. همچنین، به علت پایین آوردن دما احتمال آتش سوزی دوباره برخلاف استفاده از آب بسیار پایین است. هنگام استفاده از آب مقدار زیادی از آن در زیر مواد مشتعل قرار گرفته و عملاً خاصیت خاموش کردن آتش را از دست می‌دهد؛ ولی کریستال‌های جامد هیدرات تا پایان آتش سوزی بر روی مواد مشتعل قرار می‌گیرند و خاصیت خاموش کنندگی خود را حفظ می‌کنند [۹].

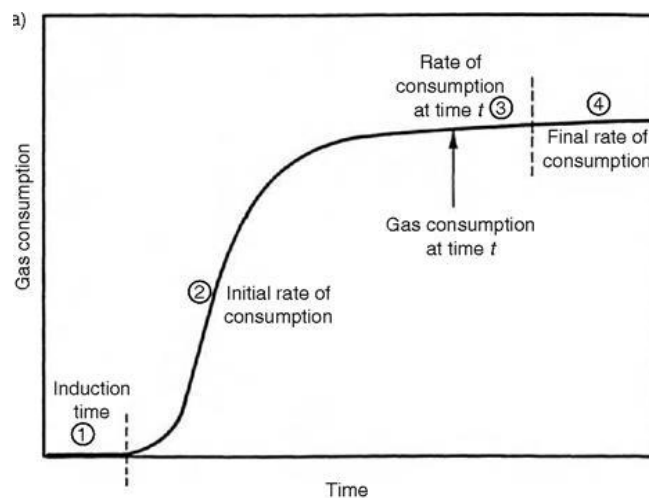
## ۵- نحوه تشکیل و پایداری هیدرات دی اکسید کربن

هیدرات‌های گاز طبیعی، جامدهای کریستالی متشکل از آب و گاز هستند؛ ترکیبات غیر استوکیومتری که از مولکول‌های گاز و آب به وجود می‌آیند. مولکول‌های گاز (مهمان) در مولکول‌های آب (میزبان) با برقرار کردن پیوند هیدروژنی با میزبان به دام می‌افتند. این ترکیبات وقتی تشکیل می‌شوند که دو جزء در دمای پایین و فشار بالا با هم تماس پیدا کنند. عمده مولکول‌های گاز طبیعی که هیدرات تشکیل می‌دهند متان، اتان، پروپان و دی‌اکسید کربن می‌باشند [۴، ۶].

هیدرات‌های گاز در ظاهر، شبیه به ترکیبات شیمیایی هستند، چرا که در یک دما و فشار معین ترکیب ثابتی دارند، اما در واقع هیدرات‌ها ترکیباتی از نوع «مولکولی» هستند که در نتیجه ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب، تشکیل حفره‌ها و سپس پایداری این حفره‌ها به کمک نیروهای «واندروالس» بین مولکول‌های آب و گاز به وجود می‌آیند.

مهم‌ترین سؤالات مطرح شده در مورد هیدرات‌ها به چگونگی تشکیل، تجزیه و ممانعت از تشکیل آنها مربوط می‌شود که فرآیندهایی وابسته به زمان هستند و از آنجا که تعیین کم و کیف فرآیندهای وابسته به زمان مشکل است، یک تقسیم‌بندی آزمایشگاهی برای این فرآیندها ارائه شده است:

۱. هسته‌زایی که یک پدیده تصادفی است.
  ۲. رشد هیدرات، که با محدودیت‌های سینتیکی، انتقال جرم و انتقال حرارت کنترل می‌شود.
  ۳. تجزیه و از هم گسستن، که معمولاً با انتقال حرارت کنترل می‌شود و در آن قالب‌ها یا هسته‌های هیدرات به صورت شعاعی تجزیه می‌شوند [۴، ۶].
- در شکل ۱ نمونه‌ای از هسته‌زایی و رشد هیدرات به صورت تجمع گاز بر حسب زمان، برای یک سیستم همزن-دار که در فشار و دمای ثابت کار می‌کند، نشان داده شده است:



شکل ۱: تجمع گاز بر حسب زمان برای تشکیل هیدرات [۱۱]

زمان القا (یا زمان تأخیر یا هسته‌زایی) مدت زمانی است که طول می‌کشد تا هسته‌های کریستالی که غیر قابل مشاهده و تشخیص ماکروسکوپی هستند، شکل یابند. در عمل این مدت زمان را برابر با زمان سپری شده برای ظاهر شدن حجم مشخصی از فاز هیدرات تعریف می‌کنند. طی گذشت این زمان، دما و فشار در ناحیه پایداری هیدرات هستند، ولی به دلیل خاصیت فراپایداری، هیدرات تشکیل نمی‌شود. رشد هیدرات نیز، زمانی است که بزرگ شدن هیدرات در آن به سرعت اتفاق می‌افتد. طی این مدت گاز در حفرات هیدرات متمرکز می‌شود. سرانجام وقتی که عمده آب با رشد هیدرات تبدیل شد، شیب نمودار با زمان کاهش خواهد یافت [۴، ۶].

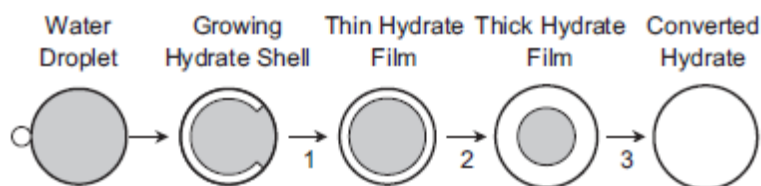
هسته‌زایی هیدرات فرآیندی است که طی آن خوشه‌های کوچک آب و گاز (هسته‌های هیدرات) رشد کرده و پخش می‌شوند تا به اندازه بحرانی برای رشد هیدرات برسند. این مرحله یک پدیده میکروسکوپی است که شامل ده‌ها هزار مولکول بوده و مشاهده آزمایشگاهی آن مشکل است. شواهد آزمایشگاهی نشان می‌دهد که هسته‌زایی یک فرآیند آمار و احتمالی است. این مرحله را می‌توان با انحلال پذیری گازهای طبیعی در آب بیشتر توصیف کرد. انحلال‌پذیری گازهای غیرقطبی در آب مایع، چه در فشارهای بالا و چه فشار پایین نقطه تشکیل هیدرات، خیلی کم است [۴، ۶].

مقادیر انحلال‌پذیری، همچنین آنتالپی، آنترپی و ظرفیت گرمایی انحلال در رقت بی‌نهایت گاز دی‌اکسیدکربن در دمای ۲۹۸ K در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: خواص انحلالی گاز دی‌اکسیدکربن در آب در ۲۹۸°C [۱۰].

Component	Solubility $10^5 x_2$	$-\Delta H_{soln}$ KJ/mol	$-\Delta S_{soln}$ J/(K.mol)	$\Delta C_p$ kJ/(K.mol)
Carbon dioxide	60/8	19/43	65/2	34

معمولاً هیدرات‌ها به صورت یک فیلم کریستالی نازک متخلخل در سطح تماس بین فاز آبی و فاز هیدروکربنی (گاز یا مایع) شکل می‌یابند (شکل ۲).



