

محاسبه عددی تانسور تراوایی در مخازن شکافدار

سیما جلیلی رئوف^۱، حسین معماریان^۲، محمد رضا رسایی^{۳*}، بهزاد تخم چی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده فنی دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده معدن، دانشگاه تهران

^۳ استادیار انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران

^۴ دانشیار دانشکده معدن دانشگاه تهران

*mrasaei@ut.ac.ir

(دریافت: آبان ۱۳۹۲، پذیرش: تیر ۱۳۹۳)

چکیده

توسعه مناسب مخازن هیدروکربوری شکافدار به سرشت نمایی درست شکستگی‌ها بستگی دارد. توصیف خصوصیات و شبیه سازی این دسته از مخازن هیدروکربوری به دلیل ناهمگنی و ناهمسانگردی ذاتی در پارامترهای مخزنی مانند تراوایی، بسیار پیچیده و در عین حال ضروری می‌باشد. شبیه سازی مخازن شکافدار معمولاً به روش‌های تخریل دوگانه و یا تراوایی دوگانه انجام می‌شود. در این روش‌ها شکستگی‌ها به صورت الگوهای منظم فرض می‌شوند. برای رفع این مشکل در این مطالعه روش عددی برای محاسبه تانسور تراوایی در مخازن شکافدار ارائه شده است. در این روش خصوصیات شکستگی‌ها با جهت متفاوت و الگوهای نامنظم که در طبیعت بیشتر دیده می‌شود در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور ابتدا یک شبکه شکستگی در دو بعد با توجه به مختصات ابتدا و انتها شکستگی ساخته شد، سپس با در نظر گرفتن مدل دو بعدی ریز دانه و تک فاز و در نظر گرفتن توزیعی از مشخصات شکستگی در شبکه ریز دانه و با اعمال شرایط مرزی مناسب، فشار و دبی در راستاهای مختلف محاسبه گردید. سپس با استفاده از رابطه داری المان‌های ماتریس تراوایی بدست آمد. نتایج به دست آمده از این روش با روش تحلیلی برای یک شکستگی در زوایای مختلف مقایسه شد و نشان داد که از دقت خوبی در محاسبه تانسور تراوایی برخوردار است. روش ارائه شده در محاسبه تانسور تراوایی سیستم شکستگی تصادفی که روش‌های تحلیلی در آن با محدودیت مواجه است با موفقیت عمل می‌کند.

کلمات کلیدی: مخازن شکافدار، تانسور تراوایی، شبکه شکستگی، ناهمسانگردی تراوایی، شبیه سازی جریان سیال.

۱. مقدمه

مدلسازی دقیق مخازن شکافدار و پیش بینی رفتار جریان سیال در مخازن شکافدار طبیعی یکی از مهمترین و چالش برانگیزترین موضوعات در مهندسی نفت است. دو مدل رایج برای توصیف جریان و پدیده انتقال سیال در مخازن شکافدار مدل‌های گسسته و پیوسته می‌باشد. در مدل‌های گسسته، تراوایی ماتریکس صفر در نظر گرفته می‌شود و نیاز به حجم بالایی از محاسبات پیچیده دارد. مدل تخلخل دوگانه در حالتی که شکستگی‌ها به خوبی گسترش یافته و به موازات یکی از محورهای اصلی باشند، معتبر است. مدل تخلخل دوگانه توانایی مدلسازی صحیح مخازنی که دارای تغییرات در طول، جهت و فاصله شکستگی‌ها هستند را ندارد (امیر علی، ۲۰۱۱). تانسور تراوایی روشی کارا برای ارائه تراوایی در سازندهای شکافدار است. در این روش هر بلوک از مخزن با یک بلوک همگن که دارای یک تانسور تراوایی معادل است جایگزین می‌شود.

تانسور تراوایی اولین بار توسط اسنو در سال ۱۹۶۹ برای شکستگی‌های موازی با تراوایی ماتریکس صفر، معرفی شد. وی مدلی ریاضی برای محاسبه تراوایی یک دسته شکستگی موازی و نامحدود ارائه کرد. چن و همکاران در سال ۱۹۹۹ بر اساس مدل اسنو، روشی تحلیلی برای محاسبه تراوایی معادل یک سیستم شکستگی با شکستگی‌های موازی ارائه کردند. لانگ و همکاران (۱۹۸۲) با در نظر گرفتن اتصال بین شکستگی‌ها سیستمی از شکستگی‌ها با جهت دلخواه مطالعه کردند. ادا در سال ۱۹۸۵ برای محاسبه تانسور تراوایی خط تولید-توزیع در شکستگی‌هایی با توزیع تصادفی در نظر گرفت. در روش‌های ذکر شده تراوایی ماتریکس نادیده گرفته شده است.

ناکاشیما و همکاران با استفاده از روش المان مرزی متغیر در یک محیط دارای شکستگی با توزیع یکسان مدلی برای محاسبه تانسور تراوایی ارائه دادند. لی در سال ۲۰۰۰، با معرفی روش سلسله مراتبی مدلی را برای در نظر گرفتن شکستگی‌های کوچک و بزرگ در محاسبه تانسور تراوایی ارائه کرد. تیموری در سال ۲۰۰۵، شکستگی‌های کوتاه را به عنوان تخلخل ماتریکس در نظر گرفت. وی در یک محیط دو بعدی به زبان فورترن^۱، برنامه کامپیوتری برای محاسبه تانسور تراوایی ارائه کرد.

در مطالعه حاضر تانسور تراوایی با استفاده از شکستگی‌هایی با اندازه و جهت دلخواه محاسبه شده است. برای این منظور ابتدا یک شبکه شکستگی در دو بعد با توجه به مختصات ابتدا و انتهای شکستگی ساخته شده و سپس با در نظر گرفتن مدل دو بعدی ریز دانه و تک فاز و در نظر گرفتن توزیعی از مشخصات شکستگی در شبکه ریز دانه و با اعمال شرایط مرزی مناسب، فشار و دبی در راستاهای مختلف محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از رابطه دارسی المان‌های ماتریس تراوایی موثر بدست می‌آید. در پایان نتایج بدست آمده از روش عددی توسعه یافته در این مطالعه با نتایج حاصل از روش تحلیلی، برای یک شکستگی منفرد در زوایای مختلف، مقایسه شده است.

