

## مدل‌سازی فرایند پر شدن و تخلیه مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی جذب شده

صاحبه یوسفی<sup>۱</sup>، مسعود مفرحی<sup>۲\*</sup>، حسین رهیده<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۶	در سال‌های اخیر سیستم گاز طبیعی جذب شده به عنوان یک روش فشار پایین و ایمن برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی به ویژه در وسایل نقلیه مورد توجه قرار گرفته است. اما مشکلاتی بر سر راه عملی شدن این تکنولوژی وجود دارد که از جمله آن‌ها تأثیر گرمای جذب و دفع بر روی ظرفیت ذخیره‌سازی و تخلیه مخزن و کاهش آن است. هدف از این مطالعه به دست آوردن توزیع دمای یک مخزن استوانه‌ای در طول فرایندهای پرسازی و تخلیه آن به وسیله گاز طبیعی می‌باشد. این مخزن شامل یک پخش کننده گازی در مرکز به منظور بهبود نوسانات دمایی می‌باشد. در این مطالعه ابتدا معادلات انتقال جرم و انرژی حاکم بر بستر جاذب موجود در مخزن استخراج شده و پس از بی‌بعدسازی با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی حل شده است. با حل معادلات حاکم، تغییرات شعاعی دما و فشار بستر در طول زمان به دست آمده و عوامل موثر بر این نوسانات دمایی و بازده مخزن بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، پخش کننده گاز در طول فرایند پرسازی و تخلیه بازده را نزدیک به ۵ درصد افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که مدت زمان فرایند، رسانایی گرمایی بستر جاذب، ضریب جابجایی گرمایی طبیعی، هندسه مخزن و اعداد بدون بعد بایوت و فوریه عوامل موثر بر کاهش و افزایش بازده می‌باشند. همچنین مقاومت نفوذی بالای بستر جاذب در طول فرایند جذب می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن و افزایش زمان فرایند داشته باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰	
<b>واژگان کلیدی:</b> متان، ذخیره‌سازی، گاز طبیعی جذب شده، گرمای جذب، مدل‌سازی.	

### ۱-مقدمه

و قابل رقابت آن با سایر منابع انرژی و آلاینده‌گی کمتر محیط زیست در قیاس با سایر سوخت‌های فسیلی این منبع انرژی را در مرکز توجه قرار داده است. در این میان ایران به علت دارا بودن ۲۸/۰۸ تریلیون متر مکعب گاز و رتبه اول ذخایر گازی جهان، می‌تواند از گاز طبیعی به عنوان یک منبع انرژی مهم و سوخت جایگزین در وسایل نقلیه استفاده کند که در صورت استفاده صحیح، منجر به شکوفایی اقتصادی آن می‌گردد [۱].

روند کنونی مصرف انرژی در جهان از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی روندی غیرمطمئن و بی‌ثبات است. با رشد روز افزون صنایع در دنیا به ویژه در کشورهای صنعتی و افزایش نیاز شدید به انرژی، اغلب کشورها در صدد جایگزینی گاز طبیعی با سایر منابع انرژی و سوخت‌های فسیلی از جمله نفت برآمده‌اند. فراوانی و پراکندگی میادین گاز طبیعی، هزینه کمتر استخراج، قیمت مناسب

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mofarahi@pgu.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس

۲. استاد، دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس در حال حاضر استاد مدعو در دانشگاه یانسه، سنول، کره جنوبی

۳. استادیار، دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس

همراه است. گرمای جذب در طول پرکردن و تخلیه مخزن، اثرات زیان‌آوری بر روی عملکرد سیستم دارد. این گرما در طول فرایند جذب، منجر به افزایش دمای بستر و در طول فرایند دفع باعث کاهش دمای آن می‌شود. در هنگام پرکردن مخزن ANG، افزایش دمای ایجاد شده منجر به کاهش گاز جذب شده و در نتیجه کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی جذب می‌شود. همچنین در طول فرایند تخلیه مخزن، دفع گرماگیر گاز باعث کاهش دمای بستر و در نتیجه افزایش نگهداری گاز در بستر جذب و کاهش گاز تخلیه شده از آن می‌شود [۳]. در این زمینه مطالعاتی برای دستیابی به ظرفیت تخلیه و ذخیره‌سازی بالاتر در مخزن ANG انجام شده است که بیشتر این مطالعات بر روی ساخت جاذبی با ظرفیت جذب بالای گاز طبیعی متمرکز شده‌اند. به طور مثال هرنا و همکارانش ظرفیت جذب متان سه نوع زئولیت طبیعی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۴]. همچنین بررسی ظرفیت جذب متان جاذب کربن فعال تولید شده از پوست نارگیل توسط باستس نتو و همکارانش انجام شد [۵]. گرالگو و مورنو در سال ۲۰۱۱، جذب متان چند نمونه کربن فعال بدست آمده از پوست قهوه که به شکل مونولیت و دیسکی ساخته شده بودند را بررسی کرده و مشاهده نمودند با این جاذب‌ها، ظرفیت جذب متان در مبنای جرمی افزایش می‌یابد [۲]. رشیدی و همکاران در سال ۲۰۱۱، ظرفیت جذب متان بر روی جاذب کربنی نانوحفره‌ای که در فشارهای پایین آماده‌سازی شده بود را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۶]. آرامی‌نیا و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲، بهینه‌سازی تولید کربن فعال از پوست نخل برای جذب متان را با استفاده از ترکیبی از فرایندهای فعال‌سازی فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار دادند [۷]. گرچه دستیابی به جاذبی با ظرفیت جذب بالا بسیار مهم می‌باشد اما به منظور استفاده از این ظرفیت، مطالعه و بررسی تأثیر گرمای جذب بر کاهش آن بسیار مهم و ضروری است. به منظور بررسی اثرات گرمای جذب و سایر عوامل مؤثر بر ظرفیت مخزن ANG تحقیقاتی هم به صورت آزمایشگاهی و هم مدل‌سازی انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به کارهای زیر اشاره کرد.

چانگ و تالو اثرات مضر گرمای جذب بر روی کاهش ظرفیت مخزن ANG را در طول فرایند تخلیه به صورت

در حال حاضر وسایل نقلیه با گاز طبیعی فشرده شده (CNG)<sup>۱</sup>، متداول ترین نوع وسایل نقلیه گازسوز هستند، اما این روش مشکلاتی دارد که مانع از استفاده آن در مقیاس‌های وسیع شده است. فشار عملیاتی CNG بالا و در محدوده (۲۰-۲۵ MPa) بوده که نیازمند استفاده از مخازن سنگین، کمپرسورهای متراکم‌سازی چندمرحله‌ای و سرمایه‌گذاری‌های بالا می‌باشد [۲]. با توجه به مشکلات بیان شده، برای ذخیره‌سازی و انتقال گاز طبیعی نیاز به روشی مؤثرتر می‌باشد. تلاش‌های انجام شده در این زمینه بر روی ارائه روشی با فشار عملیاتی پایین متمرکز شده‌اند که بدین وسیله هزینه‌های عملیاتی متراکم‌سازی را کاهش داده و همچنین اجازه استفاده از مخازن سبک‌تر را فراهم سازد. در سال‌های اخیر ذخیره‌سازی گاز طبیعی با استفاده از جاذب به عنوان یک تکنولوژی نویدبخش برای استفاده در وسایل نقلیه گازسوز مورد توجه قرار گرفته است. گاز طبیعی جذب شده (ANG)<sup>۲</sup>، روشی است که در آن گاز طبیعی به وسیله یک جاذب متخلخل در فشارهای نسبتاً پایین (۳-۴ MPa) جذب می‌شود. از مزایای این روش، کاهش هزینه‌های متراکم‌سازی، کاهش هزینه ساخت مخزن، امکان استفاده از کمپرسورهای تک مرحله‌ای، انعطاف‌پذیری در ساخت مخزن ذخیره، کاهش وزن و افزایش ایمنی مخزن می‌باشد. عملکرد و امکان پذیری سیستم ANG وابسته به خواص میکروحفره‌ای جاذب و ظرفیت جذب آن و همچنین خصوصیات انتقال جرم و گرمای سیستم است. ارزیابی مخزن ANG با اندازه‌گیری حجم گاز قابل استفاده صورت می‌گیرد، که ظرفیت تخلیه نامیده می‌شود. ظرفیت تخلیه به صورت حجم گاز به دست آمده از مخزن ذخیره‌سازی هنگامی که فشار آن از ۳/۵ MPa به ۰/۱ MPa کاهش می‌یابد، تعریف می‌شود. با وجود مزایای ذکر شده برای ANG، ظرفیت ذخیره آن از CNG کمتر است و برای این که این تکنولوژی بتواند قابل رقابت با روش‌های متداول ذخیره‌سازی باشد، ظرفیت ذخیره آن باید به  $180 \text{ v/v}$  (حجم گاز جذب شده - که در شرایط استاندارد اندازه‌گیری می‌شود)  $(1 \text{ atm}$  و  $25^\circ \text{C})$  - در واحد حجم مخزن ذخیره‌سازی) برسد. فرایند جذب گاز یک فرایند گرمازا و دفع آن گرماگیر است. هر سرعت مشخصی از جذب (یا دفع)، با تغییرات دمایی در سیستم ذخیره‌سازی ANG

<sup>2</sup> Adsorbed Natural Gas<sup>1</sup> Compressed Natural Gas

به این منظور در این مطالعه نوسانات دمایی یک مخزن استوانه‌ای شکل هم در طول فرایند پرسازی و هم در طول فرایند تخلیه گاز مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین به منظور بهبود نوسانات دمایی فرض شده است که این مخزن شامل یک پخش کننده گاز در مرکز می‌باشد. در این مطالعه برخلاف مطالعات قبلی فشار مخزن با استفاده از معادله بقای جرم تابعی از زمان و شعاع در نظر گرفته شده و با اعمال شرایط مرزی مناسب، تأثیر انتقال گرمای جابجایی بین مخزن و محیط و ظرفیت گرمایی دیواره مخزن اعمال شده است. در پایان نیز با اضافه کردن رابطه مدل نیروی محرکه خطی به مجموعه معادلات، تأثیر مقاومت نفوذی بستر بر روی بازده ذخیره‌سازی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مدل سازی ریاضی

### ۲-۱- توضیح فیزیکی سیستم

فرایند ورود یا خروج گاز و جذب و دفع آن در طول پرکردن و تخلیه مخزن ذخیره‌سازی ANG، در دما، فشار و جرم متغیر گاز اتفاق می‌افتد.

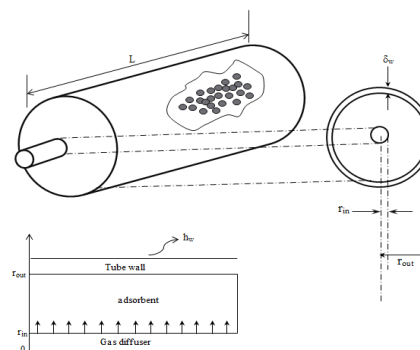
مدل ریاضی کامل سیستم ANG، بر مبنای حل همزمان دستگاه معادلات بقای انرژی، جرم و معادله همدمای جذب می‌باشد. یکی از راه‌های افزایش نرخ انتقال حرارت بین محیط و مخزن به ویژه ناحیه مرکزی آن برای کاهش نوسانات دمایی، تغییر جهت جریان گاز از محوری به شعاعی می‌باشد. برای این کار می‌توان از یک پخش کننده گاز که به صورت یک لوله سوراخ‌دار است و در مرکز مخزن قرار می‌گیرد، استفاده کرد. این پخش کننده در هنگام پر کردن مخزن، گاز را وارد مخزن می‌کند و در هنگام تخلیه گاز را از مخزن خارج می‌کند. این پخش کننده با تغییر جهت جریان، در هنگام تخلیه از گاز دفع شده از نواحی نزدیک به دیواره به عنوان یک واسطه برای انتقال انرژی از دیواره به مرکز مخزن و در هنگام پرسازی مخزن از گاز ورودی در مرکز که در دمای محیط وارد می‌شود به منظور بهبود نوسانات دمایی استفاده می‌کند.