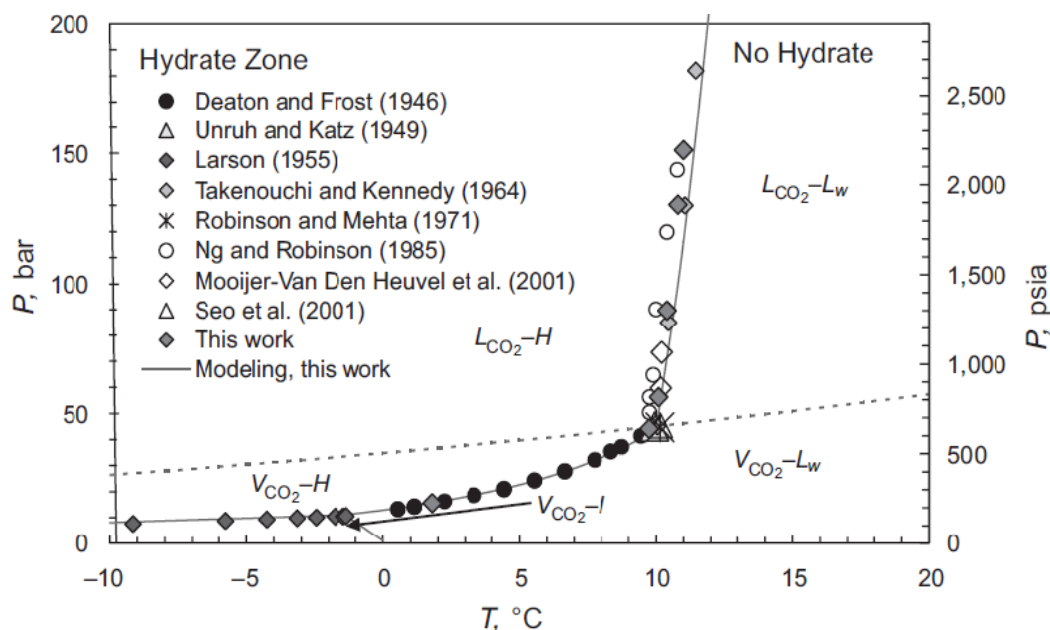
شکل ۲: شماتیک مکانیزم پیشنهادی تشکیل هیدرات از یک قطره آب؛  
مرحله ۱: گسترش یک فیلم نازک متخلخل هیدرات پیرامون یک قطره آب،  
مرحله ۲: توسعه هیدرات، مرحله ۳: تبدیل توده به هیدرات [۱۲].

## ۶- خودنگهدارنگی هیدرات گازی:

خودنگهدارنگی پدیده‌ای است که در آن هیدرات می‌تواند برای زمان‌های طولانی در ناحیه خارج از پایداری خود، پایدار باقی بماند. این پدیده یک پدیده غیرعادی است و تنها گازهای محدودی هستند که چنین رفتاری را از خود نشان می‌دهند. خودنگهدارنگی غیرمتعارف توسط محققان زیادی مشاهده شده است [۳، ۴]. توانایی افزایش و طولانی کردن پایداری در

هیدرات‌های گازی برای ذخیره‌سازی گاز و استفاده از آن به عنوان خاموش کننده‌ها مورد توجه است. ناحیه خودنگهدارندگی غیرمتمعارف برای افت فشار سریع به 0.1 MPa در بازه‌ی دمایی 272-242 کلوین مشاهده شده است. قبل از این حالت، یک تجزیه فازی کوتاه و سریع با آزاد شدن 20-5٪vol. از کل دی‌اکسید کربن sI در نمونه هیدرات اتفاق می‌افتد. طی آزاد شدن گاز، سرمایش آدیاباتیک همراه با جذب حرارتی رخ می‌دهد. بعد از تجزیه فازی، هیدرات به صورت "خودنگهداشته و فراپایدار"، بسته به دمای تجزیه آن، برای مدت بیش از 2-3 هفته باقی می‌ماند [10].

در شکل 3 نمودار فازی و ناحیه پایداری هیدرات دی‌اکسیدکربن نشان داده شده است. حداقل فشار لازم برای یک فاز پایدار هیدرات، با افزایش دما افزایش می‌یابد.



شکل 3: دیاگرام دما-فشار هیدرات CO<sub>2</sub>، ناحیه سمت چپ نمایانگر پایداری هیدرات CO<sub>2</sub> [13].

