

مدلسازی جریان سیال دوفازی در مخازن شکافدار به روش دینامیک سیالات محاسباتی

مصطفی کشاورز مروجی^۱، علی رفیعی فر^۲

تهران- خ حافظ- دانشکده مهندسی شیمی- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
آدرس پست الکترونیک: moraveji@aut.ac.ir

چکیده

شبیه سازی مخازن شکافدار به دلیل پیچیدگی های ساختاری در توصیف مدل استاتیک و زیاد بودن تعداد معادلات در مدل دینامیک، همواره یکی از چالش های علم مهندسی مخزن بوده است. بیشتر مخازن شکافدار طبیعی دارای تراوایی بسیار اندک در توده سنگ بوده و شکاف ها نقش اصلی در هدایت سیال را بر عهده دارند. دقت محاسبات به همراه سرعت بالا دو فاکتور کلیدی در موفقیت هر روش عددی در تولید مدل بهینه می باشد. در این تحقیق سعی شده است از تکنیک دینامیک سیال محاسباتی برای حل معادلات بقای جرم، مومنتوم، با در نظر گرفتن معادلات نیروی مویینه با رویکرد میدان فازی استفاده گردد. در مدلسازی معمولی، نیروی مویینگی تنها به صورت اختلاف فاز غیر ترشونده و ترشونده در معادله بقای مومنتوم لحاظ می گردد، لیکن در این پژوهش سعی شده است تا اثر نیروی کشش سطحی، انرژی متوسط مخلوط شدگی و زاویه تماس نیز به طور همزمان لحاظ گردد. بررسی میدان سرعت، پروفایل توزیع فشار و زاویه تماس در هندسه شکاف ها نشان داد که حرکت مرز دو سیال تابع موازنه نیروهای وزن، ویسکوز و مویینگی در مدل می باشد. بیشترین میزان زاویه در حالت دو شکافی و بر روی دیواره خیس به میزان ۶۷ درجه بوده است. نتایج بدست آمده از این روش در مدلسازی مخازن شکافدار که مکانیسم تولید و تخلیه آن به صورت تخلیه گرانشی است، کاربرد زیادی خواهد داشت.

کلمات کلیدی

شبیه سازی مخازن شکافدار، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل میدان فازی، دیواره خیس

۱- دکترای مهندسی شیمی و دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشجوی دکترای مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مخازن شکافدار از پیچیده ترین ساختارهای زمین شناسی در علم مهندسی نفت و در عین حال یکی از عمده ترین منابع تولید هیدروکربن در سراسر جهان و بالاخص کشورمان به حساب می آیند، لذا مشخصه سازی و مدل سازی آن ها همواره محل چالش مهندسیین نفت بوده است. وجود انبوهی از شبکه شکاف ها در این گونه از مخازن، نقش بسزایی در هدایت سیالات به سمت چاه و در پاره ای موارد، ممانعت در امر تولید ایفا می نماید. شبیه سازی عددی این مخازن دشوارتر از مخازن عادی است. این پیچیدگی هم از جهت توصیف مخزن و هم به خاطر دینامیک حاکم بر آنهاست. [۱]

به دلایل زمین شناختی، بیشتر مخازن شکافدار طبیعی دارای تراوایی بسیار اندکی در توده سنگ بوده و شکاف ها نقش اصلی در هدایت سیال را بر عهده دارند. به طور معمول هیدروکربن ها در محیط متخلخل سنگ انباشته و از طریق شکاف های تراوا به چاه های تولیدی منتقل می شوند. [۲] دانش شبیه سازی مخازن شکافدار به تخمین دقیق تر ذخایر و نمودار پیش بینی تولید و در نتیجه بهینه کردن میزان بازیافت منجر خواهد شد.

