

شبیه‌سازی یکپارچه جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی با روش ترک مجزای افزوده و

پردازش تصاویر هوایی

علی حشمتی^۱، مهرداد تقی‌زاده منظری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- ali.heshmati.mech@gmail.com

۲- mtmanzari@sharif.edu

چکیده:

در نوشتار حاضر، یک فرآیند یکپارچه برای شبیه‌سازی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی ارائه شده است. این فرآیند شامل دو بخش اصلی است: (۱) تولید شبکه ترک‌ها از یک تصویر هوایی و اختصاص آن به سنگ مخزن، (۲) شبیه‌سازی جریان در مخزن با کمک روش ترک مجزای افزوده. جزئیات پردازش تصویر و نحوه تشخیص هر ترک‌ها تشریح شده و تاثیر پارامترهای موثر بر کیفیت نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی با کمک یک مسئله نمونه صحت‌سنجی شده و تاثیر خواص فیزیکی سنگ و ترک‌ها بر جریان گزارش شده است. نتایج نشان دادند که در یک مخزن دوفازی حاوی آب و نفت، افزایش بازشدگی ترک‌ها از ۰/۱۵ به ۰/۲۱ میلی‌متر باعث کاهش ۳ درصدی تولید نفت و افزایش نفوذپذیری سنگ از ۱ به ۲۰ میلی‌داری، باعث افزایش ۲۲ درصدی آن می‌شود.

واژگان کلیدی:

مخازن ترک‌دار طبیعی، روش ترک مجزای افزوده (EDFM)، پردازش تصویر، جریان دوفاز، تصویربرداری هوایی، رخنمون

* مهرداد تقی‌زاده منظری، استاد دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی شریف.

ایمیل: mtmanzari@sharif.edu (نویسنده مسئول مقاله)

An Integrated Approach for Simulation of Two-phase flows in Naturally Fractured Reservoirs using Embedded Discrete Fracture Model and Aerial Image Processing

A. Heshmati^١, M.T. Manzari^٢

١- Master Student, Department of Mechanical Engineering of Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

٢- Professor, Department of Mechanical Engineering of Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract:

This paper introduces an integrated approach for simulating two-phase flows in naturally fractured reservoirs. The proposed computational process comprises two key steps: ١) generating a representation of the fracture network from aerial images using image processing techniques, ٢) conducting two-phase flow simulations using the Embedded Discrete Fracture Method (EDFM). The reservoir contains only oil and water as immiscible incompressible fluids, with the assumption that the fracture system matches surface outcrops observations. Python libraries are utilized for image processing to convert aerial images into a fracture system defined by line segments. The effect of various tuning parameters, such as image resolution and edge detection, on the final fracture model is investigated. Once a robust fracture system representation is achieved, the reservoir geometry is defined and boundary conditions are set. The problem is solved using the Matlab Reservoir Simulation Toolbox (MRST), which includes an EDFM module for accurate analysis of naturally fractured reservoirs by incorporating detailed information, yielding precise fluid flow predictions. All types of fracture-matrix and fracture-fracture intersections and fluid exchanges between matrix and fractures are incorporated in the EDFM. Simulation results are verified against a benchmark problem, and the influence of rock and fracture physical properties on the flow field is examined. The study finds that rock permeability significantly affects fluid flow compared to fracture aperture or permeability. For instance, a ٢ percent decrease in oil production is observed when increasing fracture aperture from ٠,١٥ (mm) to ٠,٢١ (mm), while increasing the matrix permeability from ١ to ٢٠ millidarcy leads to a ٢٢ percent increase.

Keywords: Natural Fractured Reservoirs, Embedded Discrete Fracture Model (EDFM), Image Processing, Two-Phase Flow, Aerial Imaging, Outcrop

۱ - مقدمه

مخازن طبیعی ترک‌دار از پیچیده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی می‌باشند و لذا مدل‌سازی آن‌ها همواره چالشی جدی برای مهندسان مخزن بوده است [۱]. شبکه‌ی ترک‌ها در یک مخزن ترک‌دار طبیعی، به مجموعه‌ای از ترک‌ها در سنگ اشاره دارد که بر جریان سیال در مخزن تأثیر می‌گذارند. مدل‌سازی این شبکه‌ی ترک یک چالش بزرگ است، زیرا ایجاد مدلی کامل از شبکه‌ی ترک‌ها نیازمند اطلاعات گسترده از هندسه هر ترک، خواص فیزیکی ترک و تلاقی آن با سایر ترک‌ها و لایه‌های مختلف سنگی است که دستیابی به چنین اطلاعاتی بسیار پرهزینه و دشوار و اغلب غیرممکن است. به همین دلیل اغلب در مطالعات مهندسی مخزن شبکه ترک‌ها به صورت تصادفی و بر پایه مدل‌های آماری بنا می‌شود که البته در بسیاری موارد با واقعیت فاصله قابل ملاحظه‌ای دارد [۲].

معمولاً برای تعیین ویژگی‌های هندسی و فیزیکی ترک‌ها، از ترکیبی از روش‌های مختلف نظیر داده‌برداری از چاه‌ها، لرزه‌نگاری^۱، مشاهدات میدانی و ... استفاده می‌شود. یکی از روش‌های جدیدی که برای بازتولید شبکه ترک‌ها بکار می‌رود، مطالعه و تحلیل رخنمون‌ها از طریق تهیه تصاویر هوایی است. استفاده از رخنمون، روشی قدیمی در زمین‌شناسی است اما با گسترش تصویربرداری با ماهواره یا پهپاد^۲ و همچنین دانش پردازش تصویر^۳ این کار از یک فرآیند تجربی و زمان‌بر به یک فرآیند خودکار و هوشمند تبدیل شده است. باید تأکید نمود که تجربه و دانش یک زمین‌شناس مجرب همچنان می‌تواند نقش مهمی در تولید شبکه دقیق‌تری از ترک‌ها ایفا نماید. ارتباط بین تصاویر رخنمون و شبکه ترک‌ها در اعماق زمین بر پایه این منطق استوار است که چه در سنگ‌های لایه‌ای و چه در سنگ‌های غیر لایه‌ای ترک‌ها بیشتر به صورت عمودی هستند و می‌توان الگوهای مشابهی را بین ترک‌های سطح زمین و زیر زمین مشاهده کرد (اودلینگ و همکارانش [۳]). هر چند این تناظر یک به یک نیست اما در این مقاله فرض می‌شود که آنچه در سطح بعنوان خطوط ناپیوستگی در سنگ دیده می‌شود، نماینده مناسبی از وضعیت شبکه

ترک‌ها در عمق باشد. به ویژه فرض می‌شود که ابعاد و وضعیت قرارگیری و تقاطع این ناپیوستگی‌ها متناظر با ویژگی‌هایی نظیر طول ترک‌ها و نحوه تقاطع آن‌ها با یکدیگر باشد [۴].

در سال‌های اخیر از تصاویر هوایی رخنمون‌ها برای مدل‌سازی ترک‌های زیر زمین استفاده شده است. برونو و همکارانش [۵] از داده‌های رخنمون برای ترسیم هندسه شبکه ترک‌های زیرسطحی استفاده کردند. شاه و همکارانش [۶] برای بررسی مدلشان از شبکه‌ی ترکی که از مطالعه‌ی بیسدوم و همکارانش [۷] بدست آمده بود، استفاده کردند که این شبکه بر اساس عکس‌های رخنمون ساخته شده بود. گایگر و همکارانش [۸] از تصویر یک رخنمون در مراکش برای ساخت شبکه‌ی ترک‌ها استفاده کردند تا دقت شبیه‌سازی خود را افزایش بدهند. بیسدوم و همکارانش [۹] با استفاده از تصویربرداری از رخنمون‌ها توسط پهپاد شبکه‌ی ترک مربوط به سازند جان‌دایرا^۴ را تولید کردند. اکیا و همکارانش [۱۰] از همین شبکه‌ی ترک برای تحلیل جریان در مخزن استفاده نمودند.

در بسیاری از مطالعات، تکنیک‌های پردازش تصویر برای تجزیه و تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله این تکنیک‌ها می‌توان به دسته‌بندی تصاویر^۵ و استخراج ویژگی^۶ اشاره کرد. منظور از دسته‌بندی تصویر در واقع دسته‌بندی پیکسل‌های یک تصویر به گروه‌های مختلف بر اساس ویژگی‌های پیکسل‌ها (از جمله رنگ و شدت روشنایی) است. در دسته‌بندی تصویر، به هر پیکسل برچسبی اختصاص داده می‌شود. پیکسل‌هایی که ویژگی‌های مشابه دارند، با برچسب یکسان نام‌گذاری و دسته‌بندی می‌شوند. به کمک دسته‌بندی کردن پیکسل‌ها در تصویر می‌توان ویژگی‌ها یا الگوهای خاص از یک تصویر را شناسایی یا استخراج کرد [۱۰]. استخراج ویژگی در مطالعات زمین‌شناسی، کاربردهای گوناگونی مانند تشخیص اندازه، شکل، جهت‌گیری و توزیع ساختارهای زمین‌شناسی (از جمله گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها یا ترک‌ها) دارد. در استخراج ویژگی از تکنیک‌هایی مانند لبه‌یابی استفاده می‌شود [۱۰] به عنوان مثال واسوکی و همکارانش [۱۱] از

^۵ Jandaira Formation
^۶ Image Classification
^۷ Feature Extraction

^۱ Well Log Analysis
^۲ Seismic Methods
^۳ Drone
^۴ Image processing

روش‌های لبه‌یابی، برای نقشه برداری و شناسایی ویژگی ساختارهای زمین‌شناسی (از جمله گسل‌ها و ترک‌ها) استفاده کردند.

