

مدل سازی شبکه حفره‌ای نفوذ مولکولی توأم با ریزش ثقلی در یک مدل تک بلوکی

احمد محمدی^۱، محمدرضا رسایی^{۲*}، وحید مشایخی زاده^۳ و علی نخعی^۱

۱- گروه مهندسی نفت، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، ایران

۲- انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۳- معاونت مهندسی نفت، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

چکیده

بخش قابل توجهی از منابع هیدروکربوری ایران در مخازن شکافدار واقع شده‌اند. وجود دو سیستم مختلف شکاف و ماتریس، باعث به‌وجود آمدن دو مدل برای ذخیره و عبور سیال می‌شود. ارزیابی واکنش بین سنگ و سیال و شناسایی میکرو فرآیندها در مقیاس حفره، در شناخت بهتر فرآیندهای تولید در این مخازن مؤثر است. مدل سازی شبکه حفره‌ای، امکان شبیه‌سازی محدوده وسیعی از شرایط مختلف، رژیم‌های جریان متفاوت و شناسایی میکرو فرآیندها در مقیاس حفره را فراهم می‌کند. از آنجا که در تزریق گاز غیرتعدالی در مخازن شکافدار، تلفیقی از ریزش ثقلی و نفوذ مولکولی به فرآیند تولید کمک می‌کنند و تاکنون مطالعه‌ای در مقیاس حفره، که در برگرنده اثر توأم هر دو فرآیند باشد، انجام نشده است، این مطالعه به بررسی این موضوع پرداخته است. در این تحقیق با توسعه یک مدل شبکه حفره‌ای که بر مبنای قیاس بین فرآیند خشک‌شدن هم‌دمای محیط متخلخل و فرآیند نفوذ مولکولی ساخته شده بود، با اضافه کردن اثر نیروی ثقل در یک مدل تک بلوکی و با حساسیت‌سنجی بر روی پارامترهای مختلف محیط متخلخل و سیالات موجود در فرآیند نظیر نوع سیالات، فشارهای مختلف و ابعاد گلوگاه‌ها، فرآیندهای ریزش ثقلی و نفوذ مولکولی مورد ارزیابی قرار گرفتند. براساس نتایج به‌دست آمده، در فشار $10.1/3 \text{ kPa}$ ، زمان تخلیه فاز مایع در سیستم‌های هپتان-نیتروژن و هپتان-دی اکسید کربن به ترتیب حدود ۱۸ و ۱۷۰٪ از سیستم هپتان-متان بیشتر است. این روند در فشار بالا نیز صادق است. با تغییر فاز مایع از هپتان به اکتان و دکان، زمان تخلیه فاز مایع به ترتیب $3/6$ و 19 برابر دیرتر اتفاق می‌افتد. همچنین، نتایج نشان داد که اثر افزایش طول گلوگاه به اندازه افزایش شعاع گلوگاه، زمان تخلیه فاز مایع را طولانی‌تر نمی‌کند.

کلمات کلیدی: مخازن شکافدار، فرآیند نفوذ مولکولی، فرآیند ریزش ثقلی، مدل سازی شبکه حفره‌ای، فرآیند خشک‌شدن

مقدمه

پیچیده‌ترین منابع هیدروکربوری در دنیا و به‌ویژه در کشور ایران هستند. مخازن بزرگی در کشور ایران (مانند مخزن آسماری در میدین هفتکل، گچساران، بی‌بی‌حکیمه، کرج، پارسی و مخزن بنگستان میدان

مخازن شکافدار از مهم‌ترین و در عین حال

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/PR.2022.4719.3116) mrasaei@ut.ac.ir

اما رویکرد گسسته که برای بررسی پدیده‌ها و میکرو فرآیندها در مقیاس بسیار کوچک، مورد استفاده قرار می‌گیرد، محدودیت‌های رویکرد پیوسته را ندارد. در ابتدا عمدتاً از این رویکرد برای مطالعات پدیده‌شناسی^۱ و بررسی‌های کیفی پدیده‌ها استفاده می‌شد، اما با توسعه این رویکرد، تخمین میانگین خواص محیط متخلخل و سیالات موجود در آن نیز به مزایای این رویکرد اضافه گردید. علی‌رغم مزایای قابل توجه این رویکرد، از نظر کاربردی محدودیت‌هایی دارد. این رویکرد نیازمند محاسبات سنگین و زمان زیاد برای توصیف فضای متخلخل و جریان سیالات در آن است. در این رویکرد، شبکه‌ای از حفرات و گلوگاه‌ها با یک محیط متخلخل معادل سازی می‌شود [۲].

در ادامه، تاریخچه مختصری از مطالعات صورت گرفته در زمینه مدل سازی شبکه حفره‌ای فرآیند خشک شدن هم‌دمای محیط متخلخل آورده شده است: نوویکی و همکاران [۳] یک مدل شبکه حفره‌ای ساده برای نمایش جریان و توزیع مایع و بخار در یک محیط متخلخل در حال خشک شدن ارائه نموده و از این طریق به توضیح فرآیندهای میکروسکوپی این فرآیند پرداختند. علاوه بر آن، نحوه محاسبه پارامترهای میانگین مؤثر انتقال مانند تراوایی‌های نسبی، فشارهای موینگی، ضرایب نفوذ مؤثر بخار در فرآیند نفوذ مولکولی به‌عنوان تابعی از اشباع مایع و تاریخچه خشک شدن را بیان داشتند. پرت [۴] یک سال بعد از نوویکی و همکاران [۳]، مدلی برای خشک شدن هم‌دمای محیط متخلخل موینه بر مبنای یک فرم اصلاح شده از نظریه پرکولاسیون تهاجمی^۲ ارائه نمود. مدل ارائه شده توسط پرت از این لحاظ که تأثیرات تبخیر، نفوذ مولکولی بخار در فاز گازی (به‌صورت یک بعدی و پایا) و فرآیندهای موینگی را با هم ادغام می‌کرد، با مدل‌های استاندارد جابه‌جایی دو فازی در اعداد

کوپال) از نوع مخازن شکافدار بوده و اغلب آنها ماتریس متراکمی دارند. با توجه به شرایط ترمودینامیکی حاکم بر این مخازن، از سال‌ها پیش تحت تزریق گاز قرار گرفته‌اند و ضخامت قابل توجهی از ستون نفتی آنها در ناحیه گاز زده قرار گرفته است. بنابراین با توجه به اهمیت فرآیندهای تولید از مخازن شکافدار، شناخت هر چه بهتر این فرآیندها و پارامترهای وابسته به آنها، ضروری به‌نظر می‌رسد. یکی از منابع مهم ابهامات، عدم توانایی در تعیین مشخصات مؤثر ساختار میکروسکوپی پیچیده سنگ و واکنش‌های بین سنگ و سیال در مقیاس حفره است. مدل سازی شبکه حفره‌ای، ابزاری کارآمد است که از پیشرفت‌های سریع تصویربرداری‌ها و شبیه‌سازی‌های ابعاد حفره، بهره می‌برد. این فناوری، امکان شبیه‌سازی محدوده وسیعی از شرایط مختلف، رژیم‌های جریانی متفاوت، حالت‌های مختلف تولید نفت، ترکیب اجزا و شیمی متفاوت سیالات در مقیاس حفره را فراهم می‌کند [۱]. در چهار دهه اخیر برخی از محققان حوزه صنعت نفت، برای توصیف حرکت سیال و فرآیندهای تولید در محیط‌های متخلخل و شکافدار با استفاده از دو رویکرد پیوسته و گسسته مدل‌هایی را توسعه داده‌اند. رویکرد پیوسته، رویکرد کلاسیک مهندسی است که به توصیف بزرگ مقیاس فرآیندها در ابعاد طولی مشخص که از مقیاس حفرات، گلوگاه‌ها و شکاف‌ها خیلی بزرگ‌تر هستند، می‌پردازند (مانند رابطه دارسی). در مدل‌هایی که بر مبنای رویکرد پیوسته ساخته می‌شوند، میانگین خصوصیات مؤثر محیط متخلخل محاسبه می‌شود. گرچه کار با این مدل‌ها به نسبت ساده است اما در عمل دارای محدودیت‌هایی هستند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به چگونگی متوسط‌گیری خواص مخزنی، ابعاد مورد استفاده، ضعف در توصیف پدیده‌هایی که پیوستگی فضای محیط متخلخل یا شبکه شکاف و یا پیوستگی سیالات نقش مهمی در آنها دارد، اشاره کرد [۲].

1. Phenomenological Study

2. Invasion Percolation

فریتاس و پرت [۷]، نفوذ مولکولی در هر دو فاز مایع و گاز در نظر گرفته شده است. براساس نتایج کار آنها، فرآیند نفوذ در فاز مایع به صورت گذرا است. ضریب نفوذ مولکولی به شدت به ترکیب اجزای مایع بستگی دارد و چگالی مخلوط با تغییر ترکیب اجزای آن، تغییر می‌کند. یوتیس و همکاران [۸] یک مدل شبکه حفره‌ای برای فرآیند خشک شدن همدمای یک بلوک متخلخل حاوی یک مایع تک جزئی (هگزان مایع) در مجاورت یک شکاف حاوی هوا ارائه نموده و پدیده‌های انتقال جرم توسط نفوذ مولکولی و همرفت در فاز گاز، جریان ویسکوز در فازهای مایع و گاز و تأثیرات موینگی در سطح مشترک گاز/مایع را در آن بررسی نمودند. هوا در مدل آنها با دبی ثابت در شکاف تزریق می‌شد. آنها از دو عدد بدون بعد عدد موینگی و عدد پکلیت برای توصیف فرآیندهای در حال انجام در مدل استفاده نمودند. آنها پی بردند که کلاسترهایی که به مرز آزاد مدل نزدیک تر هستند، در معرض تبخیر سریع تری قرار می‌گیرند. کلاسترهای نزدیک به شکاف اندازه کوچک‌تر و کلاسترهای دور از شکاف اندازه بزرگ‌تری دارند. یوتیس و همکاران [۱] نتایج مدل‌سازی عددی خود را که به بررسی پدیده‌های مختلف در فرآیند خشک شدن اختصاص داشت، ارائه نمودند. بخشی از پدیده‌های مورد بررسی آنها مربوط به کار بود. علاوه بر آن، آنها تأثیر جریان ناشی از موینگی را در لایه‌های ماکروسکوپی مایع ایجاد شده در نتیجه عقب رفتن سطح مشترک گاز و نفت در حفره‌ها، بررسی نمودند. آنها جریان لایه‌های نازک مایع را یکی از فرآیندهای اصلی انتقال در خشک شدن محیط‌های متخلخل دانستند. یوتیس و همکاران [۹] به مطالعه بازه‌هایی پرداختند که در فرآیند خشک شدن محیط متخلخل حاوی مایع تک جزئی مشاهده می‌شوند. از آنجا که آنها به دنبال بررسی بازه خشک شدن با سرعت ثابت نیز بودند، از مدل شبکه حفره‌ای سه بعدی استفاده نمودند.

