Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

An Integrated Approach for Simulation of Two-Phase Flows in Naturally Fractured Reservoirs Using Embedded Discrete Fracture Model and Aerial Image Processing

Ali Heshmati and Mehrdad T. Manzari *

Department of Mechanical Engineering of Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
* corresponding author:(mtmanzari@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 14 May 2024

Revised: 22 June 2024

Accepted: 14 July 2024

Keywords:

Natural fractured reservoirs,
embedded discrete fracture model (EDFM),
image processing,
two-phase flow,
aerial imaging,
outcrop.

Abstract

This paper introduces an integrated approach for simulating two-phase flows in naturally fractured reservoirs. The proposed computational process comprises two key steps: 1) generating a representation of the fracture network from aerial images using image processing techniques, 2) 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 outcrop 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 3 percent decrease in oil production is observed when increasing fracture aperture from 0.15 (mm) to 0.21 (mm), while increasing the matrix permeability from 1 to 20 millidarcy leads to a 22 percent increase.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

The author is an Editorial Board Member/Editor-in-Chief/Associate Editor/Guest Editor for Sharif Journal and was not involved in the editorial review or the decision to publish this article.

Authors contribution statement

Ali Heshmati: Conception and design, implementation, obtaining results, data interpretation, drafting and reviewing manuscript
Mehrdad Taghizadeh Manzari: Conception and design, data interpretation, drafting and reviewing the manuscript

To Cite this article:
Heshmati, A. and T.Manzari, M. 2025. An integrated approach for simulation of two-phase flows in naturally fractured reservoirs using embedded discrete fracture model and aerial image processing, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(2), 58-69. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64497.3331

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

شبیه‌سازی یکپارچه‌ی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی با روش ترک مجازی افزوده و پردازش تصاویر هوایی

علی حشمتی و مهرداد تقی‌زاده منظری *

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (mtmanzari@sharif.edu)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

واژگان کلیدی:

مخازن ترک‌دار طبیعی،

روش ترک مجازی افزوده (EDFM)،

پردازش تصویر،

جریان دوفاز،

تصویربرداری هوایی،

رخنمون.

چکیده

در نوشتار حاضر، یک فرآیند یکپارچه برای شبیه‌سازی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی ارائه شده است؛ که شامل دو بخش اصلی است: ۱) تولید شبکه‌ی ترک‌ها از یک تصویر هوایی و اختصاص آن به سنگ مخزن، ۲) شبیه‌سازی جریان در مخزن با کمک روش ترک مجازی افزوده. جزئیات پردازش تصویر و نحوه‌ی تشخیص هر ترک تشریح و تأثیر پارامترهای مؤثر در کیفیت نتایج بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی با کمک یک مسئله‌ی نمونه، راستی‌آزمایی شده است. همچنین، تأثیر خواص فیزیکی سنگ و ترک‌ها در جریان گزارش شده است. نتایج نشان داده‌اند که در یک مخزن دو فازی 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 میلی‌دارسی، باعث افزایش ۲۲ درصدی آن شده است.

۱. مقدمه

مخازن طبیعی ترک‌دار از پیچیده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی هستند 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 در جریان سیال در مخزن تأثیر می‌گذارند. مدل‌سازی شبکه‌ی ترک‌ها، یک چالش بزرگ است؛ زیرا ایجاد مدلی کامل از شبکه‌ی ترک‌ها نیازمند اطلاعات گسترده از هندسه‌ی 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، شبکه‌ی ترک‌ها به‌صورت تصادفی و بر پایه‌ی مدل‌های آماری بنا می‌شود، که البته در بسیاری موارد با واقعیت، فاصله‌ی قابل ملاحظه‌ای دارد.[۲]

معمولاً برای تعیین ویژگی‌های هندسی و فیزیکی ترک‌ها، از ترکیبی از روش‌های مختلف نظیر داده‌برداری از: چاه‌ها[۱]، لرزه‌نگاری[۲]، مشاهده‌های میدانی، و ... استفاده می‌شود. یکی از روش‌های جدیدی که برای بازتولید شبکه‌ی ترک‌ها به‌کار می‌رود، مطالعه و تحلیل رخنمون‌ها از طریق تهیه‌ی تصاویر هوایی است. استفاده از رخنمون، روشی قدیمی در زمین‌شناسی است، اما با گسترش تصویربرداری با ماهواره یا پهپاد[۳] و همچنین دانش پردازش تصویر[۴]، این کار از یک فرآیند تجربی و زمانبر به یک فرآیند خودکار و هوشمند تبدیل شده است. باید تأکید کرد که تجربه و دانش یک زمین‌شناس مجرب همچنان می‌تواند نقش مهمی در تولید شبکه‌ی دقیق‌تری از ترک‌ها ایفا کند. ارتباط بین تصاویر رخنمون و شبکه‌ی ترک‌ها در اعماق زمین بر این منطق استوار است که چه در سنگ‌های لایه‌ای و چه در سنگ‌های غیرلایه‌ای، ترک‌ها بیشتر به صورت عمودی هستند و می‌توان الگوهای مشابهی را بین ترک‌های سطح زمین و زیر زمین مشاهده کرد (اودلینگ[۵] و همکارانش (۱۹۹۹).[۳]). هر چند این تناظر یک به یک نیست، اما در نوشتار مذکور فرض شده است که آنچه در سطح به‌عنوان خطوط ناپیوستگی در سنگ مشاهده می‌شود، نماینده‌ی مناسبی از

[1] Well Log Analysis
[2] Seismic Methods
[3] Drone
[4] Image processing
[5] Odling

استناد به این مقاله:

حشمتی، علی و تقی‌زاده منظری، مهرداد، ۱۴۰۴. شبیه‌سازی یکپارچه‌ی جریان دو فاز در مخازن ترک‌دار طبیعی با روش ترک مجازی افزوده و پردازش تصاویر هوایی. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص.۵۸-۶۹. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64497.3331

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

وضعیت شبکه‌ی ترک‌ها در عمق باشد. به ویژه فرض می‌شود که ابعاد و وضعیت قرارگیری و تقاطع ناپیوستگی‌های مذکور، متناظر با ویژگی‌هایی نظیر طول ترک‌ها و نحوه‌ی تقاطع آن‌ها با یکدیگر باشد.[۴]

در سال‌های اخیر، از تصاویر هوایی رخنمون‌ها برای مدل‌سازی ترک‌های زیرِ زمین استفاده شده است. برونا[۶] و همکارانش (۲۰۱۹)،[۵] از داده‌های رخنمون برای ترسیم هندسه‌ی شبکه‌ی ترک‌های زیرسطحی استفاده کرده‌اند. شاه و همکارانش (۲۰۱۶)،[۶] برای بررسی مدل‌شان از شبکه‌ی ترکی که از مطالعه‌ی بیسدوم[۷] و همکارانش (۲۰۱۴)،[۷] به‌دست آمده بود، استفاده کردند، که براساس عکس‌های رخنمون ساخته شده بود. گایگر[۸] و همکارانش (۲۰۱۳)،[۸] از تصویر یک رخنمون در مراکش برای ساخت شبکه‌ی ترک‌ها استفاده کرده‌اند تا دقت شبیه‌سازی خود را افزایش بدهند. بیسدوم و همکارانش (۲۰۱۷)،[۹] با استفاده از تصویربرداری از رخنمون‌ها توسط پهپاد، شبکه‌ی ترک مربوط به سازند جاندایرا[۹] را تولید کردند. اگیا[۱۰] و همکارانش (۲۰۱۹)،[۱] از همان شبکه‌ی ترک برای تحلیل جریان در مخزن استفاده کرده‌اند.