پس از تولید هندسه شبکه ترک، لازم است خواص فیزیکی هر ترک شامل نفوذپذیری و بازشدگی^۱ آن مشخص شود و به ترک مورد نظر اختصاص یابد. این فرآیند نیز معمولاً با عدم قطعیت زیاد همراه است و در یک شبکه بزرگ از ترک‌ها نیاز به سعی و خطای زیاد دارد. معیار اصلی برای مناسب بودن انتخاب این خواص، نزدیک بودن رفتار مدل ساخته شده از نظر جریان سیال به مقادیر ثبت شده در چاه‌های تولیدی یا تزریقی مخزن واقعی است، فرایندی که به تطبیق تاریخیچه^۲ مشهور است.

چالش بعدی شبیه‌سازی دینامیکی جریان در یک مخزن ترک‌دار طبیعی است. بدلیل پیچیدگی هندسه ترک‌ها، روش‌های سنتی شبیه‌سازی مخزن جزئیات ترک‌ها را لحاظ نمی‌کردند و تنها با کمک مدل‌های تقریبی دو-محیطی^۳، اندرکنش سنگ و ترک با یکدیگر را تقریب می‌زدند. در میان این مدل‌ها، مدل تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه^۴ کامل‌ترین مدل کاربردی محسوب می‌شود. البته یک چنین مدلی دوباره نیاز به تنظیمات خاص دارد و معمولاً سعی می‌شود با کمک داده‌های چاه‌های تولیدی، تطبیق تاریخیچه صورت گیرد و مدل به واقعیت مخزن نزدیک شود.

در کنار مدل دو-محیطی، مدل ترک مجزا^۵ تلاش می‌کند با محسوب کردن جزئیات هندسی و فیزیکی هر ترک تاثیر آن را بر جریان سیال لحاظ نماید. این مدل در مقایسه با مدل قبلی پر هزینه بوده و معمولاً برای مسائل کاربردی غیر قابل اجرا است. در سال ۲۰۰۸ لی و لی [۱۲] مدل ترک مجزای افزوده^۶ را بعنوان یک جایگزین مناسب برای دو مدل دیگر معرفی کردند. در این مدل هندسه همه ترک‌ها با جزئیات کامل در هندسه مخزن گنجانده می‌شود ولی بدلیل روش عددی بکار رفته برای شبیه‌سازی جریان، هزینه محاسباتی بر مراتب کمتری از مدل ترک مجزا دارد. البته این مدل هنوز از مدل تقریبی دو-محیطی پرهزینه‌تر است.

بر خلاف روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه که در آن ترک بعنوان یک محیط پیوسته همپوشان با ماتریس در سرتاسر ناحیه حل پخش می‌شود، در روش EDFM هندسه هر ترک بطور دقیق و مجزا لحاظ می‌شود. بنابراین در روش EDFM ترک‌ها با ماتریس و در صورت تلاقی با یکدیگر تبادل جریان می‌کنند، در حالی که در روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه، ترک‌ها دیگر هویت خود را از دست می‌دهند و هر سلول از محیط ترک تنها با سلول متناظر از ماتریس تبادل جریان دارد. در ضمن بر خلاف روش EDFM که خواص فیزیکی ترک (نظیر نفوذپذیری و باز شدگی) را لحاظ می‌کند، روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه از مقادیر متوسط‌گیری شده تخلخل و نفوذپذیری برای ترک استفاده می‌کند که دقت روش را کاهش می‌دهد. بزرگترین مزیت EDFM اما عدم نیاز این روش به تنظیم پارامترهایی نظیر ضریب شکل است که نقش کلیدی در روش تخلخل دوگانه-نفوذپذیری دوگانه ایفا می‌کند.

در سال‌های اخیر اصلاحات متعددی بر روی مدل EDFM انجام شده است تا قابلیت‌های آن را افزایش دهد. معین‌فر و همکارانش [۱۳]، [۱۴]، توانایی مدل‌سازی ترک‌های شیب‌دار با زاویه دلخواه را به مدل افزودند. همچنین وانگ و همکارانش [۱۵] برای در نظر گرفتن ترک‌های با شکل‌های دلخواه در هندسه سه-بعدی، یک الگوریتم محاسباتی کارآمدتر را ارائه دادند. الگوریتم آن‌ها (۳D-EDFM) به طور کلی قادر به بررسی تعداد دلخواه ترک‌های سه‌بعدی با انواع شیب، شکل هندسی، انحنا و نحوه‌ی اتصال ترک‌ها به یکدیگر است. مدل اولیه EDFM سازگاری کمی با مخازن با شکل هندسی نامنظم دارد، هر چند تقریباً تمام مخازن دنیا از این نوع هستند. ژانگ و شنگ [۱۶] توانستند مدل را بر روی شبکه بی‌سازمان با سلول‌های چهار گوش توسعه دهند و مدل خود را (UnQ-EDFM)^۷ نامیدند. این مدل علاوه بر افزایش سازگاری رویکرد EDFM با مخازن با شکل هندسی نامنظم، از دقت بالاتر و هزینه محاسباتی کمتر برخوردار است. استفاده از مدل EDFM نشان داده است که در مواردی که نفوذپذیری ترک‌ها کمتر از سنگ باشد، مدل دقت پایینی دارد. برای رفع این

^۵ Discrete fracture model

^۶ (EDFM) Embedded Discrete Fracture Model

^۷ Unstructured Quadrangular Grid-based Embedded

Discrete Fracture Model

^۱ Aperture

^۲ History matching

^۳ Dual continuum

^۴ Dual porosity-dual permeability model

مشکل تنه و همکارانش [۱۷] مدل ترک مجزای افزوده مبتنی بر تصویرسازی^۱ را توسعه دادند. آن‌ها الگوریتمی را پیاده کردند که در آن قابلیت انتقال ماتریس (سنگ)، مطابق با نفوذپذیری شبکه‌های ترک‌های همسایه، اصلاح شود. اولوروده و همکارانش [۱۸]، یک الگوریتم سه بعدی را برای pEDFM ارائه کردند که قابلیت مدل‌سازی ترک‌ها را در هر راستای دلخواه در فضای سه‌بعدی فراهم می‌کند. یکی دیگر از ضعف‌های مدل اولیه EDFM این بود که در شبیه‌سازی مخازن با نفوذپذیری بسیار پایین^۲ دچار خطای زیادی می‌شود. اولوروده و رشید [۱۹]، رویکرد tEDFM را برای غلبه بر این مشکل ارائه کردند. به هر حال، در سال‌های اخیر گرایش به رویکرد EDFM برای شبیه‌سازی جریان در مخازن ترک‌دار رو به افزایش است. از جمله‌ی این مطالعات می‌توان به مطالعاتی نظیر رن و همکارانش [۲۰]، شکبیا و همکارانش [۲۱] و جیانگ و همکارانش [۲۲] اشاره نمود.

در این مقاله از نسخه a-2023 نرم‌افزار منبع باز MRST^۳ که در محیط نرم‌افزار متلب توسعه یافته است، برای شبیه‌سازی جریان در مخزن استفاده می‌شود. این نسخه دارای قابلیت حل مسائل با مدل EDFM است و به علاوه انواع مدل‌های جریان تک فاز و چند فاز و مدل‌های ترکیبی و حرارتی را شامل می‌شود. این نرم‌افزار بطور گسترده توسط پژوهشگران مختلف در دنیا بکار گرفته شده و آزمایشات عددی زیادی را با موفقیت گذرانده است.

در پژوهش حاضر، از تصاویر هوایی از رخنمون‌ها برای مدل‌سازی هندسه‌ی مخزن ترک‌دار استفاده می‌شود. استفاده از این تصاویر سبب می‌شود تا ساختار ترک‌ها با دقت بهتری بازسازی شوند. این درحالی است که تاکنون از داده‌های حاصل از رخنمون‌ها و رویکرد EDFM به صورت همزمان استفاده نشده است. همچنین، یک الگوریتم و نرم‌افزار پردازش تصویر برای به دست آوردن شبکه ترک‌ها توسعه داده شده است که با نرم‌افزار MRST نیز سازگار است. به کمک این ابزار می‌توان تاثیر پارامترهای مختلف پردازش تصویر را بر دقت بازسازی شبکه ترک‌ها و در نتیجه بر شبیه‌سازی جریان در مخزن بررسی نمود.

^۱ Projection-based EDFM (pEDFM)
^۲ Tight reservoirs

در ادامه، ابتدا الگوریتم پردازش تصویری توسعه یافته شده برای مدل‌سازی مخزن توضیح داده می‌شود. سپس، شبیه‌سازی جریان در ترک و فرضیات و طرز کار روش عددی EDFM شرح داده می‌شود. در بخش نتایج، اثر پارامترهای موثر در پردازش تصویر و خواص فیزیکی سنگ و ترک بر شبیه‌سازی جریان در مخزن بررسی می‌گردد.

۲- مدل‌سازی مخزن

در این بخش ابتدا روش تولید هندسه شبکه ترک‌ها از تصاویر هوایی بدست آمده از رخنمون‌ها تشریح شده و سپس با افزودن شرایط مرزی مناسب و قرار دادن چاه‌های (تولید یا تزریق) به این هندسه، مدل استاتیکی مخزن ساخته می‌شود. در ادامه فرمول‌بندی و الگوریتم تحلیل دینامیکی مخزن با کمک روش EDFM توضیح داده می‌شود.