موینگی پایین و مدل استاندارد پرکولاسیون تهاجمی تفاوت داشت. لائوریندو و پرت [۵] به بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی شبکه حفره‌ای دو بعدی فرآیند خشک شدن همدمای محیط متخلخل پرداختند. تمرکز آنها در این مطالعه بر توزیع فازها استوار بود. آنها در کار خود اثر نیروهای ثقلی را در سه حالت، خشک شدن در فقدان نیروهای ثقلی، خشک شدن با اثر پایدارکننده نیروهای ثقلی و خشک شدن با اثر ناپایدارکننده نیروهای ثقلی بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که جبهه اشغال در فرآیندهای تخلیه و تبخیر مشابه است؛ در فرآیند تبخیر، کلاسترهای مجزا تحت اشغال گاز در می‌آیند در حالی که در فرآیند تخلیه این اتفاق نمی‌افتد. جهت حرکت ماکروسکوپی مایع در فرآیند تبخیر بر خلاف جهت آن در فرآیند تخلیه است. الگوی اشغال در شکل‌گیری کلاسترهای مجزا در دو فرآیند شبیه به هم است. لو بری و پرت [۶] برای اولین بار یک مدل سه بعدی شبکه حفره‌ای از خشک شدن تحت شرایط خارجی ثابت ارائه نمودند. آنها نشان دادند که مدل مذکور قادر است مشخصه‌های اصلی فرآیند خشک شدن محیط متخلخل مانند فرآیند وصله‌های خشک و وقوع یک بازه سرعت ثابت را ارزیابی کند. آنها دریافتند که هیچ ارتباط مستقیمی میان متوسط اشباع مایع در مجاورت سطح آزاد مدل و اشباع کل مدل وجود ندارد. همچنین، می‌توان بازه‌های مختلف فرآیند خشک شدن را از روی ساختار توزیع مایع در شبکه، تشخیص داد. فریتاس و پرت [۷] یک مدل شبکه حفره‌ای را با ذکر جزئیات قاعده‌سازی برای تبخیر یک مایع دو جزئی (مخلوط آب و ۲-پروپانول) به درون یک گاز سه جزئی (بخار آب و ۲-پروپانول و هوا) ارائه نمودند. هدف آنها از ساخت این مدل، بررسی اثر گرادیان کشش سطحی ناشی از تغییرات اجزای مایع در یک محیط متخلخل بود. به عقیده آنها، اثر گرادیان کشش سطحی تنها در محیط‌های متخلخل با بی‌نظمی کم اهمیت دارد. در کار

ساده با ترکیب مدل پرکولاسیون تهاجمی، میزان نفوذ مایع در فاز گاز را پیش‌بینی کرد. یک مدل شبکه حفره‌ای سه‌بعدی برای بررسی تبخیر در سیستم‌های متخلخل آبگریز مختلف، توسط وو و همکاران [۱۳] توسعه داده شد. ساختار شبکه، از جمله نسبت ابعاد و توزیع اندازه منافذ، در مدل آنها در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی‌های آنها نشان داد که ساختارهای شبکه تأثیر زیادی بر ویژگی‌های تبخیر در محیط متخلخل آبگریز دارند. در شبکه گسترده، فرسایش گازی یک فرآیند تصادفی است و تا حدودی تحت تأثیر نسبت ابعاد قرار می‌گیرد. در مقابل، فرسایش گازی در شبکه باریک به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نسبت ابعاد قرار می‌گیرد. فورهاور و همکاران [۱۴] پیش‌رفتی را که در مدل‌سازی اثرات موینگی ثانویه در شرایط خشک‌شدن در ساختارهای پیچیده‌تر، با استفاده از ایده حلقه‌های موینگی^۲ در مجاورت گره‌های شبکه انجام دادند، را توصیف کردند. با توجه به یافته‌های آنها، تأثیر حلقه‌های موینگی بر سرعت خشک‌شدن در مقایسه با سیستم‌هایی که دارای فیلم‌هایی با اتصال هیدرولیکی در فواصل طولانی هستند، کمتر است. وو و همکاران [۱۵] مدلی را پیشنهاد کردند که تأثیر درجه موینگی^۳ ناشی از انبساط ناگهانی بین مناطق بزرگ و کوچک متصل در یک شبکه متخلخل را بررسی می‌کرد. این کار نشان داد برای اینکه بتوان تطابق بهتری بین آزمایش‌های میکروسیال و نتایج شبیه‌سازی را به دست آورد، لازم است تأثیر درجه موینگی در نظر گرفته شود. تیری و همکاران [۱۶] دینامیک انتقال بخار و مایع را از طریق محیط متخلخل در طول فرآیند خشک‌شدن با استفاده از روش تصویربرداری رزونانس مغناطیسی بررسی کردند. با توجه به یافته‌های آنها، اثر کلین می‌تواند سرعت خشک‌شدن را زمانی که اندازه منافذ به اندازه کافی

این کار دومین مطالعه‌ای بود که در آن از مدل‌های سه‌بعدی استفاده می‌شد (پس از کار لوپری و پرت [۶]). آنها نقش پایدارکنندگی یا ناپایدارکنندگی نیروی ثقل را بر شکل منحنی خشک‌شدن و گسترش نسبی بازه‌های سه‌گانه بررسی کردند. پرت [۱۰] مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی شبکه حفره‌ای خشک‌شدن محیط متخلخل ارائه نمود. او در فرآیند خشک‌شدن به پدیده‌هایی مانند وصله‌های خشک و بازه تبخیر با سرعت ثابت اشاره کرد که رویکردهای پیوسته قادر به مدل‌سازی آنها نیست. چنین پدیده‌هایی با مدل‌سازی شبکه حفره‌ای قابل بررسی هستند. او در کار خود به چگونگی استفاده از مدل‌های شبکه حفره‌ای برای محاسبه خصوصیات مؤثر انتقال در محیط متخلخل پرداخت. نتایج کار او نشان داد که در خشک‌شدن آرام، در هر گام زمانی تنها یکی از گلوگاه‌ها اشغال می‌شود در حالی که در خشک‌شدن سریع امکان اشغال بیش از یک گلوگاه نیز وجود دارد. یک مدل شبکه حفره‌ای سه‌بعدی توسط متزگر و همکاران [۱۱] توسعه داده شد. آنها برای اولین بار، خشک‌شدن همرفتی^۱ و ویسکوزیته مایع را در مدل‌سازی خشک‌شدن در نظر گرفتند. آنها دریافتند که در طول اولین دوره خشک‌شدن، سرعت خشک‌شدن به دلیل گرم شدن، ثابت نیست. همچنین، لوله‌های موین بزرگ قبل از اینکه جبهه تبخیر (در لوله‌های موین کوچک) از سطح به عقب برگردد و دوره خشک‌شدن دوم شروع شود، کاملاً خالی می‌شوند و سپس، سرعت تبخیر کاهش می‌یابد. در مطالعه دیگری که توسط شرابی و همکاران [۱۲] انجام گرفت، تأثیر زاویه تماس بر زمان خشک‌شدن در طول تبخیر آهسته مورد مطالعه قرار گرفت. مفهوم زاویه تماس بحرانی برای تمایز زدایی از الگوهای خشک‌شدن پایین‌تر و بالاتر از این مقدار استفاده شد. براساس نتایج کار آنها، برای زوایای تماس کوچک، الگوی خشک‌کردن فراکتال است و می‌توان با یک مدل

1. Convection Drying

2. Capillary Rings

3. Capillary Valve Effect

این فرآیند الهام گرفتند. مشایخی زاده و رسایی بر نحوه چیدمان گلوگاه‌های^۱ مدل تمرکز کرده و تأثیرات احتمالی آن را بر فرآیند نفوذ مولکولی مورد مطالعه قرار دادند. آنها همچنین نشان دادند [۲۰] که زمان فرآیند نفوذ مولکولی، لحظه میان‌شکنی گاز، انفصال آخرین کلاستر مایع^۲ از سطح آزاد مدل، انفصال بالا و پایین مدل، گرادیان فشار جزئی بخار، گرادیان اشباع مایع، فراوانی کلاسترهای مایع، فراوانی سطوح مشترک گاز-مایع و پتانسیل تبخیر شدیداً تابع نظم گلوگاه‌های شبکه هستند. یوکان چن و همکاران [۲۱]، یک مدل جدید شبکه دوگانه حفره-شکاف را براساس تئوری پرکولاسیون ایجاد کردند. جریان سیال در حفره در دو مقیاس، میکرو شکاف و توده ماتریس، نیز با تأثیر باز و بسته شدن میکروشکاف در طول جریان در نظر گرفته شد. برخی از پارامترهای مؤثر در محیط متخلخل مانند اشباع سیال، فشار موینگی، نفوذپذیری نسبی، راندمان جابه‌جایی در مراحل مختلف جریان را می‌توان با روش محاسبه پیشنهادی، پیش‌بینی کرد. با استفاده از مطالعه آنها، پارامترهای مؤثر محیط‌های متخلخل دوگانه به‌دست آمد. ژائو و همکاران [۲۲] یک روش ترکیبی مبتنی بر کوپل کردن یک مدل شبکه حفره‌ای و یک رویکرد ترکیبی با ترکیب مدل شبه پتانسیل شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی خشک‌شدن مایع در محیط متخلخل پیشنهاد کردند. شبکه بولتزمن یک روش دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان سیال است که به‌جای حل معادلات ناویس-استوکس، رابطه بولتزمن گسسته شده به‌کار می‌رود. این روش در واقع یک تکنیک شبیه‌سازی نسبتاً جدید برای هندسه‌های پیچیده است. در مدل شبکه بولتزمن، سیال متشکل از ذرات خیالی و شامل دو مرحله برخورد و پخش است. هر دو روش با موفقیت تغییر اشباع مایع را در خشک‌شدن و توزیع فاز و فشار شبیه‌سازی کردند.

کوچک است، کاهش دهد. در نتیجه، نشان داده شد که این اثر، زمان وقوع تخلیه همگن در نانوحفره‌ها را تعیین می‌کند. برای بررسی فرآیند خشک‌شدن یک جریان آرام کاملاً توسعه یافته گاز در محیط‌های متخلخل آبگریز نازک، یک مدل شبکه حفره‌ای توسط وو و همکاران [۱۷] توسعه داده شد. در این شبکه دو نوع نفوذ به توده حفرات، به‌عنوان یک نتیجه از اثر دریاچه موینگی، یعنی نفوذ متمرکز و پراکنده، شناسایی شد. آنها متوجه شدند که خشک‌شدن در یک محیط متخلخل به شدت به الگوی نفوذ گاز در حفرات وابسته است. با این حال، الگوی نفوذ گاز به ترشوندگی محیط متخلخل و ساختار حفرات نیز وابسته است. عطاری مقدم و همکاران [۱۸] فرآیند خشک‌شدن را در یک محیط متخلخل موینگی با شعاع متوسط گلوگاهی ۲۵۰ میکرون بررسی کردند تا اثر تعادل غیرمحمولی را توضیح دهند. براساس نتایج به‌دست آمده از این کار، یک دوره کوتاه اولیه در طی فرآیند تبخیر شناسایی شد که به آن دوره انتقال اولیه گفته می‌شود. در این دوره، فاز گاز هنوز به انتهای شبکه نرسیده است. گاهی اوقات این دوره به تبخیر یک فیلم مایع در سطح نسبت داده می‌شود. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این دوره را می‌توان بدون حضور لایه مایع در هنگام شروع خشک‌شدن نیز مشاهده کرد. مشایخی زاده و رسایی [۱۹] همچنین یک روش کار مشروح برای مدل‌سازی شبکه حفره‌ای شبه‌پایای دوبعدی فرآیند نفوذ مولکولی در یک مدل تک‌بلوکی ارائه کردند. آنها از یک الگوریتم پرکولاسیون تهاجمی اصلاح شده برای تبخیر کلاسترهای بجا مانده حین فرآیند نفوذ مولکولی و همچنین تعیین گلوگاهی که در هر گام زمانی اشغال می‌شود، استفاده کردند. آنها نشان دادند که مدل‌سازی شبکه حفره‌ای قادر است شمایه‌های اصلی فرآیند نفوذ مولکولی در مخازن شکاف‌دار را تشخیص دهد. برای این منظور از قیاس با فرآیند خشک‌شدن همدمای محیط متخلخل استفاده کرده و از مدل‌های شبکه حفره‌ای

1. Thermography

2. Last liquid Cluster Disconnected

3. Nonlocal Equilibrium Effect

مطالعه تشریح شده است. در بخش ۳، فرضیات مدل-سازی ذکر گردیده است. در بخش‌های ۴ و ۵ به ترتیب معادلات ریاضی و خصوصیات مدل توسعه یافته، آورده شده است. بحث و بررسی نتایج در بخش ۶ این تحقیق ارائه و در بخش ۷ خلاصه نتیجه‌گیری این تحقیق ذکر شده است.