## 7- روش آزمایشگاهی:

مواد مورد نیاز برای تولید و نگهداری هیدرات جهت خاموش کردن آتش:

- (1) رآکتور تشکیل هیدرات
- (2) اتاق سرد جهت نگهداری هیدرات (صفر تا ماکزیمم 15- درجه سانتی گراد)
- (3) ماشین خردکننده و پودر کننده
- (4) ماشین تهیه قرص و گلوله هیدرات (تبدیل کننده پودر هیدرات به قرص های هم اندازه) [9]

مطالعات انجام شده تاکنون منجر به تولید دو آزمایش با نسبت مولی متفاوت برای تولید هیدرات و چهار آزمایش جهت خاموش کردن آتش نوع A و B شده است. هدف از تولید هیدرات به دست آوردن ماکزیمم مقدار هیدرات بوده و بنابراین سعی بر این شد که سیستم در محدوده تعادلی گاز و هیدرات قرار گیرد؛ به عبارت دیگر با تزریق گاز افت فشار ناشی از هسته‌زایی هیدرات جبران گردید و سیستم در شرایط هم فشار قرار گرفت. (شکل شماره 4) دستگاه مورد استفاده در این آزمایش را نشان می‌دهد که طراحی و ساخت آن در پژوهشکده نفت و گاز دانشگاه صنعتی سپهند انجام گرفته است. ماکزیمم حجم مورد استفاده 850 سی سی و ماکزیمم فشار 4000 Psi و حداقل دمای مورد استفاده منفی 20 درجه سانتی گراد می‌باشد. در

جدول ۲ آزمایش‌های انجام شده جهت تشکیل هیدرات در شرایط بدون استفاده از تسریع کننده آورده شده است. در شکل ۵ هیدرات‌های تشکیل شده نشان داده شده است.



شکل ۴. دستگاه تشکیل هیدرات (طراحی و ساخت در پژوهشکده نفت و گاز سهند)

جدول ۲. آزمایش‌های انجام شده جهت تشکیل هیدرات در شرایط بدون استفاده از تسریع کننده

مدت زمان تقریبی تشکیل تعادل گاز و هیدرات (ساعت)	فشار تعادلی (Psi)	دمای تعادلی (درجه سانتی‌گراد)	درصد مولی گاز	درصد مولی آب
۱۶	700	۷	۷۵	۲۵
۱۳	700	۷	۷۰	۳۰



شکل ۵. هیدرات‌های گازی دی‌اکسید کربن

نحوه استفاده جهت خاموش کردن آتش:

- (۱) خرد کردن هیدرات و تبدیل آن به قرص‌ها و گلوله‌های هم اندازه قابل عبور از نازل‌های متداول در آتش‌نشانی.
- (۲) پودر کردن هیدرات (پودر هیدرات سطح آتش بیشتری را می‌پوشاند اما پایداری کمتری نسبت به گلوله‌های هیدرات دارند).
- (۳) تهیه دوغاب هیدرات (ریختن ذره‌های هیدرات در آب یا مواد اشتعال ناپذیر دیگر)
- (۴) استفاده از هیدرات جهت خاموش کردن موقت و پایین آوردن دما به علت گرمای نهان تبخیر بالا و سپس استفاده از مواد رایج جهت خاموش کردن آتش مانند آب [۹].