در مخازن شکافدار نیروهای ویسکوز، موئینگی و گرانش نیروهای غالب هستند و موازنه این نیروها، بیانگر رفتار حرکت سیال در مخزن و میزان فاکتور تولید می باشد. برخلاف مخازن معمولی که از معادلات بقای جرم، انرژی و مومنوم برای شبیه سازی استفاده می نمایند. در مخازن شکافدار به دلیل وجود شکاف های ریز، نیروی موئینگی نیز سهم و تاثیر قابل توجهی بر تولید ایفا خواهد کرد. لذا صرف نظر کردن از نیروی وزن و موئینگی در مخازن شکافدار غیر ممکن می باشد. پس از استخراج معادلات حاکم بر حرکت سیال در محیط متخلخل، باید تکنیک مناسبی برای حل معادلات بکار برد. [۳ و ۴] یکی از این روش های مناسب، کمک گرفتن از روش دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره ای حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می شود. با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان های کوچک تر و اعمال شرایط مرزی برای گره های مرزی با اعمال تقریب هایی یک دستگاه معادلات خطی بدست می آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه مورد نظر بدست می آید. با استفاده از نتایج بدست آمده از حل معادلات می توان برآیند نیروهای وارد بر سطوح، ضرایب و متغیرهای مورد نیاز را محاسبه نمود. در دینامیک سیالات محاسباتی از روشها و الگوریتمهای مختلفی جهت رسیدن به جواب بهره می برند، ولی در تمامی موارد، دامنه مساله را به تعداد زیادی اجزاء کوچک تقسیم می کنند و برای هر یک از این اجزاء مساله را حل می کنند. [۵] اکنون روش دینامیک سیالات محاسباتی جای خود را در میان روش های آزمایشگاهی و تحلیلی برای تحلیل مسائل حرکت سیالات باز کرده است و استفاده از این روش ها برای انجام تحلیل های مهندسی امری عادی شده است. دینامیک سیالات محاسباتی بصورت گسترده در زمینه های مختلف صنعتی مرتبط با سیالات، انتقال حرارت و انتقال مواد به کمک سیال بکار گرفته می شود. از جمله این موارد می توان به صنایع خودروسازی، صنایع هوافضا، توربوماشین ها، صنایع هسته ای، صنایع نظامی، صنایع نفت، گاز و انرژی و موارد گسترده صنعتی دیگر اشاره نمود. علیرغم اینکه قدمت روش دینامیک سیالات محاسباتی در دنیا چندان زیاد نیست، این شاخه از علم در ایران و در سالهای اخیر، رشد بسیار خوبی داشته است لیکن در حوزه صنایع بالادستی نفت و گاز به دلیل تاثیر ویژه ی آن بر اقتصاد ملی، نیازمند توجه جدی تر می باشد. در این تحقیق سعی شده است تا الگوی تولید از شکاف به چاه در مخازن شکافدار مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- مدل سازی و بررسی معادلات حاکم بر مسئله

در این پژوهش سعی شده است در ابتدا مدل فیزیکی مرتبط با هندسه و شرایط حاکم بر مسئله ایجاد شده، سپس با گسترش مدل ریاضی، معادلات حاکم بر جریان سیال در مدل فیزیکی، استخراج گردد. در مرحله سوم معادلات حاکم به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی حل گردد. برای گسسته سازی معادلات در این تحقیق از روش المان محدود استفاده شده

است. برای تبیین بهتر مسئله، معادلات حاکم به دو دسته معادلات حرکت سیال و معادلات مربوط به نیروی موئینه تقسیم شده است.

۲-۱- معادلات بقای جرم و مومنتوم

استخراج معادله حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل نیازمند فهم دقیق خواص سنگ، سیال و استفاده از مفاهیم بنیادی حاکم بر جریان از جمله قانون بقای جرم، معادله حالت و معادله مومنتم می باشد. قانون بقای جرم بیان می دارد که تفاضل میزان جرم ورودی و جرم خروجی از یک المان حجمی در مخزن باید برابر با میزان افزایش خالص جرم داخل آن المان حجمی در مخزن باشد. معادله پیوستگی برای دو فاز آب (معادله ۱) و نفت (معادله ۲) بصورت زیر بیان می گردد:

$$-\nabla(\rho_w u_w) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \phi S_w) \quad (1)$$

$$-\nabla(\rho_o u_o) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_o \phi S_o) \quad (2)$$

چنانچه در معادله پیوستگی بجای سرعت های فاز آب و نفت (معادله ۳) از رابطه داری استفاده نماییم، در نهایت یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی خواهیم داشت که معادله انتشار سیال در محیط متخلخل نامیده می شود. با در نظر گرفتن اثر نیروهای وزن و موئینگی معادله نهایی برای فاز آب (معادله ۴) و نفت (معادله ۵) به صورت زیر خواهد بود.

$$u_l = -\frac{KK_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l - \gamma_l \nabla_z) \quad l = o, w \quad (3)$$

$$\nabla \left(\rho_w \frac{KK_{rw}}{\mu_w} (\nabla P_w - \gamma_w \nabla_z) \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_w S_w) \quad (4)$$

$$\nabla \left(\rho_o \frac{KK_{ro}}{\mu_o} (\nabla P_o - \gamma_o \nabla_z) \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_o S_o) \quad (5)$$

با در نظر گرفتن رابطه اشباع سیال (معادله ۶) و تعریف فشار موئینگی (معادله ۷) برای سیستم دوفازی آب و نفت در سیستم آب دوست می توان معادلات بالا را ساده سازی نمود. [۵]

$$S_o + S_w = 1 \quad (6)$$

$$P_{cow} = P_o - P_w = f(S_w) \quad (7)$$

در معادلات فوق، ϕ بیانگر تخلخل، γ وزن مخصوص، S میزان اشباع و K_r بیانگر میزان تراوایی نسبی برای هر فاز می باشد.

