

۱

بررسی عددی تراوایی سطوح متخلخل در بستر گاز شیل با روش DSMC

احسان روحی گل خطمی

دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک e.roohi@um.ac.ir دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک hosseinchambari@gmail.com

حسين چمبری

چکیدہ

در بسترهای شیل منافذ با قطر میکرومتر تا نانومتر به فراوانی یافت می شوند که سبب تفاوت چشمگیر این ذخایر با ذخایر گاز معمولی می شود. یکی از اصلی ترین خواص در مدل کردن تولیدات هیدروکربنی تروایی است. از این رو به دست آوردن تراوایی ظاهری حائز اهمیت می باشد. در این مقاله به بررسی جریان در بستر گاز شیل در رژیمهای لغزشی و گذرا پرداخته شده است. حل بر مبنای روش شبیه سازی مستقیم مونت کارلو در قالب نرم افزار این فم انجام شده است. در این بررسی جریان دو گاز آرگون و متان در مدل دو بعدی واقعی که از تصاویر سی تی اسکن بستر شیل به دست آمده است، مورد ارزیابی قرار گرفته اند. مدل های توزیع انرژی درونی لارسن – بورگناک و برخورد از نوع جسم کروی سخت در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی جریان در ورودی و خروجی به صورت فشار مشخص تعیین شده است. منحنی های ضریب تراوایی و نیم رخهای سرعت برای هر دو گاز به دست آمده است. با افزایش عدد نودسن در هر دو گاز سرعت لغزشی افزایش می بابد. نتایج نشان می دهند که بیشینه سرعت در یک نودسن ثابت برای گاز متان بیشتر از گاز آرگون است.

كلمات كليدى: حلكر DCMC، تراوايي، كاز شيل، رابطه دارسي، رابطه كليكنبر گ

فهرست علائم (در صورت لزوم)

سرعت سطحی U_{S} فشار P مدد نودسن K_{n} عدد نودسن L

علائم يونانى

- μ ضريب لزجت ديناميكي
 - ρ چگالی
 - *ع* تخلخل
 - λ طول مشخصه

۱– مقدمه

به تازگی مخازن گاز شیل^۱ بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند زیرا پیشرفتهای اخیر در حوزه تکنولوژی، تولید از این ذخایر را به لحاظ اقتصادی ممکن ساخته است [۱]. گاز شیل مخازن غیر مرسوم^۲، گاز با ذخایر بسیار بالا است. این گازها نقش مهمی را در تامین انرژی جهان ایفا میکنند [۲]. در این ذخایر، دینامیک سیالات و ارتباط متقابل آنها با سطوح با ذخایر عادی بسیار متفاوت است [۱]. فراوانی گاز شیل در مواد آلی شیل جذب می شود و با کمک روشهای شکست هیدرولیکی و جابه جایی تزریق گاز، گاز شـیل آزاد می شـود، در منافذ چند مقایسـه^۳ نقل و انتقال میکند و در نهایت در چاه بهم می پیوندند. بنابراین بهبود درک انتقال چند مقیاسی از گاز شیل می تواند منافع عملی در تخمین تولید و ذخایر گاز شیل داشته باشد [۳].

¹ Shale gas

² Unconventional gas reservoir

³ Multi scale

سطوح متخلخل با قطر حدودی بین چند نانومتر تا چندصد نانومتر در ذخایر گاز سنگ شیل پراکنده شدهاند. این امر سبب تفاوت چشمگیر این ذخایر با ذخایرگاز معمولی برحسب مقیاس تخلخل و مکانیسمهای انتقال میشود [۴]. برای آنالیز جریان گاز از طریق بستر متخلخل معمولا از قانون دارسی^۱ (۱۸۵۶) استفاده میشود که براساس آن میزان تخلیه در یک محیط متخلخل نسبتی از شیب فشار (∇p) و تراوایی (K) بوده و با ضریب لزجت (µ) گاز ارتباط معکوس دارد. میتوان قانون دارسی را به صورت رابطه ۱ نوشت:

$$U_s = -\frac{K}{\mu} \nabla p \tag{1}$$

که در آن p فشار گاز و U_s سرعت سطحی است که به صورت میزان جریان حجمی از طریق واحد سطح مقطع جامد بستر متخلخل تعریف می شود [۸]. متوسط سرعت (U) گاز در حال انتقال از مسیر منافذ با سرعت سطحی را می توان از رابطه ۲ محاسبه نمود:

$$U = \frac{U_s}{\varepsilon} \tag{(7)}$$

که در آن ع تخلخل محیط متخلخل است [۴]. یک چالش در مدل کردن و شبیه سازی گاز شیل تاثیر عدد نودسن ^۲بالا است. از انجایی که منافذ در گاز شیل در ابعاد نانو هستند جریان گاز در شیل با نودسن نسبتا بالا است از این رو باید تراوایی در معادله دارسی اصلاح شود [۴]. عدد نودسن (Kn) نسبت مسیر آزاد مولکولی^۳ به طول مشخصه^۴ در بستر متخلخل پارامتر مشخصه برای جریان در منافذ با ابعاد میکرو و نانو است. عدد نودسن به عنوان کلیدی برای اطمینان از صحت فرض پیوستگی برای تحلیل جریان گاز است. (۳)

$$Kn = \frac{\lambda}{L}$$
 (٣)
با توجه عدد نودسن جریان به ۴ دسته تقسیم می شود:

- جریان پیوستهی لزج⁴ (0.001 > Kn): میانگین مسیر آزاد در مقایسه با اندازه دهانه تخلخل یا منفذ، قابل
 اغماض و جزئی است؛ برخورد های بین مولکولی تعیین شده هستند؛ برخورد مولکول ها با دیواره های منفذ ناچیز
 می باشند؛ معادله دارسی به خوبی عمل می کند و هیچ نیروی اینرسی غالب نیست.
- جریان لغزش⁹ (0.1 < Kn < 0.1): سرعت غیرصفر در محدوده منافذ و برخوردهای مولکول با دیواره دیده می شود، متوسط مسیر آزاد مولکول های گاز در ابعاد مقیاس منفذ است.
- منطقه جریان گذار ^۷(10 < Kn < 10): شیعاع منفذ بسیار کوچک (مقیاس نانومتر) است، رفتارهای جریان پیوسیته و لغزشی هر دو اتفاق میافتد و تاثیر لایه نودسن افزایش یابد. اکثر مخازن گاز شیل در این حیطه قرار می گیرند.
- شرایط مولکولی آزاد^۸ (10 < *Kn*): در این شرایط، جریان نودست خالص روی میدهد، بعد مشخصه فضای تخلخل هم مرتبه یا کوچک تر از دامنه متوسط مسیر آزاد است؛ برخوردهای مولکول با دیواره بر برخورد بین مولکولی غلبه دارد و معادلات جریان مایع پیوسته نقض می شوند. شاره توده هر مولفه *i* برمبنای شیب چگالی مولکول ها به صورت ذیل نشان داده می شود:

- ³ Mean free path
- ⁴ Characteristic length
- ⁵ Viscous
- ⁶ Slip
- ⁷ Transition

¹ Darcy's law

² Knudsen

⁸ Free molecular regime

(۴)
که در آن
$$J_{Kn}$$
، $D_{i}e_{j}N_{n}$ ترتیب بیانگر شاره توده ، ضریب پخش نودسن و گرادیان چگالی است. این مدل مستلزم ضریب
پخش نودسن است که قابل اندازه گیری بوده یا به صورت تحلیلی بدست میآید [۵].
در بستر های گاز شیل به دلیل قطر منفذ اندک (بین ۱ تا ۲۰۰ نانومتر) مقدار عدد نودسن زیاد است. بنابراین، جریان پیوسته
به جریان گذرا و لغزنده تغییر نموده و روشهای CFD قادر به تشریح رفتار جریان نخواهند بود [۵]. به منظور برآورد میزان
جریان گاز در یک محیط متخلخل، ارزیابی تراوایی^۱ آن به طرز درست امری مهم به شمار میآید [۶]. در راستای اصلاحات
برای جریان غیردارسی، رابطه های بسیاری برای فاکتور گاز-لغزش^۲ و تراوایی ظاهری پیشنهاد شده است. در مطالعات گذشته،
مدل های تجربی متفاوتی برای تراوایی پیشنهاد شدهاند (روابط ۵، ۶ و ۷):

$$K_{B-K} = \frac{dp}{150} \frac{c}{(1-\varepsilon)^2}$$

$$K_{C-K} = \frac{dp}{180} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$$

$$K_{R-G} = \frac{dp}{5.6} \frac{\varepsilon^{5.5}}{1.05}$$
(V)