در بسیاری از مطالعات، روش‌های پردازش تصویر برای تجزیه‌وتحلیل ساختارهای زمین‌شناسی استفاده شده‌اند؛ که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به دسته‌بندی تصاویر[۱۱] و استخراج ویژگی[۱۲] اشاره کرد. منظور از دسته‌بندی تصویر، در واقع دسته‌بندی پیکسل‌های یک تصویر به گروه‌های مختلف براساس 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 دسته‌بندی‌کردن 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 روش‌هایی مانند لبه‌یابی استفاده می‌شود.[۱۰] به‌عنوان مثال، واسوکی[۱۳] و همکارانش (۲۰۱۴)،[۱۱] از روش‌های لبه‌یابی، برای نقشه‌برداری و شناسایی ویژگی ساختارهای زمین‌شناسی (از جمله گسل‌ها و ترک‌ها) استفاده کرده‌اند.

پس از تولید هندسه‌ی شبکه‌ی ترک، لازم است خواص فیزیکی هر ترک، شامل نفوذپذیری و بازشدگی[۱۴] آن مشخص شود و به ترک موردنظر اختصاص یابد. این فرآیند نیز معمولاً با عدم قطعیت زیاد همراه است و در یک شبکه‌ی بزرگ از ترک‌ها نیاز به سعی و خطای زیادی دارد. معیار اصلی برای مناسب‌بودن انتخاب خواص ذکرشده، نزدیک‌بودن رفتار مدل ساخته‌شده از نظر جریان سیال به مقادیر ثبت‌شده در چاه‌های تولیدی یا تزریقی مخزن واقعی است، فرایندی که به تطبیق تاریخچه[۱۵] مشهور است. چالش بعدی، شبیه‌سازی دینامیکی جریان در یک مخزن ترک‌دار طبیعی است. به‌دلیل پیچیدگی هندسه‌ی ترک‌ها، روش‌های سنتی، شبیه‌سازی مخزن جزئیات ترک‌ها را لحاظ نمی‌کردند و فقط با کمک مدل‌های تقریبی دو- محیطی[۱۶]، اندرکنش سنگ و ترک با یکدیگر را تقریب می‌زدند. در میان مدل‌های مذکور، مدل تخلخل دوگانه- نفوذپذیری دوگانه[۱۷] کامل‌ترین مدل کاربردی محسوب می‌شود. البته یک چنین مدلی دوباره نیاز به تنظیم‌های خاص دارد و معمولاً سعی می‌شود با کمک داده‌های چاه‌های تولیدی، تطبیق تاریخچه صورت گیرد و مدل به واقعیت مخزن نزدیک شود.

در کنار مدل دو محیطی، مدل ترک مجزا[۱۸] تلاش می‌کند با محسوب‌کردن جزئیات هندسی و فیزیکی هر ترک، تأثیر آن را در جریان سیال لحاظ کند. این مدل در مقایسه با مدل قبلی، پُرهزینه است؛ و معمولاً برای مسائل کاربردی غیر قابل اجراست. لی و لی[۱۹] (۲۰۰۸)،[۱۲] مدل ترک مجزای افزوده (EDFM)[۲۰] را به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای دو مدل دیگر معرفی کرده‌اند؛ که در آن، هندسه‌ی همه‌ی ترک‌ها با جزئیات کامل در هندسه‌ی مخزن گنجانده می‌شود، ولی به‌دلیل روش عددی به‌کاررفته برای شبیه‌سازی جریان، هزینه‌ی محاسباتی به‌مراتب کمتری از مدل ترک مجزا دارد. البته مدل اخیر هنوز از مدل تقریبی دو محیطی پُرهزینه‌تر است.

برخلاف روش تخلخل دوگانه- نفوذپذیری دوگانه، که در آن ترک به‌عنوان یک محیط پیوسته‌ی همپوشان با ماتریس در سرتاسر ناحیه‌ی حل پخش می‌شود؛ در روش EDFM، هندسه‌ی هر ترک دقیقاً 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 فقط با سلول متناظر از ماتریس تبادل جریان دارد. در ضمن برخلاف روش EDFM، که خواص فیزیکی ترک (نظیر نفوذپذیری و بازشدگی) را لحاظ می‌کند، روش تخلخل دوگانه- نفوذپذیری دوگانه از مقادیر متوسط‌گیری‌شده‌ی تخلخل و نفوذپذیری برای ترک استفاده می‌کند، که دقت روش را کاهش می‌دهد. بزرگ‌ترین مزیت روش EDFM، بی‌نیازی آن 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 (۲۰۱۳)،[۱۳] و معین‌فر و همکارانش (۲۰۱۴)،[۱۴] توانایی مدل‌سازی ترک‌های شیب‌دار با زاویه‌ی دلخواه را به مدل افزوده‌اند. همچنین وانگ[۲۱] و همکارانش (۲۰۱۹)،[۱۵] برای درنظرگرفتن ترک‌های با شکل‌های دلخواه در هندسه‌ی سه‌بُعدی، یک الگوریتم محاسباتی کارآمدتر (3D-EDFM) را ارائه کرده‌اند؛ که به‌طورکلی قادر به بررسی تعداد دلخواه ترک‌های سه‌بُعدی با انواع شیب، شکل هندسی، انحنا، و نحوه‌ی اتصال ترک‌ها به یکدیگر است. مدل اولیه‌ی EDFM، سازگاری کمی با مخازن با شکل هندسی نامنظم دارد، هر چند تقریباً تمام مخازن دنیا از این نوع هستند.

---

[6] Bruna
[7] Bisdom
[8] Geiger
[9] Jandaira formation
[10] Egya
[11] Image classification
[12] Feature extraction
[13] Vasuki
[14] Aperture
[15] History matching
[16] Dual continuum
[17] Dual porosity-Dual permeability model
[18] Discrete fracture model
[19] Li & Lee
[20] Embedded Discrete Fracture Model
[21] Wang

ژانگ و شنگ[22] (۲۰۲۱)،[۱۶] توانسته‌اند مدل را بر روی شبکه‌ی بی‌سازمان با سلول‌های چهارگوش توسعه دهند و مدل خود را (UnQ-EDFM)[23] نامیده‌اند؛ که علاوه‌بر افزایش سازگاری رویکرد EDFM با مخازن با شکل هندسی نامنظم، دقت بالاتر و هزینه‌ی محاسباتی کمتری دارد.