شکل (۱)، مدل فیزیکی این مخزن را نشان می‌دهد. مخزن موردنظر، یک مخزن استوانه‌ای شکل با طول  $L$  و شعاع بیرونی  $r_{out}$  و شعاع داخلی  $r_{in}$  (شعاع پخش کننده گاز موجود در مرکز مخزن) است. همچنین ضخامت دیواره مخزن  $\delta_w$  با واحد متر می‌باشد.

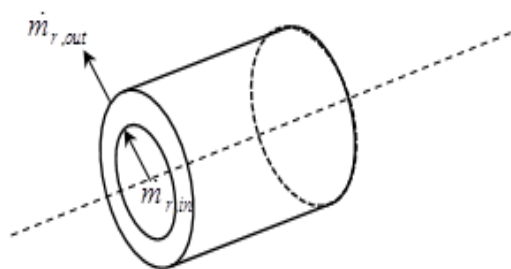
آزمایشگاهی مطالعه کردند [۳]. موتا و همکارانش نوسانات دمایی یک مخزن استوانه‌ای ساده ANG را در طول مرحله پرکردن با فرض اعمال فشار ثابت در ورودی مخزن بررسی کردند. آن‌ها برای ساده‌سازی محاسبات فرض کردند که مخزن عایق می‌باشد و از اثرات تبادل گرمایی دیواره مخزن با محیط اطراف و ظرفیت گرمایی دیواره صرف نظر کردند. همچنین آن‌ها توزیع دمای بستر را در طول یک فرایند تخلیه آهسته بدست آوردند که در محاسبات خود به جای محاسبه فشار از معادلات بقای جرم، آن را به صورت تابعی از زمان به سیستم اعمال کردند و فرض کردند که این فشار اعمال شده منجر به خروج جریان جرمی ثابتی از مخزن می‌شود [۸]. موتا یک مدل ریاضی را به منظور بررسی تأثیر ترکیب گاز طبیعی بر روی ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن به کار برد. نتایج حاصل از این مدل‌سازی، کاهش شدید بازده را به علت وجود هیدروکربن‌های سنگین در گاز طبیعی نشان داد [۹]. تأثیر رطوبت باقی‌مانده در کربن فعال بر روی جذب متان به وسیله ژو و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه تئوری آن‌ها تأثیر منفی رطوبت کربن فعال را بر روی ظرفیت جذب متان تأیید کرد [۱۰]. لارا و همکارانش، مدل‌سازی خود را در دو بعد شعاعی و محوری برای فرایند تخلیه در مخزنی استوانه‌ای انجام دادند. این مخزن شامل یک لوله گرمایی بود که در طول فرایند تخلیه گرما را به بستر جاذب منتقل می‌کرد و به وسیله سوراخی در جلو مخزن پر و خالی می‌شد. آن‌ها از تغییرات فشار گاز در طول و شعاع بستر صرف نظر کرده و فشار سیستم را یکنواخت و فقط تابعی از زمان فرض کردند [۱۱]. هیراتا و همکارانش نیز یک فرمولاسیون یک‌بعدی برای مطالعه تأثیرات مضر گرمای جذب بر روی ظرفیت تخلیه در طول فرایند تخلیه‌ای آهسته بکار بردند. آن‌ها برای ساده‌سازی محاسبات، از تغییرات شعاعی فشار صرف نظر کرده و فشار سیستم را فقط تابعی از زمان در نظر گرفته و معادلات خود را با یک روش ترکیبی تحلیلی- عددی حل نمودند [۱۲].

با توجه به اهمیت و تأثیرات مضر نوسانات دمایی مخزن ANG بر روی بازده آن، بررسی کامل رفتار دمایی آن در طول فرایندهای جذب و دفع و همچنین شناخت عوامل موثر بر روی ظرفیت ذخیره‌سازی و تخلیه به منظور بررسی عملی بودن این تکنولوژی و ساخت مخزنی با خصوصیات مناسب بسیار ضروری می‌باشد.

کنترل مورد نظر شامل سه فاز گاز، گاز جذب شده و جامد می باشد. فاز جامد ( $s$ ) شامل بستر جاذب، فاز گازی ( $g$ ) شامل مولکول های گازی جذب نشده موجود در فضاهای خالی بستر جاذب و تخلخل ها و فاز جذب شده ( $l$ ) نیز شامل گاز جذب شده بر روی سطح جاذب و حفره های دانه های جاذب می باشد. موازنه جرم شامل ورود و خروج جریان فاز گاز به حجم کنترل و تغییر مقدار جرم فاز گازی و جذب شده است.



شکل ۱- مدل فیزیکی مخزن ذخیره سازی



شکل ۲- موازنه جرم برای مخزن ذخیره سازی ANG

با توجه به شکل (۲) موازنه جرم برابر است با:

$$\left( \frac{\partial m_g}{\partial t} + \frac{\partial m_l}{\partial t} \right)_{CV} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad (1)$$

سمت چپ رابطه (۱) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial m_g}{\partial t} \Big|_{CV} + \frac{\partial m_l}{\partial t} \Big|_{CV} = \left( \varepsilon_{eff} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_l}{\partial t} \right) \Big|_{CV} \Delta V \quad (2)$$

که  $\rho_g$  و  $\rho_l$  به ترتیب چگالی فاز جذب شده و فاز گازی با واحد  $(kg/m^3)$ ،  $t$  زمان با واحد ثانیه و  $\Gamma$  شعاع مخزن بر حسب متر می باشند. همچنین  $\varepsilon_{eff}$  در این رابطه، تخلخل مؤثر بستر یا تخلخل در دسترس برای گاز است و رابطه آن با تخلخل بستر ( $\varepsilon_b$ ) و تخلخل ذرات جاذب ( $\varepsilon_p$ ) به صورت زیر است:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_b + (1 - \varepsilon_b) \varepsilon_p \quad (3)$$

با آگاهی از این نکته که تنها جرم ورودی و خروجی به حجم کنترل فاز گاز است، سمت راست رابطه (۱) برابر است با:

$$\sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} = \sum_{in} \dot{m}_g - \sum_{out} \dot{m}_g \quad (4)$$

با توجه به اینکه مدل در نظر گرفته شده، یک مدل یک بعدی و در جهت شعاعی است، جرم ورودی و خروجی از حجم

## ۲-۲- معادلات حاکم

برای استخراج معادلات انتقال جرم و حرارت، یک حجم کنترل به شکل پوسته ای استوانه ای شکل به همراه فرضیات زیر در نظر گرفته شد.

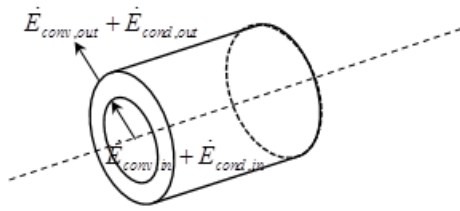
- وجود پخش کننده گاز در مرکز مخزن، باعث ایجاد جریان شعاعی می شود و مسأله را به یک مسأله یک بعدی در جهت شعاعی تبدیل می کند.
- گاز طبیعی به عنوان یک گاز ایده آل و متان خالص در نظر گرفته شده است.
- تمام خواص گاز متان در محدوده دما و فشار عملیاتی ثابت فرض می شوند.
- برای محاسبه جریان گرمی و جریان حرارت به ترتیب از قوانین داری و فوریه استفاده شده است.
- فاز جذب شده و جاذب جامد به صورت موضعی در تعادل با فاز گازی هستند.
- از جابه جایی طبیعی در مخزن صرف نظر شده است.
- از مقاومت نفوذی بستر جاذب صرف نظر شده و فرض می شود که در هر لحظه سیستم در تعادل آنی می باشد.

با در نظر گرفتن فرضیات بالا و نوشتن موازنه جرم و انرژی برای حجم کنترل مورد نظر، معادلات به صورت زیر حاصل می شوند:

## ۲-۲-۱- معادله انتقال جرم

شکل (۲) طرحی کلی از حجم کنترل در نظر گرفته شده برای موازنه جرم در مخزن ANG را نشان می دهد.

این حجم کنترل یک پوسته استوانه ای با ابعاد  $L$  و  $r$ ،  $\Delta r$  می باشد؛ که حجم آن برابر است با:  $\Delta v = 2\pi r \Delta r L$ . حجم



شکل ۳- موازنه انرژی حجم کنترل

که در آن  $e$  انرژی داخلی بر حسب ژول در واحد جرم است. با توجه به ناچیز بودن کار جریان، می‌توان رابطه (۹) را به فرم زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} & (\varepsilon_{eff} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g e_g) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s e_s) + \\ & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l e_l)) 2\pi r \Delta r L = \dot{Q}|_{cv} + (\dot{E}_{conv,in} \\ & - \dot{E}_{conv,out}) + (\dot{E}_{cond,in} - \dot{E}_{cond,out}) \end{aligned} \quad (11)$$

گرمای جذب تولیدی در حجم کنترل را می‌توان به عنوان یک منبع انرژی داخلی در نظر گرفت و به فرم زیر نوشت:

$$\dot{Q}|_{cv} = \Delta H \frac{\partial \rho_l}{\partial t} (2\pi r \Delta r L) \quad (12)$$

انتقال انرژی ناشی از جریان سیال در حجم کنترل، با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{conv,in} - \dot{E}_{conv,out} &= \{ \rho_g w e_g (2\pi r L) \} \\ & - \{ \rho_g w e_g (2\pi r L) + \frac{\partial (\rho_g w e_g (2\pi r L))}{\partial r} \Delta r \} \end{aligned} \quad (13)$$

با فرض اینکه انرژی داخلی فاز گاز جذب شده و جامد فقط تابع دما می‌باشند، خواهیم داشت:

$$de_s = c_{p,s} dT \quad (14)$$

$$de_l = c_{p,l} dT \quad (15)$$

که  $c_{p,l}$  و  $c_{p,s}$  گرمای ویژه جاذب جامد و گاز جذب شده با واحد  $J/(kg \cdot K)$  هستند که گرمای ویژه فاز جذب شده با گرمای ویژه فاز گاز در فشار ثابت برابر در نظر گرفته می‌شود. رابطه بین آنتالپی فاز گاز و انرژی داخلی آن به صورت زیر است:

$$e_g = h_g - (1/\rho_g)P \quad (16)$$

انتقال انرژی رسانشی نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{cond,in} - \dot{E}_{cond,out} &= \{ q_r'' (2\pi r L) \} - \\ & (q_r'' (2\pi r L) + \frac{\partial (q_r'' 2\pi r L)}{\partial r} \Delta r) \end{aligned} \quad (17)$$

کنترل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \sum_{in} \dot{m}_g - \sum_{out} \dot{m}_g &= \\ (2\pi r L \rho_g w)_r - (2\pi r L \rho_g w)_{r+\Delta r} \end{aligned} \quad (5)$$

که  $w$  سرعت گاز در جهت شعاعی می‌باشد و با استفاده از رابطه دارسی برای محیط‌های متخلخل محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$w = -\sigma \frac{\partial P}{\partial r} \quad (6)$$

که در آن  $P$  فشار با واحد Pa و  $\sigma$  ثابتی است وابسته به خصوصیات جاذب و سیال جذب‌شونده و با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\sigma^{-1} = \frac{150(1-\varepsilon_b)^2 \mu}{4\varepsilon_b^3 R_p^2} \quad (7)$$

که در رابطه (۷)،  $R_p$  شعاع دانه‌های جاذب با واحد متر و  $\mu$  لزجت گاز متان با واحد  $kg/(m \cdot s)$  می‌باشد.