۲-۲- معادلات کشش سطحی و مرز

برای بیان اثر نیروی موئینه در یک شکاف ریز، باید نیروهای کشش سطحی، میان سطحی و نیروی چسبندگی مورد بررسی قرار گیرد. در یک لوله موئینه در مرز سیال و جداری لوله، نیروی چسبندگی و وزن در خلاف جهت یکدیگر عمل می کنند و در صورت غلبه نیروی چسبندگی، سیال در لوله به سمت بالا حرکت می کند. برای بیان رفتار مرز، روابط و رویکردهای متفاوتی وجود دارد که در این تحقیق از رویکرد میدان فازی (Phase Field) و رابطه کان- هیلاریاد (Cahn-Hilliard) استفاده شده است. در این روش معادلات ناویر- استوکس و کشش سطحی به طور همزمان توصیف می شوند که برای جریان آرام دوفازی به صورت ذیل می باشد. [۷۶]

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \Phi = \nabla \cdot \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \quad (۸)$$

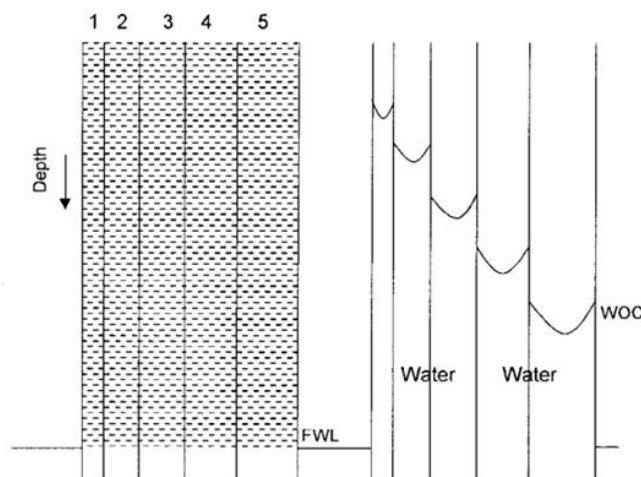
$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \Phi + (\Phi^2 - 1) \Phi \quad (۹)$$

در معادلات فوق، U معرف سرعت سیال، λ بیانگر انرژی مخلوط و γ سیالیت می باشد. همچنین Φ بیانگر ضریب بی بعد میدان فازی است که معمولاً بین ۱- و ۱ متغیر می باشد. برای ارتباط سه پارامتر سیالیت، انرژی مخلوط و ضخامت مرز (ε) با نیروی کشش سطحی (σ) از رابطه زیر استفاده می شود. [۸]

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{\lambda}{\varepsilon} \quad (۱۰)$$

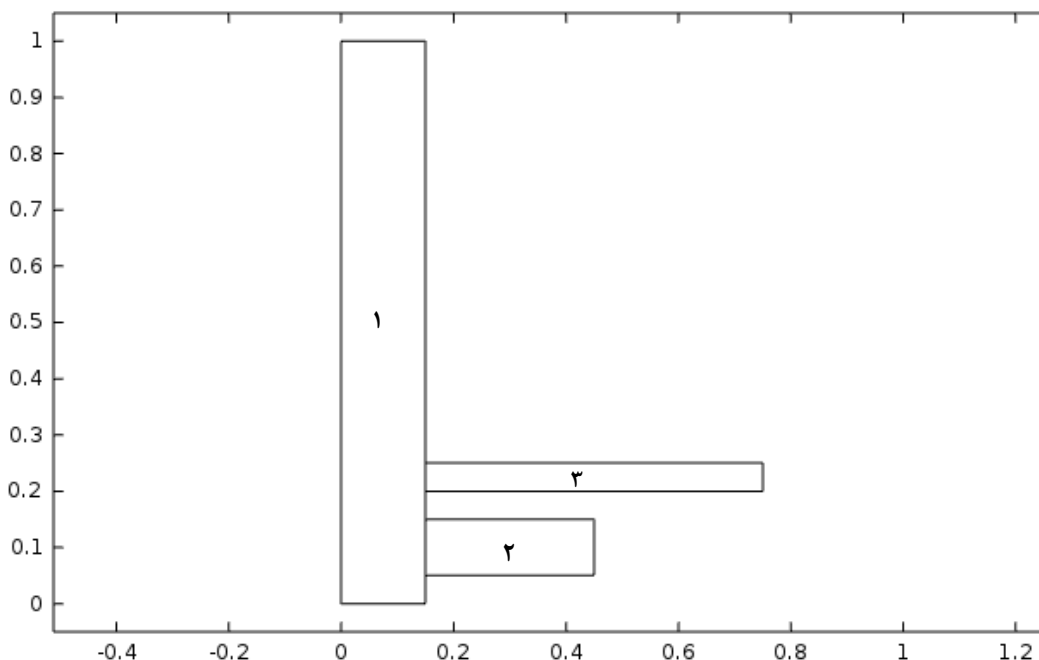
۳- هندسه و شرایط مدل سازی

برای بررسی حرکت سیال در شکاف می توان فرض نمود که شکاف از مجموعه ای لوله های موئینه یا میکرو کانال تشکیل شده است که می تواند دارای قطر های یکسان بوده یا همانند شکل ۱ دارای توزیع اندازه قطر در یک بازه مشخص باشد.