که در آن d_p متوسط قطر ذرات محیط متخلخل، K_{B-K} ، K_{B-K} به ترتیب مدل بلیک – کازنی^۳، مدل کارمن – کازنی^۴ و مدل رامپ –گاپت^۵ میباشند. مدلهای بلیک کازنی و کارمن کازنی برحسب یک محیط متخلخل به عنوان دستهای از لولههای مویین و با توجه به جریان آرام در لولهها حاصل شده است. مدل رامپ –گاپت با یافتن ارتباط میان فاکتور اصطکاک محیط متخلخل و تخلخل با استفاده از آنالیز به دستآمد [۶]. در بستر متخلخل با کاهش متوسط فشار، تراوایی گاز (K_{ap})محیط متخلخل افزایش یافته و از تراوایی مطلق آن(K_{ab})که در محدوده پیوسته با تراوایی گاز برابر است، فاصله می گیرد. کلینکنبرگ⁶ رابطه ۸ را برای تراوایی گاز معرفی کرد:

$$\frac{K_{ap}}{K_{ab}} = 1 + aKn$$

که در آن K_{ap} تراوایی سطحی، K_{ab} تراوایی مطلق و a مقدار ثابتی است که به مفروضات بستگی دارد. به علاوه شکل کلی
اصلاح مرتبه دوم به صورت ذیل است:

$$\frac{K_{ap}}{K_{ab}} = 1 + bKn + cKn^2 \tag{9}$$

- ³ Blake–Kozeny
- ⁴ Carman–Kozeny
- ⁵ Rumpf–Gupte
- ⁶ Klinkenberg
- ⁷ Direct Simulation Monte Carlo
- ⁸ Boltzmann equation
- ⁹ Molecular Dynamic

¹ Permeability

² Gas-Slippage

تمامی مولکولها در تمام اوقات به طور صریح محاسبه می گردد. برجستهترین محدودیتهای مدلهای مولکولی، زمان محاسباتی زیاد و نیاز به حافظه رایانهای بالا میباشد [۵].

برد^۱ شبیه سازی مونت کارلو را در سال ۱۹۲۰ اختراع کرد. DSMC را میتوان به عنوان روش دینامیک مولکولی (MD) ساده شده برای حل معادله بولتزمن شناخت [۷]. DSMC یک روش مبتنی برذرات اجرا شده جهت مدل سازی ذرات شبیه سازی مستقل است. هر ذره شبیه سازی شده نماد مولکول های واقعی هستند. اندازه و توده ذرات شبیه سازی شده مشابه مواد حقیقی می است. هر ذره شبیه سازی شده نماد مولکول های واقعی هستند. اندازه و توده ذرات شبیه سازی شده مشابه مواد حقیقی می است. هر ذره شبیه سازی شده می ای می است. هر ذره شبیه سازی شده منابه مواد حقیقی می می است. هر ذره شبیه سازی شده نماد مولکول های واقعی هستند. اندازه و توده ذرات شبیه سازی شده مشابه مواد حقیقی می باشد. اصل اساسی DSMC، جداسازی حرکت و برخورد در طی هر گام زمانی است. در این مقاله برای پیاده سازی موارد بورگناک⁷ و برخورد جسم کروی سخت⁷ متغیر را بررسی نموده تا برخورد مولکولی را نشان دهد. شرایط مرزی جریان در ورگناک⁷ و برخورد جسم کروی سخت⁷ متغیر را بررسی نموده تا برخورد مولکولی را نشان دهد. شرایط مرزی جریان در برگناک⁷ و برخورد جسم کروی سخت⁷ مینین شده و محدوده بازتاب دیواره انتشار برای دیوارههای جامد به کار می روند. این برانه از تابع توزیع انرژی درونی لارسن برگناک⁷ و برخورد مولکولی ان زمان دهد. شرایط مرزی جریان در ورودی و خروجی به صورت جریان آزاد تعیین شده و محدوده بازتاب دیواره انتشار برای دیوارههای جامد به کار می روند. این برامه از تابع توزیع سرعت ماکسولیانی⁷ برای تعیین شتاب و میزان ذرات ورودی به دامنه محاسباتی بهره می گیرد. در طی هر و مولکول ها برخورد می کنند و سرعت و ماکسولیانی⁷ برای تعیین می از مرحله برخورد، ای مرایط حدی حرکت نموده و با دیوارهها برامه از بابی در تمامی جهات درون فضای تخلخل برای کل گام زمانی تا رسیدن به شرایط حدی حرکت نموده و با دیواره ها مراین تا رسیدن به شرایط حدی حرکت نموده و با دیوارهها و و مای و مای و مرای و برخورد داخلی یا برخورد می کند و سرعت و موقی جهره در مای هره و مرای ها رمانه و می می می در ترخور داخلی یا برخورد داخلی عدی می شده و می از برخورد داخلی می می می در می می می می در می مرده و می می می در می می مروده از می و می می مرول و مرای از می می مراه و می مرحور در مره می مرول و مرای و می مرول و مرود مرول و مرای از می می می و درمای می می می و می می می می می