با جایگذاری روابط بالا در رابطه (۱)، معادله انتقال جرم کلی در مخزن ذخیره‌سازی ANG موردنظر به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon_{eff} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_g w)}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

### ۲-۲-۲- معادله انتقال حرارت

شکل (۳)، طرحی از موازنه انرژی سیستم ANG را نشان می‌دهد. این حجم کنترل نیز شامل سه فاز جاذب جامد، فاز گازی و جذب‌شده است. همانطور که بیان شد، فرض می‌شود که این سه فاز در تعادل گرمایی قرار دارند و دمای هر سه فاز در هر نقطه یکسان است و به همین دلیل نیازی به ارائه موازنه انرژی جداگانه برای هر یک از فازها نیست.

با نوشتن موازنه انرژی برای حجم کنترل نشان داده شده در شکل (۳) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial E}{\partial t}|_{cv} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + (\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out}) \quad (9)$$

که  $\dot{Q}_{cv}$  و  $\dot{W}_{cv}$  به ترتیب نشان دهنده نرخ کار و گرمای تولید شده در حجم کنترل هستند.

میزان تغییر انرژی انباشته‌شده در حجم کنترل در هر مرحله برابر است با:

$$\frac{\partial (pe)}{\partial t}|_{cv} \Delta V = (\varepsilon_{eff} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g e_g) + \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s e_s) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l e_l)) 2\pi r \Delta r L$$

عدم نفوذ گاز از دیواره را خواهیم داشت:

$$\dot{m}'' = \rho_g \sigma \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (24)$$

$$\rightarrow \frac{\partial P}{\partial r} = 0, \quad r = r_{out}$$

همچنین با فرض ورود و خروج جریان گاز با شدت جریان جرمی ثابت از مرکز مخزن شرط مرزی زیر به دست می آید:

$$\rho_g \sigma \frac{\partial P}{\partial r} = \dot{m}''_{in} \quad r = r_{in} \quad (25)$$

که در آن  $\dot{m}''_{in}$  شدت جریان جرمی ورودی به مخزن می باشد که در مرحله تخلیه منفی در نظر گرفته می شود. تأثیر جریان گاز ورودی و خروجی از داخل پخش کننده گاز بر روی توزیع دما به صورت زیر اعمال می شود.

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} = \rho_g \sigma \frac{\partial P}{\partial r} \quad (26)$$

$$C_{pg} (T_0 - T) \quad r = r_{in}$$

که  $T_0$  دمای اولیه گاز بر حسب K می باشد.

رابطه (۲۷) نیز شرط مرزی دما بر روی دیواره مخزن را نشان می دهد که تأثیر تبادل گرمای جابجایی بین مخزن و محیط بیرون و همچنین ظرفیت گرمایی دیواره مخزن را بر روی توزیع دمای بستر جاذب اعمال می کند:

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} = h_w (T - T_0) + \rho_w c_w \delta_w \frac{\partial T}{\partial t} \quad (27)$$

$$r = r_{out}$$

که در آن  $h_w$  و  $C_w$ ،  $\rho_w$  به ترتیب ظرفیت گرمایی مخزن، چگالی مخزن و ضریب انتقال گرمای جابجایی با محیط بر حسب  $J/kg \cdot K$ ،  $kg/m^3$  و  $W/(m^2 \cdot K)$  هستند.

#### ۲-۲-۶- شرایط اولیه

در مرحله تخلیه فرض می شود که در ابتدا مخزن در دمای محیط و فشار بیشینه و در مرحله پرسازی فرض می شود که در دمای محیط و فشار کمینه در حالت تعادل با گاز متان می باشد. با این فرض، شرایط اولیه برای مراحل تخلیه و پرسازی به ترتیب با روابط (۲۸) و (۲۹) بیان می شوند:

$$P = P_{max}, T = T_0 \quad (28)$$

$$P = P_{min}, T = T_0 \quad (29)$$

#### ۲-۳- حل عددی

##### ۲-۳-۱- بی بعد سازی معادلات

با فرض این که هم فرایند پر کردن و هم فرایند تخلیه از یک حالت اولیه آغاز می شوند که در حالت تعادل با محیط است، بیشینه چگالی فاز گاز و فاز جذب شده به صورت زیر

$$q_r'' = -k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (18)$$

با ساده سازی و جایگذاری روابط بالا در رابطه (۱۱) و اعمال فرضیات در نظر گرفته شده، در پایان به معادله (۱۹) خواهیم رسید:

$$C_{pg} \varepsilon_{eff} \rho_g \frac{\partial T}{\partial t} + C_{pg} \rho_l \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} - C_{pg} \rho_g \sigma \frac{\partial P}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} + k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \Delta H \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \varepsilon_{eff} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (19)$$

که در آن  $T$  دما بر حسب K،  $\Delta H$  گرمای جذب بر حسب J/kg و  $k_{eff}$  رسانایی گرمایی بستر جاذب بر حسب W/(m.K) هستند.

##### ۲-۲-۳- رابطه همدمای جذب

مقدار گاز جذب شده بر روی یک جاذب در هنگام تعادل در یک دما و فشار معین، تابعی از ماهیت گاز و ماده جاذب می باشد. رابطه بین مقدار گاز جذب شده و فشار در یک دمای ثابت برای یک جاذب، با یک رابطه همدمای جذب مناسب بیان می شود. در اینجا رابطه همدمای جاذب استفاده شده در مدل سازی (کربن G216) رابطه همدمای لانگمویر می باشد که به صورت زیر بیان می شود [۹]:

$$\frac{\rho_l}{\rho_s} = q_m \frac{bP}{1 + bP} \quad (20)$$

$$q_m = 5.592 \times 10^4 T^{-2.3} \quad (21)$$

$$b = 1.0863 \times 10^{-7} \exp(806/T) \quad (22)$$

که  $q_m$  ظرفیت اشباع نیز نامیده می شود و برابر با مقدار بیشینه جذب در یک دمای معین می باشد.

##### ۲-۲-۴- معادله گاز ایده آل

خواص فاز گاز با استفاده از رابطه گاز ایده آل به یکدیگر مرتبط می شوند. در سیستم ANG همانطور که قبلاً بیان شد گاز طبیعی، متان خالص فرض می شود که رفتار یک گاز ایده آل را از خود نشان می دهد که با توجه به مقدار ضریب تراکم پذیری متان در بازه دمایی و فشاری مخزن فرض مناسبی می باشد.

$$\rho_g = \frac{P}{RT} \quad (23)$$

##### ۲-۲-۵- شرایط مرزی

با توجه به صلب بودن دیواره مخزن، بر روی دیواره شرط

$$Bi = \frac{h_w (r_{ex} - r_{in})}{k_{eff}} \quad (41)$$

$$Fo = \frac{k_{eff} t_f}{\rho_s C_s (r_{out} - r_{in})^2} \quad (42)$$

سایر روابط استفاده شده نیز در زیر تعریف شده‌اند:

$$M_l^* = \frac{\rho_{l,max}}{\rho_{max}}, M_g^* = \frac{\rho_{g,max} \mathcal{E}_{eff}}{\rho_{max}} \quad (43)$$

$$\omega = \frac{P_{max} - P_{min}}{\rho_{g,max} C_{pg} T_0} \quad (44)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma (P_{max} - P_{min}) t_f}{\varepsilon (r_{out} - r_{in})^2} \quad (45)$$

$$i_{sor}^* = \frac{\Delta H}{T_0 C_{p,g}} \quad (46)$$

$$C_{lg}^* = \frac{C_l}{C_{pg}}, C = \frac{C_{ps} \rho_s}{C_{pg} \rho_{max}} \quad (47)$$

۳-۲-۲- شرایط مرزی بدون بعد:

$$\frac{\partial P^*}{\partial r^*} = 0, \quad r^* = 1 \quad (48)$$

$$M_g^* \rho_g^* \sigma^* \frac{\partial P^*}{\partial r^*} = j_{in}^*,$$

$$j_{in}^* = \frac{\dot{m}_{in}^* t_f}{\rho_{max} (r_{out} - r_{in})}, \quad r^* = 0 \quad (49)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial r^*} = \frac{\sigma^* M_g^*}{Fo C_s^*} \rho_g^* \frac{\partial P^*}{\partial r^*} (1 - T^*), \quad r^* = 0 \quad (50)$$

$$-k_{eff}^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = Bi (T^* - 1) +$$

$$\frac{C_w^*}{C_s^*} \frac{1}{Fo} \frac{\partial T^*}{\partial t^*}, \quad r^* = 1 \quad (51)$$

۳-۳-۲- شرایط اولیه:

شرایط اولیه بدون بعد برای مرحله تخلیه و پرسیازی به ترتیب به صورت زیر خواهند بود:

$$P^* = 1, \Gamma^* = 1 \quad (52)$$

$$P^* = 0, \Gamma^* = 1 \quad (53)$$

۳-۳-۲- روش حل عددی

مجموعه معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی بیان شده در بخش‌های قبل، شامل چهار مجهول  $\rho_g^*(r,t)$ ،  $P^*(r,t)$ ،  $\rho_l^*(r,t)$  و  $T^*(r,t)$  می‌باشند که با استفاده از حل دستگاه معادلات حاصل که شامل معادله پیوستگی، انرژی، همدمای جذب و معادله گاز ایده‌آل است، محاسبه می‌شوند.

می‌باشد:

$$\rho_{g,max} = \rho_g(P_{max}, T_0), \quad (30)$$

$$\rho_{l,max} = \rho_l(P_{max}, T_0)$$

که  $\rho_{g,max}$  مطابق با چگالی گاز در شروع مرحله تخلیه است. در عملیات غیرهمدما این مقدار بیشینه به دست نخواهد آمد و بنابراین مقدار گاز کمتری در مخزن ذخیره خواهد شد.

فشار، دما، مکان، زمان، چگالی فاز گازی و جذب شده نیز به صورت زیر بی‌بعدسازی می‌شوند [۱۴]:

$$P^* = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (31)$$

$$T^* = \frac{T}{T_0}, t^* = \frac{t}{t_f} \quad (32)$$

$$r^* = \frac{r - r_{in}}{r_{out} - r_{in}}, \quad r_{in}^* = \frac{r_{in}}{r_{out} - r_{in}} \quad (33)$$

$$\rho_g^* = \frac{\rho_g}{\rho_{g,max}} \quad (34)$$

$$\rho_l^* = \frac{\rho_l}{\rho_{l,max}} \quad (35)$$

با استفاده از روابط بیان شده، شکل بدون بعد معادلات جرم، انرژی و همدمای جذب به ترتیب به شکل زیر خواهند بود:

$$M_g^* \frac{\partial \rho_g^*}{\partial t^*} + M_l^* \frac{\partial \rho_l^*}{\partial t^*} = \frac{1}{r^* + r_{in}^*} \frac{\partial}{\partial r^*}$$

$$((r^* + r_{in}^*) M_g^* \rho_g^* \sigma^* \frac{\partial P^*}{\partial r^*}) \quad (36)$$

$$M_g^* \rho_g^* \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + M_l^* C_{lg}^* \rho_l^* \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + C_s^* \frac{\partial T^*}{\partial t^*}$$

$$- M_g^* \rho_g^* \sigma^* \frac{\partial P^*}{\partial r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = Fo C_s^* \frac{1}{r^* + r_{in}^*} \quad (37)$$

$$\frac{\partial}{\partial r^*} ((r^* + r_{in}^*) k_e^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*}) + M_l^* i_{sor}^* \frac{\partial \rho_l^*}{\partial t^*} + M_g^* \omega \frac{\partial P^*}{\partial t^*}$$

$$\rho_l^* - q_m^* \frac{\rho_b}{\rho_{l,max}} \frac{b^* P^* + b^* P_{min}}{1 + b^* \Delta P P^* + b^* P_{min}} = 0 \quad (38)$$

$$q_m^* = 5.592 \times 10^4 \times (T_0 T^*)^{-2.3} \quad (39)$$

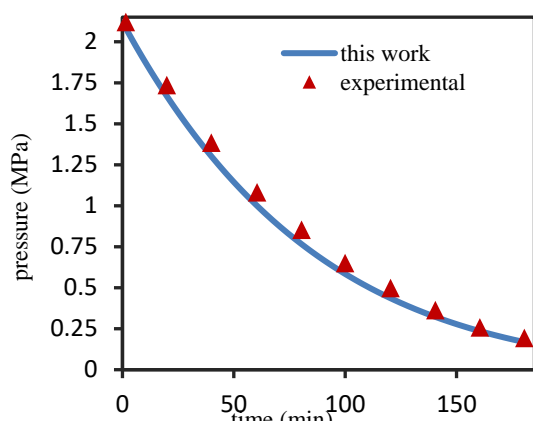
$$b^* = 1.0863 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{806}{T_0 T^*}\right) \quad (40)$$