شکل ۱- مجموعه ای از لوله های موئینه با قطر های متفاوت

همانگونه که در شکل ۱ مشخص است، به دلیل زیاد بودن نیروی موئینه در شکاف های باریکتر، ارتفاع سیال نسبت به لوله های موئین با قطر بزرگتر، بالاتر می باشد. در این تحقیق سعی شده است که موازنه نیروهای موجود در مخزن در حالت افقی و عمودی در شکاف هایی با عرض و ضخامت متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. به دلیل تقارن موجود در هندسه استوانه ای، از شکل ۲ استفاده شده است.



شکل ۲- هندسه مورد مطالعه به صورت مجموعه ای از چند شکاف (ابعاد بر حسب میلی متر)

در جدول ۱ ابعاد شبکه شکاف بکار رفته در مدل آورده شده است. سعی شده است ابعاد شکاف متناسب با یک مدل واقعی از شبکه شکاف در مخازن هیدروکربوری باشد.

جدول ۱- ابعاد شکاف های مورد مطالعه

شماره شکاف	عرض (mm)	ارتفاع (mm)
۱	۰,۱۵	۱
۲	۰,۳	۰,۱
۳	۰,۶	۰,۰۵

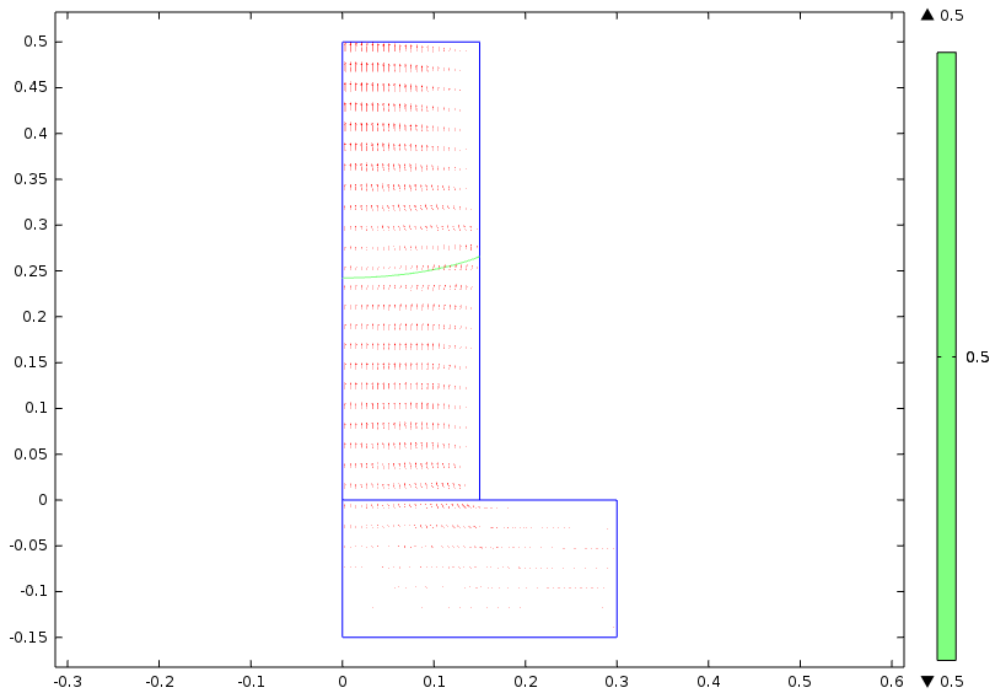
به دلیل وجود تقارن، قسمت های فوقانی دیواره ی شکاف های ۲ و ۳ و قسمت سمت راست دیواره شکاف ۱ به صورت دیواره خیس (wetted wall) در نظر گرفته شده است یعنی اثر نیروی چسبندگی و وزن بر روی آن بر اساس رویکرد میدان فازی لحاظ گردیده است و بقیه جداره ها دارای شرط بدون لغزش می باشند. سیال مایع (آب یا نفت) از درون شکاف های افقی وارد شکاف ۱ شده و در آن بالا می آید.