در این مقاله هدف اصلی ارزیابی میزان تراوایی دو گاز آرگون و متان در بستر گاز شیل است. به این منظور از یک مقطع از محیط سه بعدی واقعی سنگ شیل با تخلخل ۶۶ درصد و ابعاد 5 × 5 میکرومتر استفاده شده است. در نهایت نیمرخ سرعت در نودسنهای متفاوت در دو مقطع و منحنیهای تراوایی هر دو گاز مورد بررسی قرارگرفتهاست.



شكل 1: الگوريتم روش Dsmc

۲- روش بررسی

¹ Bird

² Larsen-Borgnakke

³ Hard sphere collision

⁴ Maxwellian

محیط اصلی در ابعاد 5 × 5 میکرومتر است (شکل ۲). جریانات گاز در هندسه نشان داده شده مورد مطالعه قرارگرفت. در این بررسی از واکنشهای سطحی چشمپوشی شده است. مدل کره سخت برای برخوردهای بین مولکولی در شبیه سازی جاری به کار گرفته شده است. جدول ۱ خواص مولکولهای آرگون و متان به عنوان کرههای سخت نمایش میدهد. مقدار μ برای آرگون و متان با استفاده از رابطه $\mu = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \bar{c} \lambda_{mol}$ محاسبه شده است.

	Diameter (m)	Mass (Kg)
Argon	4.17 E-10	66.3 E-27
Methane	4.83 E-10	26.27 E-27

جدول ۱: خواص مولکولی گاز های مورد مطالعه

در روابط بالا، قطر مولکولی ho ،d_m چگالی گاز و با ho = mn نشان داده شده، n چگالی عددی مولکولها، $ar{C}$ متوسط سرعت ho مروابط بالا، قطر مولکولی او $ar{C}$ ،d_m چگالی عددی مولکولها، $ar{C}$ متوسط سرعت $ar{C} = \sqrt{8K_B T}/\pi m$



شكل٢: هندسه محيط متخلخل مورد بررسي

۲-۱- تراوایی مطلق مایع

به منظور برآورد تراوایی مطلق محیط با استفاده از روش CFD، حلگر سیمپل فوم^۱، که یک منبع باز بسته نرمافزاری CFD است، استفاده شده است. تراوایی مطلق با استفاده از سرعت دارسی و اختلاف فشار بین نمای ورودی و خروجی محاسبه شد [۵].

۲-۲- تراوایی ظاهری

سه پارامتر اساسی که باید برای هر مطالعه در DSMC مورد بررسی قرار گیرند عبارتند از گام زمانی، ابعاد سلول و نسبت مولکولهای واقعی به ذرات شبیه سازی شده.

 گام زمانی: گام زمانی باید کمتر از متوسط زمان برخورد باشد. تخطی از این مقدار میتواند بر نتایج شبیهسازی تاثیرگذار باشد.