روش انجام مطالعه

در این مطالعه با توسعه یکی از مدل‌های شبکه حفره‌ای فرآیند نفوذ مولکولی در یک مدل شکافدار (بر پایه رویکرد گسسته) که توسط مشایخی‌زاده و رسایی [۱۹] ساخته شده است، با اضافه کردن اثر نیروی ثقل، مدل مذکور کدنویسی شده و فرآیندهای مؤثر از این طریق شبیه‌سازی شدند. در این طرح با حساسیت‌سنجی بر روی پارامترهای مختلف نظیر نوع و چگالی سیالات، اندازه گلوگاه‌ها و فشارهای مختلف، تأثیر هر کدام از پارامترها بر روی فرآیند تخلیه فاز مایع در سیستم نفوذ مولکولی به‌همراه ریزش ثقلی در مخازن شکافدار مورد ارزیابی قرار گرفت. یکی از اهداف مهم این مطالعه ردیابی حرکت سطح تماس گاز و مایع در گلوگاه‌ها در نتیجه اثر ترکیبی نیروی موئینگی، ثقل و تبخیر است که لزوماً در یک جهت عمل نمی‌کنند. در نتیجه تبخیر، اشباع مایع کاهش می‌یابد و سطح تماس گاز و مایع به سمت پایین حرکت می‌کند. به دلیل نیروی موئینگی (براساس توزیع فشار در مدل)، ممکن است با حرکت سطح تماس گاز-مایع در جهت مخالف، اشباع مایع افزایش یا کاهش یابد.

فرضیات مدل

فرضیات به کار رفته در این مدل شامل موارد زیر است:

- هیچ گرادیان دمایی در مدل وجود ندارد.
- هیچ گرادیان فشاری در فاز گاز وجود ندارد.

که نشان می‌دهد رویکرد ترکیبی پیشنهادی دقیق است. برای یک مطالعه موردی خاص، رویکرد ترکیبی منجر به صرفه جویی بیش از ۶۰٪ در زمان محاسباتی در مقایسه با شبیه‌سازی شبکه بولتزمن کل دامنه شد. اخیراً ملال و همکاران [۲۳] نشان دادند که اثر تعادل غیرمحلی^۱ در خشک‌شدن محیط متخلخل رطوبت گیر وجود دارد. آنها نشان دادند که خشک‌شدن جزئی زمانی حاصل می‌شود که رطوبت نسبی در فاز گاز خارج از محیط، کوچک‌تر از فشار بخار تعادلی مربوط به بزرگ‌ترین گلوگاه‌های شبکه اما بزرگ‌تر از فشار بخار تعادلی مربوط به کوچک‌ترین گلوگاه‌ها در شبکه باشد. خشک‌شدن کامل زمانی حاصل می‌شود که رطوبت نسبی در فاز گاز خارج از محیط، کمتر از فشار بخار تعادلی مربوط به کوچک‌ترین گلوگاه‌های شبکه باشد، درحالی‌که زمانی‌که رطوبت نسبی در این فاز گاز بزرگ‌تر از فشار بخار تعادلی باشد، خشک‌شدن اتفاق نمی‌افتد. به موازات بررسی فرآیند خشک‌شدن محیط متخلخل و نفوذ مولکولی با استفاده از مدل‌های شبکه حفره‌ای، در سه دهه اخیر مدل‌هایی نیز برای بررسی پدیده ریزش ثقلی در مخازن شکافدار توسعه یافته است. با این وجود، علی‌رغم فعالیت توأمان فرآیندهای نفوذ مولکولی و ریزش ثقلی در مخازن شکافدار تحت تزریق گاز غیرتعادلی، تا به امروز مطالعه‌ای در مقیاس حفره (رویکرد گسسته) که هر دو مکانیسم را به‌طور هم‌زمان بررسی کرده باشد، منتشر نشده است. از آنجا که در تزریق گاز غیرتعادلی در مخازن شکافدار، تلفیقی از فرآیند ریزش ثقلی و نفوذ مولکولی به فرآیند تولید کمک می‌کنند، لازم است که این مدل‌سازی به‌صورت تلفیقی انجام شود. این پژوهش با مبنا قرار دادن این اصل، به‌نقش رقابتی این دو پدیده و عوامل مؤثر در تقویت هر فرآیند می‌پردازد. چنین مطالعه‌ای برای اولین بار در این سطح انجام می‌شود. مقاله حاضر از این بخش‌ها تشکیل شده است: در بخش ۲، روش انجام

1. Nonlocal Equilibrium Effect

لاپلاس حفظ می‌شود.

۸- اگر سرعت تبخیر برای جبران جرم ورودی در اثر برآیند نیروهای مویین و ثقل کافی نباشد، از تساوی رابطه جریان مایع با رابطه فلاکس تبخیری یک عبارت معادل برای گرادیان فشار استخراج می‌شود. از این رابطه به‌عنوان یک جمله معلوم در محاسبات ماتریس فشار استفاده می‌شود.

۹- پس از محاسبه مجدد فشار فاز مایع، تمام گلوگاه‌های مرزی رصد می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که شرایط مرزی از یک نوع به نوع دیگر تغییر نکرده باشد. اگر چنین بود، گام‌های ۴ تا ۸ مجدداً پیموده می‌شوند.

۱۰- در تمام گلوگاه‌های مرزی موازنه جرم انجام شده و زمان لازم برای تخلیه کامل یا پُر شدن کامل تک تک آنها محاسبه می‌شود.

۱۱- گلوگاهی که کمترین زمان را برای تخلیه (یا پُر) شدن کامل نیاز دارد، شناسایی می‌شود. آن گلوگاه خالی (یا پُر) شده و میزان اشباع مایع در سایر گلوگاه‌ها محاسبه می‌شود.

۱۲- توزیع فازها بروز شده و این روش کار تکرار می‌شود.

معادلات ریاضی

جریان (مایع) بین دو حفره مجاور حاوی مایع (سرعت تغییر جرم مایع در نتیجه گرادیان فشار) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q_i = 6 \times 10^7 \times g_i / \mu (P_{(p,i)}^l - P_{(p,j)}^l \pm 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L) \quad (1)$$

در رابطه ۱، q_i سرعت حجمی جریان در یک حفره منفرد، μ گرانیروی مایع، ρ دانسیته مایع، L طول گلوگاه و P_{pj}^l فشار مایع در حفره زام مجاور گلوگاه نام است. برای فاز مایع نیز قانون کریشوف^۲ به شکل زیر است: از آنجا که فاز مایع تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود می‌توان خالص حجم ورودی و خروجی مایع به یک حفره را صفر در نظر گرفت.

1. Yang-Laplace
2. Krishoff low

- سرعت فاز گاز به قدری کم است که تنها فرآیند مؤثر در انتقال جرم، نفوذ مولکولی است و جریان همرفتی در آن حضور ندارد به‌نحوی که بتوان کل فرآیند را با تئوری پرکولاسیون تهاجمی توصیف نمود.

- فاز مایع، فاز ترکنده است.

- انتقال بخار در فاز گاز به‌طور کامل از طریق فرآیند نفوذ مولکولی صورت می‌گیرد.

- انتقال جرم به خارج از مدل از وجوه بالا و پایینی مدل اتفاق می‌افتد.

- از اثر جریان فیلم‌های نازک مایع صرف‌نظر می‌شود.

- از نفوذ مولکولی گاز در مایع صرف‌نظر می‌شود.

تشریح الگوریتم به کار رفته در مدل

الگوریتمی که در ادامه می‌آید برای تعیین نوع شرایط مرزی در محاسبات فشار مایع استفاده می‌شود. روش کار کلی برای وارد کردن فشار مایع در این مدل به شرح زیر است:

۱- تمام گلوگاه‌های موجود در مرز فاز مایع شناسایی می‌شوند.

۲- فشار محاسبه شده از رابطه یانگ لاپلاس به‌عنوان مقدار اولیه برای تمام گلوگاه‌های مرزی در نظر گرفته می‌شود.

۳- سیستم معادلاتی برای فشار در فاز مایع حل می‌شود.

۴- در گلوگاه‌هایی که اشباع مایع در آنها کمتر از ۱۰۰٪ است، فشار یانگ لاپلاس^۱ حفظ می‌شود.

۵- در گلوگاه‌هایی که اشباع مایع برابر ۱۰۰٪ است، جهت جریان ناشی از برآیند نیروهای مویین و ثقل تعیین می‌شود.

۶- اگر جریان به سمت فاز مایع باشد، فشار یانگ لاپلاس حفظ می‌شود و در غیراین صورت مقدار فلاکس تبخیری با جرم ورودی به گلوگاه در اثر برآیند نیروهای مویین و ثقل مقایسه می‌شود.

۷- اگر فلاکس تبخیری بزرگ‌تر از جرم ورودی در اثر برآیند نیروهای مویین و ثقل باشد، فشار یانگ

$$g_1(P_p^I - P_{(p,1)}^I) + g_2(P_p^I - P_{(t,2)}^I - 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L) + g_3(P_p^I - P_{(p,3)}^I + 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L) + g_4(P_p^I - P_{(p,4)}^I) = 0 \quad (۸)$$

در رابطه ۷، r_i شعاع گلوگاه i ام و k_p ضریب انتقال جرم است. با جایگزینی رابطه ۷ در رابطه ۸ و پس از جابه‌جایی عبارات، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$-g_1 P_{(p,1)}^I + G_k P_p^I - g_3 P_{(p,3)}^I - g_4 P_{(p,4)}^I = B \quad (۹)$$

در رابطه ۹ مقادیر G_k و B از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G_k = [g_1 + ((k_m \mu) / (10^9 \rho g_2 + k_m \mu)) g_2 + g_3 + g_4]$$

$$B = (9.8 \times 10^{(-6)} k_m \mu g_2 \rho L) / (10^9 \rho g_2 + k_m \mu) - 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L g_3 \quad (۱۰)$$

رابطه ۹ مستقل از فشار گلوگاه مرزی است و می‌توان آن را مستقیماً در محاسبات ماتریس فشار استفاده کرد. لازم به ذکر است که رابطه ۹ تنها برای گلوگاه‌هایی قابل استفاده است که شرایط مندرج در گام ۸ الگوریتم فوق را دارا باشند. برای سایر گلوگاه‌های سطح آزاد مدل، فشار محاسبه شده از رابطه یانگ لاپلاس به‌عنوان یک جمله معلوم در رابطه ۸ با فرم نهایی زیر استفاده می‌شود:

$$-g_1 P_{(p,1)}^I + G_k P_p^I - g_3 P_{(p,3)}^I - g_4 P_{(p,4)}^I = (9.8 \times 10^{(-6)} \rho L + P_{(t,2)}^I) g_2 - (9.8 \times 10^{(-6)} \rho L) g_3 \quad (۱۱)$$

در رابطه ۱۰ تساوی زیر برقرار است:

$$G_k = \sum g_i \quad (۱۲)$$

سطح پایینی مدل:

هنگامی که جهت جریان در قسمت پایینی مدل به سمت پایین باشد، فشار گلوگاه با فشار محیط برابر می‌شود. بنابراین:

$$P_{(t,3)}^I = P_a \quad (۱۳)$$

$$g_1(P_p^I - P_{(p,1)}^I) + g_2(P_p^I - P_{(p,2)}^I - 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L) + g_3(P_p^I - P_a + 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L) + g_4(P_p^I - P_{(p,4)}^I) = 0 \quad (۱۴)$$

سپس:

$$-g_1 P_{(p,1)}^I - g_2 P_{(p,2)}^I - g_4 P_{(p,4)}^I + P_p^I \sum g_i = 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L (g_2 - g_3) + P_a g_3 \quad (۱۵)$$

عمق مدل:

رابطه ۱۵ فلاکس جرمی ناشی از تبخیر در گلوگاه‌هایی

$$\sum q_{i(i=1)}^4 = 0 \quad (۲)$$

با جای‌گذاری معادل q_i از رابطه ۱ در رابطه ۲ و پس از مرتب‌سازی، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$-g_1 P_{(p,1)}^I - g_2 P_{(p,2)}^I - g_3 P_{(p,3)}^I - g_4 P_{(p,4)}^I + P_p^I \sum g_i = 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L (g_2 - g_3) \quad (۳)$$

سطح بالایی مدل:

زمانی که گاز حاوی جزء تبخیر شده مایع از شکاف عبور می‌کند، نرخ تبخیر از سطح تماس گاز-مایع واقع در گلوگاه‌های مرزی مجاور شکاف از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(dml / dt)_E S = 6 \times 10^{(-5)} \times k_m (P_{(t,i)}^I - P_o) \quad (۴)$$

در رابطه فوق، $(dml/dt)_{ES}$ سرعت تغییر جرم مایع در گلوگاه‌های سطح آزاد مدل در اثر تبخیر سطحی و k_m ضریب انتقال جرم است. فشار موینگی شکاف صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، فشار مایع در سطح پایین برابر با فشار گاز است. با در نظر گرفتن $P_o = 0$ ، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(dml / dt)_E S = 6 \times 10^{(-5)} \times k_m P_a \quad (۵)$$

P_a فشار جزئی بخار مایع است. فلاکس جرمی ناشی از تبخیر در گلوگاه‌های سطح آزاد مدل از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. برخلاف گلوگاه‌های موجود در عمق مدل، سرعت تبخیر در گلوگاه‌های سطح آزاد مدل تابع فشار مایع است. نرخ تغییر جرم مرتبط با جریان ناشی از نیروی موینگی از رابطه ۵ محاسبه می‌شود که به صورت زیر بازنویسی شده است:

$$((dm_i) / dt)_p = 6 \times 10^4 \times \rho \times g_i / \mu (P_{(p,j)}^I - P_{(t,i)}^I) - 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L \quad (۶)$$

فرم معادلات اجازه نمی‌دهد که از مساوی قرار دادن رابطه ۳ و رابطه ۵ بتوان یک رابطه معادل برای گرادیان فشار $(P_{p,j}^I - P_{t,i}^I)$ استخراج نمود؛ اما می‌توان فشار گلوگاه را به‌عنوان تابعی از فشار حفره مجاور نوشت و با جایگزینی در رابطه ۴ رابطه زیر حاصل می‌شود که فشار جزئی بخار در مرز آزاد مدل (Pa) برابر صفر است:

$$P_{(t,i)}^I = (10^9 \rho g_i) / (10^9 \rho g_i + \pi k_p r_i^2 \mu) P_{(p,j)}^I - (9.8 \times 10^3 \rho^2 g_i L) / (10^9 \rho g_i + \pi k_p r_i^2 \mu) \quad (۷)$$

با استفاده از رابطه آنتوان [۲۴] محاسبه می‌شوند:

$$\ln(p_a / (0.133)) = A - B / (C + T) \quad (19)$$

که در آن A، B و C ضرایب ثابت رابطه آنتوان هستند که برای مواد خالص در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده‌اند.

خصوصیات مدل

در این مدل‌سازی، شبکه‌ای با ابعاد ۶۳×۲۵ و متشکل از ۱۵۷۵ حفره و گلوگاه (شامل: ۱۱۵۹ گلوگاه و ۴۱۶ حفره)، ساخته شد. در این پژوهش، از شبکه‌ای از گلوگاه‌های استوانه‌ای شکل به طول ۲۳۰ μm و با توزیع اندازه تصادفی شعاع گلوگاه که با عدد کئوردیناسیون ۴ به هم متصل شده‌اند، استفاده شده است. حداقل و حداکثر شعاع گلوگاه‌ها به ترتیب معادل ۵۰ μm و ۱۰۰ μm و میانگین شعاع آنها برابر ۷۵ μm می‌باشد. حفره‌ها در محل تلاقی گلوگاه‌ها قرار گرفته و نقش گره را دارند. در این مطالعه، حفره‌ها فاقد حجم فرض شده‌اند. تخلخل مدل در حدود ۲۶٪ محاسبه شده است (جدول ۱). شکل کلی شبکه به صورت یک مستطیل ایستاده است که تمام مرزهای آن از گلوگاه‌ها تشکیل شده است. مرز بالایی مدل فشار ثابت، مرزهای چپ و راست تناوبی و انتقال جرم از طریق مرز بالایی و مرز پایینی برقرار است. منظور از شرایط مرزی تناوبی این است که مرزهای چپ و راست مدل به هم پیوسته و در ارتباط با یکدیگر فرض می‌شوند به گونه‌ای که اگر یکی از گلوگاه‌های مرزی با گاز اشغال شود، در سمت دیگر نیز گلوگاه قرینه آن با گاز اشغال می‌شود. برای حل سیستم معادلات خطی، از روش فاکتورگیری حد بالا و پایین^۱ استفاده شد.

که از سطح آزاد مدل فاصله دارند را نشان می‌دهد [۱۹]:

$$w_i = 6 \times 10^{(-6)} \times \pi r_k^2 (P_{amb} MD) / (RTL_i) \ln((P_{amb} - P_{(p,j)}^v) / (P_{amb} - P_{(t,i)}^v)) \quad (15)$$

که در آن، w_i سرعت تبخیر در سطح مشترک موجود در شاخه نام است که در مجاورت سطح آزاد محیط متخلخل قرار ندارد، D ضریب نفوذ مولکولی جزء مایع در فاز بخار، R ثابت جهانی گازها، T دمای سیستم و P_{pj}^v فشار جزئی بخار در مرکز حفره زام متصل به گلوگاه نام است که از گاز پر شده است. لازم به ذکر است که ابتدا باید میزان فشار جزئی بخار را محاسبه نمود تا بتوان از مقادیر مناسب فشار بخار گلوگاه و حفره در رابطه ۱۵ استفاده کرد. از برابری معادلات ۵ و ۱۵ می‌توان عبارت معادلی برای گرادیان فشار استخراج نمود:

$$g_i (P_{(p,j)}^l - P_{(t,i)}^l \pm 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L_i) = (10^{(-10)} \pi r_2^2 P_{amb} MD \mu) / (\rho RTL_i) \ln((P_{amb} - P_{(p,j)}^v) / (P_{amb} - P_{(t,i)}^v)) \quad (16)$$

این عبارت معلوم را می‌توان با هدف حذف فشار مجهول در جمله دوم، به صورت مستقیم در رابطه ۸ جایگزین کرد. رابطه نهایی به این شکل خواهد بود:

$$+ [g_1 + g_3 + g_4] P_p^l - g_3 P_{(p,3)}^l - g_4 P_{(p,4)}^l = (P_{amb} - P_{(t,2)}^v) - 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L g_3 - (10^{(-10)} \pi r_2^2 P_{amb} MD \mu) / (\rho RTL_2) \ln((P_{amb} - P_p^v) / (P_{amb} - P_{(t,2)}^v)) \quad (17)$$

پس از محاسبه فشار فاز مایع، می‌توان از رابطه ۱۶ برای تعیین فشار مجهول گلوگاه مرزی استفاده کرد که به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{(t,2)}^l = P_p^l - (10^{(-10)} \pi r_2^2 P_{amb} MD \mu) / (\rho RTL_2 g_2) \ln((P_{amb} - P_p^v) / (P_{amb} - P_{(t,2)}^v)) \pm 9.8 \times 10^{(-6)} \rho L_i \quad (18)$$

در شرایط مرزی متفاوت فشارهای بخار در دمای T

جدول ۱ مقادیر ثابت مورد استفاده در مدل به عنوان مقادیر حالتی پایه.

ضریب انتقال جرم	طول نفوذپذیری (μm)	شعاع نفوذپذیری (μm)	طول گلوگاه (μm)	عمق مدل (μm)	شعاع گلوگاه (μm)	
					حداقل	حداکثر
$1/33 \times 10^{-7}$	۵۰	۵۰	۲۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰

1. Lower-upper factorization

بحث و نتایج

به‌عنوان فاز گاز در سه فشار متفاوت استفاده شده است. برای مقایسه اثر تغییرات نوع مایع بر فرآیند تخلیه، علاوه بر هپتان از اکتان و دکان نیز استفاده شد. خصوصیات ترمودینامیکی این اجزاء در **جدول ۲** نشان داده شده است. در این مطالعه، تأثیر اندازه گلوگاه‌ها، طول گلوگاه‌ها و مقدار ضریب انتقال جرم بر فرآیند تخلیه فاز مایع هم ارزیابی گردید. جهت مطالعه اثر فشار بر فرآیند، چندین فشار (از فشار محیط تا بیشترین فشاری که فاز گاز می‌تواند به‌حالت بخار یا سیال فوق بحرانی وجود داشته باشد) انتخاب شده است. **جدول ۳** خصوصیات ترمودینامیکی جزء مایع را در شرایط فشاری مختلف نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به ضریب نفوذ مولکولی و کشش سطحی گازهای مختلف در شرایط فشار متفاوت در **جدول ۴** ارائه شده است. ضرائب نفوذ با استفاده از روش داسیلوا و بلری [۲۵] محاسبه شده‌اند. مقادیر کشش سطحی با استفاده از رابطه تجربی لی-چین [۲۶] به دست آمده‌اند. فشارهای بخار با استفاده از رابطه آنتوان [۲۴] محاسبه شده‌اند. دیگر داده‌های **جدول ۲** و **۴** از منبع NIST^۱ استخراج شده‌اند. همانگونه که در **جدول ۴** مشاهده می‌شود، در شرایط یکسان فشاری، ضریب نفوذ مولکولی هپتان در گاز متان از دو گاز دیگر بیشتر است. ضریب نفوذ مولکولی هپتان در نیتروژن نیز از دی اکسید کربن بزرگ‌تر است. با افزایش فشار ضریب نفوذ مولکولی کلیه گازها کاهش می‌یابند.

در شرایط اولیه، سیستم از فاز مایع اشباع و در شرایط فشار ثابت محیط قرار دارد. با شروع فرآیند، گاز با فشار مورد نظر (از فشار اتمسفریک تا فشار ۱۰۰۰۰ kPa) فاز مایع را تحت تأثیر قرار داده و با نفوذ فاز مایع در گاز، به مرور فشار مایع در نواحی مختلف مدل تغییر می‌کند. با توجه به اینکه گلوگاه‌های با اندازه بزرگ‌تر دارای فشار بیشتری هستند، جریان سیال از گلوگاه‌های بزرگ‌تر به سمت گلوگاه‌های کوچک‌تر حرکت خواهد کرد. این امر سبب بوجود آمدن کلاسترهای مایع موقت و سطوح تماس متعدد در گستره مدل می‌شود. سرعت تبخیر جزء مایع و انتقال آن در فاز گاز به پارامترهایی نظیر ضریب نفوذ مولکولی، نسبت ارتفاع بلوک به عرض آن، ضریب انتقال جرم، کشش سطحی، فشار بخار و تقابل نیروهای ویسکوز، ثقل و مویبندی وابسته است. این پارامترها خود تابع نوع سیال، شرایط ترمودینامیکی و خواص فیزیکی سیستم- هستند. در این تحقیق به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف و مؤثر در این مدل سازی، نظیر نوع و چگالی سیالات، اندازه طول و شعاع گلوگاه‌ها و فشارهای مختلف، بر روی فرآیند هم‌زمان نفوذ مولکولی و ریزش ثقلی، ۲۰ حالت مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. در سیستم نفوذ مولکولی به‌همراه ریزش ثقلی از نرمال هپتان به‌عنوان فاز مایع و از دی اکسید کربن، نیتروژن و متان به تناوب

جدول ۲ خصوصیات ترمودینامیکی جزء مایع و اجزای گازهای مختلف مورد استفاده در مدل.

M (g/mol)	Parachor	Z_c	ρ_c (g/cm ³)	V_c (cm ³ /mol)	P (KPa)	T (K)	نوع سیال
۱۰۰	۳۱۲	۰/۲۶	۰/۲۳	۴۲۸	۲۷۳۶	۵۴۰/۱۳	هپتان
۱۱۴	۳۵۷	۰/۲۵۹	۰/۲۳۵	۴۹۲	۲۴۹۷	۵۶۹/۳۲	اکتان
۱۴۲	۴۳۷	۰/۲۴۷	۰/۲۳۳	۶۲۴	۲۱۰۳	۶۱۷/۷	دکان
۴۴	۷۸	۰/۲۷	۰/۴۷	۹۲	۷۳۷۷	۳۰۴/۱۳	دی اکسید کربن
۲۸	۴۱	۰/۲۹	۰/۳۱	۹۰	۳۳۹۶	۱۶۲/۲	نیتروژن
۱۶	۷۷	۰/۲۹	۰/۱۶	۹۹	۴۵۹۹	۱۹۰/۵۶	متان

1. National Institute of Standards and Technology

جدول ۳ خصوصیات ترمودینامیکی جزء مایع در شرایط فشاری مختلف.