۴- بحث و نتایج

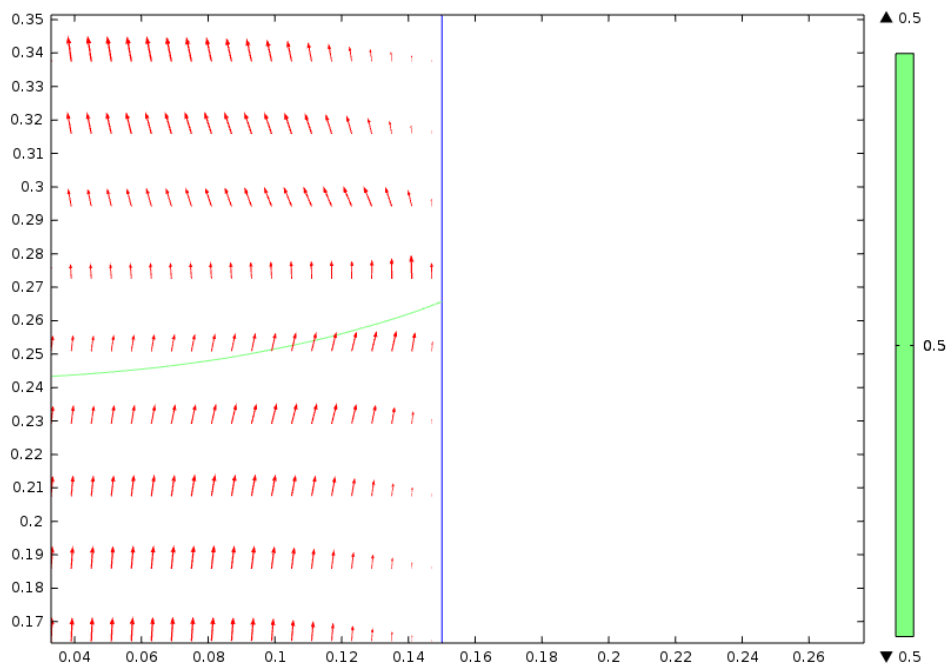
در این تحقیق پارامترهای نظیر میدان سرعت، توزیع فشار، مکان مرز و زاویه تماس در دو حالت وجود دو شکاف (شکاف ۱ و ۲) و سه شکاف (شکاف ۱ و ۲ و ۳) مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- میدان سرعت

در شکل ۳ میدان سرعت در حالت وجود دو شکاف و در شکل ۵ برای سه شکاف نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، سرعت سیال در مناطق نزدیک به دیواره خیس کاهش می یابد. زیرا نیروی چسبندگی و کشش سطحی بر روی دیواره زیاد بوده و این امر موجب کاهش سرعت سیال خواهد شد. برای بررسی وضعیت میدان سرعت در مرز دو سیال، باید به شکل ۴ توجه نمود که در واقع بیانگر مقطع مرزی شکل ۳ می باشد.