استفاده از مدل EDFM نشان داده است در مواردی که نفوذپذیری ترک‌ها کمتر از سنگ باشد، مدل دقت پایینی دارد؛ که برای رفع آن، تِنه[24] و همکارانش (۲۰۱۷)،[۱۷] مدل ترک مجزای افزوده‌ی مبتنی بر تصویرسازی (pEDFM)[25] را توسعه داده‌اند. ایشان الگوریتمی را پیاده کرده‌اند که در آن قابلیت انتقال ماتریس (سنگ)، مطابق با نفوذپذیری شبکه‌های ترک‌های همسایه اصلاح شود. اولوروده[26] و همکارانش (۲۰۲۰)،[۱۸] یک الگوریتم سه‌بُعدی را برای pEDFM ارائه کرده‌اند، که قابلیت مدل‌سازی ترک‌ها را در هر راستای دلخواه در فضای سه‌بُعدی فراهم می‌کند. یکی دیگر از ضعف‌های مدل اولیه‌ی EDFM این است که در شبیه‌سازی مخازن با نفوذپذیری بسیار پایین[27] دچار خطای زیادی می‌شود. اولوروده و رشید (۲۰۲۲)،[۱۹] رویکرد tEDFM را برای غلبه بر این مشکل ارائه کرده‌اند. به هر حال، در سال‌های اخیر گرایش به رویکرد EDFM برای شبیه‌سازی جریان در مخازن ترک‌دار رو به افزایش بوده است. از جمله‌ی مطالعات انجام‌شده می‌توان به مطالعات: رن[28] و همکارانش (۲۰۱۸)،[۲۰] شکیبا و همکارانش (۲۰۱۸)،[۲۱] و جیانگ[29] و همکارانش (۲۰۲۲)،[۲۲] اشاره کرد.

در نوشتار حاضر، از نسخه‌ی a- ۲۰۲۳ نرم‌افزار منبع باز MRST[30]، که در محیط نرم‌افزار متلب توسعه یافته است، برای شبیه‌سازی جریان در مخزن استفاده شده است. نسخه‌ی مذکور قابلیت حل مسائل با مدل EDFM را دارد و به‌علاوه‌ی انواع مدل‌های جریان‌های تک‌فاز و چندفاز، مدل‌های ترکیبی و حرارتی را شامل می‌شود. نرم‌افزار MRST، به‌طورگسترده توسط پژوهشگران مختلف در دنیا استفاده شده و آزمایش‌های عددی زیادی را با موفقیت گذرانده است.

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

در ادامه، ابتدا الگوریتم پردازش تصویری توسعه‌یافته شده برای مدل‌سازی مخزن و سپس، شبیه‌سازی جریان در ترک و فرضیه‌ها و طرز کار روش عددی EDFM شرح داده شده است. در بخش نتایج، اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر و خواص فیزیکی سنگ و ترک در شبیه‌سازی جریان در مخزن بررسی شده است.

۲. مدل‌سازی مخزن

در بخش حاضر، ابتدا روش تولید هندسه‌ی شبکه‌ی ترک‌ها از تصاویر هوایی به‌دست‌آمده از رخنمون‌ها تشریح و سپس با افزودن شرایط مرزی مناسب و قراردادن چاه‌های (تولید یا تزریق) به هندسه‌ی مذکور، مدل استاتیکی مخزن ساخته شده است. در ادامه، فرمول‌بندی و الگوریتم تحلیل دینامیکی مخزن با کمک روش EDFM توضیح داده شده است.

۱.۲. تولید هندسه‌ی ترک‌ها با پردازش تصویر

در بخش کنونی، فرآیند تولید شبکه‌ی ترک‌ها از تصاویر هوایی به‌دست‌آمده از یک منطقه‌ی مشخص تشریح شده است. در تولید عکس‌های هوایی، عواملی نظیر: کیفیت تصویر، وجود موانع طبیعی مثل پوشش گیاهی،[۴] و وجود سایه‌ها می‌توانند در نتیجه‌ی نهایی تأثیر زیادی بگذارند. لذا پس از تهیه‌ی عکس‌های هوایی، لازم است که فرآیند پردازش تصویر روی آن‌ها انجام پذیرد تا در حد امکان، تأثیر عوامل اخیر به میزان کمینه برسد. باید پذیرفت که علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در علم پردازش تصویر، هنوز در موارد زیادی کسب نظر یک کارشناس زمین‌شناسی و انجام اصلاحات دستی ضروری است.[۱۱ و ۲۳] در ادامه، مراحل لازم برای آماده‌سازی شبکه‌ی ترک‌ها از تصاویر هوایی تشریح شده‌اند. در شکل ۱، الگوریتم پردازش تصویر به‌کاررفته در نوشتار حاضر مشاهده می‌شود. کد پردازش تصویر به زبان برنامه‌نویسی پایتون و با استفاده از کتابخانه‌های اوپن‌سی‌وی،[۲۴] و سایکیت ایمیج،[۲۵] توسعه داده شده است.

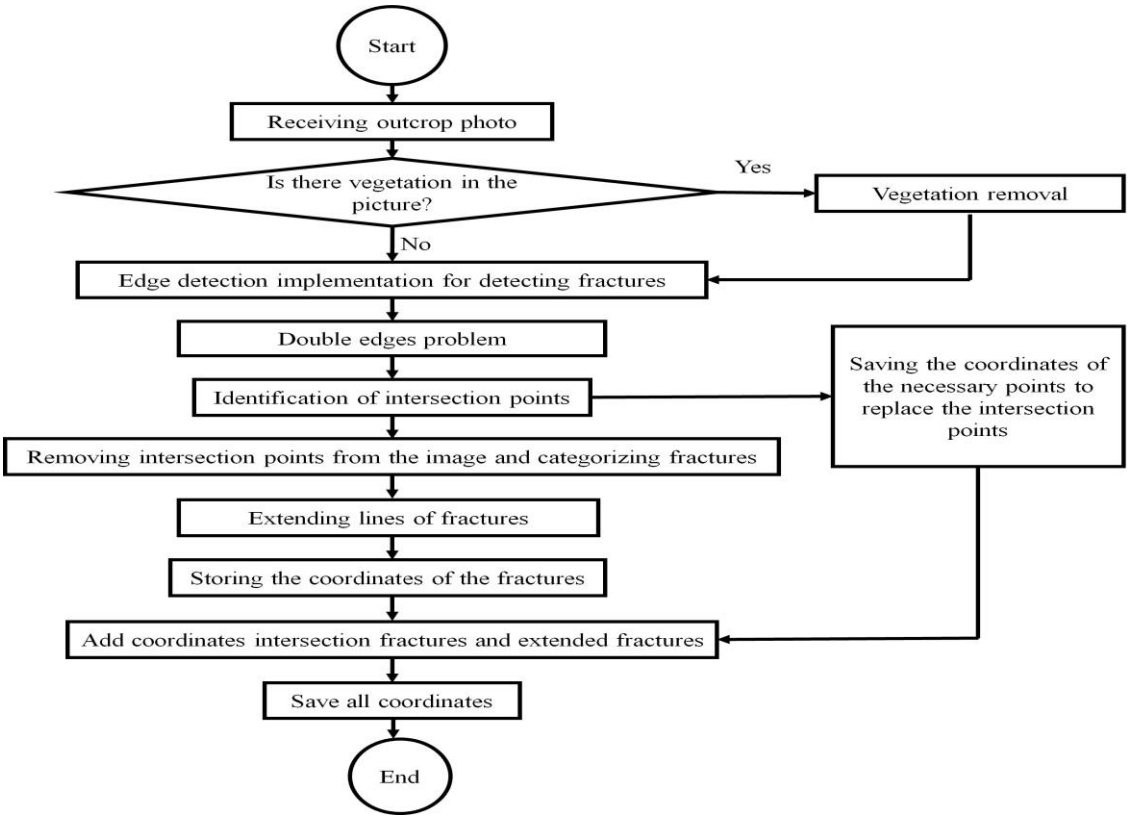
– حذف پوشش گیاهی

در ابتدا، پوشش گیاهی در تصویر به کمک یک ماسک رنگ فیلترکننده‌ی رنگ سبز، شناسایی و از تصویر حذف شده‌اند. در مرحله‌ی بعد لازم است تصویر مناطق خالی‌شده از پوشش گیاهی بازسازی شود. در پژوهش حاضر، از الگوریتم بازسازی تصویر[31] که توسط تِلیا[32] (۲۰۰۴)،[۲۶] معرفی شده است، برای بازسازی پوشش گیاهی حذف‌شده از تصاویر هوایی استفاده شده است. الگوریتم مذکور براساس یک معادله‌ی دیفرانسیل مشتقات جزئی است، که انتشار اطلاعات از مناطق شناخته‌شده به مناطق ناشناخته یا حذف‌شده را مدل می‌کند.