ضرائب رابطه آنتوان			(k)	(kPa)	فاز مایع
A	B	C			
۴/۰۲۸۳۲	۱۲۶۸/۶۳۶	-۵۶/۱۹۹	۳۷۱	۱۰/۱/۳	هپتان
۴/۰۲۸۳۲	۱۲۶۸/۶۳۶	-۵۶/۱۹۹		۳۴۰/۱/۳	
۴/۰۲۸۳۲	۱۲۶۸/۶۳۶	-۵۶/۱۹۹		۴۶۰/۱/۷	
۴/۰۲۸۳۲	۱۲۶۸/۶۳۶	-۵۶/۱۹۹		۷۳۸۰	
۴/۰۲۸۳۲	۱۲۶۸/۶۳۶	-۵۶/۱۹۹		۱۰۰۰۰	
۴/۴,۰۴۸۶۷	۱۳۵۵/۱۲۶	-۶۳/۱۹۹		۴۶۰/۱/۷	اکتان
۴/۰۷۸۵۷	۱۵۰/۱/۲۶۸	-۷۸/۶۷	۴۶۰/۱/۷	دکان	

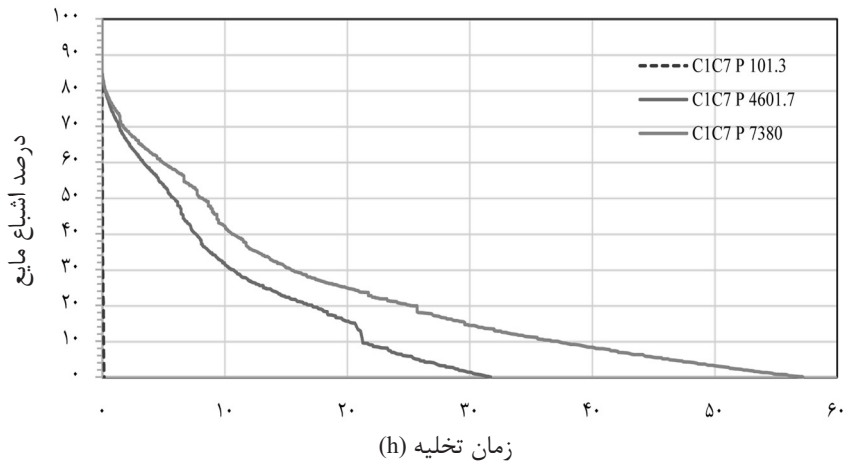
جدول ۴ ضریب نفوذ مولکولی، کشش سطحی و حالت فیزیکی گازهای مختلف مورد استفاده در مدل

D (cm ² /s)	σ (dyne/cm)	P (kPa)	T (K)	حالت فیزیکی	نوع گاز
$۵/۶۹ \times ۱۰^{-۵}$	۱۰/۱	۵۷۲۹/۱	۳۷۱	بخار	دی اکسید کربن
$۸/۶۸ \times ۱۰^{-۵}$	۱۳/۶			فوق بحرانی	متان
$۱/۱۴ \times ۱۰^{-۴}$	۱۲/۷	۱۰/۱/۳		بخار	دی اکسید کربن
$۱/۴۲ \times ۱۰^{-۴}$	۱۲/۷			بخار	نیتروژن
$۱/۷۳ \times ۱۰^{-۴}$	۱۲/۷			بخار	متان
$۱/۳۷ \times ۱۰^{-۴}$	۱۲/۷	۳۴۰/۱/۳		بخار	نیتروژن
$۱/۳۵ \times ۱۰^{-۴}$	۱۱/۸	۴۶۰/۱/۷		فوق بحرانی	نیتروژن
$۱/۶۵ \times ۱۰^{-۴}$	۱۰/۵			بخار	متان
$۱/۰۵ \times ۱۰^{-۴}$	۸/۴	۷۳۸۰		بخار	دی اکسید کربن
$۱/۶۰ \times ۱۰^{-۴}$	۹/۲			فوق بحرانی	متان
$۱/۰۲ \times ۱۰^{-۴}$	۶/۷	۱۰۰۰۰	فوق بحرانی	دی اکسید کربن	

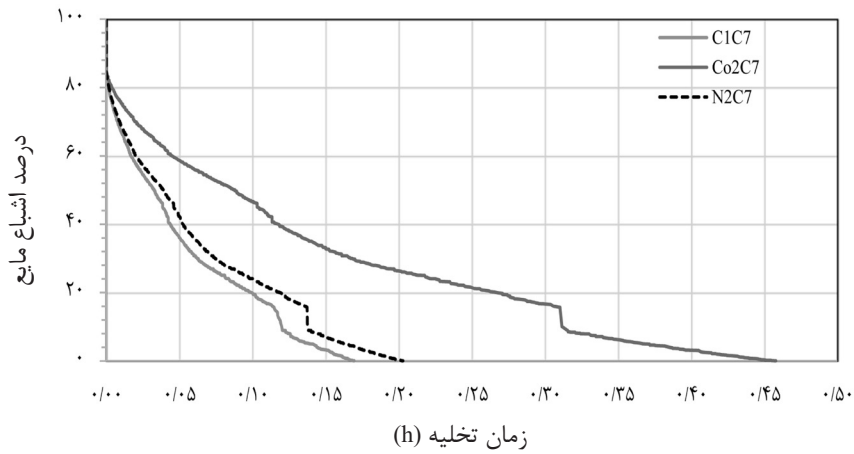
سیستم هپتان-متان بیشتر است (جدول ۵). این روند در فشار بالا (شرایط مخزنی) نیز صادق است (جدول ۵ و شکل ۴). این اختلاف به دلیل تفاوت در ضرایب نفوذ مولکولی در این سه گاز است (ضریب نفوذ مولکولی هپتان در متان از دو گاز دیگر بیشتر است. ضریب نفوذ مولکولی هپتان در نیتروژن نیز از دی اکسید کربن بزرگتر است). در سیستم هپتان-نیتروژن در فشارهای بالا که نیتروژن در حالت فاز بخار باشد، تأثیر افزایش فشار بر زمان تخلیه هپتان، تقریباً ناچیز است و در شرایط فشاری یکسان، حدود ۱۶٪ زمان تخلیه نسبت به سیستم هپتان-متان بیشتر طول می کشد.

پروفایل تخلیه فاز مایع در سه نوع گاز و فشارهای مختلف

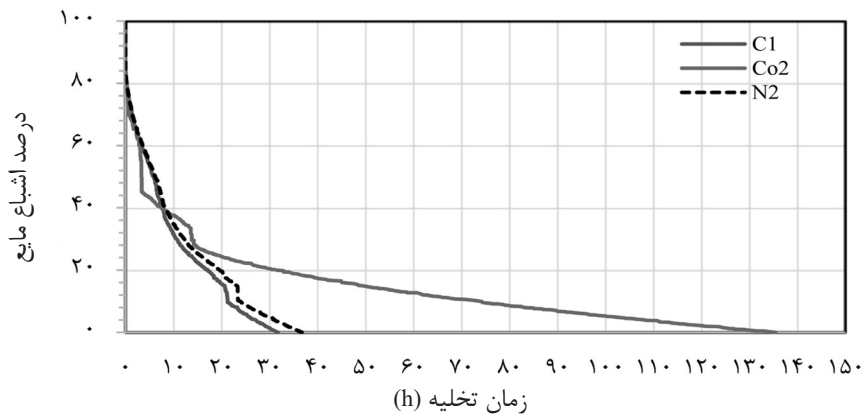
منحنی تخلیه هپتان (فاز مایع) در سیستم‌های هپتان-متان، هپتان-دی اکسید کربن و هپتان-نیتروژن در فرآیند هم‌زمان نفوذ مولکولی-ریزش ثقلی نسبت به زمان تخلیه در فشارهای مختلف و دمای ثابت در شکل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فشار، زمان تخلیه هپتان در سیستم‌های مورد مطالعه به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد. در فشار ۱۰/۱/۳ kPa (فشار اتمسفریک)، زمان تخلیه فاز مایع در سیستم‌های هپتان-نیتروژن و هپتان-دی اکسید کربن به ترتیب حدود ۱۸ و ۱۷۰٪ از



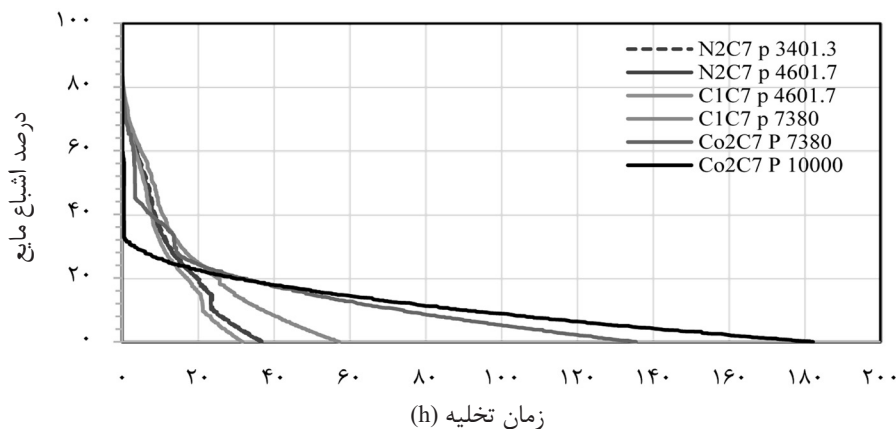
شکل ۱ منحنی تخلیه هپتان در سیستم هپتان-متان (فشارها برحسب KPa است)



شکل ۲ مقایسه پروفایل تخلیه هپتان در سه نوع گاز مختلف در دمای ۳۷۱ K و فشار ۱۰۱/۳ KPa



شکل ۳ مقایسه پروفایل تخلیه هپتان در سه نوع گاز مختلف در شرایط مخزنی



شکل ۴ مقایسه پروفایل تخلیه هپتان در گازهای مختلف در فشار مخزن و دمای ۳۷۱ K (فشارها برحسب KPa است)

جدول ۵ مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی حالت های مختلف

زمان اتمام فرآیند (h)	میان شکنی گاز		کنده شدن توده مایع از بالا و پایین		نوع گاز	فشار Kpa	فرآیند
	زمان (h)	درصد اشباع مایع باقی مانده	زمان (h)	درصد اشباع مایع باقی مانده			
۰/۱۷	۰/۰۶	۷/۳۲	۰/۰۱	۵/۷۲	متان	۳/۱۰۱	نفوذ مولکولی + ثقل
۰/۴۶	۰/۱۴	۵/۳۵	۰/۰۱	۷۳	دی اکسید کربن		
۰/۲	۰/۰۶	۳/۴۳	۰/۰۱	۷۳	نیتروژن		
۳۷/۱	۱۱	۳۳	۰/۹	۳/۷۴	متان	۳/۳۴۰۱	
۳۱/۷	۱۰	۳۱	۰/۷۴	۵/۷۴	نیتروژن	۷/۴۶۰۱	
۳۶/۷	۱۱	۶/۳۲	۰/۹	۲/۷۴	متان	۷۳۸۰	
۵۷/۲	۲۳	۲۱	۱/۷۴	۷۰	دی اکسید کربن		
۱۳۶	۱۴/۲	۵/۲۸	۰/۶	۶/۷۲	دی اکسید کربن		
۱۸۲	۰/۴۶	۶/۳۳	۱	۳۲	دی اکسید کربن	۱۰۰۰۰	

شکنی گاز، سرعت فرآیند و تخلیه فاز مایع کندتر می شود. براساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، در سیستم هپتان-متان در هر سه بازه فشاری بررسی شده، زمان کنده شدن توده مایع از بالا و پایین مدل^۱ در اشباع مایع باقی مانده کمتری نسبت به سیستم های هپتان-نیتروژن و هپتان-دی اکسید کربن حادث می شود. پدیده میان شکنی گاز^۲ در فشار اتمسفریک در سیستم های هپتان-متان، هپتان-نیتروژن و هپتان-دی اکسید کربن به ترتیب در اشباع مایع باقی مانده حدود ۳۳، ۳۶ و ۳۴٪ اتفاق می افتد.