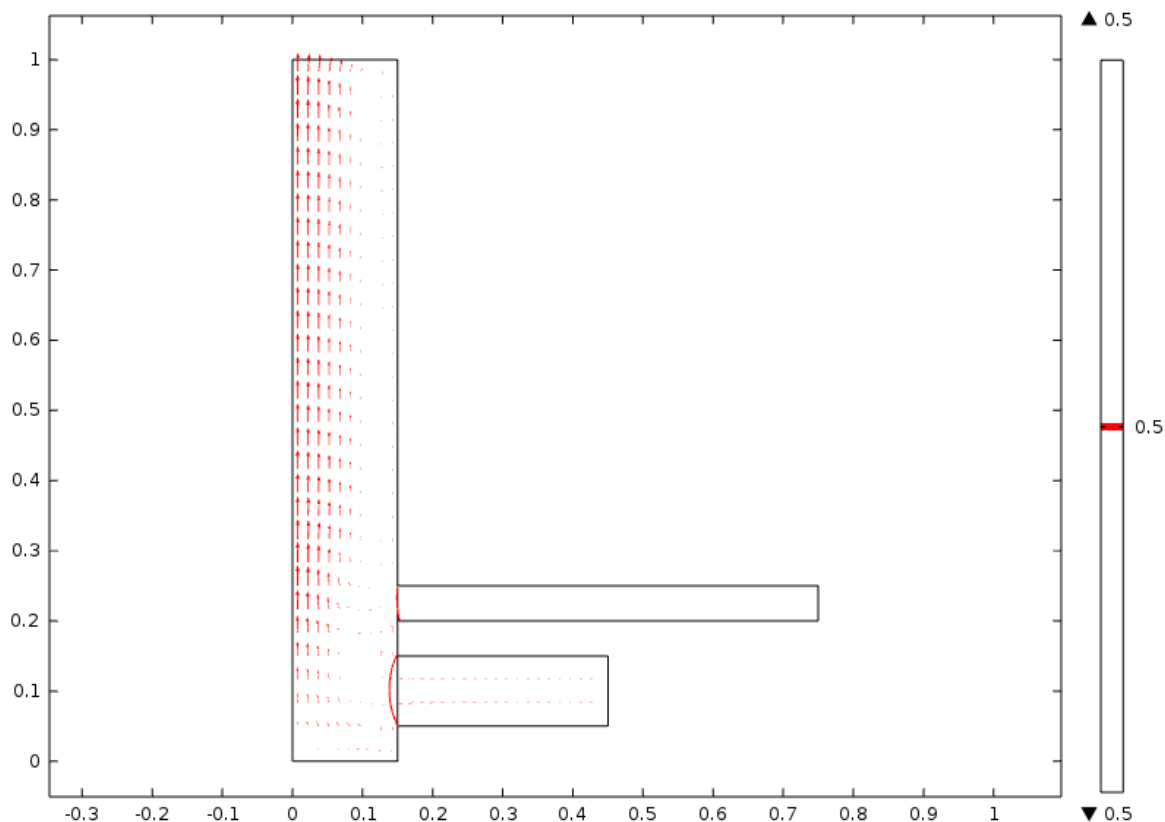


شکل ۳- میدان سرعت و موقعیت مرز در زمان ۰,۶ میلی ثانیه



شکل ۴- موقعیت مرز و میدان سرعت در زمان ۰,۶ میلی ثانیه از نمای نزدیک

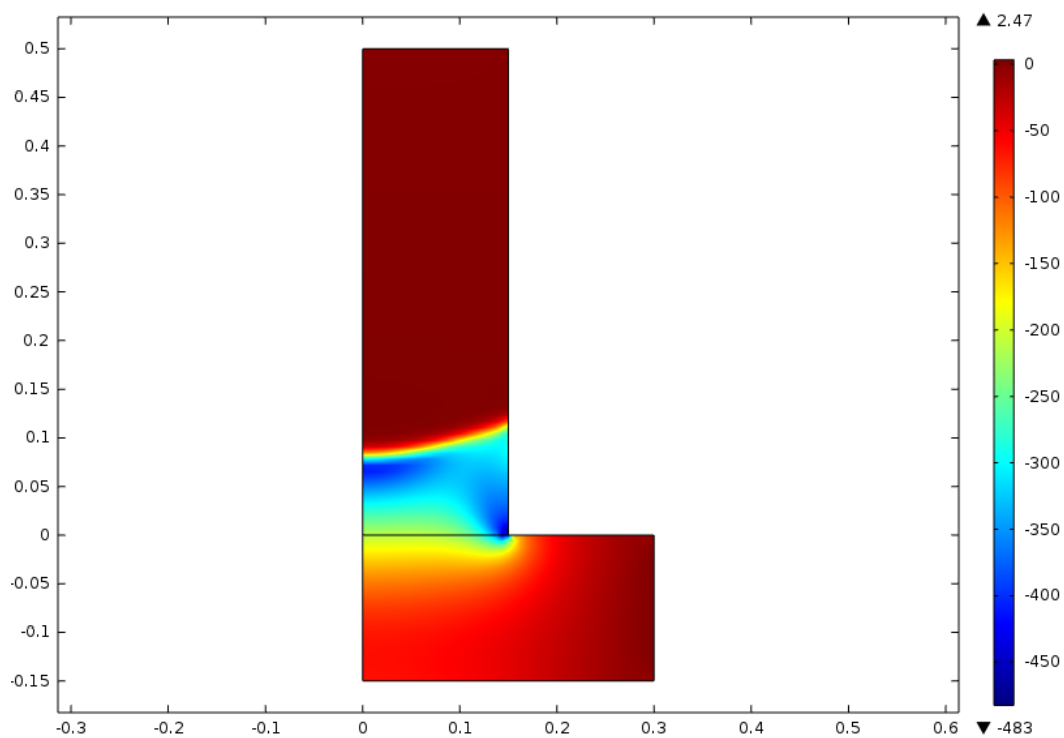
همچنین در شکل ۵ به دلیل وجود دو شکاف در طبیعتا افزایش دبی ورودی، در زمان ۰,۶ میلی ثانیه، شکاف عمودی به سرعت پر شده و اثر مرز کاهش می یابد. زیرا نیروی ویسکوز به مراتب نیروی قوی تری از موینگی می باشد. این مطلب در تغییر زاویه سطح تماس نیز قابل ملاحظه است که در ادامه می یابد.