– شناسایی ترک‌ها و حذف لبه‌های مضاعف

در مطالعه‌ی حاضر، از الگوریتم تشخیص لبه برای شناسایی ترک‌ها استفاده شده است. یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تشخیص لبه، روش کَنی[33] (۱۹۸۳)،[۲۷] است، که با حفظ ویژگی‌های اصلی تصویر، زوائد و نویزها را حذف می‌کند. الگوریتم کَنی از یک فیلتر گاوسی، همراه با دو آستانه‌ی بالا و آستانه‌ی پایین[34] (که این مقادیر باید با توجه به تصویر ورودی توسط کاربر انتخاب شوند) استفاده می‌کند. در نتیجه، با استفاده از الگوریتم مذکور، 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 روش لبه‌یابی شناسایی می‌شود، به‌علت ضخامت ترک در تصویر، دو لبه خواهد داشت. به عبارت دیگر، الگوریتم تشخیص لبه ممکن

[22] Zhang & Sheng
[23] Unstructured Quadrangular Grid-based Embedded Discrete Fracture Model
[24] Ţene
[25] Projection-based EDFM
[26] Olorode
[27] Tight reservoirs
[28] Ren
[29] Jiang
[30] MATLAB Reservoir Simulation Toolbox
[31] Image inpainting
[32] Telea
[33] Canny
[34] Upper threshold and lower threshold



شکل ۱. الگوریتم پردازش تصویر برای شناسایی ترک‌ها.

است آن را به‌صورت دو خط مجزای کنار هم تشخیص دهد، که این مشکل معمولاً به‌عنوان پیدایش لبه‌های مضاعف یا لبه‌های دوگانه شناخته می‌شود؛ که برای حل آن، از روش‌های مورفولوژی[۳۵] استفاده می‌شود، تا بتوان دو لبه را به یک لبه تبدیل کرد. در این مرحله‌ی بخصوص، از یک عملیات مورفولوژی به نام بستن[۳۶] (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 فقط به یک پیکسل محدود شود. برای این کار از یک عملیات مورفولوژی دیگر به نام اسکلت‌سازی[۳۷] (تابع skeletonize در کتابخانه‌ی پایتون سایکیت ایمیج) استفاده شده است. 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 مشخص‌شدن محل ترک‌ها لازم است آن‌ها را دسته‌بندی و ساده‌سازی کرد، تا بتوان از آن‌ها به عنوان داده‌ی ورودی برای مدل دینامیکی مخزن استفاده کرد. برای این منظور، از روش‌های شناسایی منطقه[۳۸] در پردازش تصویر استفاده می‌شود. یکی از روش‌های متعدد برای شناسایی منطقه، برچسب‌گذاری هر منطقه (یا هر مرز) با یک عدد صحیح منحصر به فرد است. در برچسب‌گذاری به‌کاررفته در نوشتار حاضر از روش برچسب‌گذاری ۸ همسایه‌ای استفاده شده است؛[۱۰] که در آن ممکن است دو برچسب متفاوت در کنار یکدیگر قرار بگیرند. این مسئله به‌دلیل وجود منحنی‌های U شکل ممکن است رخ دهد، که به‌دلیل ماهیت ردیف به ردیف بررسی‌شدن تصویر اتفاق می‌افتد. در این حالت، جفت برچسب‌ها به‌عنوان 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 و سپس ترک‌ها را برچسب‌گذاری کرد. حذف نقاط تقاطع ترک‌ها به ساختار شبکه‌ی ترک‌ها آسیب می‌رساند و بنابراین لازم است آن‌ها را مجدداً به‌عنوان ترک به فهرست مختصات ترک‌ها اضافه کرد. در بخش بعد، نحوه‌ی تشخیص محل تلاقی ترک‌ها و مختصات جایگزین نقاط مذکور شرح داده شده است.

پس از برچسب‌گذاری تمام پاره‌خط‌ها (ترک‌ها) و حذف نقاط تلاقی ترک‌ها، مختصات پیکسل‌های تمامی پاره‌خط‌ها (ترک‌ها) ذخیره می‌شوند. مختصات پاره‌خط‌های اخیر باید ساده‌سازی شوند تا برای استفاده در شبیه‌سازی مخزن مناسب باشند. پیش از ساده‌سازی باید توجه داشت که در شبیه‌ساز MRST، ترک‌ها فقط به‌صورت صفحات مستوی (مسطح) منظور شوند. برای ساده‌سازی، با انتخاب یک طول معیار، خطوط منحنی حاصل از پردازش تصویر به پاره‌خط‌هایی شکسته می‌شوند. به‌عنوان مثال، به جز مختصات ابتدایی و انتهایی ترک‌ها، مختصات سایر پیکسل‌های ذخیره‌شده بین دو نقطه‌ی ابتدایی و انتهایی، ۵ تا ۵ تا خوانده می‌شود. توجه شود که طول معیار، به مقیاس عکس و پیچیدگی شبکه‌ی ترک‌ها وابسته است. همچنین معیاری تعریف می‌شود (مثلاً ۳ پیکسل) ، که اگر پاره‌خطی از حد مذکور کوچک‌تر باشد، کاملاً نادیده گرفته شود؛ چرا که چنین ترکی تأثیر ناچیزی در 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؛ که برای رفع مشکل مذکور، خطوط شکسته و برچسب‌گذاری‌شده به اندازه‌ی ۱ واحد از دو طرف

[35] Morphology
[36] Closing
[37] Morphological skeleton
[38] Region identification

امتداد می‌یابند. بنابراین، دو پاره‌خطی (ترکی) که فقط 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 باید محل تلاقی ترک‌ها (یا نقاط تداخل) را شناسایی کرد. در محل تلاقی ترک‌ها به‌دلیل باینری‌بودن تصویر و یک پیکسلی‌بودن ضخامت خطوط در لبه‌یابی، مقادیر پیکسل‌ها، آرایشی مشابه با یکی از ماتریس‌های رابطه‌ی ۱ (یا چرخش‌های آن‌ها) خواهند داشت:

$$\begin{bmatrix}1&0&1\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1&1&1\\0&1&0\\0&0&0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1&0&1\\0&1&0\\1&0&0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&1\\0&1&0\end{bmatrix} \quad (۱)$$

در ماتریس‌های مذکور، مقدار ۱ نماینده‌ی پیکسل‌هایی است که لبه (ترک) تشخیص داده می‌شود و مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی پس‌زمینه (سنگ) است. در اینجا، ابعاد ماتریس (۳×۳) انتخاب شده است، زیرا درنظرگرفتن ابعاد بزرگ‌تر برای ماتریس، فقط تعداد آرایش‌های مختلف ماتریس موردنیاز برای شناسایی نقاط تداخل را افزایش می‌دهد.