که اعداد بدون بعد بایوت و فوریه نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

استوانه‌های افقی  $4 \text{ W/m}^2.K$  در نظر گرفته شده است. شکل (۴)، مقایسه تغییرات زمانی فشار حاصل از حل عددی مدل و نتایج آزمایشگاهی چانگ و تالو را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، مطابقت بسیار خوبی بین نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. شکل (۵) نیز، مقایسه تغییرات شعاعی دما را در بازه‌های مختلف زمانی برای مدل و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. داده‌های آزمایشگاهی برای مدت زمان ۳ ساعت و هر ۲۰ دقیقه ثبت شده‌اند.

همانطور که از این شکل مشخص است، با افزایش زمان، اختلاف بین نتایج حاصل از مدل و نتایج آزمایشگاهی بیشتر می‌شود، به گونه‌ای که با افزایش زمان، مدل دمای پایین‌تری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند که این مسأله می‌تواند به دلیل نامشخص بودن مقدار صحیح ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی باشد.

مطابق با شکل (۵)، در طول مرحله تخلیه با فشارزدایی مخزن، به علت گرماگیر بودن فرایند دفع، دمای بستر جاذب به شدت کاهش می‌یابد و بیشترین افت دما در مرکز مخزن اتفاق می‌افتد و با نزدیک شدن به دیواره مخزن مقدار این افت دما کاهش می‌یابد.



شکل ۴- مقایسه تغییرات زمانی فشار میانگین حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی چانگ و تالو [۳] (نقاط)

دلیل کاهش افت دمای ایجادشده در دیواره مخزن و نقاط نزدیک به آن، جبران مقداری از انرژی مورد نیاز دفع به وسیله تبادل گرمای جابه‌جایی دیواره مخزن با محیط اطراف و همچنین انرژی ذخیره‌شده در دیواره مخزن به علت ظرفیت گرمایی آن می‌باشد. دمای پایین‌تر در فرایند دفع باعث افزایش میزان گاز باقی‌مانده در پایان تخلیه مخزن و کاهش بازده آن می‌شود. به منظور اطمینان

این معادلات دیفرانسیل جزئی پیچیده بوده و به صورت تحلیلی قابل حل نمی‌باشند. زیرا این معادلات شامل عبارت‌های غیرخطی بوده که با هم ترکیب شده‌اند. مهم‌ترین مشکل در حل معادله‌های دیفرانسیل جزئی، غیرخطی بودن آن‌ها است. بیشتر روش‌های عددی برای این منظور ترکیبی از روش‌های اختلاف محدود با روش‌های خطی‌سازی و آزمون و خطا هستند. در روش‌های عددی، قاعده قطعی و مشخصی را نمی‌توان برای حل همه انواع معادله‌های دیفرانسیل غیرخطی بکار برد، به گونه‌ای که بر اساس شکل معادله، نوع عبارت غیر خطی و شدت غیرخطی بودن آن، روش‌های پیشنهادی برای حل معادله‌ها متفاوت خواهند بود.

در این مطالعه، برای حل معادلات بیان شده از روش اختلاف محدود ضمنی استفاده شده است. به این صورت که ابتدا معادلات مذکور گسسته‌سازی شده و تبدیل به دستگاهی از معادلات جبری شده و سپس این مجموعه معادلات جبری با استفاده از روش تکراری نیوتون-رافسون خطی‌سازی شده و برای هر زمان مشخص حل شده‌اند.

### ۳- نتایج و بحث

اولین مدل‌سازی برای فرایند تخلیه مخزن و به منظور اعتبارسنجی مدل و روش حل عددی مورد استفاده، انجام شده است. در شروع مرحله تخلیه، مخزن و جاذب درون آن در دمای محیط و فشار بیشینه، قرار دارد. در این حالت یک شدت جریان ثابت گاز از سیستم خارج می‌شود و این تا زمانی ادامه می‌یابد که فشار مخزن به فشار کمینه خود که برابر با فشار اتمسفر در نظر گرفته می‌شود، برسد.

برای اولین مقایسه، نتایج آزمایشگاهی ارائه شده به وسیله چانگ و تالو [۳] مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات آزمایشگاهی استفاده شده برای مدل‌سازی این مخزن در جدول (۱) ارائه شده است. مخزن استفاده شده به وسیله چانگ و تالو، مخزنی استوانه‌ای شکل است که به وسیله سوراخی در جلو مخزن، گاز به آن وارد و خارج می‌شود و پخش‌کننده گاز در مرکز آن وجود ندارد. به همین دلیل به منظور یکسان‌سازی فیزیک هر دو مدل برای مقایسه نتایج، شعاع پخش‌کننده گاز در محاسبات  $10^{-6} m$  در نظر گرفته می‌شود. به علت بیان نشدن مقدار ضریب جابه‌جایی گرمایی به وسیله این دانشمندان، مقدار ضریب جابه‌جایی گرمایی خارجی با توجه به رابطه ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی برای

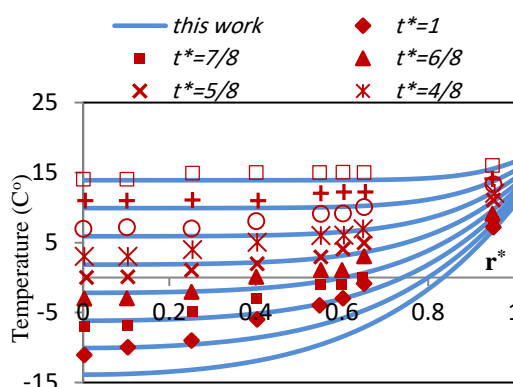


آهسته‌ای به مدت زمان ۲ ساعت در یک مخزن استوانه‌ای ساده و بدون پخش کننده گاز که دارای یک سوراخ با شعاع  $5\text{ mm}$  در جلو مخزن برای ورود و خروج گاز بود، انجام دادند.

بیشتر از نتایج مدل و روش حل عددی، نتایج حاصل با نتایج مطالعه تئوری هیراتا و همکاران [۱۲] مقایسه شد. این دانشمندان مدل‌سازی خود را در یک بعد برای فرایند تخلیه

جدول ۱- مقادیر متغیرهای استفاده شده برای اعتبارسنجی مدل و روش حل

منبع	هیراتا و همکاران [۱۲]	چانگ و تالو [۳]
خواص جاذب:	کربن قرصی شکل G216	کربن N/A
چگالی ( $\rho_s$ )	$410\text{ kg/m}^3$	$975\text{ kg/m}^3$
گرمای ویژه ( $C_{p,s}$ )	$650\text{ J/kg.K}$	$1052\text{ J/kg.K}$
رسانایی گرمایی موثر بستر ( $k_{eff}$ )	$1/2\text{ W/m.K}$	$0.122\text{ W/m.K}$
تخلخل موثر ( $\varepsilon_{eff}$ )	۰.۷۴	۰/۵
گرمای جذب ( $i_{sor}$ )	$1/1 \times 10^6\text{ J/kg}$	$\Delta H = f(R_g, q)$
هندسه		
ماده سازنده	فولاد ضد زنگ	فولاد کربن
چگالی ( $\rho_w$ )	$7900\text{ kg/m}^3$	$7800\text{ kg/m}^3$
گرمای ویژه ( $C_{p,w}$ )	$496/2\text{ J/kg.K}$	$502/4\text{ J/kg.K}$
شعاع خارجی ( $r_{out}$ )	$0.14\text{ m}$	$0.1\text{ m}$
طول ( $L$ )	$0.185\text{ m}$	$0.174\text{ m}$
ضخامت ( $\delta_w$ )	$0.01\text{ m}$	$0.055\text{ m}$
شرایط عملیاتی:		
فشار اولیه مرحله تخلیه ( $P_0$ )	$3/5\text{ MPa}$	$2/1\text{ MPa}$
فشار نهایی مرحله تخلیه ( $P_d$ )	$0.1013\text{ MPa}$	$0.1166\text{ MPa}$
دمای اولیه ( $T_0$ )	$293\text{ K}$	$291\text{ K}$
دمای محیط ( $T_{amb}$ )	$293\text{ K}$	$291\text{ K}$
ضریب انتقال گرمای جابجایی بیرونی ( $h_w$ )	$4\text{ W/m}^2.\text{K}$	-

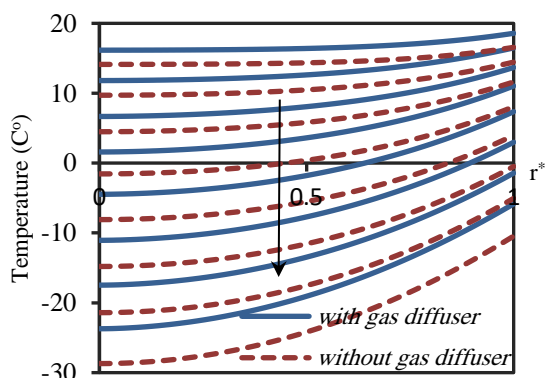


شکل ۵- مقایسه تغییرات شعاعی دمای حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی چانگ و تالو [۳] در هشت بازه زمانی در طول فرایند تخلیه (نقاط نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهند) ( $t^* = 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1$ )

مدل‌سازی انجام شده به وسیله آن‌ها توزیع فشار را در کل سیستم یکنواخت در نظر گرفته است که منجر به یک فرمولاسیون ساده‌تر شده و در نتیجه فشار حاصل را فقط به صورت تابعی از زمان ( $P = P(t)$ ) محاسبه می‌نماید. اما مدل‌سازی انجام شده در اینجا همانطور که به وسیله معادلات نشان داده شد، فشار را به صورت تابعی از زمان و مکان ( $P = P(r, t)$ ) در نظر می‌گیرد. با وجود اختلافات بیان شده بین دو مدل، به دلیل در نظر گرفتن فرایند تخلیه آهسته، تغییرات فشار در جهت شعاعی کم بوده و در نتیجه در فرایندهای تخلیه طولانی‌مدت، هر دو مدل باید منجر به نتایج یکسانی شوند. هیراتا و همکارانش برای حل معادلات حاصل، روش انتقال انتگرال تعمیم یافته (GITT)<sup>۱</sup> که

<sup>۱</sup>Generalized Integral Transform Technique

مرکز و طول  $0.185\text{ m}$  و شعاع خارجی  $0.14\text{ m}$  و شرایط و جاذب در نظر گرفته شده به وسیله هیراتا و همکاران انجام شد. تغییرات شعاعی دما در بازه‌های زمانی مختلف برای مخزنی با پخش کننده گاز و بدون آن در شکل (۷)، مقایسه شده است.