۲-۱- تولید هندسه ترک‌ها با پردازش تصویر

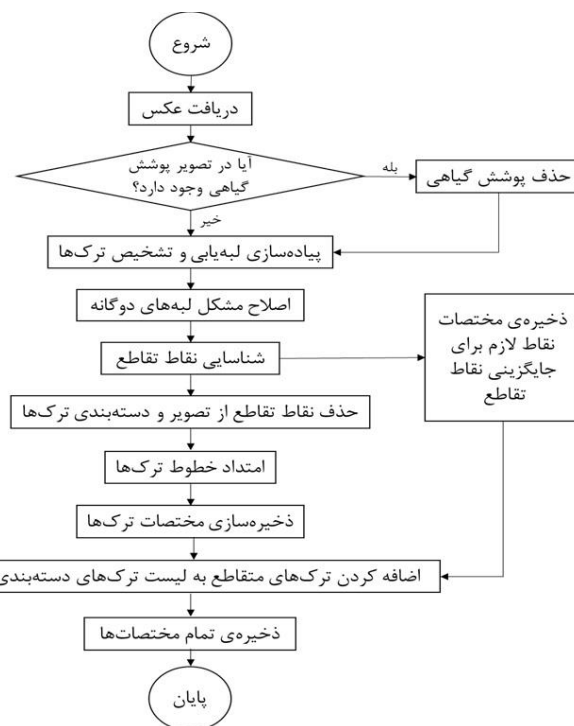
در این بخش فرآیند تولید شبکه ترک‌ها از تصاویر هوایی بدست آمده از یک منطقه مشخص تشریح می‌شود. در تولید عکس‌های هوایی عواملی نظیر کیفیت تصویر، وجود موانع طبیعی مثل پوشش گیاهی [۴] و وجود سایه‌ها می‌توانند بر نتیجه نهایی تاثیر زیادی بگذارند. لذا پس از تهیه عکس‌های هوایی، لازم است که فرآیند پردازش تصویر روی آن‌ها انجام پذیرد تا در حد امکان تاثیر این عوامل حداقل شود. باید پذیرفت که علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در علم پردازش تصویر، هنوز در موارد زیادی کسب نظر یک کارشناس زمین‌شناسی و انجام اصلاحات دستی ضروری می‌شود [۱۱]، [۲۳]. در ادامه این بخش، مراحل لازم برای آماده‌سازی شبکه ترک‌ها از تصاویر هوایی تشریح می‌شوند. شکل ۱ الگوریتم پردازش تصویر بکار رفته در این مقاله را نشان می‌دهد. کد پردازش تصویر به زبان برنامه‌نویسی پایتون و با استفاده از کتابخانه‌های اوپن‌سی‌وی [۲۴] و سایکیت‌ایمیج [۲۵] توسعه داده شده است.

^۳ MATLAB Reservoir Simulation Toolbox

دو آستانه‌ی بالا و آستانه‌ی پایین^۳ (که این مقادیر باید با توجه به تصویر ورودی توسط کاربر انتخاب شوند) استفاده می‌کند. در نتیجه استفاده از این الگوریتم، تصویر اولیه به یک تصویر باینری تبدیل می‌شود که در آن لبه‌ها به مقداری مخالف با صفر و سایر تصویر (یا پس‌زمینه) به مقدار صفر تبدیل می‌شوند. هنگامی که یک ترک در تصویر دیجیتال به کمک تکنیک لبه‌یابی شناسایی می‌شود، به علت ضخامت ترک در تصویر دارای دو لبه خواهد بود. به عبارت دیگر الگوریتم تشخیص لبه ممکن است آن را بصورت دو خط مجزای کنار هم تشخیص دهد که این مشکل معمولاً به عنوان پیدایش لبه‌های مضاعف یا لبه‌های دوگانه شناخته می‌شود. برای حل این مشکل، از روش‌های مورفولوژی^۴ استفاده می‌شود تا بتوان دو لبه را به یک لبه تبدیل نمود. در این مرحله بخصوص از یک عملیات مورفولوژی به نام بستن^۵ (تابع morphologyEx در کتابخانه‌ی پایتون اوپن‌سی‌وی) برای بستن شکاف‌های بین دو لبه استفاده می‌شود. پس از اتصال مجدد دو لبه، لازم است که ضخامت هر ترک تنها به یک پیکسل محدود شود. برای این کار از یک عملیات مورفولوژی دیگر به نام اسکلت‌سازی^۶ (تابع skeletonize در کتابخانه‌ی پایتون سایکیت ایمیج) استفاده می‌شود. این مرحله بسیار مهم است چرا که اتصال ترک‌ها به یکدیگر نقش مهمی را در جریان سیال ایفا خواهد کرد.

برچسب‌گذاری و ذخیره‌ی مختصات ترک‌ها

پس از مشخص شدن محل ترک‌ها لازم است آن‌ها را دسته‌بندی و ساده‌سازی کرد تا بتوان از آن‌ها به عنوان داده‌ی ورودی برای مدل دینامیکی مخزن استفاده نمود. برای این منظور از روش‌های شناسایی منطقه^۷ در پردازش تصویر استفاده می‌شود. یکی از روش‌های متعدد برای شناسایی منطقه، برچسب‌گذاری هر منطقه (با هر مرز) با یک عدد صحیح منحصر به فرد است. در برچسب‌گذاری بکار رفته در این مقاله از برچسب‌گذاری ۸ همسایه‌ای استفاده شده است [۱۰]. در این روش ممکن است دو برچسب متفاوت در کنار یکدیگر قرار بگیرند. این مساله به دلیل وجود منحنی‌های U شکل ممکن است رخ بدهد که به دلیل ماهیت ردیف به ردیف بررسی شدن تصویر، اتفاق می‌افتد.



شکل ۱: الگوریتم پردازش تصویر برای شناسایی ترک‌ها

حذف پوشش گیاهی

در ابتدا، پوشش گیاهی در تصویر به کمک یک ماسک رنگ فیلتر کننده‌ی رنگ سبز، شناسایی و از تصویر حذف می‌شوند. در مرحله بعد لازم است تصویر این مناطق خالی شده از پوشش گیاهی بازسازی گردد. در این پژوهش، از الگوریتم بازسازی تصویر^۱ که توسط تلیا^۲ معرفی شده [۲۶] برای بازسازی پوشش گیاهی حذف شده از تصاویر هوایی استفاده شده است. این الگوریتم، بر اساس یک معادله دیفرانسیل مشتقات جزئی است که انتشار اطلاعات از مناطق شناخته شده به مناطق ناشناخته یا حذف شده را مدل می‌کند.

شناسایی ترک‌ها و حذف لبه‌های مضاعف

در این مطالعه، از الگوریتم تشخیص لبه برای شناسایی ترک‌ها استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تشخیص لبه، روش کنی [۲۷] است که با حفظ ویژگی‌های اصلی تصویر، زوائد و نویزها را حذف می‌کند. الگوریتم کنی از یک فیلتر گوسی، همراه با

^۵ - Closing
^۶ Morphological skeleton
^۷ Region identification

^۱ Image inpainting
^۲ A. Telea
^۳ Upper threshold and lower threshold
^۴ Morphology

در این حالت، جفت برچسب‌ها به عنوان معادل یکدیگر ذخیره می‌شوند. از طرف دیگر، ممکن است به خاطر اتصال دو ترک با یکدیگر، به دو ترک متفاوت یک برچسب اختصاص یابد. برای رفع این مشکل با حذف نقاط تقاطع دو خط می‌توان آن‌ها را به پاره‌خط‌های مجزا از یکدیگر تبدیل کرد و سپس ترک‌ها را برچسب‌گذاری نمود. حذف نقاط تقاطع ترک‌ها به ساختار شبکه‌ی ترک‌ها آسیب می‌رساند و بنابراین لازم است آن‌ها را مجدداً به عنوان ترک به لیست مختصات ترک‌ها اضافه نمود. در بخش بعدی نحوه‌ی تشخیص محل تلاقی ترک‌ها و مختصات جایگزین این نقاط شرح داده می‌شود.

پس از برچسب‌گذاری تمام پاره‌خط‌ها (ترک‌ها) و حذف نقاط تلاقی ترک‌ها، مختصات پیکسل‌های تمامی پاره‌خط‌ها (ترک‌ها) ذخیره می‌شوند. مختصات این پاره‌خط‌ها می‌بایست ساده‌سازی شوند تا برای استفاده در شبیه‌سازی مخزن مناسب باشند. پیش از ساده‌سازی باید توجه داشت که در شبیه‌ساز MRST ترک‌ها تنها به صورت صفحات مستوی (مسطح) منظور می‌شوند. برای ساده‌سازی، با انتخاب یک طول معیار، خطوط منحنی حاصل از پردازش تصویر به پاره‌خط‌هایی شکسته می‌شوند. به عنوان مثال به جز مختصات ابتدایی و انتهایی ترک‌ها، مختصات سایر پیکسل‌های ذخیره شده بین این دو نقطه، ۵ تا ۵ خوانده می‌شود. توجه شود که طول معیار، به مقیاس عکس و پیچیدگی شبکه‌ی ترک‌ها وابسته است. همچنین معیاری (مثلاً ۳ پیکسل) تعریف می‌شود که اگر پاره‌خطی از این حد کوچکتر باشد، کاملاً نادیده گرفته شود چرا که چنین ترکی‌تایی ناچیزی بر جریان سیال در مخزن خواهد گذاشت. در شبیه‌ساز MRST ترک‌ها در صورتی متصل در نظر گرفته می‌شوند که صفحات ترک کاملاً با یکدیگر تلاقی کنند. برای رفع این مشکل خطوط شکسته و برچسب‌گذاری شده به اندازه‌ی ۱ واحد از دو طرف امتداد می‌یابند. بنابراین، دو پاره‌خطی (ترکی) که تنها در یک نقطه با یکدیگر برخورد داشته‌اند از یکدیگر عبور می‌کنند و در نتیجه شبیه‌ساز آن‌ها را متصل در نظر می‌گیرد.

تشخیص تلاقی ترک‌ها و مختصات جایگزین آن‌ها

برای رفع مشکل برچسب‌گذاری یکسان دو ترک متفاوت، در ابتدا می‌بایستی محل تلاقی ترک‌ها (یا نقاط تداخل) را شناسایی کرد. در محل تلاقی ترک‌ها به دلیل باینری بودن تصویر و یک پیکسلی بودن

ضخامت خطوط در لبه‌یابی، مقادیر پیکسل‌ها، آرایشی مشابه با یکی از ماتریس‌های زیر (یا چرخش‌های آن‌ها) را خواهند داشت:

$$(1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

در این ماتریس‌ها، مقدار ۱ نماینده‌ی پیکسل‌هایی است که لبه (ترک) تشخیص داده شده‌اند و مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی پس‌زمینه (سنگ) می‌باشد. در اینجا ابعاد ماتریس (۳×۳) انتخاب شده است، زیرا در نظر گرفتن ابعاد بزرگتر برای ماتریس، تنها تعداد آرایش‌های مختلف ماتریس مورد نیاز برای شناسایی نقاط تداخل را افزایش می‌دهد.