با توجه به اختلاف بالای نفوذپذیری سنگ و ترک باید 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 تأثیر ترک‌های کوچک به شبکه ناچیز است، برای جایگزینی نقاط تداخل با اضافه‌کردن چند ترک کوچک از اتصال مجدد ترک‌ها اطمینان حاصل می‌شود. در شکل ۲، مراحل جایگزینی نقاط تقاطع دو ترک در الگوریتم مشاهده می‌شود. در شکل ۲- a ، انواع برخورد دو ترک در تصویر باینری و در شکل ۲- b، نحوه‌ی تشخیص پیکسل‌های متصل به محل تقاطع که به کمک ماتریس‌های رابطه‌ی ۱ شناسایی شده‌اند، مشاهده می‌شوند. در شکل ۲- c، پیکسل‌های شناسایی‌شده در شکل ۲- b برای دسته‌بندی صحیح خطوط حذف شده‌اند. در این مرحله خطوط باقی‌مانده برچسب‌گذاری می‌شوند. در شکل ۲- d، پیکسل‌های جایگزین برای پیکسل‌هایی حذف‌شده نشان داده شده‌اند. در شکل ۲- e نیز مشاهده می‌شود که خطوط ترک‌ها مجدداً به یکدیگر متصل شده‌اند، اما پیکسل‌هایی به شکل اولیه‌ی ترک‌ها اضافه شده است، که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در جریان سیال نخواهند داشت.

۲.۲. شبیه‌سازی جریان در ترک

در بخش حاضر، کلیاتی در مورد روش EDFM همراه با فرضیه‌های اساسی آن و نحوه‌ی مدل‌سازی جریان در مخزن ترک‌دار تشریح شده است.

- معادله‌های حاکم بر جریان و گسسته‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار MRST

جریان تک‌فاز در یک محیط متخلخل معمولاً با کمک قانون دارسی (رابطه‌ی ۲) توصیف می‌شود. بسط قانون دارسی به جریان چندفازی اغلب به موسکات[39] (۱۹۳۸)،[۲۸] نسبت داده می‌شود؛ که سرعت هر فاز (سرعت دارسی) را به گرادیان فشار آن فاز و خواص فیزیکی سنگ و سیال ربط می‌دهد.

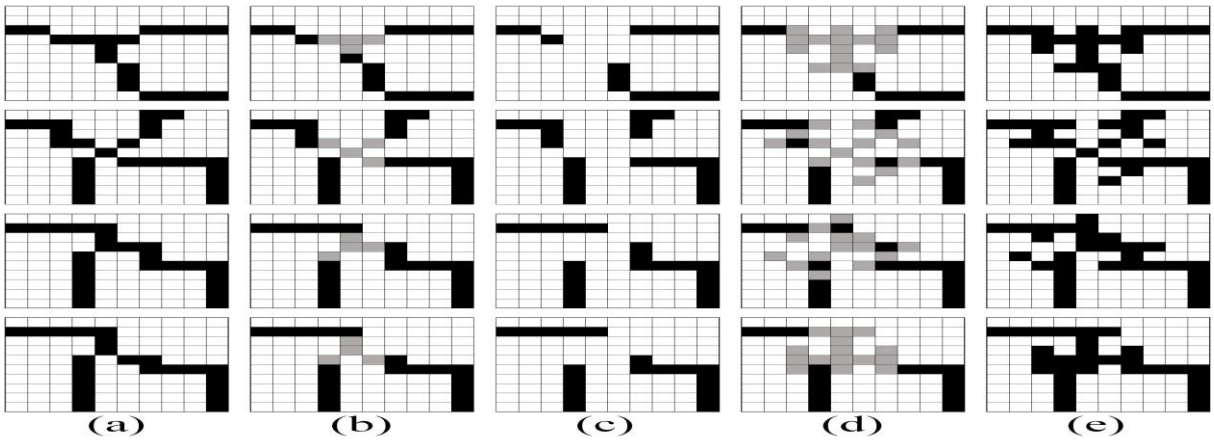
$$\mathbf{v}_\alpha = -\frac{K\,k_{r\alpha}}{\mu_\alpha}\left(\nabla p_\alpha - \rho_\alpha g \nabla z\right) \quad (۲)$$

که در آن، K نفوذپذیری مطلق، $k_{r\alpha}$ نفوذپذیری نسبی، μ لزجت دینامیکی، p فشار سیال، g ثابت مثبت گرانش، ρ چگالی سیال، و z نماینده‌ی محور مختصات در راستای گرانش است. اندیس α در معادله‌ی ۲، فاز سیال را نشان می‌دهد. در نوشتار حاضر، سیال‌های مخزن به‌صورت دو فاز امتزاج‌ناپذیر در نظر گرفته شده‌اند. برای توصیف نفوذپذیری نسبی در چنین سیستمی، رابطه‌ی توانی یا مدل کوری[40]، استفاده شده است.[۲۹]

برای تحلیل جریان چند فاز امتزاج‌ناپذیر در محیط متخلخل لازم است به تعداد فازهای موردنظر، معادله‌ی بقای جرم نوشته شود. معادله‌ی بقای جرم برای جریان چندفازی سیال‌های امتزاج‌ناپذیر در یک محیط متخلخل بدون ترک به شکل رابطه‌ی ۳ نوشته می‌شود:

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

که در آن، ϕ ، S_α، و ρ_α به ترتیب مقدار تخلخل سنگ، اشباع هر فاز، و چگالی سیال را نشان می‌دهند. همچنین q نشانگر چشمه یا چاه‌ها[41] (خروجی و ورودی سیال‌ها) است. در شبیه‌ساز مخزن MRST گسسته‌سازی سیستم حاصل از معادله‌ها کاملاً ضمنی و برای فاز α به‌صورت رابطه‌های ۴ و ۵ است:[۲۹]



شکل ۲. (a) محل برخورد دو ترک؛ (b) شناسایی محل نقاط تقاطع؛ (c) حذف پیکسل‌های تقاطع برای دسته‌بندی صحیح خطوط؛ (d) افزودن پیکسل‌های جایگزین برای نقاط تقاطع جهت اتصال مجدد ترک‌ها؛ (e) نهایی‌کردن شکل تقاطع دو ترک پس از اتصال مجدد.