شکل ۷- تغییرات شعاعی دما برای مخزنی با پخش کننده گازی و بدون پخش کننده برای فرایند تخلیه‌ای با شدت جریان خروجی  $0.185\text{ kg/min}$  در بازه‌های زمانی مختلف

همانگونه که از این شکل مشخص است، وجود پخش کننده و تغییر جهت جریان متان از محوری به شعاعی باعث می‌شود که گاز دفع شده از نواحی نزدیک به دیواره به عنوان یک منتقل کننده انرژی به نواحی نزدیک به مرکز مخزن عمل کند و افت دمای ناشی از دفع گاز را کاهش دهد به گونه‌ای که میانگین دمای بستر در پایان فرایند نزدیک به  $5\text{ C}^0$  افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که وجود پخش کننده باعث افزایش ۵ درصدی بازده می‌شود.

همانطور که دیده شد انتقال گرمای بین دیواره مخزن و محیط می‌تواند افت دما در طول چرخه تخلیه را کاهش دهد. برای مثال برای افزایش این انتقال حرارت می‌توان از انرژی گاز خروجی از آگزوز وسیله نقلیه که موتور را در دمای بالایی ترک می‌کند، استفاده کرد. به منظور بررسی تأثیر ضریب جابجایی گرمایی دیواره، مقایسه‌ای بین دو حالت با ضرایب جابجایی‌های  $h_w=4\text{ W/m}^2.K$  و  $h_w=40\text{ W/m}^2.K$  انجام شد.

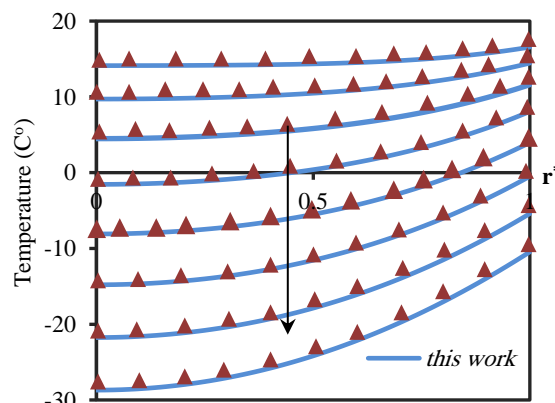
شکل (۸) نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، تغییر ضریب جابجایی به صورت قابل توجهی توزیع شعاعی و کاهش دما را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع در  $h_w=40\text{ W/m}^2.K$  کاهش دمای میانگین بستر نسبت به حالت اولیه  $14\text{ C}^0$  کمتر خواهد بود. در این حالت بازده تخلیه مخزن از  $85\%/96$  به  $96\%/82$  افزایش می‌یابد. اما مطلب دیگری که

ترکیبی از روش‌های تحلیلی و عددی برای حل مسائل نفوذ و جابه‌جایی-نفوذ است را استفاده کردند. داده‌های استفاده شده به وسیله هیراتا و همکاران در جدول (۲) بیان شده است.

شکل (۶)، مقایسه نتایج تغییرات شعاعی دما را برای هر دو مدل در ۸ بازه زمانی نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است نتایج دمایی هر دو مدل مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. اختلاف کم مشاهده شده بین نتایج دو مدل نیز به علت متفاوت بودن فرض در نظر گرفته شده برای تغییرات مکانی فشار و روش حل معادلات در دو مدل است. (نمودارها برای هشت بازه زمانی مساوی رسم شده و زمان در جهت پیکان افزایش می‌یابد).

عملکرد سیستم ANG، به وسیله بازده دینامیکی بررسی می‌شود که در فرایند تخلیه، برابر با نسبت مقدار گاز خروجی در شرایط واقعی به مقدار گاز خروجی در شرایط همدمای و در فرایند پر کردن مخزن، برابر با نسبت مقدار گاز ذخیره شده در سیستم در شرایط واقعی به مقدار گاز ذخیره شده در سیستم در شرایط عملیاتی همدمای می‌باشد.

$$\eta = \frac{V_{real}}{V_{isothermal}} \quad (54)$$



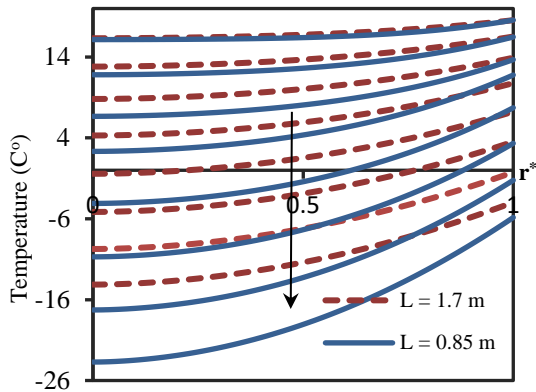
شکل ۶- مقایسه تغییرات شعاعی دما با نتایج هیراتا و همکاران (نقاط [۱۲] در هشت بازه زمانی مختلف در طول فرایند تخلیه ( $t^* = 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1$ ))

همچنین برای محاسبه مقادیر میانگین متغیرها از رابطه (۵۵) استفاده شده است:

$$\phi = \frac{1}{r_{out}^2} \int_{r_{in}}^{r_{out}} \phi(r) r dr \quad (55)$$

پس از اطمینان از روش مدل‌سازی و حل عددی، مدل‌سازی برای فرایند تخلیه‌ای با شدت جریان  $0.185\text{ kg/min}$  برای مخزنی با یک پخش کننده گازی به قطر  $2\text{ cm}$  در

و افت دمای بستر جاذب، محاسبات برای دو مقدار مختلف رسانایی گرمایی جاذب انجام شد.

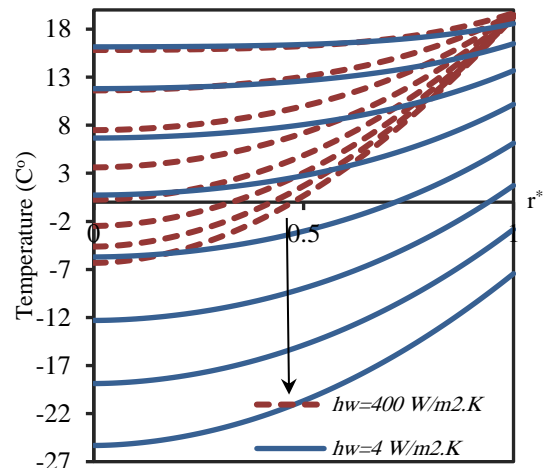


شکل ۹- بررسی تاثیر هندسه مخزن بر روی کاهش دما در طول فرایند تخلیه با شدت جریان  $0.185 \text{ kg/min}$

شکل (۱۰)، توزیع دمایی حاصل را در مقابل شعاع بدون بعد در بازه‌های مختلف زمانی نشان می‌دهد. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش رسانایی گرمایی بستر، انتقال گرما به مرکز بستر افزایش یافته و توزیع دما در شعاع بستر هموارتر می‌شود و همچنین میزان افت دما به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب رسانایی گرمایی از  $1/2$  به  $7/3 \text{ W/m.K}$ ، دمای مرکز بستر،  $11 \text{ C}^\circ$  بیشتر می‌شود. با این کاهش افت دما، بازده مخزن ANG از  $85/96\%$  به  $90/55\%$  افزایش می‌یابد. برای بررسی بازده و میزان جذب و دفع دینامیکی جاذب‌هایی با ظرفیت جذب همدمای بالاتر می‌توان از ظرفیت اشباع تعریف شده در بخش‌های قبل استفاده کرد. همانطور که قبلاً بیان شد، همدمای لانگمویر دارای عبارتی به نام ظرفیت اشباع ( $q_m$ ) است، که برابر با مقدار بیشینه جذب یک جاذب می‌باشد که در آن حالت تمام سایت‌های جاذب به وسیله جذب‌شونده اشغال شده است و افزایش ظرفیت اشباع به معنی افزایش ظرفیت جذب همدمای و یا به بیانی دیگر استفاده از جاذبی با ظرفیت جذب بالاتر می‌باشد. به این منظور، محاسبات برای افزایش و کاهش  $20\%$  درصدی ظرفیت اشباع جاذب، تکرار شد.

شکل (۱۱)، مقایسه‌ای بین توزیع شعاعی دمای سه حالت بیان شده را در پایان فرایند تخلیه نشان می‌دهد. با افزایش ظرفیت اشباع جاذب، میزان افت دمای بستر افزایش می‌یابد، زیرا در این حالت میزان گاز دفع‌شده در هر لحظه از زمان بیشتر خواهد بود و گرمای مورد نیاز برای دفع آن

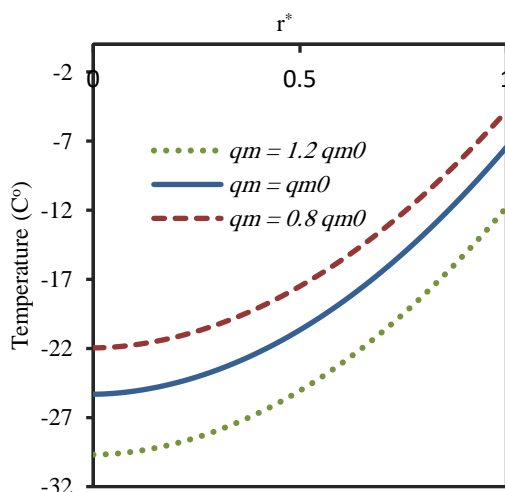
از این شکل می‌توان دریافت این است که با افزایش ضریب جابه‌جایی گرمایی، تغییرات شعاعی دما در بستر افزایش می‌یابد. دلیل این تغییر توزیع دما، پایین بودن ضریب رسانایی بستر جاذب است که نمی‌تواند به خوبی گرمای جذب‌شده به وسیله دیواره را به سایر نقاط و به ویژه نواحی نزدیک به مرکز مخزن انتقال دهد و این مسأله باعث می‌شود که تفاوت دمای دیواره و مرکز زیاد شود. یکی دیگر از راه‌های افزایش انتقال گرمای مخزن با محیط اطراف، افزایش سطح انتقال گرما در واحد حجم ذخیره‌سازی، به وسیله افزایش نسبت طول مخزن به قطر آن می‌باشد. شکل (۹)، تغییرات شعاعی دما را برای مخازنی با حجم یکسان اما با طول‌های  $1/7 \text{ m}$  و  $0/85 \text{ m}$  نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که افزایش نسبت طول به قطر، منجر به کاهش افت دما و هموار شدن توزیع دما در عرض بستر می‌شود. با این تغییر ابعاد، بازده دینامیکی به  $90/66\%$  افزایش می‌یابد.