شکل ۵- میدان سرعت و موقعیت مرز در زمان ۰,۶ میلی ثانیه با وجود دو شکاف

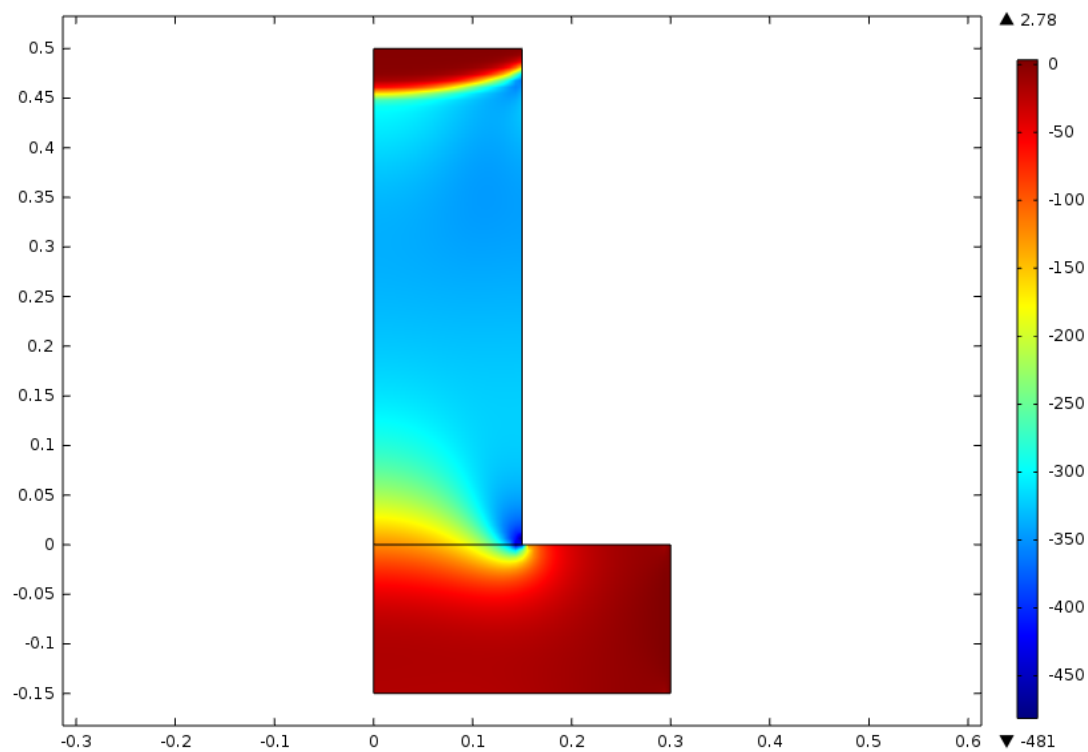
۴-۲- توزیع فشار

پروفایل توزیع فشار در شکل های ۶ و ۷ برای یک بازه زمانی از ۰,۳ میلی ثانیه تا ۱ میلی ثانیه نشان داده شده است تا حرکت مرز بین دو سیال به وضوح قابل رویت باشد. برای رویت بهتر، فرض شده است که سیال ورودی آب و سیال اولیه در لوله عمودی هوا بوده است. به دلیل وجود نیروی کشش سطحی، مرز دو سیال به صورت پروفایل سهموی حرکت نموده و با مرور زمان، لوله موین پر از آب می گردد.



شکل ۶- پروفایل توزیع فشار در زمان ۰,۳ میلی ثانیه

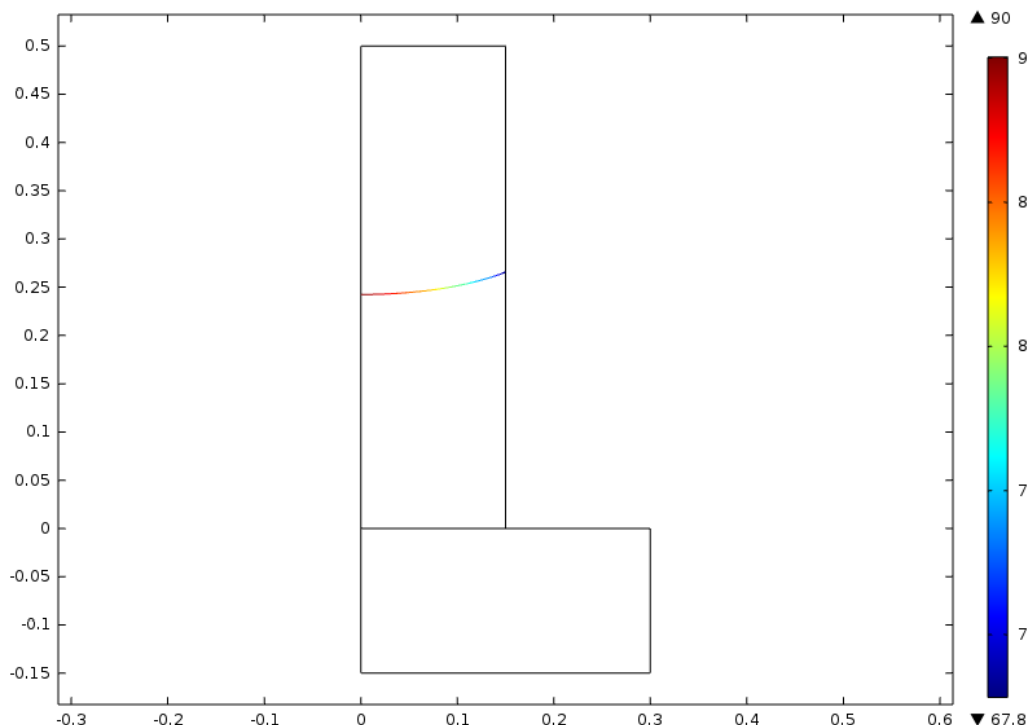
در شکل ۷ پروفایل توزیع فشار در زمان ۱ میلی ثانیه نشان داده شده است و نشان دهنده آن است که لوله موئین تقریباً از سیال ورودی پر شده است.