[39] Muskat
[40] Corey model
[41] Source and sink

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

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

بالانویس‌ها به گسسته‌سازی زمان اشاره دارد و $(\Delta t)^n$ نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی گام زمانی n اُم است. چنانچه مخزن ترک‌دار باشد، لازم است برای هر ترک یک محیط متخلخل مجزا در نظر گرفته شود و برای آن ترک، معادله‌های بقای جرم فازها نوشته شود. به‌عبارت دیگر، تعداد کل معادله‌های بقای جرم برابر با تعداد فازها ضربدر تعداد ترک‌های مجزا به‌علاوه‌ی یک (برای سنگ مخزن) خواهد بود. همه‌ی معادله‌های بقای جرم برای جریان فاز α در یک سیستم سه‌بُعدی با تعداد N_f ترک مجزا، در شکل فشرده مطابق رابطه‌ی ۶ خواهند بود:

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

که در آن، هر ترک با شاخص i نشان داده می‌شود. ماتریس با استفاده از شاخص i=۰ 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 طورمشابه، $q_\alpha^{i,j}$ با واحد $((m^3/s)/m^2)$ تابع انتقال جریان از ترک i به ترک j است. معادله‌های ترک از طریق $q_\alpha^{i,j}$ با یکدیگر جفت می‌شوند. با این حال، از آنجا که ترک‌ها همیشه یکدیگر را قطع نمی‌کنند، برای برخی از جفت‌های ترک، $q_\alpha^{i,j}$=۰ می‌شود. جریان در ماتریس نیز به صورت رابطه‌ی ۷ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\phi^0\rho_\alpha S_\alpha^0\right)+\nabla.\left(\rho_\alpha \mathbf{v}_\alpha^0\right)=\frac{\rho_\alpha^0}{a_i}\left(q_\alpha^0-\sum_{j=1,j\neq 0}^{N_f} q_\alpha^{0,j}\right) \quad (۷)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تمام معادله‌های ترک‌ها از طریق $q_\alpha^{0.i}$ به معادله‌ی ماتریس جفت می‌شوند.

در ادامه، فرضیه‌ها و طرز کار روش عددی EDFM تشریح شده‌اند. نخست، نحوه‌ی مدل‌سازی یک ترک مستقل و سپس چگونگی ایجاد ارتباط بین ماتریس و ترک و ترک‌ها با یکدیگر توضیح داده شده است.

- مدل‌سازی یک ترک

همان‌طور که گفته شد، در نوشتار حاضر، هر ترک به‌صورت یک سطح مستوی با مرزهای مشخص توصیف می‌شود. به‌طورطبیعی هر ترک توسط ماتریس احاطه می‌شود و در ضمن ممکن است با ترک یا ترک‌های دیگری در تلاقی باشد. در رویکرد EDFM، ابتدا ماتریس به‌صورت باسازمان شبکه‌بندی می‌شود. سپس هر ترک به‌عنوان یک فضای سه‌بُعدی با سطحی بزرگ و ضخامتی کم، مستقلاً شبکه‌بندی می‌شود. معمولاً اندازه‌ی سلول‌های محاسباتی در ترک به‌مراتب از اندازه‌ی 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 به‌طورطبیعی با سلول‌های همسایه، سیال تبادل می‌کند. بنابراین تعیین سلول‌های همسایه (از جنس ماتریس یا ترک) با هر سلول ترک، اهمیت زیادی دارد و در مرحله‌ی پیش‌پردازش 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، به‌طورسنتی و مشابه آنچه در مدل‌های دومحیطی انجام می‌شود، از یک ضریب انتقال‌پذیری[42] (T) برای این کار استفاده می‌شود. برای دو سلول همسایه در ماتریس (با شماره‌های i و i+۱)، ضریب انتقال‌پذیری $T_{i+1/2}$ به‌صورت رابطه‌ی ۸ تعیین می‌شود:

$$T_{i+1/2}=\frac{K_{i+1/2}A_{i+1/2}}{d} \quad (۸)$$

که در آن، $K_{i+1/2}=\left(K_i^{-1}+K_{i+1}^{-1}\right)^{-1}$ نفوذپذیری مطلق در مرز دو سلول، $A_{i+1/2}$ مساحت سطح مشترک دو سلول، و d فاصله‌ی مراکز دو سلول است. همچنین دبی انتقالی بین دو سلول همسایه مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

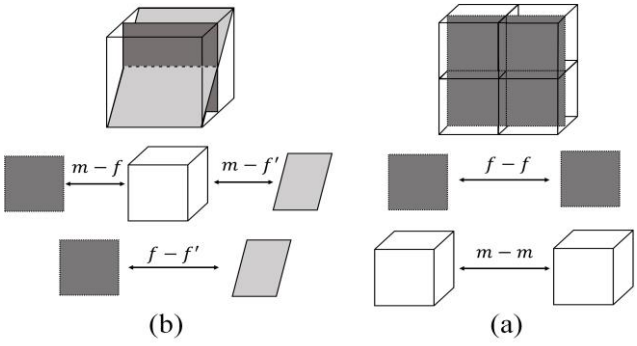
$$\left(q_\alpha\right)_{i+1/2}=T_{i+1/2}\frac{k_{r\alpha}}{\mu_\alpha}\left(p_{\alpha,i+1}-p_{\alpha,i}\right) \quad (۹)$$

این محاسبات هنگامی که تبادل جریان بین دو سلول از جنس‌های متفاوت صورت گیرد، قدری پیچیده‌تر می‌شود. در اینجا سه حالت می‌تواند مطابق شکل ۳ اتفاق بیفتد: 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 ۳ حالت مذکور ارائه شده‌اند.

لی و لی (۲۰۰۸)،[۱۲] با فرض آنکه جریان، همیشه عمود بر سطح ترک است، برای فاصله‌ی متوسط بین حجم کنترل‌های ماتریس و ترک (d_{m-f})، یک معادله‌ی انتگرالی به‌صورت رابطه‌ی ۱۰ پیشنهاد کرده‌اند:

$$d_{m-f}=\frac{1}{V}\int_V \mathbf{n}.\mathbf{x}\,dV \quad (۱۰)$$

که در آن، n بردار یکه‌ی عمود بر صفحه‌ی ترک و dv المان حجم است. V حجم سلول شبکه‌ی ماتریس و x بردار تعیین‌کننده‌ی مکان المان حجم (dv)



شکل ۳. (الف) در روش ترک‌های مجزا، صفحات ترک بوسیله‌ی سلول‌های ماتریس جدا می‌شوند و تبادل جریان بین صفحات ترک جداشده 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.

[42] Transmissibility factor

هستند. انتگرال با استفاده از روش‌های عددی محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی میانگین فاصله‌ی نرمال، قابلیت انتقال معادل برای اتصال بین یک قطعه‌ی ترک و یک سلول شبکه‌ی ماتریس به صورت رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$T_{m-f} = \frac{K_{m-f} A_{m-f}}{d_{m-f}} \qquad (۱۱)$$

که در آن، نفوذپذیری متوسط ($k_{m\text{-}f}$) میانگین هارمونیک نفوذپذیری‌های ماتریس و ترک است. زیرنویس m-f به اتصال ماتریس- ترک اشاره دارد. $A_{m\text{-}f}$ مساحت سطح بخشی از ترک است، که در داخل سلول شبکه محصور شده است.