۲. محاسبه تانسور تراوایی

¹ Fortran

قانون داری در مختصات کارتزین برای جریان سه فازی در محیط ناهمسانگرد به صورت زیر نوشته می شود:

$$Q = -\kappa \frac{A}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

$$K = \begin{bmatrix} k^{xx} & k^{xy} & k^{xz} \\ k^{yx} & k^{yy} & k^{yz} \\ k^{zx} & k^{zy} & k^{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\nabla P = \left[\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right] \quad (3)$$

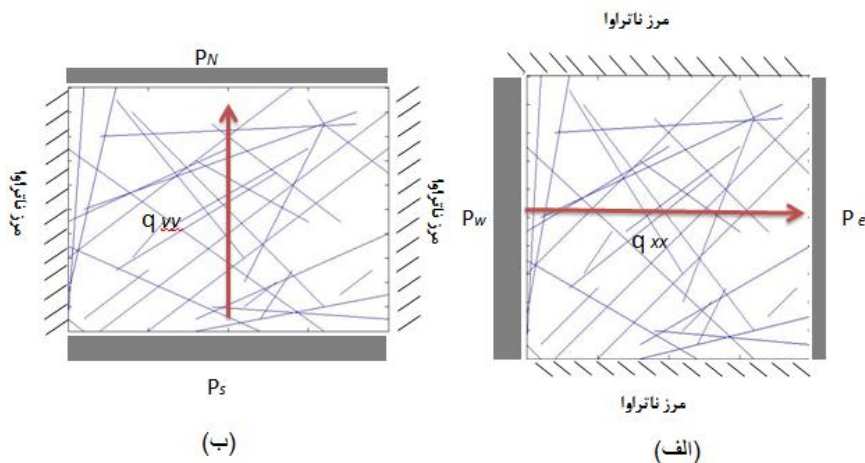
که در آن، P فشار، v سرعت، A سطح مقطع عبور سیال، μ گرانروی سیال و K تانسور تراوایی را نشان می دهد. در سیستم مختصات دو بعدی ماتریس تانسور تراوایی به صورت رابطه نمایش داده می شود.

$$\kappa = \begin{bmatrix} K^{xx} & K^{xy} \\ K^{yx} & K^{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

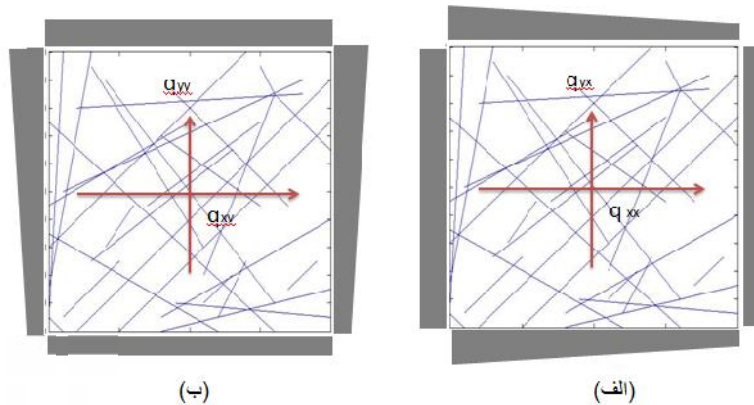
در این رابطه K_{xx} و K_{yy} عناصر قطری و K_{yx} و K_{xy} عناصر غیر قطری ماتریس تانسور تراوایی هستند. تانسور تراوایی یک ماتریس متقارن و مثبت است بنابراین، $K_{xy} = K_{yx}$ (دورلوفسکی، ۲۰۰۰).

$$K^{xx} > (K^{xy})^2 / K^{yy} > 0, K^{yy} > 0 \quad (5)$$

شکل ۱ و شکل ۲ یک شبکه شکستگی با جهت دلخواه و شرایط مرزی مناسب جهت محاسبه تانسور تراوایی را نشان می دهد. شکل ۱ شرایط مرزی به منظور محاسبه المانهای قطری تانسور تراوایی را نشان می دهد. در شکل ۲ الف نرخ جریان در جهت x ناشی از افت فشار در جهت x و نرخ جریان در جهت x ناشی از افت فشار در جهت y و در شکل ۲ ب نرخ جریان در جهت y ناشی از افت فشار در جهت y و نرخ جریان در جهت y ناشی از افت فشار در جهت x می باشد. بنابراین با استفاده از رابطه ۶ می توان تانسور تراوایی را محاسبه کرد.



شکل ۱: شرایط مرزی برای محاسبه المانهای قطری تانسور تراوایی. (الف) مقدار تراوایی معادل در جهت y با توجه به نرخ جریان در جهت y بدست می آید. (ب) مقدار تراوایی معادل در جهت x با توجه به نرخ جریان در جهت y بدست می آید.



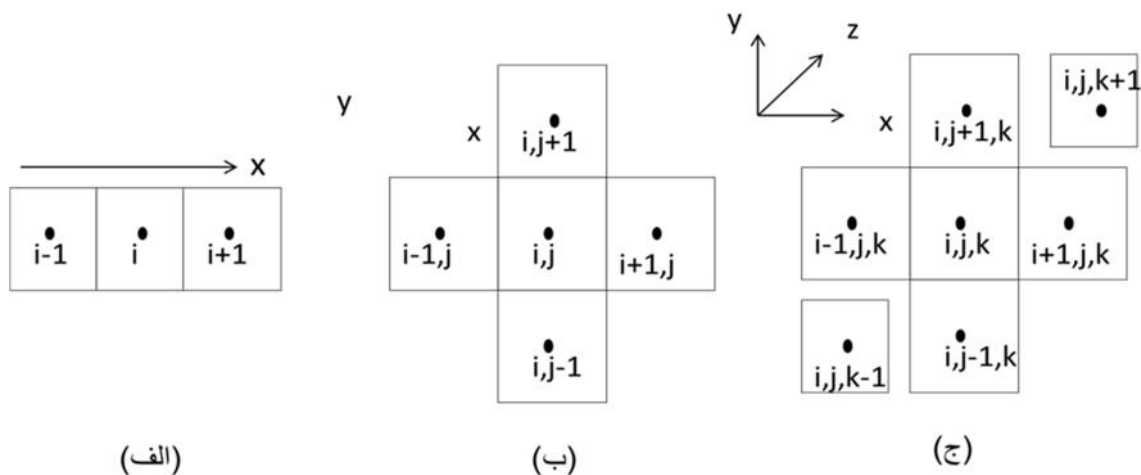
شکل ۲- شکل های الف و ب شرایط مرزی برای محاسبه المان های غیر قطری تانسور تراوایی، K_{xy} و K_{yx} را نشان می دهند.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} = \frac{\mu}{A} \times \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} \\ q_{yx} & q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta x}{\Delta p_x} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta y}{\Delta p_y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