با توجه به اختلاف بالای نفوذپذیری سنگ و ترک می‌بایستی از اتصال مجدد ترک‌ها به یکدیگر اطمینان حاصل شود چرا که عدم اتصال ترک‌های مرتبط به هم باعث ایجاد خطای زیادی می‌شود. از آنجایی که تاثیر ترک‌های کوچک به شبکه ناچیز است، برای جایگزینی نقاط تداخل با اضافه کردن چندین ترک کوچک از اتصال مجدد ترک‌ها اطمینان حاصل می‌شود. شکل ۲ مراحل جایگزینی نقاط تقاطع دو ترک در الگوریتم را نشان می‌دهد. شکل ۲-الف انواع برخورد دو ترک در تصویر باینری را نشان می‌دهد. شکل ۲-ب نحوه تشخیص پیکسل‌های متصل به محل تقاطع را که به کمک ماتریس‌های (۱) شناسایی شده‌اند، نشان می‌دهد. در شکل ۲-ج پیکسل‌های شناسایی شده در شکل ۲-ب برای دسته‌بندی صحیح خطوط حذف شده‌اند. در این مرحله خطوط باقی‌مانده برچسب‌گذاری می‌شوند. شکل ۲-د پیکسل‌های جایگزین برای پیکسل‌هایی حذف شده بوده‌اند، را نشان می‌دهد. در شکل ۲-ه مشاهده می‌شود که خطوط ترک‌ها مجدداً به یکدیگر متصل شده‌اند اما پیکسل‌هایی به شکل اولیه ترک‌ها اضافه شده است که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر جریان سیال نخواهند داشت.

نسبی در چنین سیستمی، رابطه توانی یا مدل کوری^۱، استفاده می‌شود [۲۹].

برای تحلیل جریان چند فاز امتزاج ناپذیر در محیط متخلخل لازم است به تعداد فازهای مورد نظر معادله بقای جرم نوشته شود. معادله بقای جرم برای جریان چند فاز سیالات امتزاج ناپذیر در یک محیط متخلخل بدون ترک به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_\alpha S_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha) = \rho_\alpha q_\alpha \quad (۳)$$

در این رابطه ϕ ، S_α و ρ_α به ترتیب مقدار تخلخل سنگ، اشباع هر فاز و چگالی سیال را نشان می‌دهند. همچنین q نشان‌دهنده چشمه یا چاهها^۲ (خروجی و ورودی سیالات) است. در شبیه‌ساز مخزن MRST گسسته‌سازی سیستم حاصل از معادلات کاملاً ضمنی بوده و برای فاز α بصورت زیر است [۲۹]:

$$\frac{1}{(\Delta t)^n} [(\phi \rho_\alpha S_\alpha)^{n+1} - (\phi \rho_\alpha S_\alpha)^n] + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha)^{n+1} = (\rho_\alpha q_\alpha)^{n+1} \quad (۴)$$

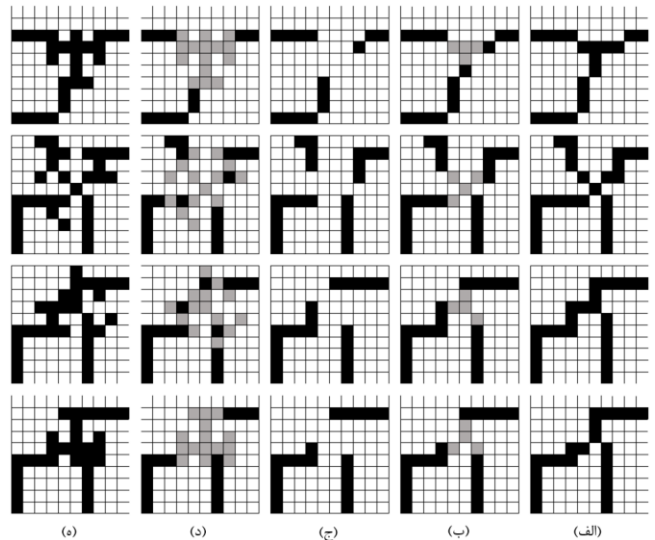
همراه با

$$\mathbf{v}_\alpha^{n+1} = -\frac{K k_{ra}}{\mu_\alpha^{n+1}} (\nabla p_\alpha^{n+1} - \rho_\alpha^{n+1} g \nabla z) \quad (۵)$$

بالانویس‌ها به گسسته‌سازی زمان اشاره دارد و $(\Delta t)^n$ نشان دهنده اندازه گام زمانی n -ام است. چنانچه مخزن ترک‌دار باشد، لازم است برای هر ترک یک محیط متخلخل مجزا در نظر گرفته شود و برای آن ترک معادلات بقای جرم فازها نوشته شود. به عبارت دیگر تعداد کل معادلات بقای جرم برابر با تعداد فازها ضربدر تعداد ترک‌های مجزا بعلاوه یک (برای سنگ مخزن) خواهد بود. همه این معادلات بقای جرم برای جریان فاز α در یک سیستم سه بعدی با تعداد N_f ترک مجزا، در شکل فشرده زیر قابل بیان هستند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi^i \rho_\alpha^i S_\alpha^i) + \nabla \cdot (\rho_\alpha^i \mathbf{v}_\alpha^i) = \frac{\rho_\alpha^i}{a_i} \left(q_\alpha^i - q_\alpha^{i,0} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_f} q_\alpha^{i,j} \right) \quad (۶)$$

در این رابطه که هر ترک با شاخص i نشان داده می‌شود. ماتریس با استفاده از شاخص $i=0$ نشان داده می‌شود. بازشدگی ترک‌ها نیز با a_i نمایش داده می‌شود. تابع انتقال $q_\alpha^{i,0}$ با واحد $(m^3/s)/m^2$ جریان سیال از ترک i به ماتریس را تعیین می‌کند. به طور مشابه، $q_\alpha^{i,j}$ با واحد $(m^3/s)/m^2$ تابع انتقال جریان از ترک



شکل ۲: (الف) محل برخورد دو ترک (ب) شناسایی محل نقاط تقاطع (ج) حذف پیکسل‌های تقاطع برای دسته‌بندی صحیح خطوط (د) افزودن پیکسل‌های جایگزین برای نقاط تقاطع جهت اتصال مجدد ترک‌ها (ه) نهایی کردن شکل تقاطع دو ترک پس از اتصال مجدد.

۲-۲- شبیه‌سازی جریان در ترک

در این بخش کلیاتی در مورد روش EDFM همراه با فرضیات اساسی آن و نحوه مدل‌سازی جریان در مخزن ترک‌دار تشریح می‌شود.

معادلات حاکم بر جریان و گسسته‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار MRST جریان تک فاز در یک محیط متخلخل معمولاً با کمک قانون داریسی توصیف می‌شود. بسط قانون داریسی به جریان چند فاز (اغلب به مسکات و ویکوف [۲۸] نسبت داده می‌شود که سرعت هر فاز (سرعت داریسی) را به گرادیان فشار آن فاز و خواص فیزیکی سنگ و سیال ربط می‌دهد. این قانون به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\mathbf{v}_\alpha = -\frac{K k_{ra}}{\mu_\alpha} (\nabla p_\alpha - \rho_\alpha g \nabla z) \quad (۲)$$

در این معادله، K نفوذپذیری مطلق، k_{ra} نفوذپذیری نسبی، μ لزجت دینامیکی، p فشار سیال، g ثابت مثبت گرانش، ρ چگالی سیال و z نماینده محور مختصات در راستای گرانش است. اندیس α در این معادله فاز سیال را نشان می‌دهد. در این مقاله سیالات مخزن بصورت دو فاز امتزاج ناپذیر در نظر گرفته می‌شوند. برای توصیف نفوذپذیری

$$T_{i+1/2} = \frac{K_{i+1/2} A_{i+1/2}}{d} \quad (8)$$

که در اینجا $K_{i+1/2} = (K_i^{-1} + K_{i+1}^{-1})^{-1}$ نفوذپذیری مطلق در مرز دو سلول، $A_{i+1/2}$ مساحت سطح مشترک دو سلول و d فاصله مراکز دو سلول است. همچنین دبی انتقالی بین دو سلول همسایه برابر است با:

$$(q_\alpha)_{i+1/2} = T_{i+1/2} \frac{k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (p_{\alpha,i+1} - p_{\alpha,i}) \quad (9)$$

این محاسبات هنگامی که تبادل جریان بین دو سلول از جنس‌های متفاوت صورت گیرد قدری پیچیده‌تر می‌شود. در اینجا سه حالت می‌تواند اتفاق بیفتد (شکل ۳): (۱) وقتی که تبادل جریان بین سلولی از ماتریس و سلولی از ترک رخ دهد، (۲) وقتی که تبادل جریان بین سلولی از یک ترک با سلولی از ترک دیگر که با ترک اول متقاطع است برقرار شود، و (۳) وقتی که تبادل جریان بین دو سلول از یک ترک اتفاق بیفتد اما این دو سلول در دو سلول ماتریس مختلف قرار بگیرند. در ادامه روابط مربوط به هر یک از این حالات ارائه می‌شوند. لی و لی [۱۲] با فرض آن که جریان همیشه عمود بر سطح ترک است برای فاصله متوسط بین حجم کنترل‌های ماتریس و ترک (d_{m-f}) ، یک معادله انتگرالی بصورت زیر پیشنهاد کردند:

$$d_{m-f} = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} dV \quad (10)$$

در این معادله، \mathbf{n} بردار یکه عمود بر صفحه ترک بوده و dV المان حجم است. V حجم سلول شبکه ماتریس است و X بردار تعیین کننده مکان المان حجم (dV) است. انتگرال با استفاده از روش‌های عددی محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی میانگین فاصله نرمال، قابلیت انتقال معادل برای اتصال بین یک قطعه ترک و یک سلول شبکه ماتریس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{m-f} = \frac{K_{m-f} A_{m-f}}{d_{m-f}} \quad (11)$$

در این معادله، نفوذپذیری متوسط (k_{m-f}) میانگین هارمونیک نفوذپذیری‌های ماتریس و ترک است. زیرنویس $m-f$ به اتصال

i به ترک j است. معادلات ترک از طریق q_α^{ij} با یکدیگر جفت می‌شوند. با این حال، از آنجا که ترک‌ها همیشه یکدیگر را قطع نمی‌کنند، برای برخی از جفت‌های ترک، $q_\alpha^{ij}=0$ می‌شود. جریان در ماتریس نیز به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi^0 \rho_\alpha S_\alpha^0) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha^0) = \frac{\rho_\alpha^0}{a_i} \left(q_\alpha^0 - \sum_{j=1, j \neq 0}^{N_f} q_\alpha^{0,j} \right) \quad (7)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تمام معادلات ترک‌ها از طریق q_α^i به معادله ماتریس جفت می‌شوند.