برای هر دو سلول ترک f_1 و f_2 که با یکدیگر تلاقی می‌کنند، قابلیت انتقال $T_{f_1\text{-}f_2}$ تعریف می‌شود، که برای تعیین آن، نصف قابلیت انتقال[۴۳] هر سلول ترک مطابق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\left(T_{1/2}\right)_{f_i} = \frac{K_{f_i}\, a_{f_i} \left(L_{\cap}\right)_{f_1,f_2}}{\left(d_{\cap}\right)_{f_i}}, \qquad i = 1,2 \qquad (۱۲)$$

که در آن، K و a به ترتیب نفوذپذیری و بازشدگی سلول ترک‌ها هستند. $(L_{\cap})_{f_1,f_2}$ طول خط تقاطع بین دو سلول و $(d_{\cap})_{fi}$ میانگین فاصله‌ی عمودی بین مراکز هر قطعه‌ی ترک تا خط تقاطع است. قابلیت انتقال $T_{f_1\text{-}f_2}$ با استفاده از میانگین هارمونیک نصف قابلیت انتقال‌های دو ترک مطابق رابطه‌ی ۱۳ تعیین می‌شود:

$$T_{f_1-f_2} = \frac{\left(T_{1/2}\right)_{f_1}\left(T_{1/2}\right)_{f_2}}{\left(T_{1/2}\right)_{f_1} + \left(T_{1/2}\right)_{f_2}} \qquad (۱۳)$$

قابلیت انتقال برای جریان بین سلول‌های یک ترک مشخص به صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$T_{f-f} = \frac{k_f A_f}{d_f} \qquad (۱۴)$$

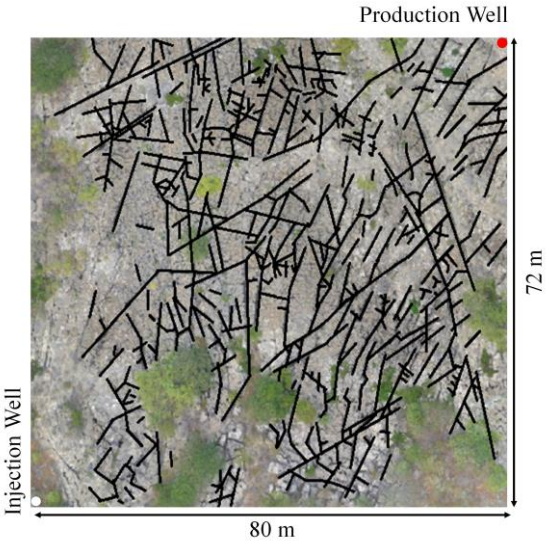
که در آن، k_f نفوذپذیری ترک و d_f فاصله‌ی بین مراکز دو سلول ترک است. A_f مساحت سطح مشترک دو سلول ترک است و به‌صورت ضرب بازشدگی ترک در طول لبه‌ی مشترک محاسبه می‌شود.

۳. نتایج

در بخش کنونی، ابتدا به تعریف مسئله و شرایط مخزن شبیه‌سازی‌شده‌ی پژوهش حاضر پرداخته شده است. سپس اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر، شامل کیفیت تصویر هوایی و پارامترهای لبه‌یابی بررسی شده‌اند. همچنین تأثیر پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی جریان در مخزن، شامل بازشدگی و نفوذپذیری ماتریس در رفتار دینامیکی مخزن بررسی شده است.

۱.۳. تعریف مسئله و شرایط مخزن

شبکه‌ی ترک‌ها و تصویر مخزن از منطقه‌ای در برزیل از مطالعه‌ی بیسدوم (۲۰۱۶)،[۴] برای بررسی برخی از پارامترهای با اهمیت در مطالعه‌ی حاضر انتخاب شده است. ابعاد مخزن مذکور ۵×۷۲×۸۰ متر بنا بر مقیاس داده‌شده در مطالعه‌ی حاضر انتخاب شده است. در شکل ۴، شبکه‌ی ترک‌های ترسیم‌شده در مطالعه‌ی بیسدوم،[۴] مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بر روی تصویر هوایی از سطح زمین بازسازی شده است. از آنجایی که شبکه‌ی ترک اخیر با کمک



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

دانش زمین‌شناسی، مطالعات میدانی، و پردازش تصویر هوایی از مکان‌های مختلف ساخته شده است، در مطالعه‌ی حاضر فرض شده است که شبکه‌ی مذکور، یک شبکه‌ی ترک واقعی است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تعداد ترک‌ها در مخزن بررسی‌شده بسیار زیاد است. لذا، رویکرد EDFM بر مدل ترک مجزا (شبکه‌ی بدون سازمان) برتری دارد؛ زیرا قادر است تا با هزینه‌ی محاسباتی بسیار کمتر، ترک‌ها را به‌طورصریح در نظر بگیرد. در پژوهش حاضر، به‌دلیل وجود شبکه‌ی پیچیده‌ای از ترک‌ها، که از پردازش تصویر به‌دست آمده است، کاهش هزینه‌ی محاسبات انجام‌شده، اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند.

مسئله به‌صورت ۲/۵ بُعدی (مخزن در راستای z گسسته نشده است) در نظر گرفته شده است. ابعاد سلول‌های مخزن ۵×۱×۱ در نظر گرفته شده است. بنابراین، شبکه‌بندی مخزن به‌صورت ۱×۷۲×۸۰ است. در مدل‌سازی کنونی فرض شده است که صفحه‌های ترک، عمودی هستند و صفحه‌های مایل ترک هم در مدل‌سازی وارد نمی‌شوند.

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

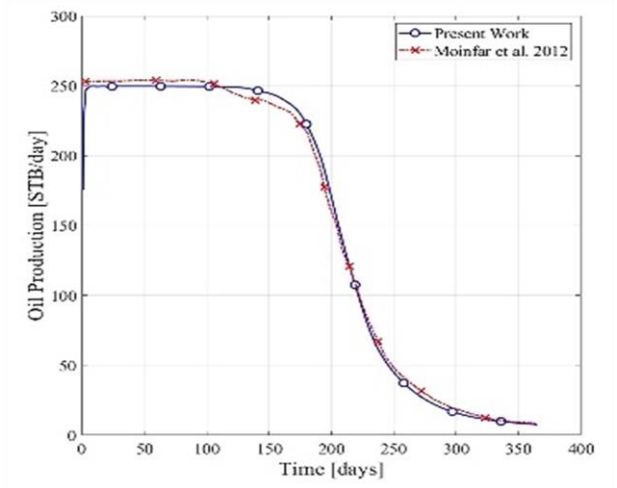
فشار اولیه‌ی مخزن و فشار ته چاه[۴۴] برای چاه تولیدکننده، ثابت و برابر ۳۰۰ بار در نظر گرفته شده است. میزان تزریق آب، ۱۴۰ بشکه در روز بوده است. داده‌های ذکرشده، مشابه مقادیری که در شبیه‌سازی مخزنی که توسط اگیا و همکارانش (۲۰۱۹)،[۱] در همین منطقه انجام شده بود، هستند.

[43] Half-transmissibility

[44] Bottom hole pressure

جدول ۱. اسامی مقاطع اعضاء تخصیص‌یافته‌ی سازه‌ی بررسی‌شده.