1. Top to Bottom Disconnected, TBD

2. Gas Breakthrough, GBT

در سیستم هپتان-دی اکسید کربن در فشارهای بالا تأثیر افزایش فشار بر زمان تخلیه هپتان، قابل توجه است به طوری که با افزایش فشار سیستم از ۷۳۸۰ به ۱۰۰۰۰ kPa زمان تخلیه فاز مایع حدود ۳۴٪ دیرتر اتفاق می افتد (جدول ۵). همچنین، در فشار یکسان ۷۳۸۰ kPa، زمان تخلیه فاز مایع در سیستم هپتان-دی اکسید کربن نسبت به سیستم هپتان-متان حدود ۱۳۸٪ دیرتر است. لازم به ذکر است که فشارهای انتخاب شده حداقل و حداکثر فشار ممکن برای باقی ماندن گاز در فاز بخار در دمای مورد نظر می باشند. با کنده شدن توده مایع از بالا و پایین مدل و همچنین با بروز پدیده میان

بیشترین تعداد کلاسترهای مایع در زمان بروز این پدیده، ایجاد شده است. در همه سیستم‌ها طول زمان فرآیند هم‌زمان نیروی ثقل و نفوذ مولکولی رابطه معکوسی با تعداد کلاسترهایی که در طول فرآیند تشکیل می‌شوند، دارد. به عبارتی، با افزایش تعداد کلاسترهای مایع سرعت فرآیند تخلیه فاز مایع کندتر خواهد شد.

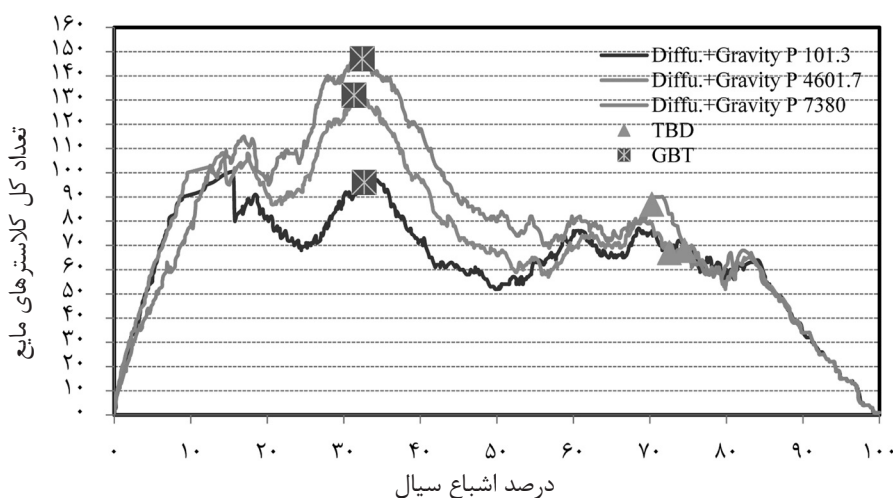
اثر تغییر فاز مایع بر فرآیند تخلیه

نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر فاز مایع از هپتان به اکتان و دکان، (با افزایش جرم مولکولی فاز مایع) زمان تخلیه فاز مایع بسیار کندتر صورت می‌گیرد. وجود فاز مایع اکتان و دکان ضریب نفوذ مولکولی مایع در گاز را به ترتیب ۴۱ و ۴۹٪ نسبت به فاز مایع هپتان کاهش می‌دهد. همان‌طور که در **شکل ۶** مشاهده می‌شود، زمان تخلیه فاز مایع با سیستم‌های اکتان-متان و دکان-متان در مقایسه با سیستم هپتان-متان به ترتیب بیش از ۳/۶ برابر و بیش از ۱۹ برابر دیرتر اتفاق می‌افتد. از مهم‌ترین دلایل کند شدن زمان تخلیه فاز مایع با افزایش چگالی فاز مایع، کاهش ضریب نفوذ مولکولی فاز مایع در فاز گاز است.

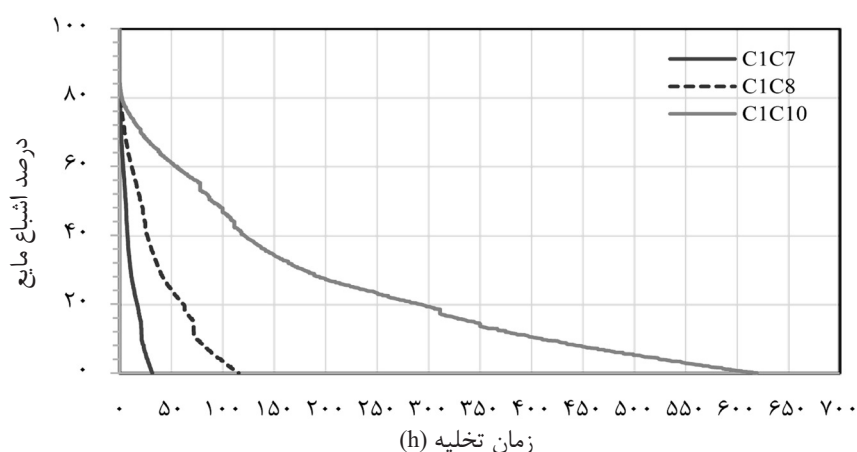
این پدیده در فشار ۴۶۰۱ kPa برای سیستم‌های هپتان-متان و هپتان-نیتروژن به ترتیب در اشباع مایع باقی‌مانده ۳۱ و ۳۳٪ (یعنی در سیستم هپتان-متان پس از تخلیه ۶۹٪ فاز مایع و در سیستم هپتان-نیتروژن پس از تخلیه ۶۷٪ فاز مایع، پدیده میان شکنی گاز رخ می‌دهد) و در سیستم‌های هپتان-متان و هپتان-دی اکسید کربن در فشار ۷۳۸۰ kPa به ترتیب در اشباع مایع باقی‌مانده ۲۱ و ۲۹٪ اتفاق می‌افتد. بررسی زمان وقوع پدیده‌های کنده شدن توده مایع از بالا و پایین مدل و میان شکنی گاز نشان‌دهنده تخلیه سریعتر فاز مایع در سیستم هپتان-متان نسبت به دو سیستم دیگر است (**جدول ۵ و شکل‌های ۱ تا ۴**).

فراوانی کلاسترهای^۱ مایع در سه سیستم مطالعه شده

در **شکل ۵** نمودار فراوانی کل کلاسترهای مایع در یکی از سه سیستم مورد مطالعه به عنوان تابعی از اشباع مایع آورده شده است. بیشترین تعداد کلاسترهای مایع در هر کدام از این سیستم‌ها در فشارهای بالا رخ داده است. در تمام حالت‌ها، پس از بروز پدیده کنده شدن توده مایع از بالا و پایین مدل، تعداد کلاسترهای مایع روند افزایشی پیدا می‌کنند. همچنین پس از پدیده میان شکنی گاز، تعداد کلاسترهای مایع در همه حالت‌ها افزایش یافته و



شکل ۵ فراوانی کلاسترهای مایع در سیستم هپتان-متان (فشارها بر حسب kPa است)



شکل ۶ مقایسه اثر مایعات مختلف بر منحنی تخلیه فاز مایع

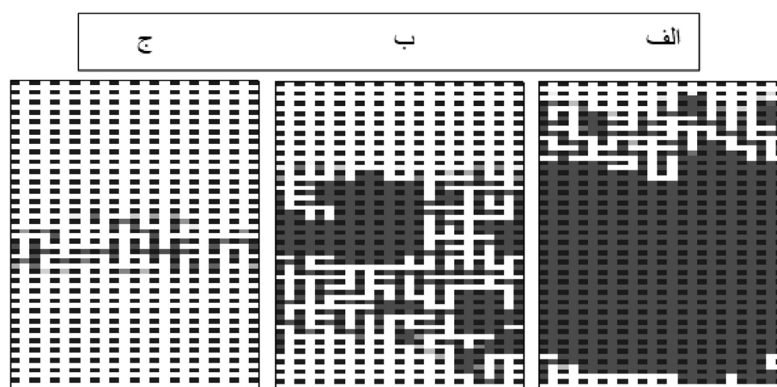
توزیع فازها

شماتیک توزیع فازها در سه گام زمانی انتخاب شده در فشار ۴۶۰/۱/۷ کیلوپاسکال و دمای ۳۷۱ K در مدل شبکه حفره‌ای سیستم هپتان-متان تحت فرآیند توأمان نفوذ مولکولی و ریزش ثقلی در شکل ۷ (الف تا ج) نشان داده شده است. در شکل ۷ (الف) پدیده‌کننده شدن توده مایع از بالا و پایین مدل آورده شده است. شکل ۷ (ب) پدیده میان‌شکنی گاز را نشان می‌دهد. میان‌شکنی گاز (GBT) می‌تواند قبل یا بعد از انفصال آخرین کلاستر مایع اتفاق بی‌افتد. در سیستم‌های ناهمگون، میان‌شکنی گاز سریع‌تر اتفاق می‌افتد. میزان اشباع باقی‌مانده فاز مایع، زمان و ترتیب وقوع میان‌شکنی گاز و انفصال بالا و پایین مدل (TBD) تأثیر بسیاری بر سرعت فرآیند دارد. تخلیه مایع در مراحل انتهایی فرآیند تحت تأثیر فرآیند نفوذ مولکولی صورت می‌گیرد و فرآیند ریزش ثقلی تأثیرچندانی بر تخلیه فاز مایع باقی‌مانده در

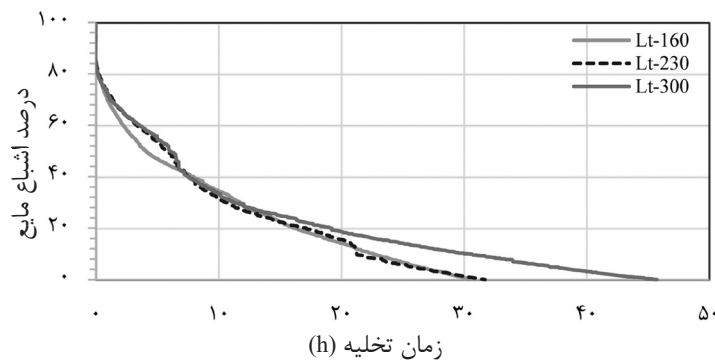
مراحل انتهایی فرآیند ندارد (شکل ۷ ج).

اثر تغییرات اندازه گلوگاه‌ها (طول و شعاع) بر فرآیند تخلیه

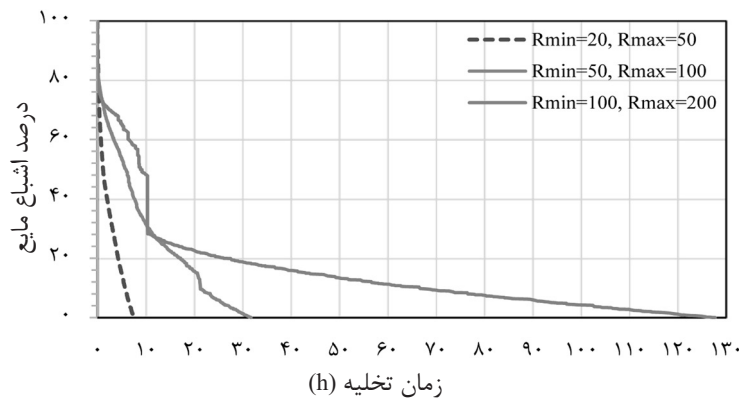
برای بررسی اثر تغییرات اندازه شعاع و طول گلوگاه بر فرآیند تخلیه مایع، سه دامنه شعاع گلوگاه (۲۰ تا ۵۰، ۵۰ تا ۱۰۰ و ۱۰۰ تا ۲۰۰ μm) با طول ثابت ۲۳۰ و سه اندازه طول گلوگاه (۱۶۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ μm) با دامنه شعاع ۵۰ تا ۱۰۰ μm مدل‌سازی شد. با افزایش طول گلوگاه از ۱۶۰ به ۲۳۰ و ۳۰۰ μm زمان تخلیه به ترتیب ۰/۳ و ۱/۵ برابر دیرتر اتفاق می‌افتد (شکل ۸). همچنین با افزایش شعاع گلوگاه، زمان فرآیند تخلیه فاز مایع افزایش قابل توجهی می‌یابد. در بازه انتخابی ۱۰۰ تا ۲۰۰ μm و ۲۰ تا ۵۰ μm به ترتیب ۱۷ و ۴ برابر دیرتر اتفاق می‌افتد (شکل ۹).