در ادامه، فرضیات و طرز کار روش عددی EDFM تشریح می‌شوند. نخست نحوه مدل‌سازی یک ترک مستقل توضیح داده شده و سپس چگونگی ایجاد ارتباط بین ماتریس و ترک و ترک‌ها با یکدیگر بیان می‌گردد.

مدل‌سازی یک ترک

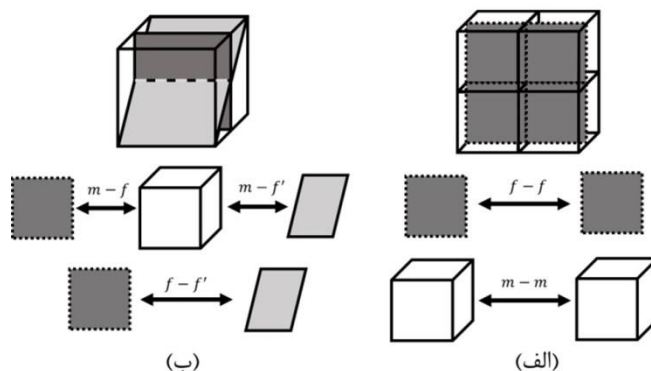
همانطور که گفته شد، در این مقاله هر ترک بصورت یک سطح مستوی با مرزهای مشخص توصیف می‌شود. بطور طبیعی هر ترک توسط ماتریس احاطه شده و در ضمن ممکن است با ترک یا ترک‌های دیگری در تلاقی باشد. در رویکرد EDFM ابتدا ماتریس بصورت باسازمان شبکه‌بندی می‌شود. سپس هر ترک بعنوان یک فضای سه-بعدی با سطحی بزرگ و ضخامتی کم بطور مستقل شبکه بندی می‌گردد. بطور معمول اندازه سلول‌های محاسباتی در ترک بمراتب از اندازه سلول‌های ماتریس کوچکتر هستند. هر سلول ترک توسط گروهی از سلول‌های ماتریس همسایه و گروهی از سلول‌های همسایه در همان ترک احاطه شده است و بطور طبیعی با این سلول‌ها سیال تبادل می‌کند. بنابراین تعیین سلول‌های (از جنس ماتریس یا ترک) همسایه با هر سلول ترک از اهمیت زیادی برخوردار است و در مرحله پیش پردازش انجام می‌شود.

تبادل جریان بین سلول‌ها:

ساده‌ترین شکل تبادل سیال بین دو سلول همسایه از یک جنس (هر دو ماتریس یا هر دو ترک) اتفاق می‌افتد. در چنین مواردی بطور سنتی و مشابه آنچه در مدل‌های دو-محیطی انجام می‌شود، از یک ضریب انتقال‌پذیری^۱ (T) برای این کار استفاده می‌شود. برای دو سلول همسایه در ماتریس (با شماره‌های i و $i+1$)، ضریب انتقال‌پذیری $T_{i+1/2}$ بصورت زیر تعیین شده

^۱ Transmissibility factor

ماتریس-ترک اشاره دارد. A_{m-f} مساحت سطح بخشی از ترک است که در داخل سلول شبکه محصور شده است.



شکل ۳: (الف) در روش ترک‌های مجزا صفحات ترک بوسیله سلول‌های ماتریس جدا می‌شوند و تبادل جریان بین صفحات ترک جدا شده و سلول‌های ماتریس با یکدیگر وجود دارد. (ب) در صورت برخورد صفحات ترک با یکدیگر، تبادل جریان بین دو صفحه‌ی ترک و صفحات ترک با سلول ماتریس وجود دارد.

برای هر دو سلول ترک f_1 و f_2 که با یکدیگر تلاقی می‌کنند قابلیت انتقال $T_{f_1-f_2}$ تعریف می‌شود. برای تعیین $T_{f_1-f_2}$ نصف قابلیت انتقال^۱ هر سلول ترک محاسبه می‌شود:

$$(T_{1/2})_{f_i} = \frac{K_{f_i} a_{f_i} (L_{\cap})_{f_1, f_2}}{(d_{\cap})_{f_i}}, \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

در اینجا، K و a به ترتیب نفوذپذیری و بازشدگی سلول ترک‌ها می‌باشند. $(L_{\cap})_{f_1, f_2}$ طول خط تقاطع بین دو سلول و $(d_{\cap})_{f_i}$ میانگین فاصله عمودی بین مراکز هر قطعه ترک تا خط تقاطع است. قابلیت انتقال $T_{f_1-f_2}$ با استفاده از میانگین هارمونیک نصف قابلیت انتقال‌های دو ترک تعیین می‌شود:

$$T_{f_1-f_2} = \frac{(T_{1/2})_{f_1} (T_{1/2})_{f_2}}{(T_{1/2})_{f_1} + (T_{1/2})_{f_2}} \quad (13)$$

قابلیت انتقال برای جریان بین سلول‌های یک ترک مشخص به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$T_{f-f} = \frac{k_f A_f}{d_f} \quad (14)$$

در این رابطه k_f نفوذپذیری ترک است؛ d_f فاصله بین مراکز دو سلول ترک است. A_f مساحت سطح مشترک دو سلول ترک است و به صورت ضرب بازشدگی ترک در طول لبه‌ی مشترک محاسبه می‌شود.

۳ - نتایج

در این بخش ابتدا به تعریف مسئله و شرایط مخزن مورد شبیه‌سازی این پژوهش پرداخته می‌شود. سپس اثر پارامترهای موثر در پردازش تصویر شامل کیفیت تصویر هوایی و پارامترهای لبه‌یابی مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین تاثیر پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی جریان در مخزن شامل بازشدگی و نفوذپذیری ماتریس بر رفتار دینامیکی مخزن بررسی می‌شود.

۳-۱ - تعریف مسئله و شرایط مخزن

شبکه‌ی ترک‌ها و تصویر مخزن از منطقه‌ای در برزیل از مطالعه‌ی بیسندوم [۴] برای بررسی برخی از پارامترهای با اهمیت در این مطالعه انتخاب شده است. ابعاد این مخزن $۸۰ \times ۷۲ \times ۵$ متر بنا بر مقیاس داده شده در این مطالعه انتخاب شده است. شکل ۴ شبکه‌ی ترک‌های ترسیم شده در مطالعه‌ی بیسندوم [۴] را نشان می‌دهد که بر روی تصویر هوایی از سطح زمین بازسازی شده است. از آنجایی که این شبکه‌ی ترک با کمک دانش زمین‌شناسی، مطالعات میدانی و پردازش تصویر هوایی از مکان‌های مختلف ساخته شده است، در این مطالعه فرض می‌شود که این شبکه‌ی ترک واقعی است.

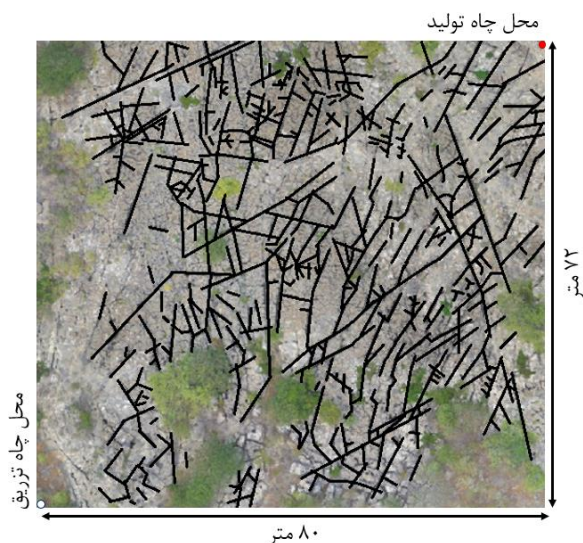
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تعداد ترک‌ها در مخزن مورد بررسی بسیار زیاد است. از این روی رویکرد EDFM بر مدل ترک مجزا (شبکه‌ی بدون سازمان) برتری دارد زیرا قادر است تا با هزینه‌ی محاسباتی بسیار کمتر، ترک‌ها را به طور صریح در نظر بگیرد. در اینجا به دلیل وجود شبکه پیچیده‌ای از ترک‌ها که از پردازش تصویر بدست آمده است، این کاهش هزینه‌ی محاسبات اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند.

^۱half-transmissibility

برای بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی با MRST از مسئله مورد مطالعه‌ی معین‌فر و همکارانش [۳۱] استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در مقاله مرجع و نتایج پژوهش حاضر تطابق خوبی داشتند (شکل ۵).