۱.۲ معادلات جریان سیال

قوانین بقای جرم، مومنتم و انرژی می توانند رفتار سیال در محیط متخلخل را پردازش کنند. این قوانین فیزیکی همگی بصورت مجموعه ای از معادلات با مشتقات جزئی بیان شده اند که حل این معادلات بدلیل پیچیدگی که دارند از طریق روش های تحلیلی امکان پذیر نمی باشد و باید با روش های عددی آنها را حل کرد. برای حل این معادلات به روش های عددی ابتدا لازم است که قلمرو حل به تعدادی زیر قلمرو (بلوک) تقسیم شود که چنانچه معادله بقای خاصیت برای هر گرید نوشته شود در این صورت هر گرید از طریق معادله مشتق جزئی با گریدهای همسایه خود ارتباط پیدا می کند. گسسته سازی مخزن به معنای توصیف مخزن با یک سری گرید است که ویژگی، ابعاد، مرزها و مکان آنها در مخزن مشخص است. شکل ۳ گسسته سازی مخزن را در محیط یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی نشان می دهد. در این مطالعه از روش گرید مرکزی^۲ برای گسسته سازی محیط دو بعدی شبکه شکستگی استفاده شده است. سپس با استفاده از روش تفاضل محدود معادلات جریان سیال برای هر گرید نوشته شده است.

² Block centered



شکل ۳: گسسته سازی مخزن و همسایگی گرید (i, j) در حالت یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی (الف) گرید i دارای دو همسایگی در حالت جریان یک بعدی می باشد. (ب) تعداد همسایگی در حالت دو بعدی چهار همسایگی می باشد. (ج) تعداد همسایگی در حالت سه بعدی برای گرید i شش همسایگی است.

معادله گسسته شده جریان سیال تکفاز و تراکم ناپذیر به روش تفاضل محدود آدر مختصات دو بعدی به صورت معادله خطی است.

$$T_{y_{i,j-1/2}}^n [(p_{i,j-1}^n - p_{i,j}^n)] + T_{x_{i-1/2,j}}^n [(p_{i-1,j}^n - p_{i,j}^n)] + T_{z_{i,j,k-1}}^n [(p_{i,j,k-1}^n - p_{i,j,k}^n)] + T_{z_{i,j,k+1}}^n [(p_{i,j,k+1}^n - p_{i,j,k}^n)] + T_{y_{i,j+1/2}}^m [(p_{i,j+1}^m - p_{i,j}^m)] + q_{sc_{i,j}}^m = 0 \quad (7)$$

که در آن فشار گرید (i, j) در گام زمانی m می باشد. در این معادله نشان دهنده جریان ورودی (خروجی) به گرید (i, j) از چاه می باشد. در صورتیکه چاه تزریقی و یا تولیدی وجود نداشته باشد، این عبارت صفر در نظر گرفته می شود. $T_{y_{i\pm 1/2,j}}$ و $T_{x_{i\pm 1/2,j}}$ به ترتیب عبورپذیری^۴ در جهت x و y نام دارد. و از روابط بدست می آیند

$$T_{x_{i\pm 1/2,j}} = \left(\frac{k_x A_x}{x \mu B} \right) \Big|_{x_{i\pm 1/2,j}} \quad (8)$$

$$T_{y_{i\pm 1/2,j}} = \left(\frac{k_y A_y}{y \mu B} \right) \Big|_{y_{i\pm 1/2,j}} \quad (9)$$

اندیس $x_{i\pm 1/2,j}$ و $y_{i\pm 1/2,j}$ به این معنی است که عبورپذیری سیال بین دو گرید همسایه در مرز مشترک آنها محاسبه میشود. μ ویسکوزیته سیال بر حسب سانتی پواز، A_x و A_y سطح مقطع عبور جریان، B ضریب حجمی نفت با واحد حجم مخزن به حجم استاندارد و Δx و Δy ابعاد مخزن در جهت x و y است. معادلات خطی جریان برای تک تک گریدهای مخزن نوشته می شود. دستگاه معادلات بدست آمده به روش تکراری گوس سایدل تا جایی حل می شود که شرط همگرایی زیر برقرار شود.

$$\frac{p_i^n - p_{i+1}^n}{p_i^n} < 10^{-6} \quad (10)$$

³ Finite difference

⁴ Transmissibility/Transmissivity

شرایط مرزی

در مطالعه حاضر ابتدا شرایط مرزی با اختلاف فشار ثابت در امتداد مرزهای شرقی و غربی اعمال شده است و شرایط مرزی بدون جریان در امتداد مرزهای شمالی-جنوبی در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد به منظور محاسبه جریان در امتداد شمالی جنوبی شرایط مرزی بدون جریان در امتداد مرزهای شرقی غربی و شرایط مرزی فشار ثابت در جهت شمالی جنوبی در نظر گرفته شده است (شکل ۱). به منظور محاسبه المان‌های غیر قطری تانسور تراوایی از شرایط مرزی شکل ۲ استفاده شده است.