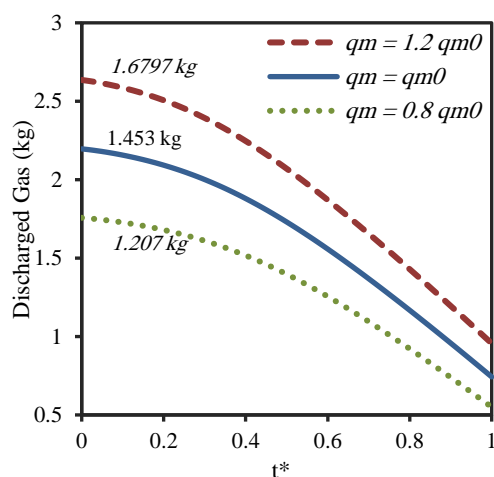
شکل ۸- بررسی تاثیر ضریب جابه‌جایی دیواره بر روی کاهش دما در طول فرایند تخلیه با شدت جریان  $0.185 \text{ kg/min}$

همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد، تبادل گرما با محیط اطراف و افزایش سطح انتقال گرما در واحد حجم مخزن، راهکارهایی برای کاهش افت دمای مخزن در طول فرایند تخلیه می‌باشد. اما یکی از موانع مهم در استفاده از این منابع گرما، پایین بودن ضریب رسانایی بستر کربن فعال می‌باشد. یکی از روش‌های افزایش ضریب رسانایی گرمایی جاذب، ترکیب کردن آن با موادی همچون گرافیت طبیعی توسعه داده شده [۱۵] است، که رسانایی گرمایی بالایی دارد. به منظور بررسی تأثیر این متغیر بر روی توزیع شعاعی

مخزن در حالت تعادل قرار دارد. پر کردن مخزن برخلاف تخلیه نمی‌تواند در مدت زمان زیادی انجام شود و برای استفاده در وسایل نقلیه شخصی دستیابی به یک زمان سریع برای پر کردن مخزن بسیار مهم می‌باشد. به همین منظور در این بخش مدل‌سازی برای فرایندی با شدت جریان بالای  $0.185 \text{ kg/min}$  و زمانی نزدیک به ۱۰ دقیقه انجام گرفته است.



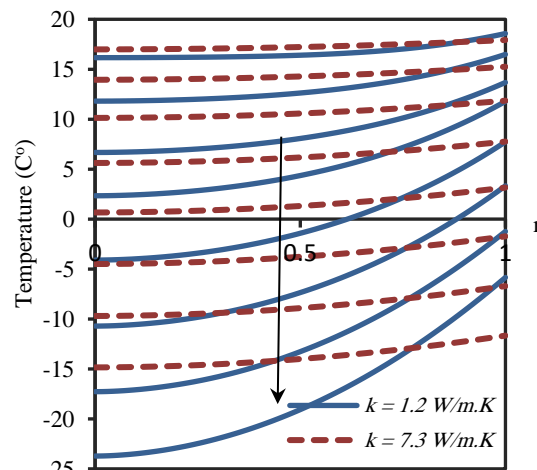
شکل ۱۱- تغییرات شعاعی دمای بستر در پایان فرایند تخلیه‌ای با شدت جریان  $0.185 \text{ kg/min}$  برای ظرفیت‌های اشباع مختلف جاذب.



شکل ۱۲- تغییرات گاز جذب‌شده در مخزن در فرایند تخلیه با شدت جریان  $0.185 \text{ kg/min}$  برای ظرفیت‌های اشباع

شکل (۱۳)، تغییرات دما را در بازه‌های مختلف زمانی در برابر شعاع بدون بعد در این فرایند نشان می‌دهد. فرایند جذب گاز فرایندی گرمازا است و در مخزن ANG نیز تولید گرما به علت جذب متان بر روی کربن فعال باعث افزایش دمای بستر جاذب می‌شود. برخلاف آنچه در مورد فرایند

در نتیجه افت دمای بستر بیشتر می‌شود. به‌گونه‌ای که با افزایش ۲۰ درصدی این عبارت، میزان افت دما در مرکز بستر  $5^\circ \text{C}$  افزایش یافته و با کاهش ۲۰ درصدی، افت دما در مرکز  $3^\circ \text{C}$  کاهش می‌یابد و بازده فرایند برای این سه حالت به ترتیب کاهش ظرفیت اشباع  $83/07\%$ ،  $85/96\%$  و  $88/93\%$  خواهد بود.



شکل ۱۰- بررسی تاثیر ضریب رسانایی گرمایی بستر جاذب برای بر روی توزیع دمای بستر در طول فرایند تخلیه با شدت جریان  $0.185 \text{ kg/min}$

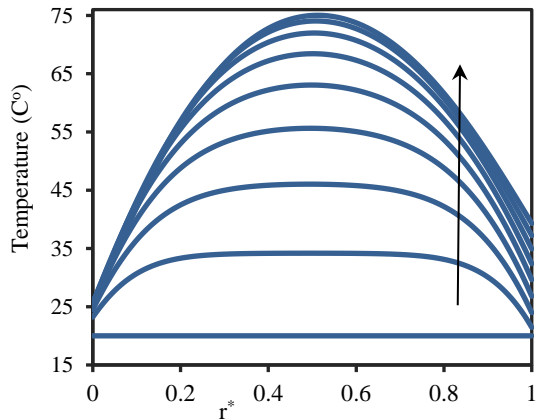
شکل (۱۲) نیز تغییرات زمانی چگالی گاز جذب‌شده موجود در مخزن را برای این سه حالت نشان می‌دهد. مطابق با شکل، میزان گاز تخلیه‌شده که به صورت جذب‌شده در بستر وجود داشته است، برای سه حالت ذکرشده به ترتیب  $1/45$ ،  $1/67$  و  $1/21 \text{ kg}$  است.

این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت جذب جاذب، میزان گاز دفع‌شده افزایش خواهد یافت. در واقع با افزایش ظرفیت اشباع، مقدار عدد مخرج (حجم گاز جذب‌شده در شرایط همدم) در رابطه بازده دینامیکی یعنی رابطه (۵۴) افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود صورت کسر نیز به همین میزان افزایش یابد، اما کاهش بازده نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت جذب به علت نوسانات دمایی بیشتر بستر این هدف به میزان لازم تحقق نمی‌یابد و اگرچه میزان گاز دفع شده افزایش خواهد یافت اما میزان افزایش آن متناسب با میزان افزایش ظرفیت جذب همدم نیست.

### ۳-۲- فرایند پر شدن

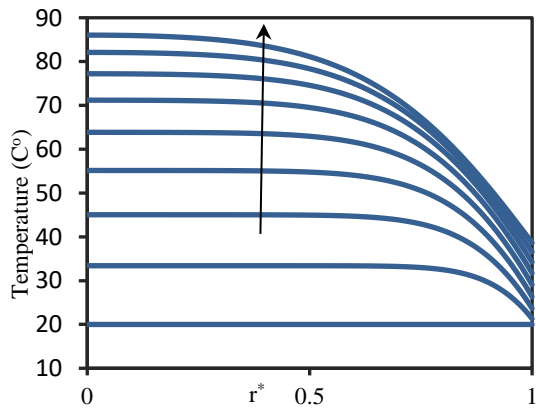
در شروع فرایند پر کردن، مخزن در دمای اولیه  $293 \text{ K}$  و فشار اتمسفر است و فرض می‌شود که در این فشار، هیچ مولکول گازی دیگری به جز متان در مخزن وجود ندارد و

پیدا می‌کند، اما میزان این کاهش نسبت به فرایند تخلیه بسیار کمتر می‌باشد. زیرا در فرایند پر کردن، مدت زمان فرایند کوتاه است و زمان کافی برای تبادل گرما با محیط وجود ندارد به‌گونه‌ای که با افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی، میزان افزایش دمای میانگین بستر  $7C^{\circ}$  کاهش می‌یابد. این افزایش ضریب جابه‌جایی باعث افزایش ۴ درصدی در بازده دینامیکی می‌شود که در مقایسه با فرایند تخلیه کاهش زیادی دارد.



شکل ۱۳- تغییرات شعاعی دما در بازه‌های مختلف زمانی (۱)،  
 $(t^* = 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875)$   
 در فرایندی با مدت زمان ۱۰ دقیقه (زمان در جهت پیکان  
 افزایش می‌یابد).

اگرچه افزایش رسانایی گرمایی بستر جاذب و نیز افزایش سطح انتقال حرارت در فرایند پر کردن برای استفاده از انتقال گرما با محیط و کاهش نوسانات نیز می‌تواند مفید واقع شود، اما همانطور که برای ضریب جابه‌جایی گرمایی نشان داده شد، به علت کوتاه بودن زمان فرایند پر کردن نمی‌توانند راه حل مناسبی باشند.



شکل ۱۴- تغییرات شعاعی دمای بستر بدون در نظر گرفتن اثر  
 گاز ورودی در فرایندی با شدت جریان  $0.205 \text{ kg/min}$

تخلیه مشاهده شد، در فرایند پر کردن، بزرگترین نوسانات دمایی در مرکز بستر جاذب واقع نشده است. در واقع دیواره و نواحی نزدیک به آن و همچنین مرکز بستر، نسبت به نقاط بین دیواره و مرکز، افزایش دمای کمتری را نشان می‌دهند. دلیل این نوع توزیع دما این است که در نقاط نزدیک به دیواره مقداری از گرمای جذب تولید شده به وسیله تبادل گرمای جابه‌جایی به محیط اطراف منتقل شده و مقداری نیز به علت ظرفیت گرمایی دیواره مخزن به وسیله دیواره جذب می‌شود و در نتیجه افزایش دمای بستر در این نقاط کاهش می‌یابد. همچنین در مرکز بستر به علت ورود گاز جدید که در دمای پایین‌تری نسبت به دمای جاذب (دمای محیط) از طریق پخش‌کننده به مخزن وارد می‌شود، میزان افزایش دما کاهش می‌یابد به طوری که دمای مرکز بستر تقریباً برابر با مقدار اولیه باقی می‌ماند. اما در شعاع‌های میانی که در فاصله بیشتری نسبت به دیواره و همچنین محل ورود گاز قرار دارند، تأثیر گرمای جذب آزاد شده بیشتر بوده و دمای بستر به شدت افزایش می‌یابد و افزایش دمایی به بزرگی  $55 C^{\circ}$  در این قسمت مشاهده می‌شود. در این حالت دمای میانگین  $42 C^{\circ}$  افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش دما، موجب کاهش بازده به  $76/23\%$  می‌شود.

برای مشخص کردن میزان تأثیر گاز ورودی، دستگاه معادلات برای حالتی با صرف نظر از اثر گاز ورودی و کاربرد شرط مرزی  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$  در مرکز بستر، حل شده است. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مطابق با شکل، در این حالت بیشینه دما در مرکز بستر اتفاق می‌افتد که متناظر با  $67 C^{\circ}$  افزایش دما می‌باشد و هر چه به دیواره نزدیک می‌شویم میزان این افزایش دما کاهش می‌یابد و افزایش دمای میانگین بستر  $48/5 C^{\circ}$  است. این نتایج نشان می‌دهد که گاز ورودی بازده را به میزان  $4/5\%$  افزایش خواهد داد.

همانند فرایند تخلیه، تأثیر افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی نیز برای فرایند پر کردن مخزن برای دو مقدار  $h_w = 400 \text{ W/m.K}$  و  $h_w = 4 \text{ W/m.K}$  نیز بررسی شد. شکل (۱۵) توزیع دما در جهت شعاعی را برای این دو حالت در پایان فرایند نشان می‌دهد. از شکل نیز مشخص است که با افزایش این ضریب میزان افزایش دمای بستر به علت گرمای جذب به ویژه در نواحی نزدیکی به دیواره کاهش

نظر شد و فرض شد که سیسم در تعادل آنی قرار دارد. زمان طولانی فرایند تخلیه باعث می‌شود که این فرض به واقعیت بسیار نزدیک باشد اما به دلیل کوتاه بودن زمان فرایند پرسی، مقاومت نفوذی بستر جذب می‌تواند یکی از متغیرهای تأثیرگذار بر روی ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن باشد.