جدول ۱: اسامی مقاطع اعضای تخصیص یافته سازه مورد بررسی

مقدار	واحد	متغیر
۰/۳	کسر	تخلخل ماتریس [۱]
۱۰	میلی‌داریسی	نفوذپذیری مطلق ماتریس [۱]
۰/۱۹	سانتی‌متر	بازشدگی ترک [۴]
3×10^6	میلی‌داریسی	نفوذپذیری ترک [۴]
۰/۲	کسر	درجه اشباع اولیه آب [۳۱]
۷۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب	چگالی نفت [۳۱]
۱۰۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب	چگالی آب [۳۱]
۰/۲	کسر	درجه اشباع آب باقی‌مانده [۳۱]
۰/۲	کسر	درجه اشباع نفت باقی‌مانده [۳۱]
۰/۸	-----	نقطه نهایی نفوذپذیری نسبی آب [۳۱]
۰/۷	----	نقطه نهایی نفوذپذیری نسبی نفت [۳۱]
۴	----	توان نفوذپذیری نسبی آب [۳۱]
۲	----	توان نفوذپذیری نسبی نفت [۳۱]
۰/۱۹	سانتی پویز	لزجت نفت (دکان) [۳۱]
۰/۸	سانتی پویز	لزجت آب [۳۱]



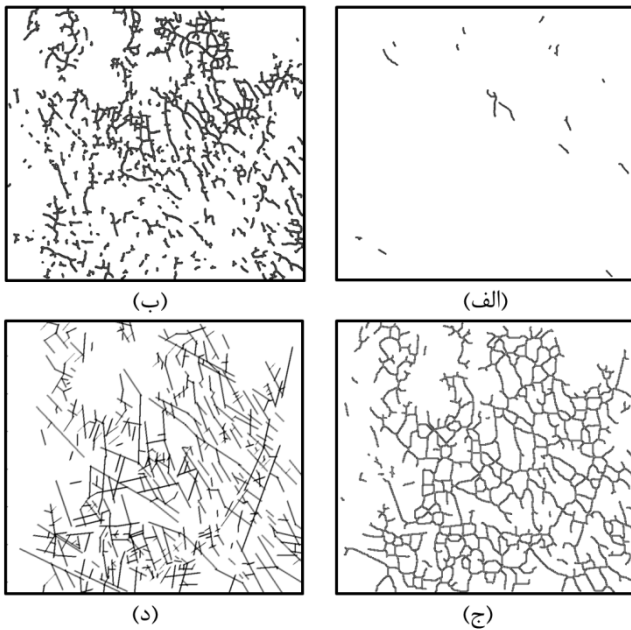
شکل ۴: تخمینی از شبکه‌ی ترک‌ها در مطالعه‌ی بیس‌دوم [۴].

مسئله به صورت $2/5$ بعدی (مخزن در راستای z گسسته نشده است) در نظر گرفته می‌شود. ابعاد سلول‌های مخزن $1 \times 1 \times 5$ در نظر گرفته شده است. بنابراین شبکه‌بندی مخزن به صورت $1 \times 72 \times 80$ می‌باشد. در این مدل‌سازی فرض می‌شود که صفحات ترک عمودی می‌باشند و صفحات مایل ترک هم در مدل‌سازی وارد نمی‌شوند.

جریان دوفاز به صورت امتزاج‌ناپذیر و تراکم‌ناپذیر و مقادیر نفوذپذیری نسبی از مدل کوری و با مقادیر داده شده در جدول ۱ تنظیم می‌شود. مخزن به صورت عایق (بدون جریان ورودی و خروجی در مرزها) در نظر گرفته شده است. چاه‌های تزریق و تولید بر اساس مدل چاه پیسمن در هندسه‌ی مسئله گنجانده می‌شوند. مدل چاه پیسمن روشی کم‌هزینه برای مدل‌سازی رفتار چاه ارائه می‌کند. در این مدل یک رابطه خطی بین دبی جریان چاه و اختلاف فشار بین سلول محاسباتی که چاه در آن واقع شده است و فشار ته چاه در نظر گرفته می‌شود. ضریب تناسب این رابطه (اندیس چاه) بسته به شرایط مختلف از طریق حل تحلیلی جریان تعیین می‌گردد [۳۰].

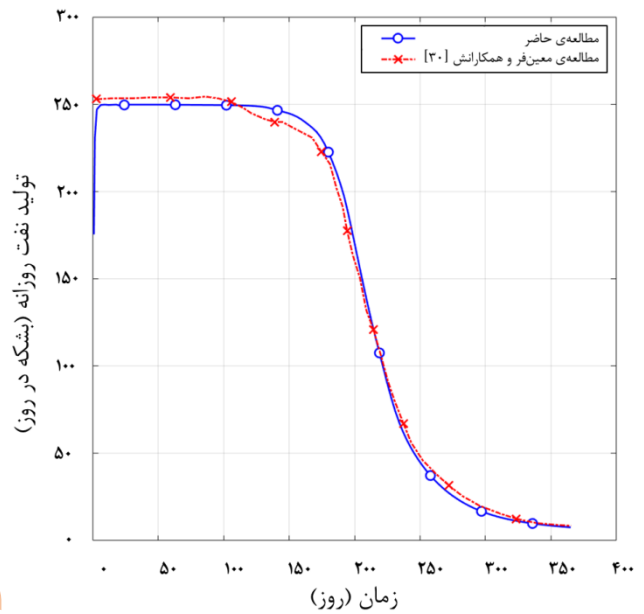
فشار اولیه‌ی مخزن و فشار ته چاه^۱ برای چاه تولید کننده ثابت و برابر 300 بار، در نظر گرفته شده است. میزان تزریق آب 140 بشکه در روز است. این داده‌ها مشابه مقادیری که در شبیه‌سازی مخزنی که توسط اگیا و همکارانش [۱] در همین منطقه انجام شده بود، هستند.

^۱ Bottom hole pressure



شکل ۶: (الف) شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر عکس بی کیفیت (ب) شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر عکس با کیفیت موجود (ج) شبکه‌ی ترک پردازش تصویر ایده آل و (د) شبکه‌ی ترک‌های واقعی از مطالعه‌ی بیسندوم [۴].

شکل ۷ تأثیر کیفیت تصویر هوایی بر نرخ تولید روزانه نفت را برای چهار شبکه ترک ذکر شده نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، رفتار شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر ایده آل، اختلاف اندکی با شبکه‌ی ترک واقعی دارد. شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر، رفتاری میان شبکه‌ی ترک واقعی و مخزن بدون ترک را نشان می‌دهد. بنابراین با پردازش تصویر، می‌توان دقت نتایج شبیه‌سازی مخزن را بهبود بخشید و نتایج را به نتایج شبکه‌ی ترک‌های واقعی نزدیک‌تر کرد.



شکل ۵: شبیه‌سازی با MRST از مسئله مورد مطالعه‌ی معین‌فر و همکارانش [۳۱].

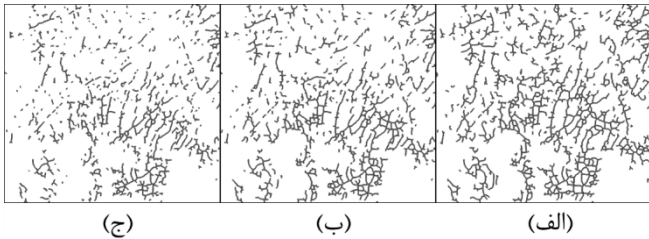
۳-۲- بررسی اثر پارامترهای موثر در پردازش تصویر

در این بخش، اثر پارامترهای موثر در پردازش تصویر شامل اثر کیفیت تصویر هوایی و اثر متغیرهای لبه‌یابی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

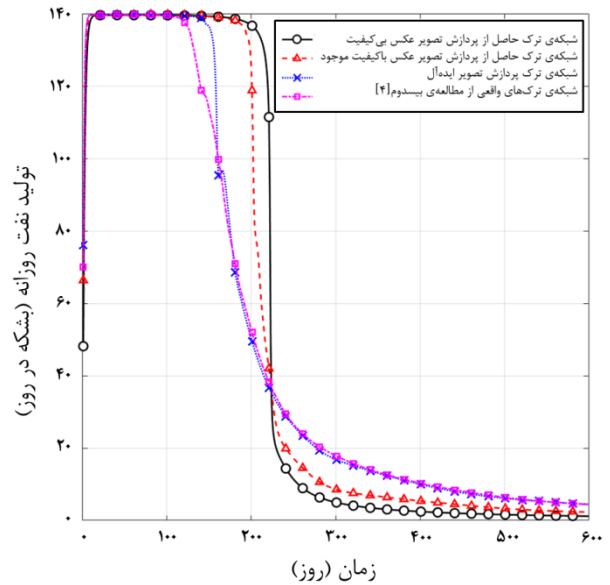
۳-۲-۱- اثر کیفیت تصویر هوایی

برای بیان اهمیت کیفیت تصاویر، چهار شبکه‌ی ترک با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این چهار شبکه شامل مخزن تقریباً بدون ترک (نماینده‌ی تصویر بدون کیفیت)، شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر (نماینده‌ی تصویر با کیفیت خوب و موجود)، شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر ایده آل، و شبکه‌ی ترک واقعی می‌باشند (شکل ۶). برای به دست آوردن شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر ایده آل، عملیات پردازش تصویر بر روی تصویری انجام می‌شود که ترک‌ها به صورت کاملاً واضح بر روی آن نشان داده شده باشند (شکل ۴). لازم به ذکر است هر سه شبکه‌ی حاصل از پردازش تصویر با مجموعه اولیه پارامترهای لبه‌یابی یکسان (فیلتر گوسی ۲، آستانه‌ی بالای ۱۵۰ و آستانه‌ی پایین ۷۵) بدست آمده‌اند و تنها کیفیت تصاویر تغییر کرده است.

این شبکه پیوستگی ترک‌ها بهتر شکل گرفته است و جریان سیال رفتاری مشابه با حالت شبکه‌ی ترک واقعی را از خود نشان می‌دهد (شکل ۹). باید توجه داشت که هر چند بهبود نتایج تا حدی وابسته به این پارامترهاست اما معمولاً از یک جایی به بعد نمی‌توان با کمک آنها نتایج را بهبود بخشید، زیرا کیفیت تصویر این فرآیند را محدود کند.