در این مطالعه تانسور تراوایی معادل بر اساس مشخصات شکستگی‌های مجزا به منظور دسترسی به نتایج با دقت بالا، محاسبه گردید. برای این منظور ابتدا یک شبکه شکستگی دو بعدی با جهت و طول متفاوت بر اساس مختصات ابتدا و انتهای هر شکستگی در محیط نرم افزاری متلب (MATLAB) ساخته شد. سپس یک مدل دو بعدی ریز دانه، به طوری که اندازه هر سلول شبکه ریزدانه برابر بازشدگی شکستگی است، در نظر گرفته شد؛ در صورتی که هر شکستگی به صورت یک مستطیل با دهانه h فرض شود، هر سلول در صورتی متعلق به شکستگی است که مرکز آن داخل یا روی محیط مستطیل باشد. سلول‌هایی که شامل شکستگی اند تراوایی برابر تراوایی شکستگی دارند و سایر سلول‌ها تراوایی ماتریکس را خواهد داشت. به این ترتیب برنامه نوشته شده قادر است تا با داشتن مختصات ابتدا و انتهای شکستگی، شبکه شکستگی متناظر را بسازد و ویژگی‌های مورد نیاز برای شبیه سازی جریان سیال هر سلول را مشخص کند.

تراوایی شکستگی بسیار زیاد است بنابراین حضور شکستگی می‌تواند تراوایی سنگ‌هایی که دارای ماتریکس با تراوایی پایین هستند را بهبود ببخشد. جریان سیال درون یک شکستگی معمولاً با قانون مکعب^۵ توصیف می‌شود (مورفی و همکاران، ۲۰۰۴).

$$k_f = \frac{h^3}{12} \quad (11)$$

h دهانه و k_f تراوایی شکستگی است. با افزایش دهانه شکستگی تراوایی شکستگی نیز افزایش می‌یابد.

۳. مدل‌سازی عددی

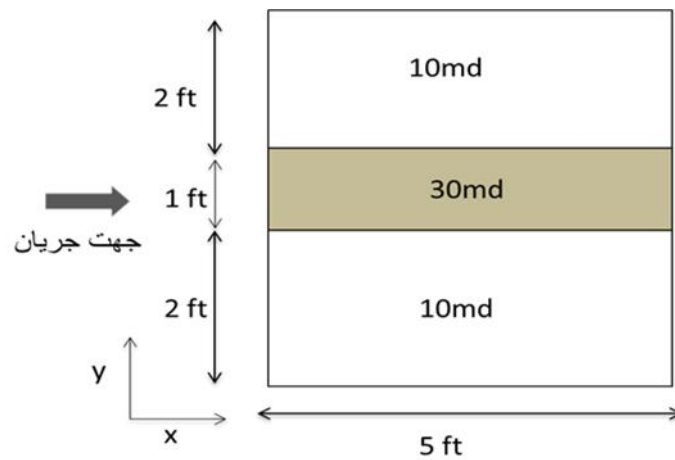
در این بخش کارایی و صحت روش عددی با چند مثال نشان داده می‌شود. در مثال اول یک سیستم متشکل از سه لایه موازی به ترتیب با تراوایی ماتریکس ۱۰، ۳۰ و ۱۰ میلی داری و ضخامت‌های ۱، ۲ و ۱ فوت ساخته شده است. لایه‌ها فاقد شکستگی می‌باشند (شکل ۴). در محاسبه عددی، این سیستم به ۲۵ گرید تقسیم شده است. ویسکوزیته سیال ۱ cp و شرایط مرزی فشار ثابت با اختلاف فشار ۱۰۰۰ psi در نظر گرفته شده است. برای محاسبه تراوایی به روش تحلیلی در جهت x از رابطه تراوایی میانگین لایه‌های موازی و در جهت y از رابطه تراوایی میانگین، لایه‌های سری استفاده شده است تراوایی معادل لایه‌های موازی و سری به روش تحلیلی به ترتیب با روابط ۱۲ و ۱۳ بدست می‌آید. جدول ۱ نتایج بدست آمده از دو روش تحلیلی و عددی را نشان می‌دهد. مقایسه بین نتایج تحلیلی و عددی در این مثال نشان می‌دهد که روش عددی توسعه یافته در این مطالعه از دقت خوبی در محاسبه تراوایی معادل برخوردار است.

⁵ Cubic law

$$k_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (12)$$

$$k_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i}} \quad (13)$$

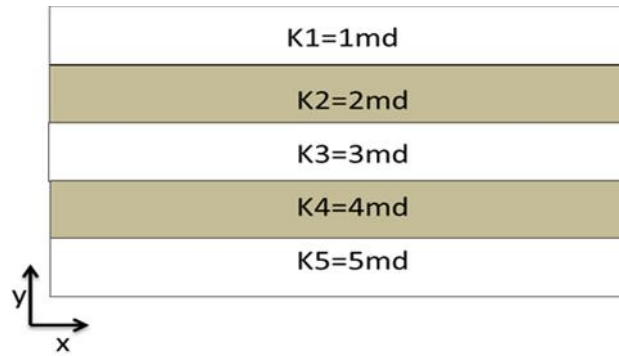
در مثالی دیگر یک سیستم پنج لایه با ضخامت یکسان به ترتیب با تراوایی ماتریکس ۱ تا ۵ میلی داری و بدون شکستگی فرض شده است (Error! Reference source not found). مدل دوبعدی به ۲۵ گرید تقسیم شده است. برای محاسبه تراوایی معادل در جهت x شرایط مرزی فشار ثابت بر روی مرزهای شرقی و غربی با اختلاف فشار ۱۰۰۰psi، و سیالی با ویسکوزیته ۱cp در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه تراوایی در جهت y مرزهای شرقی و غربی ناتراوا فرض شده‌اند، در حالیکه بر روی مرزهای شمالی و جنوبی شرایط مرزی فشار ثابت با اختلاف فشار ۱۰۰۰psi اعمال شده است. جدول ۲ مقایسه بین نتایج روش تحلیلی و عددی را برای این مثال نشان می‌دهد.