¹ Simple foam

- اندازه سلول: برای پیاده سازی مقداری کارآمد، فضا به سلول های مشابه با روش حجم محدود تقسیم شده است.
 نسبتهای مختلفی از قبیل ۸ 0.1 [8] و ۸ 0.33 [9] به عنوان مقدار بهینه گزارش شدهاند . در این تحقیق ما محدودیت حداکثر نسبت، که برابر ۸ 0.1 است را برای آزمودن دامنه وسیعی از مقادیر فشار به کار بردیم.
- تعداد مولکولهای هر ذره: براساس مطالعات قبلی، بهترین محدوده برای نسبت مولکولهای واقعی جهت ذرات شبیه سازی شده ۲۰ یا بیش تر است [۵].

 Δt این مرحله با ۲۰ مولکولهای محاسباتی در هر سلول آغاز شده و با استفاده از ۱۲ پردازشگر محاسبه می شود. گام زمانی Δt به دقت انتخاب شده تا اطمینان حاصل شود که متوسط جابجایی مولکولی در حین هر Δt از متوسط مسیر آزاد مولکولی کم تر است.

۲-۳- نتایج و بحث روی نتایج

هندسه با تخلخل ۶۶ درصد را برای گاز آرگون و متان در نودسن های ۰/۱، ۵/۰و ۱ شبیه سازی شده است. شکل ۳ نتایج استقلال از شبکه را نمایش میدهد. برای بی بعد سازی محورهای افقی و عمودی به ترتیب مقادیر بر سرعت بیشینه و طول کانال تقسیم شدهاست.



استقلال از شبکه به ترتیب ۳۰۸۸، ۳۷۷۹، ۱۲۱۷۷، ۱۴۹۸۰ سلول برای نودسن ۰/۰۱ برای گاز آرگون صورت گرفتهاست. مقادیر به دست آمده سرعت برای ۱۲۱۷۷ سلول و ۱۴۹۸۰ سلول تطابق خوبی با هم دارد و نشان دهنده استقلال از شبکه در سلول ۱۲۱۷۷ میباشد. شکلهای ۴، ۵، ۶ و۷ به ترتیب نیم رخ سرعت بی بعد شده در گاز متان و آرگون در بازه نودسن های مورد بررسی در دو مقطع A و B را نمایش میدهد. برای بی بعد سازی مقادیر سرعت در این بررسی بر سرعت بیشینه تقسیم شده است. همچنین محور عمودی نیز بر طول کانال بی بعد شده است. FDC2019 هجدهمین کنفرانس دینامیک شارهها FDC2019 مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲-۵ شهریور ۱۳۹۸





A شکل *: نیم رخ سرعت بی بعد شده در گاز متان در مقطع





شکل۶: نیم رخ سرعت بی بعد شده در گاز متان در مقطع B

در شکلهای ۴ و ۵ قابل مشاهده است با افزایش عدد نودسن مقدار سرعت لغزشی افزایش مییابد. مقدار بیشینه سرعت با کاهش عدد نودسن در هر دو گاز افزایش مییابد. از سوی دیگر با توجه سنگینتر بودن وزن آرگون نسبت به متان، مولکولهای متان سرعت بیشتری در یک نودسن را تجربه میکنند.





5E-06

شکل۹: کانتور سرعت متوسط برای گاز آرگون در نودسن ۱

شکل ۸: کانتور سرعت متوسط برای گاز متان در نودسن ۱

17

شـکلهای ۸ و ۹ به ترتیب کانتورهای سـرعت برای گاز متان و آرگون را برای نودسـن ۱ در هندسـه نمایش میدهد. کاهش سرعت در گاز آرگون نسبت به گاز متان قابل مشاهده است که به علت سبکتر بودن گاز متان نسبت به گاز آرگون میباشد.