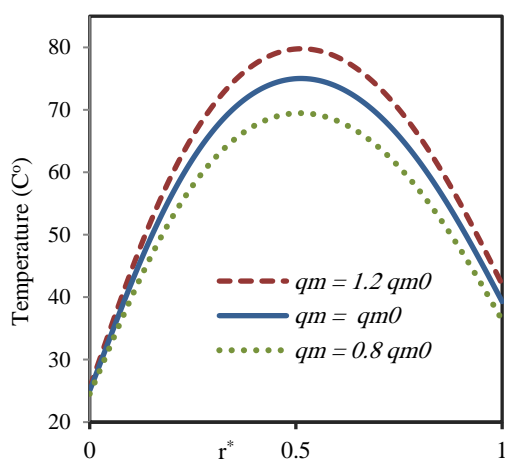
مدل نیروی محرکه خطی<sup>۱</sup>، به میزان گسترده‌ای برای توضیح جذب جذب‌شونده بر روی سطح جذب استفاده می‌شود. این مدل، یک مدل ساده‌شده از معادله نفوذ درون دانه جذب است که در آن سرعت جذب جذب‌شونده به صورت خطی متناسب با اختلاف بین جذب تعادلی  $\rho_{l,eq}$  حاصل از همدمای جذب و جذب آنی  $\rho_l$  است [۱۶]. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} = k_s a_v (\rho_{l,eq} - \rho_l) \quad (56)$$

که در آن،  $k_s a_v$  ضریب انتقال جرم مؤثر می‌باشد. ضریب انتقال جرم مؤثر می‌تواند به صورت تابعی از ضریب نفوذ سطحی با رابطه (۵۷) بیان شود.

$$k_s a_v = \frac{F_0 D_s}{R_p^2} \quad (57)$$

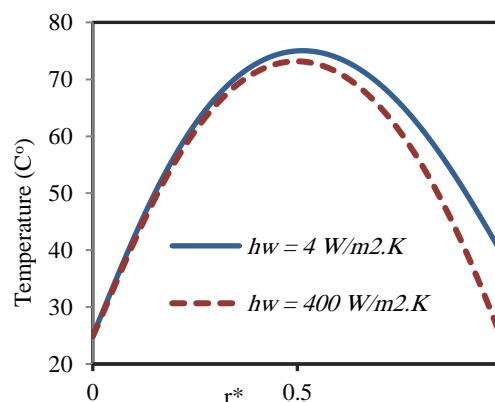
که در آن  $F_0$  مقداری ثابت،  $D_s$  ضریب نفوذ سطحی و  $R_p$  شعاع دانه جذب است. برای جذب‌هایی با دانه‌های کروی، مقدار  $F_0$  برابر با ۱۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۷].



شکل ۱۶- تاثیر ظرفیت اشباع نسبی بر روی توزیع دمای شعاعی بستر در پایان فرایند پر کردن با شدت جریان  $0.205 \text{ kg/min}$

همانند فرایند تخلیه محاسبات برای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی ظرفیت اشباع انجام شد. در این جا نیز افزایش ظرفیت اشباع مطابق با شکل (۱۶)، باعث افزایش دمای بستر می‌شود به‌گونه‌ای که در پایان فرایند بیشینه دمای بستر به  $80^\circ\text{C}$  می‌رسد و کاهش ظرفیت اشباع منجر به کاهش بیشینه دمای بستر به  $69^\circ\text{C}$  می‌رسد. این افزایش و کاهش دمای ایجاد شده در اثر تغییرات ظرفیت اشباع، بازده دینامیکی ذخیره‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که برای افزایش ظرفیت اشباع، بازده از  $76/23\%$  برای حالت مرجع به  $73/53\%$  کاهش یافته و برای کاهش ۲۰ درصدی ظرفیت اشباع، بازده دینامیکی به  $79/22\%$  افزایش می‌یابد.

شکل (۱۷) نیز میزان گاز جذب‌شده در مخزن را به صورت تابعی از زمان بدون بعد نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل نیز مشخص است، میزان گاز جذب‌شده در پایان فرایندی با بیشترین ظرفیت اشباع،  $1/39 \text{ kg}$  است که در بین سه حالت مورد نظر بیشترین مقدار است و برای کاهش ۲۰ درصدی ظرفیت اشباع میزان گاز جذب‌شده کمترین مقدار است. در این جا نیز همچون فرایند تخلیه با افزایش ظرفیت جذب اگرچه گاز جذب شده افزایش خواهد یافت اما میزان افزایش آن متناسب با میزان افزایش ظرفیت جذب هم‌دما نیست.



شکل ۱۵- تغییرات شعاعی دما در پایان فرایند پر کردن برای دو ضریب انتقال گرمای جابجایی مختلف در فرایندی با شدت جریان  $0.205 \text{ kg/min}$

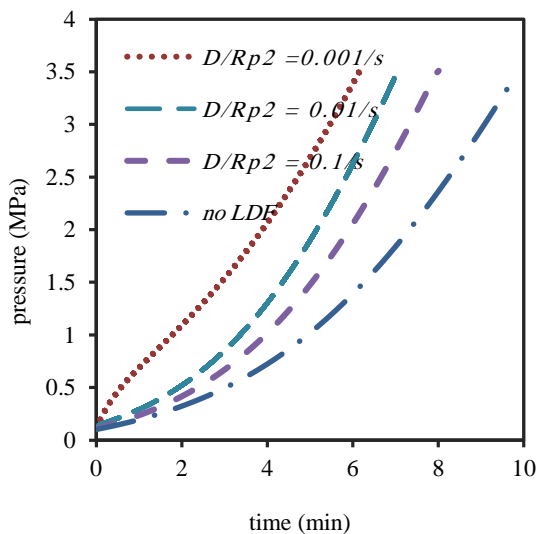
سرعت جذب و دفع بالای مولکول‌های جذب‌شونده از جذب میکرومتخلخل، شرط ضروری عملکرد مؤثر سیستم ANG می‌باشد. در ابتدای مدل‌سازی از مقاومت نفوذی بستر صرف

<sup>1</sup> Linear Driving Force



می‌رسد. در واقع تغییرات زمانی فشار در دو مرز محدود می‌شود: مرز بالایی مربوط به مدل تعادلی ( $D_s/R_p^2 \rightarrow \infty$ ) و مرز دوم مربوط به حالتی است که مخزن با ذرات غیر متخلخل پر شده است. ( $D_s/R_p^2 = 0$ ).

شکل (۱۹) نیز تغییرات زمانی مقدار میانگین گاز جذب‌شده در بستر را در طول فرایند پرکردن برای مقادیر مختلف  $D_s/R_p^2$  نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است برای مقادیر کوچک  $D_s/R_p^2$  مقدار گاز جذب‌شده در پایان فرایند بسیار کمتر از حالت تعادلی است و جاذبی با این ضریب نفوذ زمان بیشتری نیاز دارد تا بتواند به میزان حالت تعادلی گاز جذب نماید.

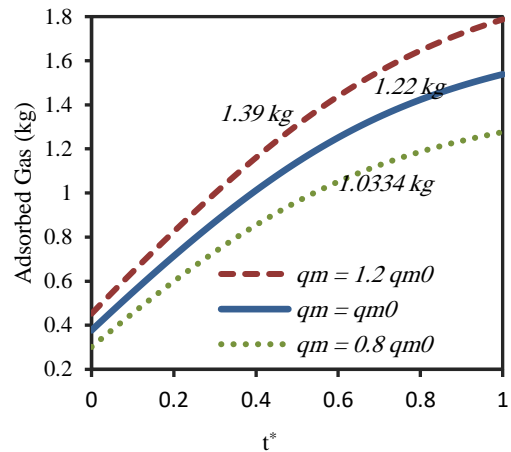


شکل ۱۸- تغییرات زمانی فشار میانگین بستر بر ای مقادیر مختلف  $D_s/R_p^2$  در فرایندی با شدت جریان  $0.205 \text{ kg/min}$

در این بخش، اثر متغیرهای بدون بعد بر روی بازده دینامیکی فرایند پرکردن مخزن بررسی شده است.

همانند بخش‌های پیشین، محاسبات برای فرایندی با شدت جریان جرمی ثابت ( $0.205 \text{ kg/min}$ ) انجام شد.

محدوده تغییر پارامترها با توجه به داده‌های موجود در منابع و ویژگی‌های جاذب‌های مورد استفاده در جذب متان انتخاب شده است. در بین متغیرهای بدون بعد موجود در معادلات بیان‌شده در بخش قبل، اعداد بدون بعد بایوت و فوریه با توجه به اینکه دارای عبارتهایی همچون، ضریب جابه‌جایی گرمایی، ضریب رسانایی گرمایی جاذب، زمان کل فرایند و چگالی فشردگی جاذب هستند، در محدوده وسیع‌تری تغییر می‌کنند و همچنین به منظور بررسی تأثیر کلی پارامترهای بیان‌شده، تغییر بازده دینامیکی ذخیره‌سازی با تغییر این اعداد، مورد بررسی قرار گرفته



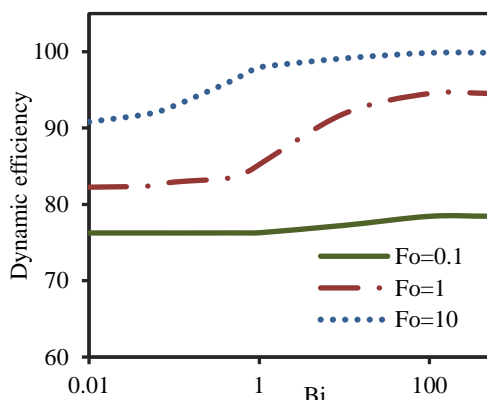
شکل ۱۷- تغییرات زمانی مقدار گاز جذب‌شده در مخزن برای مقادیر مختلف ظرفیت اشباع جاذب در فرایندی با شدت جریان  $0.205 \text{ kg/min}$

برای بررسی تأثیر مقاومت نفوذی بستر جاذب بر روی عملکرد سیستم در فرایند پر کردن مخزن، معادله نیروی محرکه خطی بیان‌شده به دستگاه معادلات اضافه گردید، و حل عددی برای سیستم حاصل انجام شد. محاسبات برای سه مقدار مختلف نسبت ضریب نفوذ سطحی به شعاع دانه جاذب ( $D_s/R_p^2$ ) انجام شد. تغییرات فشار میانگین بستر جاذب در برابر زمان برای این سه حالت مختلف  $D_s/R_p^2$  ( $10^{-3}$ ،  $10^{-2}$ ،  $10^{-1}$   $\text{s}^{-1}$ ) در مقایسه با حالتی که از مقاومت نفوذی صرف نظر شده است برای فرایندی با شدت جریان  $0.205 \text{ kg/min}$  در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، برای حالتی که  $D_s/R_p^2$  دارای کمترین مقدار ( $10^{-3}$   $\text{s}^{-1}$ ) است، فشار بستر به سرعت افزایش یافته و در مدت زمان کمتری به فشار بیشینه نهایی می‌رسد.

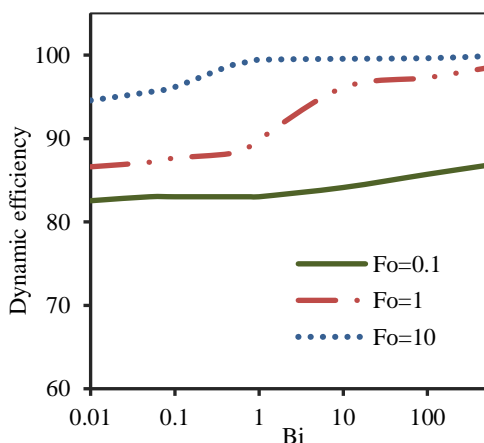
با افزایش ضریب نفوذ سطحی، سرعت افزایش فشار کاهش می‌یابد و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا مخزن به فشار نهایی خود برسد. دلیل این عملکرد مخزن این است که با افزایش ضریب نفوذ سطحی، نفوذ مولکول‌های جاذب به درون حفره‌ها افزایش یافته و گاز بیشتری بر روی جاذب جذب می‌شود و مقدار گازی که در فضاهای خالی و بین ذره‌ای که باعث ایجاد فشار می‌شود کم شده و در نتیجه مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا فشار مخزن افزایش یابد. هنگامی که ضریب نفوذ دارای مقدار کوچکی است، مولکول‌های گاز خیلی آهسته به داخل حفره‌های جاذب نفوذ کرده و بیشتر در فضای خالی بستر جمع می‌شوند و در نتیجه فشار مخزن خیلی سریع به فشار نهایی خود

حالتی که  $2C_s^* = 2$  می‌باشد، مقدار بازده نزدیک به ۷۶٪ است.