شکل ۷- پروفایل توزیع فشار در زمان ۰,۳ میلی ثانیه

۴-۳- زاویه تماس

زاویه تماس در مرز دو سیال و نقطه برخورد با دیواره خیس در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در قسمت سمت راست پایین شکل قابل مشاهده می باشد، زاویه تماس در زمان ۰,۶ میلی ثانیه برابر ۶۷,۸ درجه می باشد. در حالی که این مقدار در همان ثانیه برای حالت وجود دو شکاف افقی، برابر ۰,۱۷ درجه می باشد. به عبارت دیگر در حالت دوم، چون لوله مویین عمودی از سیال پر شده است، نیروی ویسکوز بر نیروی مویینه غلبه کرده و سطح تماس دو سیال تقریباً افقی شده است.



شکل ۸- زاویه تماس در نقطه برخورد مرز دو سیال و دیواره لوله مویینه در زمان ۰,۶ میلی ثانیه

۵- نتیجه گیری

در شبیه سازی مخازن شکافدار همواره باید نیروهای وزن، ویسکوز و مویینگی به طور همزمان لحاظ گردند. برخلاف مخازن معمولی که از اثر نیروی مویینگی به دلیل ناچیز بودن صرف نظر می شود، نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می دهد، که به دلیل نیروی چسبندگی در دیواره لوله ی مویین و وجود نیروی کشش سطحی در مرز دو سیال، حرکت و رشد مرز به صورت سهموی می باشد. ولی پس از پر شده لوله مویینه و همچنین افزایش و غلبه نیروی مویینه، سهم نیروی مویینگی از موازنه نیروها کاهش یافته و سطح مرز تقریباً مسطح می شود. همچنین معادلات بررسی شده در حالت جریان آرام حل شده اند که مسلماً برای جریان آشفته قابل تعمیم نمی باشند. با توجه به اینکه در مخازن شکافدار و به خصوص هنگامی که مکانیسم تولید از مخزن از نوع تخلیه بر اثر گرانش می باشد، نیروی غالب مویینگی و وزن می باشند، لذا از این روش می توان برای مدلسازی آنها استفاده نمود. همچنین بررسی میدان سرعت و پروفایل توزیع فشار نشان داد که در نزدیکی دیوار خیس سرعت سیال کاهش می یابد و این پدیده به دلیل افزایش نیروی چسبندگی بر روی جداره می باشد.

- [1] Reiss, L.H., "*The Reservoir Engineering Aspects of Fractured Reservoirs*", Gulf Pub. Co., Houston, 1980.
- [2] Tran, N.H., "*Characterization and Modeling of Naturally Fractured Reservoirs*", PhD dissertation, The University of New South Wales, School of Petroleum Engineering, Sydney, Australia, July 2004.
- [3] vanGolf-Racht, T.D., "*Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*", Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam, 1982.
- [4] Fung, L.S.K., "*Numerical Simulation of Naturally Fractured Reservoirs*", SPE 25616, SPE Middle East Oil Technical Conference, Bahrain, Apr. 1993
- [5] Versteeg, H. K and Malalasekera, W. "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics*", Pearson Education Limited, 2nd edition, 2007.
- [6] Luis Cueto-Felgueroso and Ruben Juanes, "*Macroscopic Phase-Field Model of Partial Wetting: Bubbles in a Capillary Tube*", Physical Review Letters, 6 April 2012.
- [7] Takada, N and Tomiyama, A, "*A Numerical Method for Two-Phase flow Based on a Phase-Field Model*", JSME International Journal, Vol 49, 2006.
- [8] Qunwu He and Nobuhide K, "*Phase-Field simulation of small capillary-number two-phase flow in a microtube*", Fluid Dynamics Research, Vol 40 No 7-8, 2008.