شکل ۷ شماتیک توزیع فازها (الف: انفصال بالا و پایین مدل) (ب: میان‌شکنی گاز) (ج: مراحل انتهایی تخلیه مایع)



شکل ۸ اثر تغییرات اندازه طول گلوگاه‌ها در تخلیه هپتان (طول گلوگاه برحسب μm است).

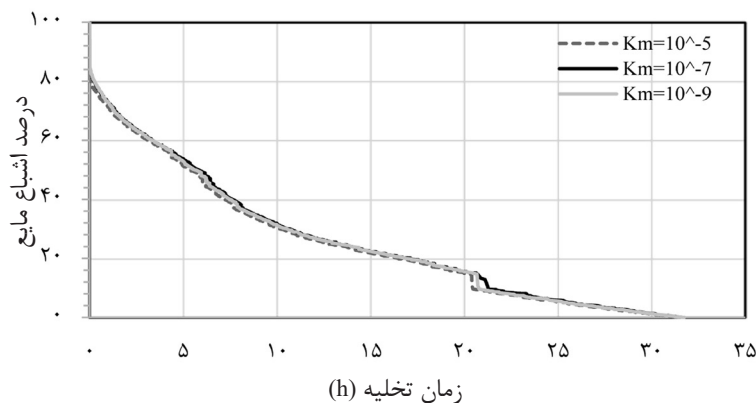


شکل ۹ اثر تغییرات اندازه شعاع گلوگاه‌ها در تخلیه هپتان (شعاع گلوگاه برحسب μm است).

اثر تغییرات ضریب انتقال جرم بر فرآیند تخلیه

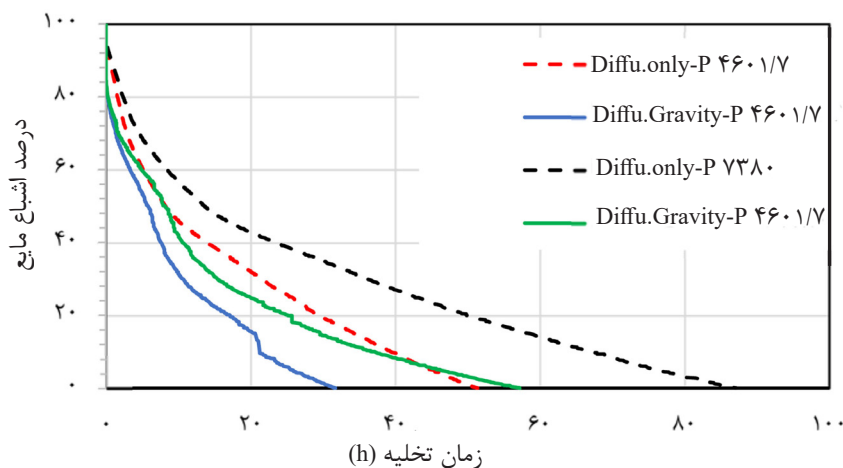
در این مطالعه با انتخاب سه مقدار متفاوت 10^{-5} ، 10^{-7} و 10^{-9} برای ضریب انتقال جرم (km)، اثر تغییرات ضریب انتقال جرم بر روی فرآیند تخلیه فاز مایع مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، تغییر مقدار ضریب انتقال جرم تأثیر چندانی بر زمان تخلیه فاز مایع ندارد.

افزایش طول گلوگاه به اندازه شعاع گلوگاه زمان تخلیه فاز مایع را کندتر نمی‌کند، علت این امر علاوه بر افزایش قابل توجه حجم مایع در اثر افزایش شعاع گلوگاه نسبت به افزایش طول گلوگاه، متأثر از نقش نیروی ثقل در گلوگاه با طول بالاست که باعث تخلیه سریع‌تر گلوگاه‌هایی که در مسیر ریزش ثقلی قرار دارند، شده و فرآیند تخلیه فاز مایع زودتر به پایان می‌رسد.



شکل ۱۰ اثر تغییرات ضریب انتقال جرم در تخلیه هپتان.

ریزش ثقلی به سیستم اضافه شود، حدود ۶۲٪ کمتر از زمانی است که فرآیند نفوذ مولکولی تنها حاکم است. این میزان در فشار ۷۳۸۰ kPa حدود ۶۶٪ است (شکل ۱۱). این موضوع به دلیل کند بودن قابل توجه فرآیند نفوذ مولکولی تنها در مقابل اثر هم افزایی ریزش ثقلی و نفوذ مولکولی در فرآیند همزمان نفوذ مولکولی به همراه ریزش ثقلی است.



شکل ۱۱ مقایسه زمان تخلیه فاز مایع در دو سیستم نفوذ مولکولی تنها و نفوذ مولکولی به همراه ریزش ثقلی (فشارها برحسب kPa است).

که اثر افزایش طول گلوگاه به اندازه افزایش شعاع گلوگاه، زمان تخلیه فاز مایع را طولانی تر نمی کند، علت این امر علاوه بر افزایش قابل توجه حجم مایع در اثر افزایش شعاع گلوگاه نسبت به افزایش طول گلوگاه (که خود عاملی برای کند شدن فرآیند تخلیه می شود)، متأثر از نقش نیروی ثقل در گلوگاه با طول بالاست که باعث تخلیه سریع تر گلوگاه هایی که در مسیر نیروی ثقل قرار دارند، شده و در نتیجه فرآیند تخلیه فاز مایع زودتر به پایان می رسد. همچنین، بررسی ما نشان داد که تغییر مقدار ضریب انتقال جرم تأثیر قابل توجهی بر زمان تخلیه فاز مایع در فرآیند همزمان نفوذ مولکولی به همراه ریزش ثقلی در دمای ثابت، ندارد. براساس بررسی های انجام شده، تخلیه فاز مایع در فرآیند همزمان نفوذ مولکولی به همراه ریزش ثقلی در مقایسه با فرآیند نفوذ مولکولی تنها، سریعتر اتفاق می افتد. بررسی های ما نشان داد که در فشارهای ۴۶۰۱/۷ و ۷۳۸۰ kPa زمان تخلیه

مقایسه نتایج این مطالعه با سیستم فرآیند نفوذ مولکولی

در این بخش نتایج به دست آمده از این مطالعه (فرآیند همزمان نفوذ مولکولی به همراه ریزش ثقلی) با آنچه در مطالعه مشایخی زاده و رسایی [۱۹] (فرآیند نفوذ مولکولی) انجام شده بود، مقایسه گردید. براساس نتایج به دست آمده در فشار یکسان ۴۶۰۱/۷ kPa زمان تخلیه فاز مایع در زمانی که

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می دهد که در مدل سازی شبکه حفره ای فرآیند خشک شدن همدمای محیط متخلخل در فرآیند همزمان نفوذ مولکولی به همراه ریزش ثقلی، با افزایش جرم مولکولی فاز گاز و فاز مایع، زمان تخلیه فاز مایع، بطور قابل توجهی طولانی تر خواهد شد. با تغییر فاز گاز از متان به نیتروژن و دی اکسید کربن در فشار ثابت ۱۰۱/۳ kPa (فشار اتمسفریک)، زمان تخلیه فاز مایع به ترتیب حدود ۱۸ و ۱۷۰٪ بیشتر می شود. با تغییر فاز گاز از متان به نیتروژن در فشار ۴۶۰۲ kPa، حدود ۱۶٪ زمان تخلیه فاز مایع کندتر خواهد شد. همچنین با انتخاب دی اکسید کربن به جای متان، زمان تخلیه فاز مایع حدود ۱۳۸٪ دیرتر اتفاق می افتد. با تغییر فاز مایع از هپتان به اکتان و دکان، زمان تخلیه فاز مایع به ترتیب ۳/۶ و ۱۹ برابر به تأخیر خواهد افتاد. با بررسی هایی که در این مطالعه انجام دادیم، به این نتیجه رسیدیم

P_c : فشار بحرانی (kPa)
 P_o : فشار بخار اشباع مایع (kPa)
 q : دبی حجمی جریان (mm^3/min)
 R : ثابت جهانی گازها ($\text{m}^3 \text{ Pa}/(\text{molK})$)
 R_f : شعاع انحنای سطح مشترک گاز-مایع در گلوگاه
 μ_m
 r : شعاع گلوگاه (μm)
 T : دمای محیط (K)
 t : زمان (min)
 w : سرعت تبخیر (g/min)
حروف یونانی
 μ : گرانروی (cp)
 ρ : چگالی (g/cm^3)
 σ : کشش سطحی (dyne/cm)
 τ : تنش سطحی (dyne/cm)
زیرنویس پارامتر
 i : شماره حفره یا گلوگاه
 z : شماره حفره یا گلوگاه
 p : حفره
 t : گلوگاه
بالانویس پارامتر
 l : مایع
 v : گاز

فاز مایع در زمانی که ریزش ثقلی به سیستم اضافه شود، به ترتیب حدود ۶۲ و ۶۶٪ کمتر از زمانی است که فرآیند نفوذ مولکولی تنها حاکم است. این مهم به دلیل کند بودن قابل توجه فرآیند نفوذ مولکولی تنها در مقابل اثر هم افزایی ریزش ثقلی و نفوذ مولکولی در فرآیند هم‌زمان نفوذ مولکولی به همراه ریزش ثقلی است.

علائم و نشانه‌ها

A : ضریب ثابت رابطه آنتوان -
 B : ضریب ثابت رابطه آنتوان -
 C : ضریب ثابت رابطه آنتوان -
 c : غلظت g/L
 D : ضریب نفوذ مولکولی بخار مایع در میان فاز گاز (cm^2/s)
 g : فاکتور هدایت‌پذیری (mm^3)
 k_m : ضریب انتقال جرم ($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ sPa})$)
 L : طول گلوگاه (μm)
 M : وزن مولکولی (g/mol)
 m_l : جرم مایع (g)
 P : فشار (kPa)
 P_a : فشار جزئی بخاری که از بالای سطح آزاد مدل عبور می‌کند (kPa)
 P_{amb} : فشار محیط (kPa)

مراجع

- [1]. Yiotis A, Stubos A, Boudouvis A, Tsimpanogiannis N, Yortsos Y (2005) Pore-network modeling of isothermal drying in porous media, Upscaling Multiphase Flow in Porous Media, 63-86 Springer
- [2]. Sahimi M (2010) Flow and transport in porous media and fractured rock, Wiley-VCH Verlag GmbH, Second, Revised and Enlarged Edition, Chapter 1, 5-7.
- [3]. Nowicki S, Davis H, Scriven L (1992) Microscopic determination of transport parameters in drying porous media, Drying Technology, 10: 925-946.
- [4]. Prat M (1993) Percolation model of drying under isothermal conditions in porous media, International Journal of Multiphase Flow, 19: 691-704.
- [5]. Laurindo J B, Prat M (1996) Numerical and experimental network study of evaporation in capillary porous media: Phase distributions, Chemical Engineering Science, 51, 23: 5171-5185.
- [6]. Le Bray Y, Prat M (1999) Three-dimensional pore network simulation of drying in capillary porous media, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42: 4207-4224.
- [7]. Freitas D, Prat M (2000) Pore network simulation of evaporation of a binary liquid from a capillary porous medium, Transport in Porous Media, 40: 1-25.
- [8]. Yiotis A G, Stubos A, Boudouvis A, Yortsos Y C (2001) A 2-D pore-network model of the drying of single-component liquids in porous media, Advances in Water Resources, 24: 439-460.