در این آزمایش مقایسه دو روش خاموش کردن آتش توسط هیدرات و آب انجام شده است. جهت این امر آتشی به قطر ۳۰ سانتی متر از دو نوع A و B تهیه گردید (شکل ۶) که اطلاعات به دست آمده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. نوع آتش و مقدار مواد استفاده شده

	مقدار هیدرات مورد استفاده (گرم)	مقدار آب مورد استفاده (گرم)	قطر آتش (سانتی متر)
آتش نوع A	۶۰	۶۰۰	۳۰
آتش نوع B	۸۰	۷۲۰	۳۰





شکل ۶. خاموش کردن آتش با استفاده از هیدرات دی اکسید کربن و آب

#### ۸- نتیجه گیری:

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که در هر دو نوع آتش سوزی نوع A و B مقدار هیدرات مصرفی برای خاموش کردن کامل آتش، حدود ۱۰ برابر وزنی کمتر از آب می‌باشد. همچنین، در هر دو آزمایش، پس از خاموش کردن با هیدرات گازی هیچ گونه اثری از آب مشاهده نگردید؛ در شرایطی که به مقدار قابل توجهی آب در آزمایش‌هایی که با آب انجام شده، باقی مانده است که می‌تواند باعث تخریب وسایل باقی مانده در آتش سوزی‌ها شود.

#### مراجع:

- [1] Walsh, C. V. Marks, L., *Fire fighting Strategy and Leadership*, second ed., 1976.
- [2] Gorham, D., *Automatic Sprinkler Protection*, second ed., John Wiley & Sons Inc., 1919.
- [3] سید علیرضا طباطبائی‌نژاد، الناز خدایانه، "امکان‌سنجی استفاده از هیدرات‌های گازی در صنایعی غیر از صنایع نفتی"، اولین کنگره ملی هیدرات‌های گازی ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۸ و ۲۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۰.
- [4] سید علیرضا طباطبائی‌نژاد، "هیدرات‌های گازی: معضل یا مزیت در صنایع نفتی و غیر نفتی"، اولین کنگره ملی هیدرات‌های گازی ایران، گارگاه آموزشی، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۶ اردیبهشت ماه ۱۳۹۰.
- [5] Circone, S. Stern, L.A. Kirby, S.H. Durham, W., "CO<sub>2</sub> Hydrate: Synthesis, Composition, Structure, Dissociation and a comparison to sl CH<sub>4</sub> hydrate", *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 107, pp. 5529 - 5539, 2003.

- [6] Tabatabaei, A.R., *Phase Behaviour Modelling of Wax and Hydrates*, PhD. Dissertation, Petroleum Eng., Heriot-Watt University, Scotland (UK), 1999.
- [7] Tabatabaei, A.R. Danesh, A. Tohidi, B. Todd, A. "A Consistent Thermodynamic model for Predicting Combined Wax-Hydrate in Petroleum Reservoir Fluids", *Annals Newyork Academy of Sciences*, Vol. 912, pp. 392-402, 2000.
- [8] Tohidi, B. Danesh, A. Tabatabaei, A.R. Todd, A, "Vapour-Hydrate Equilibrium Ratio Charts for Heavy Hydrocarbon Compounds, Part-1 Structure-II Hydrates: Benzene, Cyclopentane, Cyclohexane and Neopentane", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36(7), pp. 2871-2874, July-1997.
- [9] Tohidi, B. Anderson, R. Masoudi, R., *Novel Methods For The Manufacture and Use of Gas Hydrates*, World Intellectual Property Organization, 2006
- [10] Sloan, E.D. Koh, C.A., *Clathrate Hydrate of Natural Gases*, 3rd ed., CRC Press, 2007.
- [11] Lederhos, J.P. Long, J.P. Sum, A. Christiansen, R.L. Sloan, E.D., "Effective Kinetic Inhibitors for Natural Gas Hydrates." *Chem. Eng. Sci.*, Vol.51, pp. 1221-1229, 1996.
- [12] Taylor, C.J. Miller, K.T. Koh, C.A. Sloan, E.D., "Macroscopic investigation of hydrate film growth at the hydrocarbon/water Interface", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 62, pp.6524, 2007.
- [13] Jadhawar, P. Mohammadi, A.H. Yang, J. Tohidi, B., "Subsurface Carbon dioxide Storage through Clathrate Hydrate Formation", international approaches to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions. Dordrecht: Springer, pp. 111-126, 2006