شکل ۸: بررسی اثر آستانه‌ی پایین در مقادیر تنظیم شده در (الف) ۴۵، (ب) ۷۵ و (ج) ۱۰۵

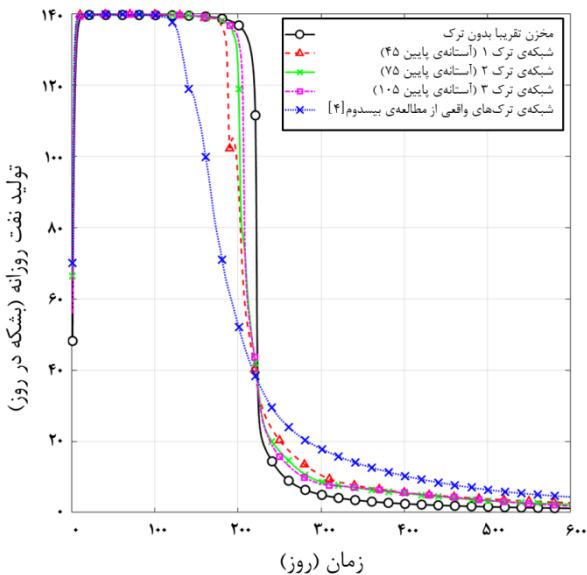


شکل ۷: بررسی اثر کیفیت تصویر هوایی بر نرخ تولید نفت روزانه

۳-۲-۲ - بررسی اثر متغیرهای لبه‌یابی

به منظور کسب شناخت بهتر از کارایی روش کنی، پارامترهای کلیدی روش تغییر داده شد تا تأثیر آن‌ها بر فرآیند تشخیص لبه و در نتیجه کیفیت شبکه‌ی ترک تولیدی مشخص شود. مجموعه اولیه پارامترهای پایه برای مقایسه با فیلتر گوسی ۲، آستانه‌ی بالا ۱۵۰ و آستانه‌ی پایین ۷۵، مورد استفاده انتخاب شد. به طور کلی، انتخاب پارامترهای لبه‌یابی وابسته به تصویر هوایی موجود می‌باشد. فیلتر گوسی کوچکتر به طور بالقوه جزئیات ریزتری را ثبت می‌کند اما تأثیر نویز در تصویر افزایش پیدا می‌کند. افزایش مقدار آستانه‌ی بالا معیار سخت‌تری را برای در نظر گرفتن پیکسل به عنوان بخشی از یک لبه اعمال می‌کند و در نتیجه ممکن است ترک‌های ریزتر در نظر گرفته نشوند. از طرفی انتخاب مقدار کم برای آستانه‌ی بالا موجب انتخاب ترک‌هایی می‌شود که در واقعیت وجود ندارند. کاهش آستانه‌ی پایین باعث لحاظ شدن لبه‌های بیشتری در لبه‌یابی می‌شود و در نتیجه پیوستگی ترک‌ها می‌تواند بهتر شکل بگیرد. از طرفی انتخاب مقدار کم برای آستانه‌ی پایین می‌تواند موجب شود که ترک‌های مجزا از یکدیگر، متصل در نظر گرفته شوند.

شکل ۸ سه شبکه ترک بدست آمده بازای مقادیر مختلف آستانه‌ی پایین (۴۵، ۷۵ و ۱۰۵) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود، شبکه‌ی ترک اول (آستانه‌ی پایین با مقدار ۴۵) نتایج شبیه‌تری به شبکه‌ی ترک واقعی دارد. علت این امر آن است که در



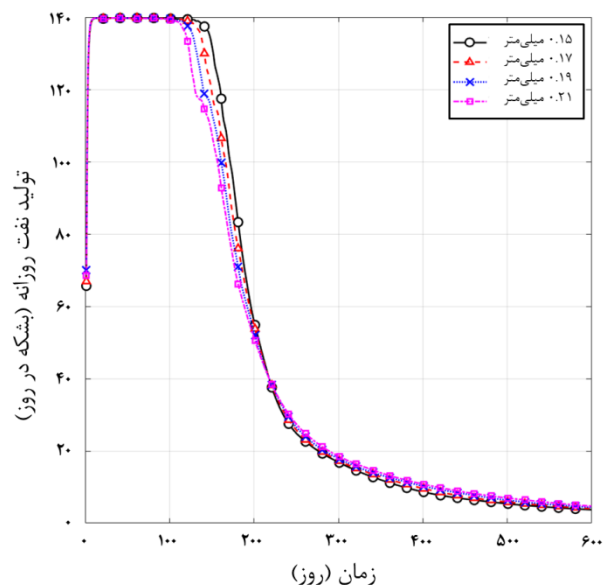
شکل ۹: بررسی اثر متغیرهای لبه‌یابی بر نرخ تولید نفت روزانه

۳-۳ - بررسی اثر پارامترهای فیزیکی مخزن

در این بخش، تأثیر پارامترهای فیزیکی مخزن شامل میزان بازشدگی ترک‌ها و نفوذپذیری ماتریس (سنگ) قرار می‌گیرند. هر یک از این پارامترها بر جریان سیال تأثیر می‌گذارند و نتایج شبیه‌سازی را تغییر می‌دهند. مخزن مورد مطالعه همان مخزن در بخش تعریف مسئله در نظر گرفته می‌شود. در ادامه تأثیر هر یک از پارامترهای فیزیکی مخزن بر نتایج بررسی می‌شود.

۳-۱- بررسی اثر بازشدگی ترک‌ها

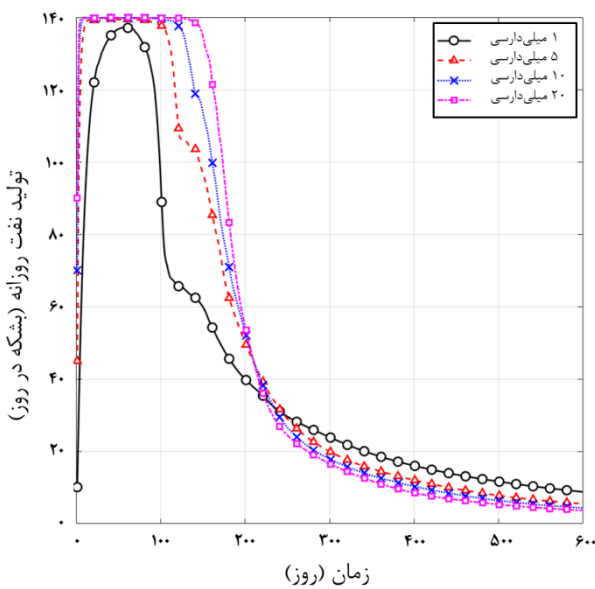
در ابتدا یک مطالعه پارامتری بر روی بازشدگی ترک‌ها در شبیه‌سازی مخزن انجام می‌شود. در شبکه‌ی ترک‌های مطالعه‌ی بیس‌دوم و همکارانش [۴] بازشدگی ترک‌ها، ۰/۱۵ تا ۰/۲۱ میلی‌متر فرض شده است. این پارامتر ارتباط مستقیمی با نفوذپذیری ترک دارد (قانون مکعب [۳۲]). شکل ۱۰ تغییرات نرخ تولید نفت را برای مقادیر مختلف بازشدگی نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات در نرخ تولید نفت از چاه، مشاهده می‌شود که با افزایش بازشدگی ترک‌ها، نرخ تولید نفت کاهش می‌یابد. در حضور ترک‌ها، به دلیل نفوذپذیری بسیار بالاتر آن‌ها نسبت به سنگ، جریان آب تزریق شده بیشتر در مسیر ترک‌ها حرکت می‌کند زیرا با مقاومت کمتری روبرو می‌شود. این امر باعث می‌شود که بخشی از نفت موجود در مخزن تحت تاثیر جریان آب قرار نگیرند و در نتیجه میزان نرخ تولید نفت کاهش می‌یابد. هرچه میزان نفوذپذیری ترک‌ها بیشتر باشد بازسازی دقیق‌تر شبکه‌ی ترک‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که برای مخازنی که ترک‌ها نفوذپذیری بسیار بالایی دارند لازم است که پردازش تصویر با دقت بالاتری انجام شود. در چنین مخازنی می‌توان شبکه‌ی ترک‌های حاصل از پردازش را مجدداً بررسی نمود تا از اتصال ترک‌ها به یکدیگر اطمینان حاصل نمود. همچنین، در چنین مخازنی اهمیت کیفیت تصاویر (به دلیل بازسازی بهتر ترک‌ها) دو چندان می‌شود.



شکل ۱۰: بررسی اثر بازشدگی ترک‌ها بر نرخ تولید نفت روزانه

۳-۲- بررسی اثر نفوذپذیری ماتریس

برای بررسی تاثیر نفوذپذیری ماتریس در شبیه‌سازی، یک مطالعه‌ی پارامتری با تغییر مقدار نفوذپذیری ماتریس (۱، ۵، ۱۰، ۲۰ میلی‌داریس) انجام می‌شود. در حالتی که نفوذپذیری ماتریس بالا باشد، سیال به راحتی از داخل سنگ مخزن به سمت چاه تولیدی جریان می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افزایش نفوذپذیری ماتریس میزان نرخ تولید نفت در چاه افزایش می‌یابد. با کاهش نفوذپذیری ماتریس، شبکه‌ی ترک‌ها مسیر جریان را کنترل می‌نماید و اتصال ترک‌ها به یکدیگر نقش موثری بر نتایج می‌گذارد. در مخازن با نفوذپذیری بسیار پایین اهمیت کیفیت تصاویر و متغیرهای پردازش تصویر دو چندان می‌شود.



شکل ۱۱: بررسی اثر نفوذپذیری ماتریس بر نرخ تولید نفت روزانه

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه مخازن ترک‌دار طبیعی به دو دلیل اصلی یک چالش جدی برای مهندسان محسوب می‌شود. اول اینکه باز تولید شبکه ترک بطوریکه تا حد خوبی به واقعیت نزدیک باشد، بسیار دشوار است و دوم اینکه شبیه‌سازی یک مخزن با صدها یا هزاران ترک مستلزم داشتن ابزار محاسباتی کارآمد و البته هزینه محاسباتی زیاد است. در این مقاله یک رویکرد یکپارچه بر مبنای پردازش تصویر برای بازسازی شبکه ترک از روی تصاویر هوایی بدست آمده از رخنمون، ارائه شد.