شکل ۴: مدل سه لایه ای با تراوایی لایه میانی برابر ۳۰ میلی داری

جدول ۱: مقایسه نتایج تانسور تراوایی بدست آمده از روش عددی و روش تحلیلی در مدل سه لایه ای

روش عددی	روش تحلیلی	تانسور تراوایی قطری
۲۰/۸۳۲۷	۲۰/۸۳	k_{xx}
۱/۲۴۶۹	۱/۲۴۶۸	k_{yy}



شکل ۵: مدل پنج لایه‌ای با ضخامت‌های یکسان

جدول ۲: مقایسه نتایج تانسور تراوایی بدست آمده از روش عددی و روش تحلیلی در مدل پنج لایه‌ای

روش عددی	روش تحلیلی	تانسور تراوایی قطری
۳	۳	k_{xx}
۲/۱۸۹۹	۲/۱۸۹۷	k_{yy}

در مثالی دیگر نتایج تانسور تراوایی حاصل از روش عددی با نتایج حاصل از روش تحلیلی مقایسه شد. این روش تحلیلی توسط لانگ و همکاران در سال ۱۹۹۸ به منظور اعتبار سنجی روش‌های عددی ارائه شده است. تانسور تراوایی به زاویه شکستگی‌ها بستگی دارد، بنابراین با توجه به زاویه شکستگی و مقدار تراوایی در زاویه صفر می‌توان المان‌های تانسور تراوایی را با استفاده از روابط زیر بدست آورد (شکل ۶).

$$K(\theta)_{xx} = K^1 \cos^2 \theta + K^2 \sin^2 \theta \quad (14)$$

$$K(\theta)_{yy} = K^1 \sin^2 \theta + K^2 \cos^2 \theta \quad (15)$$

$$K(\theta)_{xy} = (K_1 - K_2) \sin \theta \cos \theta \quad (16)$$

که در آن زاویه چرخش شکستگی و K_1 و K_2 عناصر تانسور تراوایی برای شکستگی افقی است.

برای مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با رابطه تحلیلی فوق، محاسبات بر روی یک شکستگی در زاویه‌های مختلف انجام گرفته است. به این منظور یک شکستگی با دهانه ۰/۴ میلی متر در یک گرید ماتریکس به ابعاد واحد با تراوایی ۲ میلی داری فرض شده است (شکل ۶). شکل ۷ توزیع فشار در این شبکه را بعد از حل معادله ۷ برای هر گرید، با استفاده از روش تکراری گوس سایدل نشان می‌دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد که با انحراف زاویه شکستگی از جهت جریان (در جهت x) درایه‌ی قطری k_{xx} تانسور تراوایی کاهش می‌یابد و k_{yy} افزایش می‌یابد. درایه غیر قطری تانسور تراوایی با تغییر زاویه شکستگی از ۰ تا ۴۵ درجه افزایش و از ۴۵ تا ۹۰ درجه کاهش می‌یابد. در زاویه ۴۵ درجه شکستگی جریان را در جهت xy انتقال می‌دهد بنابراین تراوایی در این زاویه افزایش می‌یابد.

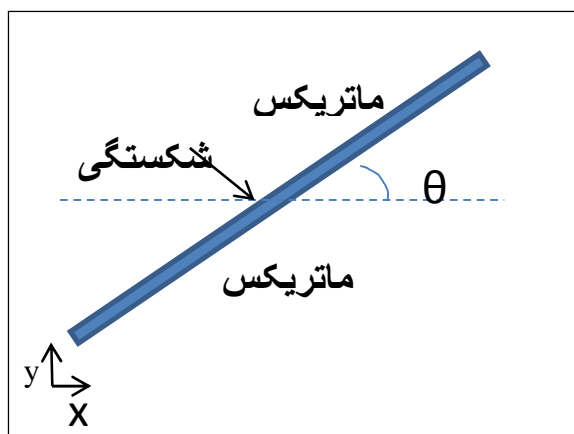
همانطور که شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند روش عددی در محاسبه تانسور تراوایی از دقت بالایی برخوردار است. بیشترین خطا در روش عددی ۴/۶ درصد است.

به عنوان یک مثال پیچیده تر، یک دسته شکستگی موازی در یک محیط دو بعدی به ابعاد 10×10 و تراوایی ماتریکس ۱ میلی داری در نظر گرفته شده است (شکل ۱۰). دهانه شکستگی ها برابر 0.4 میلی متر و گرانروی سیال ۱ سانتی پواز می باشند. سپس با دوران این دسته شکستگی مقادیر عددی تانسور تراوایی برای زوایای 15° ، 30° ، 45° ، 60° و 75° درجه محاسبه و با نتایج تحلیلی مقایسه شده اند. شکل ۱۱ نتایج عددی المان های قطری تانسور تراوایی این دسته درزه و مقایسه آن با نتایج روش تحلیلی را نشان می دهد. بیشینه خطا روش عددی حدود $6/7$ درصد است.

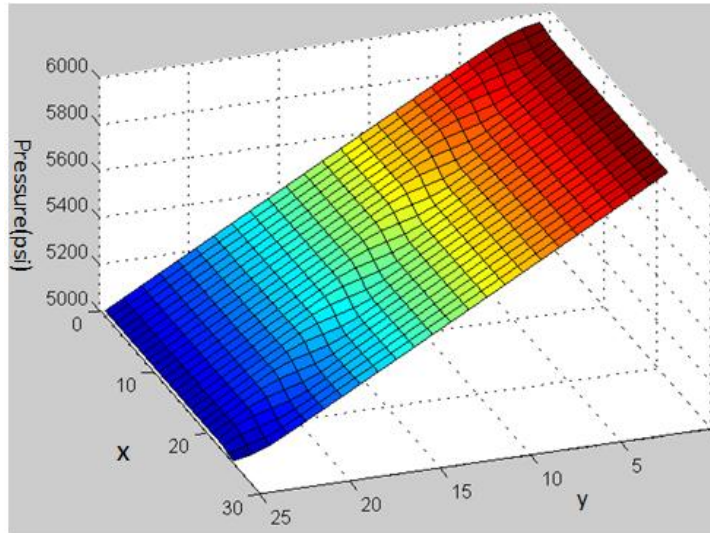
در نهایت یک شبکه شکستگی غیر موازی با 27 شکستگی شامل یک دسته شکستگی اصلی با زاویه 45° درجه و تعداد دیگری شکستگی با جهت های مختلف ساخته شده است. دهانه شکستگی ها 0.4 میلی متر، تراوایی ماتریکس ۱ میلی داری و سیالی تراکم ناپذیر با گرانروی ۱ سانتی پواز فرض شده است (شکل ۱۳). جدول ۴ مختصات ابتدا و انتهای شکستگی ها را نشان می دهد. در این جدول x_1 نشان دهنده مختصات ابتدا و x_2 نشان دهنده مختصات انتهای هر شکستگی است. پس از حل عددی شبکه فوق، ماتریس تانسور تراوایی متناظر با شبکه شکستگی به صورت زیر محاسبه شد:

$$k = \begin{bmatrix} 5.7401 & 1.9701 \\ 1.9701 & 6.0031 \end{bmatrix}$$

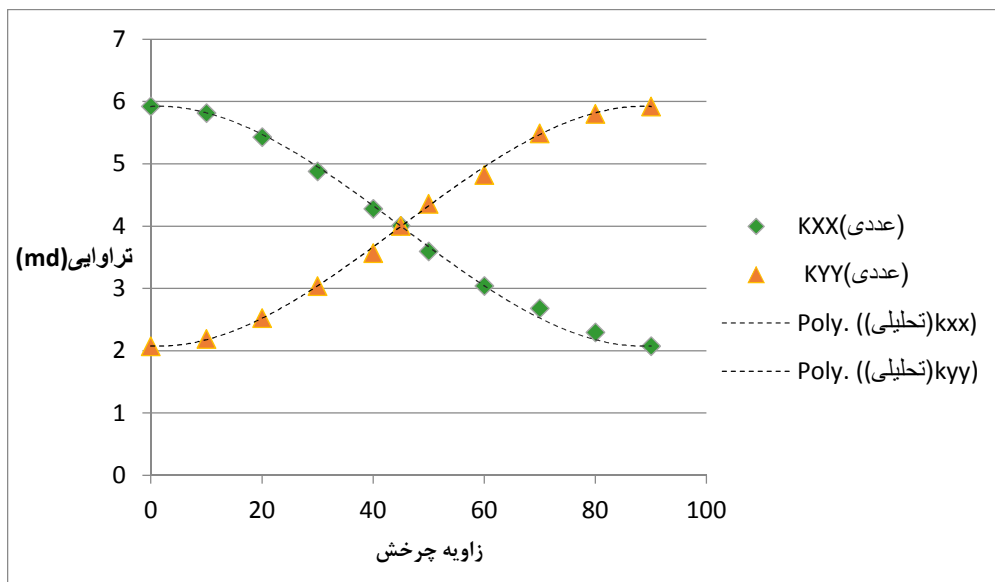
همانطور که مشاهده می شود، تانسور کامل متقارن برای شبکه شکستگی های تصادفی به صورت عددی به سرعت و بدون محدودیت خاصی قابل محاسبه می باشد. اما روش تحلیلی قادر به محاسبه تانسور فوق برای شبکه شکستگی غیر موازی (واقعی) نمی باشد.



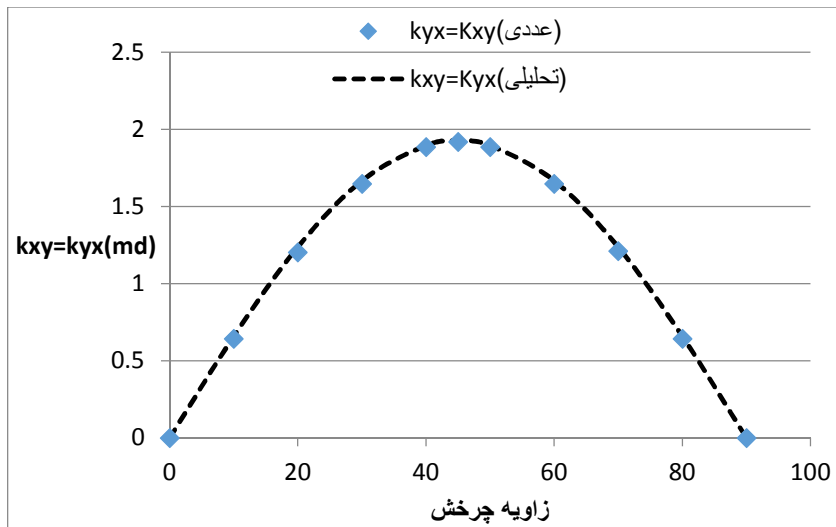
شکل ۶: یک شکستگی درون بلوک ماتریکسی چرخش یک شکستگی



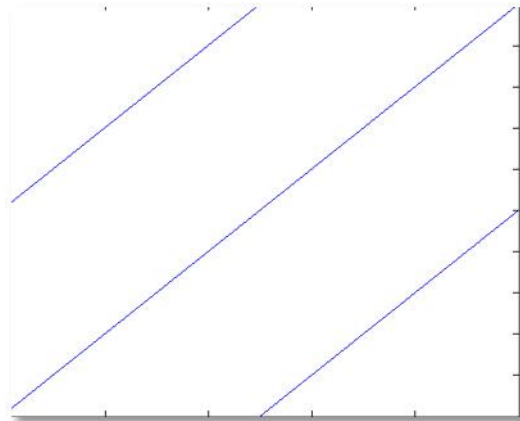
شکل ۷: توزیع فشار در شبکه ای با یک شکستگی مجزا با دهانه ۰/۴ میلی متر (سیال تکفاز تراکم ناپذیر فرض شده است).