در واقع افزایش نسبت ظرفیت گرمایی، متناسب با افزایش چگالی فشردگی و ظرفیت گرمایی بستر است که با افزایش این دو متغیر افزایش دمای بستر کاهش می‌یابد. در این حالت نیز تغییرات بازده با اعداد بدون بعد بایوت و فوریه مانند حالت قبل است و با افزایش عدد فوریه بازده افزایش یافته و با تغییر عدد بایوت به مقادیری بیشتر از ۱۰۰، بازده دینامیکی افزایشی کمی خواهد داشت که میزان افزایش آن در  $Fo = 0.1$  بیشتر است.



شکل ۲۰- نمایش تغییرات بازده دینامیکی ذخیره‌سازی در برابر عدد بدون بعد بایوت برای  $i_{sor}^* = 1.5$  و  $C_s^* = 2$

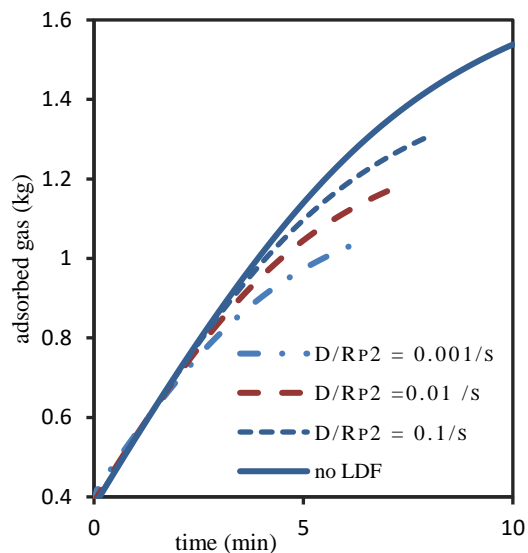


شکل ۲۱- نمایش تغییرات بازده دینامیکی ذخیره‌سازی در برابر عدد بدون بعد بایوت برای  $i_{sor}^* = 1.5$  و  $C_s^* = 4$

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مخزن ANG که شامل یک پخش‌کننده گاز در مرکز بود، برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی با استفاده از جذب سطحی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام‌شده نشان داد که در طول پرکردن مخزن

است. سایر متغیرهای بدون بعد، همچون گرمای جذب، ضریب بدون بعد معادله داریسی و... محدوده تغییر کمتری دارند. محدوده در نظر گرفته شده برای عدد بایوت بین صفر تا ۵۰۰ و برای عدد فوریه بین ۰/۱ تا ۱۰ می‌باشد. شکل (۲۰) تغییرات بازده دینامیکی را در برابر تغییرات عدد بایوت برای سه مقدار مختلف از عدد فوریه (۱، ۱۰، ۱۰۰) نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، با افزایش اعداد بایوت و فوریه، بازده دینامیکی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش عدد بایوت، انتقال حرارت با محیط افزایش یافته و به همین دلیل میزان گاز ذخیره شده در بستر و بازده افزایش می‌یابد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که برای  $Fo = 0.1$ ، افزایش عدد بایوت تأثیر زیادی بر روی بازده ندارد اما برای مقادیر بیشتر عدد فوریه، با افزایش بایوت بازده نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹- تغییرات زمانی گاز جذب‌شده در بستر برای مقادیر مختلف  $D_s/R_p^2$  در فرایند پر کردن مخزن

افزایش عدد فوریه می‌تواند با افزایش زمان فرایند و یا افزایش ضریب رسانایی گرمایی بستر حاصل شود. همچنین برای اعداد بایوت بزرگتر از ۱۰۰، با افزایش عدد بایوت، افزایش بسیار کمی در بازده ذخیره‌سازی مشاهده می‌شود. شکل (۲۱) نیز، تغییرات بازده را در برابر عدد بایوت برای حالتی نشان می‌دهد که در آن نسبت ظرفیت گرمایی بستر ( $C_s^*$ ) دو برابر حالت قبل است. همانگونه که از این شکل مشخص است، افزایش این نسبت باعث افزایش بازده دینامیکی می‌شود. به گونه‌ای که برای  $4C_s^* = 4$  در  $Fo = 0.1$  مقدار بازده دینامیکی نزدیک به ۸۳٪ است ولی در



نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد افزایش نسبت طول به قطر مخزن، ضریب جابجایی گرمایی محیط و رسانایی گرمایی بستر باعث کاهش افت دما در فرایند تخلیه و افزایش بازده مخزن می‌شود. افزایش ضریب جابجایی در طول فرایند تخلیه باعث افزایش ۱۱ درصدی بازده می‌شود ولی در طول فرایند پر کردن به علت کوتاه بودن زمان فرایند، تنها ۴ درصد افزایش بازده را در پی خواهد داشت. همچنین با بررسی اثر مقاومت نفوذی بستر جاذب در طول فرایند پرسازی، مشخص شد که مقاومت نفوذی بستر جاذب در صورت بالا بودن می‌تواند نقش مهمی در کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن داشته باشد، و جاذبی با مقاومت نفوذی بالا زمان بیشتری لازم دارد تا بتواند به میزان حالت تعادلی گاز جذب نماید. در پایان نیز تأثیر متغیرهای بدون بعد برای فرایند پر کردن مخزن مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن نشان داد که با افزایش اعداد بدون بعد بایوت و فوریه بازده دینامیکی ذخیره‌سازی افزایش می‌یابد.

#### تقدیر و تشکر

در پایان از حمایت و پشتیبانی پژوهش و فناوری سازمان منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس که طبق قرارداد شماره ۵۵۳۶۱ ما را در انجام این پروژه همیاری نمودند، تقدیر و تشکر می‌نماییم.

ANG، به علت گرمازا بودن فرایند جذب، دمای بستر جاذب به شدت افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در یک فرایند پرکردن سریع، افزایش دمایی به بزرگی  $55^{\circ}C$  ایجاد خواهد شد. همچنین در طول تخلیه مخزن، دفع گرماگیر گاز منجر به کاهش دمای بستر جاذب می‌شود. افزایش دمای جاذب در پرکردن مخزن و کاهش دمای آن در طول تخلیه، باعث کاهش بازده دینامیکی مخزن می‌شود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که استفاده از پخش‌کننده گاز در مرکز مخزن، بازده دینامیکی تخلیه و پرسازی را نزدیک به ۵٪ افزایش دهد. هرچند تغییر جهت جریان باعث افزایش بازده دینامیکی مخزن می‌شود اما چون جریان متان که به عنوان واسطه‌ای برای انتقال انرژی از دیواره به مخزن استفاده می‌شود، گازی شکل است و چگالی و ظرفیت گرمایی پائینی دارد، اثر تغییر جهت جریان بر روی افزایش بازده خیلی زیاد نمی‌باشد. همچنین در ادامه کار تأثیر متغیرهایی همچون رسانایی گرمایی بستر جاذب، ظرفیت اشباع جاذب، مقاومت‌های نفوذی بستر جاذب، اعداد بدون بعد بایوت و فوریه و نسبت ظرفیت گرمایی جاذب به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند و تأثیر تغییر آن‌ها بر روی بازده دینامیکی مخزن ANG نشان داده شد.

#### مراجع

- [۱] م. ملاشاهی، ح. هاشمی پورفسنجانی، "بررسی ذخیره سازی گاز طبیعی به روش جذب سطحی و تشکیل هیدرات در جاذب‌های کربنی مرطوب"، مجله مهندسی شیمی، سال ۹، شماره ۴۸، تیر ۱۳۸۹، صفحه ۱۸-۲۶.
- [2] L. Giraldo, J. C. Moreno-Pirajan, "Novel Activated Carbon Monoliths for Methane Adsorption Obtained from Coffee Husks", *Materials Sciences and Applications*, Vol. 2, No. 5, 2011, pp. 331- 339.
- [3] K.J. Chang, O. Talu, "Behavior And Performance of Adsorptive Natural Gas Storage Clinders During Discharge", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 16, No. 5, 1996, pp. 359-374.
- [4] R. Hernandez-Huesca, L. Diaz, G. Aguilar-Armenta, "Adsorption equilibria and kinetics of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> in natural zeolites", *Separation and Purification Technology*, Vol. 15, No. 2, 1999, pp. 163-173.
- [5] M. Bastos-Neto, B. SEurico, B. Torres, C.S. Diana, S. Cileo, J.R. Cavalcante, "Methane Adsorption Storage Using Microporous Carbons Obtained from Coconut Shells", *Adsorption*, Vol. 11, No. 1, 2005, pp. 911-915.
- [6] A.M. Rashidi, R. Lotfi, A. Nouralishahi, A.M. Khodagholi, M. Zare, F. Eslamipor, "Nanoporous carbons as promising novel methane adsorbents for natural gas technology", *Journal of Natural Gas Chemistry*, Vol. 20, No. 6, 2011, pp. 664- 668.

- [7] A. Arami-Niya, W. M. Ashri Wan Daud, F.S. Mjalli, M.S. Shafeeyan "Production of microporous palm shell based activated carbon for methane adsorption: Modeling and optimization using response surface methodology", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 90, No. 6, 2012, pp. 776- 784.
- [8] J.P.B. Mota, A. E. Rodriguea, E. Saatdjian, D. Tondeur, "Dynamics of Natural Gas Adsorption Storage Systems Employing Activated Carbon. *Carbon*", Vol. 35, No. 9, 1997, pp. 1259-1270.
- [9] J.P.B. Mota, "Impact of Gas Composition on Natural Gas Storage by Adsorption", *American Institute of chemical engineers*, Vol. 45, No. 5, 1999, pp. 986–996 .
- [10] L. Zhou, M. Li, Y. Sun, Y. Zhou, "Effect of moisture in microporous activated carbon on the adsorption of methane", *Carbon*, Vol. 39, No. 5, 2001, pp. 771- 785.
- [11] L. G. Lara, P. Couto, D.M.A. Sophya, R.M. Cotta, "Thermal Control of Adsorbed Natural Gas Reservoirs under Discharge Dynamic Condition", 13th International Heat Transfer Conference, Sydney, Australia, 13-18 August, 2006..
- [12] S.C. Hirata, P. Couto, L.G. Lara, R.M. Cotta, "Modeling and Hybrid Simulation of Slow Discharge Process of Adsorbed Methane Tanks", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 6, 2009, pp. 1176-1183.
- [13] M. Bastos-Neto, B. SEurico, B. Torres, C.S. Diana, S. Cileo, J. R. Cavalcante, "A Theoretical and Experimental Study of Charge and Discharge Cycles in a Storage Vessel for Adsorbed Natural Gas. Adsorption". *Adsorption*, Vol. 11, No. 2, 2005, pp. 147-157.
- [14] D.S. Jurumenha, L.A. Sphaier, "Suitability analysis of lumped-capacitance formulations for adsorbed gas storage", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2011, No. 14-15, pp. 2458-2463.
- [15] S. Biloe, V. Goetz, S. Mauran, "Dynamic Discharge and Performance of a New Adsorbent for Natural Gas Storage", *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 47, No.12, 2001, pp. 2819-2830.
- [16] M. Suzuki, "Adsorption Engineering". Elsevier Science, Tokyo, 1990.
- [17] E. Glueckauf, "Theory of Chromatography Part 10 - Formula for Diffusion into Spheres and Their Application to Chromatography", *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 51, 1955, pp. 1540-1551.