شکل ۱۰: ضریب تراوایی بی بعد شده برحسب نودسن

شکل ۱۰ شبیه سازی داخل میکرو کانال با نسبت تخلخل ۶۶ درصد و ضریب تراوایی بی بعد شده بر حسب عددهای نودسن مختلف برای هر دو گاز آزگون و متان نمایش میدهد. برای محاسبه تراوایی ذاتی، مقادیر سرعت با حلگر سیمپل فوم به دست آمده است و تراوایی با جایگذاری در رابطه ۱۰ محاسبه شده است. در این رابطه μ لزجت دینامیکی، *U* سرعت خروجی، *ρ* چگالی و *Δ* اختلاف فشار بین ورودی و خروجی است. تراوایی ذاتی به ترتیب برای گاز آرگون و متان برابر 14-26195 و 14-16991 است.

$$K_{\infty} = \frac{\mu H U}{\rho \Delta P} \tag{(1.)}$$

مقادیر تراوایی ظاهری گاز با استفاده از حلگر dsmcFoam با استفاده از روابط زیر محاسبه شده است.

$$K_{app} = \frac{2\mu L P_{Out} V_{out}}{P_{In}^2 - P_{Out}^2} \tag{11}$$

مقادیر عدد نودسن با استفاده از رابطه ۱۲ و ۱۳ اصلاح شده است که ع مقدار تخلخل می باشد.

$$K_{\infty}^{*} = \frac{K_{\infty}}{H^{2}}$$

$$Kn^{*} = kn \times \sqrt{\frac{\varepsilon}{12K_{\infty}^{*}}}$$
(17)

با توجه به شکل ۱۰ مقادیر ضریب تراوایی به دست آمده برای گاز متان از این بررسی با دادههای محمد مرادی و همکاران [۵] تطابق خوبی را نمایش میدهد ولی ضریب تراوایی برای هر دو گاز نسبت به رابطه خطی کلینبرگ بیش از حد برآورد شده است. بالاتر بودن مقدار تراوایی مطلق در آرگون به دلیل مقدار بیشتر بودن مقدار نودسن اصلاح شده متان نسبت به آرگون در شرایط یکسان است.

۳- نتیجهگیری

dsmcFoam هدف اصلی این بررسی ارزیابی میزان تراوایی دو گاز آرگون و متان در بستر گاز شیل بود. در این پژوهش کد dsmcFoam برای شبیه سازی جریان گاز در سطوح متخلخل استفاده شد. هدف اصلی در این بررسی، پیش بینی تراوایی گاز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و رویکرد مولکولی DSMC بوده است. نتایج به دست آمده از روش DSMC مطابقت خوبی را با روابط تحلیلی موجود در مراجع را نشان دادند.

مراجع

[1] Moghaddam RN., Jamiolahmady M., 2012, Slip flow in porous media, Fuel, pp 13.

[2] Javadpour F., 2009, Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks, Journal of Canadian Petroleum Technology, vol .46, pp 16-21.

[3] Yu H., Chen J., Zhu Y., Wang F., Wu H., 2017, Multiscale transport mechanism of shale gas in micro/nano-pores, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol .111, pp 1172–1180.

[4] Yanyua Z., Dongdonga L., Xiaofeia S., Zhaoyaoa S., Dayoub S., Yulianga S., 2018, A new model for calculating the apparent permeability of shale gas in the real state, Natural Gas Industry, vol .5, pp 245-252.

[5] Mohammadmoradi P., Kantzas A., 2016, Pore-scale permeability calculation using CFD and DSMC techniques, Journal of Petroleum Science and Engineering, vol .146, pp 515–525.

[6] Kawagoe Y., Oshima T., Tomarikawa K., Tokumasu T., Koido T., Yonemura S., 2016, A study on pressure-driven gas transport in porous media:from nanoscale to microscale, Microfluid Nanofluid , vol .20, pp 162.

[7] Wang M., Li Z., 2004, Simulations for gas flows in microgeometries using the direct simulation Monte Carlo method, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol .25, pp 975–985.

[8] Mohammadzadeh A., Roohi E., Niazmand H., Stefanov S., Myong R.S., 2012, Thermal and secondlaw analysis of a micro- or nanocavity using direct simulation Monte Carlo, Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, pp 5.

[9] Oran E.S., Oh C.K., Cybyk B.Z., Direct simulation Monte Carlo: recent advances and applications, Annu. Rev. FluidMech, vol .30, pp 403–441.