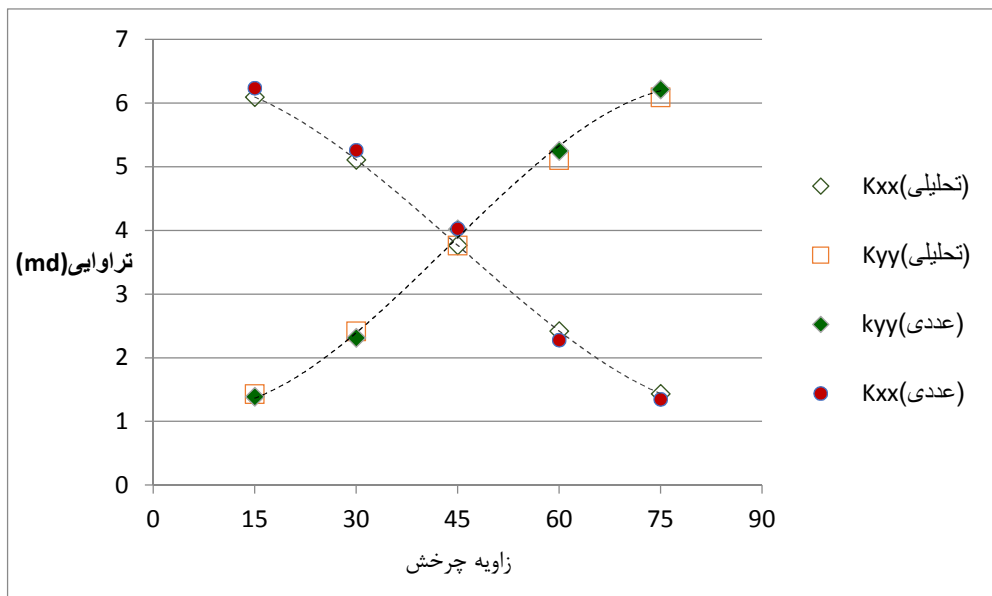
شکل ۸: مقایسه بین روش عددی و تحلیلی برای المان قطری تانسور تراوایی در جهت X و Y



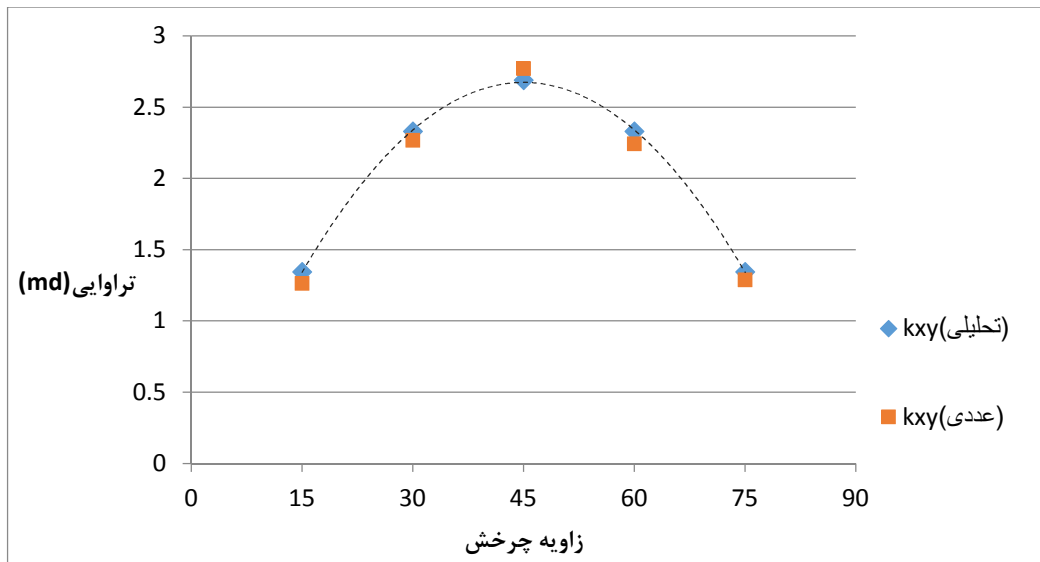
شکل ۹: مقایسه مقادیر K_{yx} و K_{xy} به روش تحلیلی و عددی



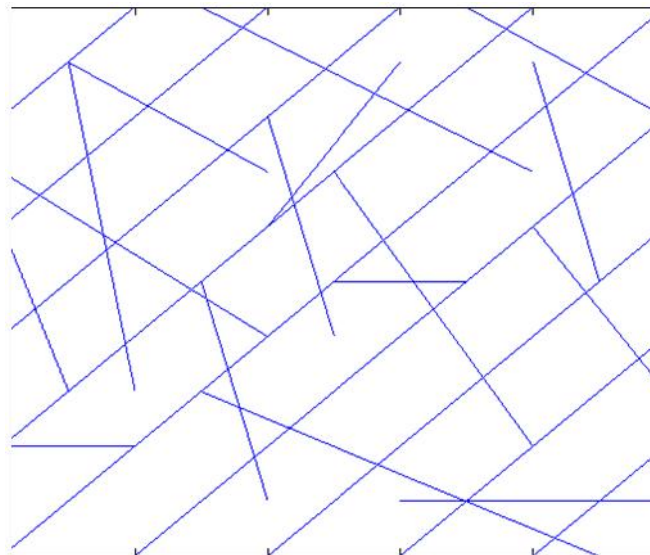
شکل ۱۰: مدل دو بعدی شبکه شکستگی با سه شکستگی موازی



شکل ۱۱: نتایج عددی المان‌های قطری تانسور تراوایی شبکه شکستگی شکل ۱۰ و مقایسه نتایج با روش تحلیلی



شکل ۱۲: نتایج عددی المان‌های غیر قطری تانسور تراوایی شبکه شکستگی شکل ۱۰ و مقایسه نتایج با روش تحلیلی



شکل ۱۳: شبکه شکستگی ساخته شده شامل شکستگی‌هایی با جهت و طول متفاوت

جدول ۳: مختصات شکستگی های شکل ۱۳

$(x,y)_1$	$(x,y)_2$	$(x,y)_1$	$(x,y)_2$
(۰,۰)	(۰,۱۰)	(۰,۴)	(۶,۱۰)
(۱۰,۰)	(۱۰,۱۰)	(۶,۰)	(۱۰,۴)
(۰,۰)	(۱۰,۱۰)	(۸,۰)	(۱۰,۲)
(۲,۰)	(۱۰,۸)	(۰,۲)	(۸,۱۰)
(۰,۲)	(۸,۱۰)	(۰,۸)	(۲,۱۰)
(۴,۴)	(۰,۷)	(۴,۶)	(۶,۹)
(۰,۲)	(۲,۲)	(۸,۶)	(۱۰,۳)
(۵,۵)	(۷,۵)	(۳,۵)	(۴,۱)
(۱۰,۱)	(۶,۱)	(۵,۷)	(۸,۲)
(۱۰,۸)	(۷,۱۰)	(۸,۹)	(۹,۵)
(۸,۷)	(۳,۱۰)	(۰,۰)	(۱۰,۱۰)
(۴,۶)	(۶,۹)	(۰,۶)	(۱,۳)
(۴,۷)	(۱,۹)	(۱,۹)	(۲,۳)
(۴,۸)	(۵,۴)		