- Petroleum Geoscience, ۵(۴), pp.۳۷۳-۳۸۴. doi: <https://doi.org/10.1144/petgeo.5.4.373>.
- [۴] Bisdom, K., ۲۰۱۶. Burial-related fracturing in sub-horizontal and folded reservoirs: Geometry, geomechanics and impact on permeability. [Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology]. doi: <https://doi.org/10.4223/uuid:f1b6f6e0-1542-4744-943e-04c7c551213b>
- [۵] Bruna, P.O., Straubhaar, J., Prabhakaran, R., Bertotti, G., Bisdom, K., Mariethoz, G. and Meda, M., ۲۰۱۹. A new methodology to train fracture network simulation using multiple-point statistics. *Solid Earth*, ۱۰(۲), pp.۵۳۷-۵۵۹. doi: <https://doi.org/10.5194/se-10-537-2019>.
- [۶] Shah, S., Møyner, O., Tene, M., Lie, K.A. and Hajibeygi, H., ۲۰۱۶. The multiscale restriction smoothed basis method for fractured porous media (F-MsRSB). *Journal of Computational Physics*, ۳۱۸, pp.۳۶-۵۷. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.05.001>.
- [۷] Bisdom, K., Gauthier, B.D.M., Bertotti, G. and Hardebol, N.J., ۲۰۱۴. Calibrating discrete fracture-network models with a carbonate three-dimensional outcrop fracture network: Implications for naturally fractured reservoir modeling. *AAPG bulletin*, ۹۸(۷), pp.۱۳۵۱-۱۳۷۶. doi: <https://doi.org/10.1306/02031413060>.
- [۸] Geiger, S., Dentz, M. and Neuweiler, I., ۲۰۱۳. A novel multirate dual-porosity model for improved simulation of fractured and multiporosity reservoirs. *SPE journal*, ۱۸(۰۴), pp.۶۷۰-۶۸۴. doi: <https://doi.org/10.2118/148120-PA>.
- [۹] Bisdom, K., Bertotti, G. and Bezerra, F.H., ۲۰۱۷. Inter-well scale natural fracture geometry and permeability variations in low-deformation carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*, ۹۷, pp.۲۳-۳۶. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.02.011>.
- [۱۰] Sonka, M., Hlavac, V. and Boyle, R., ۲۰۱۳. *Image processing, analysis and machine vision*. Springer.
- [۱۱] Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P. and Micklethwaite, S., ۲۰۱۴. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, ۶۹, pp.۲۲-۳۲. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>.
- [۱۲] Li, L. and Lee, S.H., ۲۰۰۸. Efficient field-scale simulation of black oil in a naturally fractured reservoir through discrete fracture networks and homogenized media. *SPE Reservoir evaluation & engineering*, ۱۱(۰۴), pp.۷۵۰-۷۵۸. doi: <https://doi.org/10.2118/103901-PA>.

به منظور شبیه‌سازی جریان دو فاز آب و نفت در مخزن از روش ترک مجزای افزوده (EDFM) استفاده شد که قادر است تعداد زیادی ترک را بطور همزمان در مدل‌سازی لحاظ کند و اندرکنش بین سنگ و ترک و ترک‌ها با یکدیگر را با دقت بسیار خوبی منظور نماید. همچنین پارامترهای موثر بر عملکرد پردازش تصویر و روش EDFM مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج حاصل از پردازش تصویر نشان داد که انتخاب نامناسب پارامترهای لبه‌یابی (فیلتر گوسی، آستانه‌ی بالا و آستانه‌ی پایین) در فرآیند لبه‌یابی منجر به ایجاد شبکه‌ی ترک غیر واقعی می‌شود. انتخاب نامناسب آستانه‌ی بالا منجر به عدم شناسایی ترک‌های ریز یا شناسایی ترک‌های غیر واقعی می‌شود. انتخاب نامناسب آستانه‌ی پایین بازسازی اتصال ترک‌ها به یکدیگر را بطور منفی تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین، کیفیت تصویر هوایی تاثیر بسیار زیادی بر دقت نتایج دارد به طوری که در صورت استفاده از تصاویر هوایی با کیفیت پایین، شناسایی ترک‌ها تقریباً غیرممکن می‌شود.

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی جریان توسط EDFM نشان دادند که در مخازن حاوی ترک‌های با نفوذپذیری بالا، انتخاب مقدار نفوذپذیری ماتریس اهمیت بیشتری نسبت به نفوذپذیری ترک‌ها دارد. همچنین، زمانی که نفوذپذیری ماتریس بسیار پایین باشد، کیفیت تصاویر و انتخاب متغیرهای پردازش تصویر از اهمیت بیشتری برخوردار هستند.

منابع

- [۱] Egya, D.O., Geiger, S., Corbett, P.W.M., March, R., Bisdom, K., Bertotti, G. and Bezerra, F.H., ۲۰۱۹. Analysing the limitations of the dual-porosity response during well tests in naturally fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, ۲۵(۱), pp.۳۰-۴۹. doi: <https://doi.org/10.1144/petgeo2017-052>.
- [۲] Moïnfar, A., Narr, W., Hui, M.H., Mallison, B. and Lee, S.H., ۲۰۱۱, February. Comparison of discrete-fracture and dual-permeability models for multiphase flow in naturally fractured reservoirs. In *SPE Reservoir Simulation Conference?* (pp. SPE-142295). SPE. doi: <https://doi.org/10.2118/142295-MS>.
- [۳] Odling, N.E., Gillespie, P., Bourguine, B., Castaing, C., Chiles, J.P., Christensen, N.P., Fillion, E., Genter, A., Olsen, C., Thrane, L. and Trice, R., ۱۹۹۹. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs.

- Method. Lithosphere, 2021(Special 1), p.4254-428. doi: <https://doi.org/10.2113/2.22/4254-28>.
- [23] Lin, Y., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, L. and Lin, J., 2015. Use of UAV oblique imaging for the detection of individual trees in residential environments. Urban forestry & urban greening, 14(2), pp.44-412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.03.003>.
- [24] Bradski, G., 2000. The opencv library. Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer, 25(11), pp.120-123.
- [25] Van der Walt, S., Schönberger, J.L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J.D., Yager, N., Gouillart, E. and Yu, T., 2014. scikit-image: image processing in Python. PeerJ, 2, p.e453. doi: <https://doi.org/10.7717/peerj.453>.
- [26] Telea, A., 2004. An image inpainting technique based on the fast marching method. Journal of graphics tools, 9(1), pp.23-34. doi: <https://doi.org/10.1080/10867651.2004.10487596>.
- [27] Canny, J.F., 1983. Finding edges and lines in images. URI: <http://hdl.handle.net/1121.1/6939>.
- [28] Muskat, M., 1938. The flow of homogeneous fluids through porous media. Soil Science, 46(2), p.169.
- [29] Lie, K.A., 2019. An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). Cambridge University Press.
- [30] Peaceman, D.W., 1978. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation (includes associated paper 9988). *Society of Petroleum Engineers Journal*, 18(3), pp.183-194. doi: <https://doi.org/10.2118/6893-PA>.
- [31] Moinfar, A., Varavei, A., Sepehrnoori, K. and Johns, R.T., 2012, April. Development of a novel and computationally-efficient discrete-fracture model to study IOR processes in naturally fractured reservoirs. In SPE Improved Oil Recovery Conference? (pp. SPE-154246). SPE. doi: <https://doi.org/10.2118/154246-MS>.
- [32] Witherspoon, P.A., Wang, J.S., Iwai, K. and Gale, J.E., 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Water resources research, 16(6), pp.1016-1024. doi: <https://doi.org/10.1029/WR16i06p1016>.
- [13] Moinfar A., 2013. "Development of an Efficient Embedded Discrete Fracture Model for 3D Compositional Reservoir Simulation in Fractured Reservoirs" Ph. D. Thesis., The University of Texas at Austin. URI: <http://hdl.handle.net/2152/21293>
- [14] Moinfar, A., Varavei, A., Sepehrnoori, K. and Johns, R.T., 2014. Development of an efficient embedded discrete fracture model for 3D compositional reservoir simulation in fractured reservoirs. SPE Journal, 19(2), pp.289-303. doi: <https://doi.org/10.2118/154246-PA>.
- [15] Wang, C., Ran, Q. and Wu, Y.S., 2019. Robust implementations of the 3D-EDFM algorithm for reservoir simulation with complicated hydraulic fractures. Journal of Petroleum Science and Engineering, 181, p.106299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106299>.
- [16] Zhang, H. and Sheng, J.J., 2021. An efficient embedded discrete fracture model based on the unstructured quadrangular grid. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 85, p.103710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103710>.
- [17] Tene, M., Bosma, S.B., Al Kobaisi, M.S. and Hajibeygi, H., 2017. Projection-based embedded discrete fracture model (pEDFM). Advances in Water Resources, 105, pp.205-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.05.009>.
- [18] Olorode, O., Wang, B. and Rashid, H.U., 2020. Three-dimensional projection-based embedded discrete-fracture model for compositional simulation of fractured reservoirs. SPE Journal, 25(4), pp.2143-2161. doi: <https://doi.org/10.2118/201243-PA>.
- [19] Olorode, O. and Rashid, H., 2022. Analytical modification of EDFM for transient flow in tight rocks. Scientific Reports, 12(1), p.22018. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26523-w>.
- [20] Ren, G., Jiang, J. and Younis, R.M., 2018. A Model for coupled geomechanics and multiphase flow in fractured porous media using embedded meshes. Advances in Water Resources, 122, pp.113-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.09.017>.
- [21] Shakiba, M., de Araujo Cavalcante Filho, J.S. and Sepehrnoori, K., 2018. Using embedded discrete fracture model (EDFM) in numerical simulation of complex hydraulic fracture networks calibrated by microseismic monitoring data. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 55, pp.495-507. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.04.019>.
- [22] Jiang, Y., Killough, J.E. and Cui, Y., 2022. A Numerical Simulation Approach for Shale Fracture Network Characterization Using Hybrid EDFM