- [9]. Yiotis A G, Tsimpanogiannis I N, Stubos A K, Yortsos Y C (2006) Pore-network study of the characteristic periods in the drying of porous materials, *Journal of Colloid and Interface Science*, 297: 738-748.
- [10]. Prat M (2007) On the influence of pore shape, contact angle and film flows on drying of capillary porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50: 1455-1468.
- [11]. Metzger T, Tsotsas E (2008) Viscous stabilization of drying front: Three-dimensional pore network simulations, *Chemical Engineering Research and Design*, 86: 739-744.
- [12]. Chraïbi H, Prat M, Chapuis O (2009) Influence of contact angle on slow evaporation in two-dimensional porous media, *Physical Review E*, 79, 2: 026313.
- [13]. Wu R, Cui G M, Chen R (2014) Pore network study of slow evaporation in hydrophobic porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68: 310-323.
- [14]. Vorhauer N, Wang Y, Kharaghani A, Tsotsas E, Prat M (2015) Drying with formation of capillary rings in a model porous medium, *Transport in Porous Media*, 110: 197-223.
- [15]. Wu R, Kharaghani A, Tsotsas E (2016) Capillary valve effect during slow drying of porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 94: 81-86.
- [16]. Thiery J, Rodts S, Weitz D, Coussot P (2017) Drying regimes in homogeneous porous media from macro-to nanoscale, *Physical Review Fluids*, 2: 074201.
- [17]. Wu R, Zhao C, Tsotsas E, Kharaghani A (2017) Convective drying in thin hydrophobic porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112: 630-642.
- [18]. Attari Moghaddam A, Kharaghani A, Tsotsas E, Prat M (2018) A pore network study of evaporation from the surface of a drying non-hygroscopic porous medium, *AIChE Journal*, 64: 1435-1447.
- [19]. Mashayekhizadeh V, Rasaei M R (2018) Pore network modelling of molecular diffusion in a single-block model during lean gas injection, investigating the effect of throat sorting, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96: 605-619.
- [20]. Mashayekhizadeh V, Rasaei M R (2019) Pore network modelling of molecular diffusion in a single-block model during lean gas injection, a comparative study on calculation approaches, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97: 808-820.
- [21]. Chen Y, Yan K, Zhang J, Leng R, Cheng H, Zhang X, Liu H, Lyu W (2020) A novel pore-fracture dual network modeling method considering dynamic cracking and its applications, *Petroleum Research*, 5: 164-169.
- [22]. Zhao J, Qin F, Kang Q, Derome D, Carmeliet J (2021) Pore-scale simulation of drying in porous media using a hybrid lattice Boltzmann: pore network model, *Drying Technology*, 1-16.
- [23]. Maalal O, Prat M, Lasseux D (2021) Pore network model of drying with Kelvin effect, *Physics of Fluids*, 33: 027103.
- [24]. Antoine C (1888) Pressure calculation of various vapours.(Calcul des tensions de diverses vapeurs), *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 107: 778-780.
- [25]. Da Silva F V, Belery P (1989) Molecular diffusion in naturally fractured reservoirs: a decisive recovery mechanism, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE-19672-MS.
- [26]. Lee S T, Chien M C H (1984) A New Multicomponent Surface Tension Correlation Based On Scaling Theory, *SPE Enhanced Oil Recovery Symposium*, SPE-12643-MS.



Petroleum Research

Petroleum Research, 2022(June-July), Vol. 32, No. 123, 23-25

DOI: 10.22078/pr.2022.4719.3116

Pore-Network Modeling of Combined Molecular Diffusion and Gravity Drainage Mechanisms in a single *Matrix Block*

Ahmad Mohammadi¹, Mohammad Reza Rasaei^{*2}, Vahid Mashayekhizadeh³, and Ali Nakhaei^{1,2}

1. Department of Petroleum Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Iran

2. Institute of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, University of Tehran, Iran

3. Department of Petroleum Engineering, National Iranian South oil Company, Ahwaz, Iran

mrasaei@ut.ac.ir

DOI: 10.22078/PR.2022.4719.3116

Received: January/17/2022

Accepted: February/23/2022

Introduction

Fractured reservoirs are one of the most important and complex hydrocarbon resources in the world, especially in Iran. Considering the importance of production mechanisms from fractured reservoirs, it seems necessary to better understand these mechanisms and their related parameters. Pore network modeling is an efficient tool that utilizes rapid advances in imaging and simulations of pore dimensions. This technology enables to simulate a wide range of different conditions, different flow regimes, different states of oil production, composition of components and different chemistry of fluids in the pore scale [1]. In the last four decades, some researchers have developed pore network models to describe fluid movement and production mechanisms in porous media and fracture networks. Later, some models have been developed to investigate the phenomenon of gravity drainage in fractured reservoirs. However, despite the combined effect of molecular diffusion and gravity drainage mechanisms in the fractured reservoirs under non-equilibrium gas injection, to date, no study has been published on the pore scale (discrete approach) that has simultaneously investigated both mechanisms. Gravity drainage mechanism is an important driving force for oil recovery from fractured reservoirs under non-equilibrium gas injection. Understanding the combined effects of capillary and gravity-induced flow and tracing the gas-liquid interface movement is critical to mimicking the microscopic efficiency of gas injection schemes.

Methodology

In continuation of the study presented by Mashayekhizadeh and Rasaei [2, 3], we apply some extensions to modeling the molecular diffusion mechanism in a matrix block near the fracture by considering the effect of gravity on the process of molecular diffusion. As molecular diffusion and gravity drainage usually occur simultaneously, considering the force of gravity in the equations can be closer to the synchronous reality of molecular diffusion in fractured reservoirs. One of the most important objectives of this study is to track the gas-liquid contact movement in the throats because of the combined effects of capillary force, gravity and diffusion. These effects do not necessarily work in the same direction. During diffusion, the liquid saturation decreases and the gas-liquid interface moves deep in the model [2]. Because of the gravity drainage, the gas-liquid contact moves in opposite directions, increasing or decreasing the saturation of an element.

Model Description

In this work, a network consisting of 1159 throats and 416 pores with dimensions of 63×25 elements was made. The throats were considered as tubes connected to pores in a regular network with a coordination number of 4. The porosity of the model is estimated to be about 26%. The upper and lower boundaries of the model are constant pressure, and the left and right boundaries are periodic. The L.U. factorization method was used to solve the system of linear equations.

Results and Discussion

In the initial conditions, the system is fully saturated by liquid phase and in the constant ambient pressure conditions. By starting the process, the gas with the desired pressure (from atmospheric pressure to pressure of 10000 kPa) affects the liquid phase by diffuse the liquid components in the gas phase, and over time, the liquid pressure changes in different regions of the model (Figure 1). Given that larger-sized throats have more pressure, fluid flow will move from larger throats to smaller ones. This causes temporary liquid clusters and multiple contact surfaces in the system (Figure 2). The evaporation rate of the liquid component and its transport in the gas phase depends on parameters such as molecular diffusion coefficient, block height to width ratio, mass transfer coefficient, surface tension, vapor pressure and contrast of viscose forces, gravity and capillary. These parameters themselves are subject to fluid type, thermodynamic conditions and physical properties of the system. The schematic of phase distribution is shown in three selected time steps at 4601.7 kpa pressure and temperature of 371 K in Heptane-Methane system pore network model under combined process of molecular diffusion and gravity darianage in Figure 3. Also, by increasing the radius of the throats, the depletion time of the liquid phase increases significantly. In the selected range of 100 to 200 μm , the depletion time occurs 17 and 4 times later than the selected range of 20 to 50 and 50 to 100 μm , respectively (Figure 4).

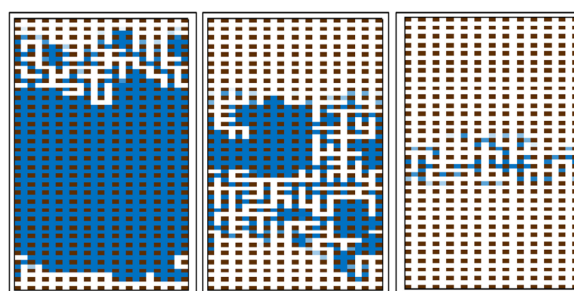


Fig. 3 Schematics of phase distribution (Left to Right: Top and bottom disconnected of the model, gas breakthrough and Final stages of liquid depletion).

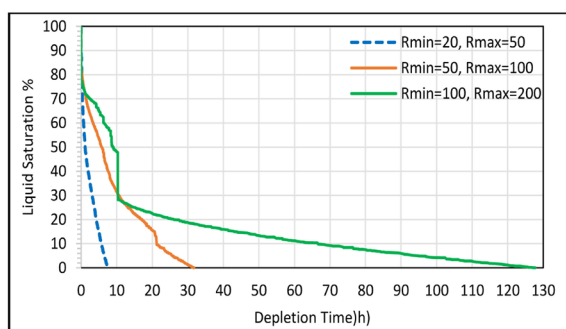


Fig. 4 Effect of changes in the radius of throats in Heptane desaturation (the radius of the throat is μm).

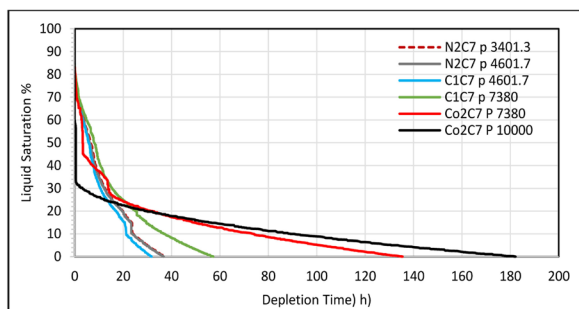


Fig. 1 Comparison of Heptane desaturation profile in different gases, different pressures and temperature of 371 K (pressures are in KPa).

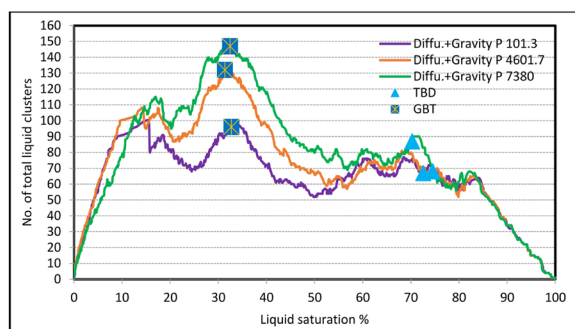


Fig. 2 Frequency of liquid clusters in Heptane-Methane system (pressures are in KPa).

Conclusions

In this work, a 2D quasi-static pore network model is developed to study molecular diffusion and gravity drainage mechanisms separately in combination. The results of this study show that, molecular diffusion and gravity drainage mechanisms, by increasing the molecular mass of gas phase, the depletion time of the liquid phase will be considerably longer. According to the results obtained, the effect of increasing the length of the throat does not prolong the depletion time of the liquid phase as much as the increase in the radius of the throat, due to the significant increase in the volume of the liquid due to the increase in the radius of the throat compared to the increase in the length of the throat (which itself is a factor for slowing the desaturation process), affected by the role of gravity in the high-length throat, which causes faster depletion of the throats that are in the path of gravity. And as a result, the liquid phase desaturation process ends earlier.

References

1. Yiotis A, Stubos A, Boudouvis A, Tsimpanogiannis N, Yortsos Y (2005) Pore-network modeling of isothermal drying in porous media, Upscaling Multiphase Flow in Porous Media. Springer.
2. Mashayekhizadeh V, Rasaei M R (2018) Pore network modelling of molecular diffusion in a single-block model during lean gas injection, investigating the effect of throat sorting, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 96, 2: 605-19.

3. Mashayekhizadeh V, Rasaei M R (2019) Pore network modelling of molecular diffusion in a single-block model during lean gas injection, a comparative study on calculation approaches, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 97, 3: 808-20.