۴. خلاصه و نتیجه گیری

تانسور تراوایی مخازن شکافدار پارامتری کلیدی در توصیف جریان سیال در اینگونه مخازن است. این پارامتر داده‌ی ورودی بسیار مهمی در شبیه سازی جریان سیال است. در حقیقت در روش تانسور تراوایی تمام شکستگی هایی که در یک بلوک قرار می گیرند با یک تراوایی معادل که بیانگر تراوایی معادل تمام آن شکستگی های موجود است، جایگزین می شود. در نتیجه روش تانسور تراوایی در مقایسه با روش هایی نظیر تخلخل دوگانه، محیط های شکافدار متخلخل مانند مخازن شکافدار با جهت و اندازه های متفاوت را با دقت بیشتری شبیه سازی می کند. در این مطالعه نتایج زیر حاصل شد:

۱. در این مطالعه یک مدل عددی برای محاسبه تانسور تراوایی در مخازن شکافدار توسعه داده شده است.
۲. مدل عددی توسعه یافته در این مطالعه نسبت به روش های دیگر توانایی محاسبه تانسور تراوایی در مخازن شکافدار با شکستگی هایی با طول و جهت متفاوت را دارد. در این روش ماتریکس تراوا فرض می شود در صورتیکه اغلب روش هایی که تانسور تراوایی را محاسبه می کنند ماتریکس سنگ را ناتراوا در نظر می گیرند.
۳. به منظور اعتبار سنجی روش عددی دو مدل لایه ای به ترتیب با سه و پنج لایه ساخته شد و تراوایی معادل بدست آمده از روش عددی با تراوایی معادل لایه های سری و موازی مقایسه شد که انطباق بسیار نزدیکی از نتایج بدست آمد. همچنین مقایسه المان های قطری و غیر قطری بدست آمده برای یک شکستگی منفرد و نیز دسته ای از شکستگی های موازی در زوایای مختلف با روش عددی و روش تحلیلی لانگ نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل عددی در محاسبه ماتریس تانسور تراوایی است.
۴. همچنین بررسی های عددی نشان دادند در حالت شبکه شکستگی های تصادفی که روش تحلیلی قادر به محاسبه

تانسور تراوایی نمی باشد، می توان از روش عددی بدون محدودیت خاصی استفاده نمود.

" هیئت تحریریه مجله از سرکار خانم دکتر میترا دادور و دکتر بهرام حبیب نیا که داوری مقاله را به عهده داشته اند، تشکر و قدردانی می نماید."

منابع

- [1] Ali, A., and M. Jakobsen, 2011, Anisotropic permeability in fractured reservoirs from frequency-dependent seismic AVAZ data, *Geophysical Prospecting*, *Journal of Geophysics and Engineering*, Published online.
- [2] Chen, M., M. Bai, et al., 1999, Permeability Tensors of Anisotropic Fracture Networks., *Mathematical Geology* 31(4), 335-373.
- [3] Durlofsky, L.J. ,1991, Numerical calculation of equivalent grid block permeability tensor for heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, 27(5): 699-708
- [4] Lee, S. H., M. F. Lough, et al., 2001, Hierarchical modeling of flow in naturally fractured formations with multiple length scales, *Water Resources Research* 37(3): 443-455.
- [5] Long, J. C. S., Remer, S., Wilson, C. R. and P. A. Witherspoon, 1982, Porous mediaequivalents for network of discontinuous fractures, *Water Resources Research*, 18(3): 645-658.
- [6] Lough, M.F., Lee, S.H. and J. Kamath, 1998, An efficient boundary integral formulation for flow through fractured porous media. *Journal of Computational Physics*, 143: 462-483.
- [7] Murphy, H., Huang, C., Dash, Z., Zyvoloski, G. and A. White, 2004 , Semianalytical solutions for fluid flow in rock joints with pressure dependent openings, *Water Resources Research*, 40, W12506, doi: 10.1029/2004WR003005.
- [8] Oda, M., 1985, Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Geotechnique*, 35(4): 483-495.
- [9] Rasmussen, T. C., 1988, Fluid flow and solute transport through three- dimensional networks of variably saturated discrete fractures, PhD dissertation, University of Arizona.
- [10] Snow, D. T., 1969, Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research*, 5(6): 1273-1289.
- [11] Teimoori, A., Tran, N. H., Chen, Z. and S.S. Rahman, 2005, Simulation of production from naturally fractured reservoirs with the use of effective permeability tensor., SPE 88620, Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, Oct. 18-20.

Numerical calculation of permeability tensor in fractured reservoirs

J. Raof, M. R.Rasaei*, H. Memarian and B. Tokhmchi

* mrasaei@ut.ac.ir

Received: November 2013, Accepted: July 2014

Abstract

Proper characterization of fracture reservoir is crucial for their sound development plan. It is however very difficult to correctly obtain various fracture reservoir properties such as permeability due to high order of heterogeneity and anisotropy within these reservoirs. Classical dual porosity and/or dual permeability models consider a regular fracture network across the reservoir. To improve the concept, we develop a numerical method for tensorial permeability calculation of blocks with random/disordered fracture distribution. We considered a 2D Cartesian fine grid in which the fractures were defined explicitly with their endpoints coordinates. Applying proper boundary conditions, single phase flow is then solved. Full tensor permeability is then obtained analytically from the calculated flow and pressure fields. The result of our method is compared well with that of the analytical models for simple fracture systems. In addition we reported the permeability tensor values of random fracture networks where no analytical solution is available.

Keywords: Fracture reservoirs, Permeability tensor, Fracture network, Permeability anisotropy, Flow simulation.