Variable	Value	Units
Matrix porosity	0.3	fraction
Matrix permeability	10	md
Fracture aperture	0.19	centimeter
Fracture permeability	3×10^6	md
Initial water saturation	0.2	fraction
Oil density	700	kg/m^3
Water density	1000	kg/m^3
Residual water saturation	0.2	fraction
Residual oil saturation	0.2	fraction
Water rel. permeability endpoint	0.8	-----
Oil rel. permeability endpoint	0.7	----
Water rel. permeability exponent	4	----
Oil rel. permeability exponent	2	----
Oil (C10H22) viscosity	0.19	centipoise
Water viscosity	0.8	centipoise

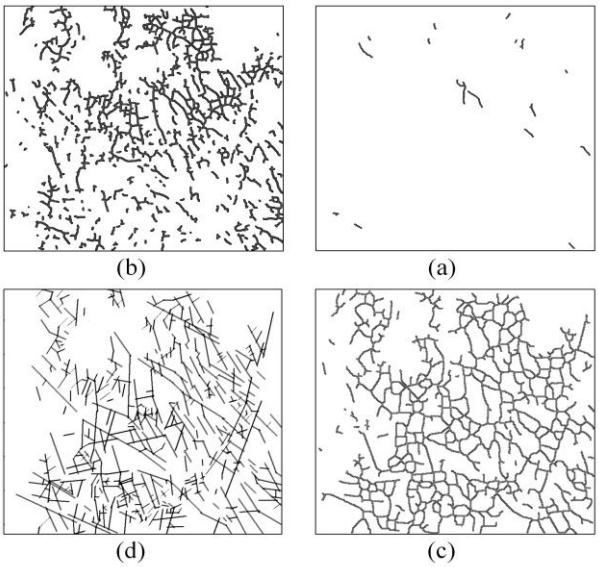


شکل ۵. شبیه‌سازی با MRST از مسئله‌ی مطالعه‌شده توسط معین‌فر و همکارانش (۲۰۱۲).[۳۱]

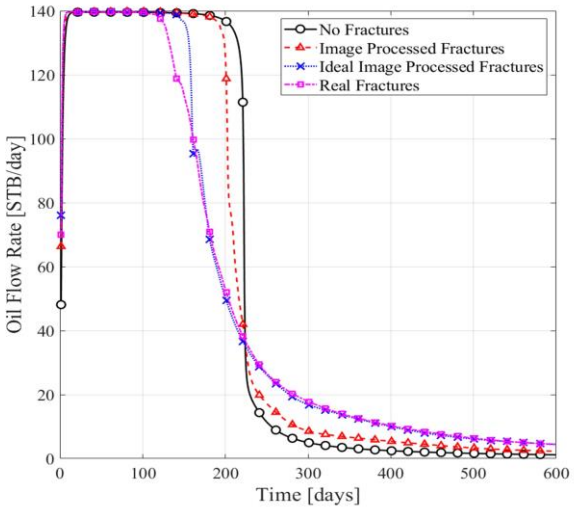
برای بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی با MRST از مسئله‌ی مطالعه‌شده‌ی معین‌فر و همکارانش (۲۰۱۲)،[۳۱] استفاده شده است و نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در آن با نتایج پژوهش حاضر تطابق خوبی داشته‌اند (شکل ۵).

۲.۳. بررسی اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر

در بخش حاضر، اثر پارامترهای مؤثر در پردازش تصویر، شامل اثر کیفیت تصویر هوایی و اثر متغیرهای لبه‌یابی بررسی شده‌اند.



شکل ۶. (الف) شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر عکس بی‌کیفیت؛ (ب) شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر عکس باکیفیت موجود؛ (ج) شبکه‌ی ترک پردازش تصویر ایده‌آل؛ و (د) شبکه‌ی ترک‌های واقعی از مطالعه‌ی بیسدوم،[۴].



شکل ۷. بررسی اثر کیفیت تصویر هوایی در نرخ تولید نفت روزانه.

۱.۲.۳. اثر کیفیت تصویر هوایی

برای بیان اهمیت کیفیت تصاویر، چهار شبکه‌ی ترک با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ که همه‌ی آن‌ها، 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 ایده‌آل، و شبکه‌ی ترک واقعی بوده‌اند (شکل ۶). برای به‌دست‌آوردن شبکه‌ی ترک حاصل از پردازش تصویر ایده‌آل، عملیات پردازش تصویر بر روی تصویری انجام شده است، که ترک‌ها به صورت کاملاً واضح بر روی آن نشان داده شده باشند (شکل ۴). شایان ذکر است هر سه شبکه‌ی حاصل از پردازش تصویر با مجموعه‌ی اولیه‌ی پارامترهای لبه‌یابی یکسان (فیلتر گاوسی ۲، آستانه‌ی بالای ۱۵۰، و آستانه‌ی پایین ۷۵) به‌دست آمده‌اند و فقط کیفیت تصاویر تغییر کرده است.

در شکل ۷، تأثیر کیفیت تصویر هوایی در نرخ تولید روزانه‌ی نفت برای چهار شبکه‌ی ترک ذکرشده مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، رفتار شبکه‌ی ترک

حاصل از پردازش تصویر ایده‌آل، 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.

۲.۲.۳. بررسی اثر متغیرهای لبه‌یابی

به‌منظور کسب شناخت بهتر از کارآیی روش کَنی، پارامترهای کلیدی روش تغییر داده شده‌اند، تا تأثیر آن‌ها در فرآیند تشخیص لبه و در نتیجه، کیفیت شبکه‌ی ترک تولیدی مشخص شود. مجموعه‌ی اولیه‌ی پارامترهای پایه برای مقایسه با فیلتر گاوسی ۲، آستانه‌ی بالای ۱۵۰، و آستانه‌ی پایین ۷۵ استفاده‌شده انتخاب شده‌اند. به‌طورکلی، انتخاب پارامترهای لبه‌یابی وابسته به تصویر هوایی موجود است. فیلتر گاوسی کوچک‌تر به‌طوربالقوه جزئیات ریزتری را ثبت می‌کند، اما تأثیر نویز در تصویر افزایش پیدا می‌کند. افزایش مقدار آستانه‌ی بالا، معیار سخت‌تری را برای درنظرگرفتن پیکسل به‌عنوان 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 لحاظ‌شدن 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.

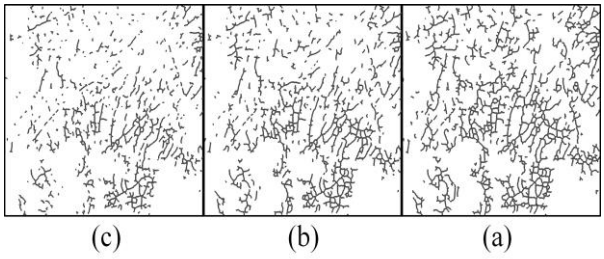
در شکل ۸، سه شبکه‌ی ترک به‌دست‌آمده به ازاء مقادیر مختلف آستانه‌ی پایین (۴۵، ۷۵، و ۱۰۵) مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، شبکه‌ی ترک اول (آستانه‌ی پایین با مقدار ۴۵) نتایج شبیه‌تری به شبکه‌ی ترک واقعی دارد. زیرا در شبکه‌ی مذکور، پیوستگی ترک‌ها بهتر شکل گرفته است و جریان سیال، رفتاری مشابه با حالت شبکه‌ی ترک واقعی از خود نشان می‌دهد (شکل ۹). باید توجه داشت که هر چند بهبود نتایج تا حدی وابسته به پارامترهای مذکور است، اما معمولاً از یک جایی به بعد نمی‌توان با کمک آن‌ها نتایج را بهبود بخشید، زیرا کیفیت تصویر این فرآیند را محدود کند.

۳.۳. بررسی اثر پارامترهای فیزیکی مخزن

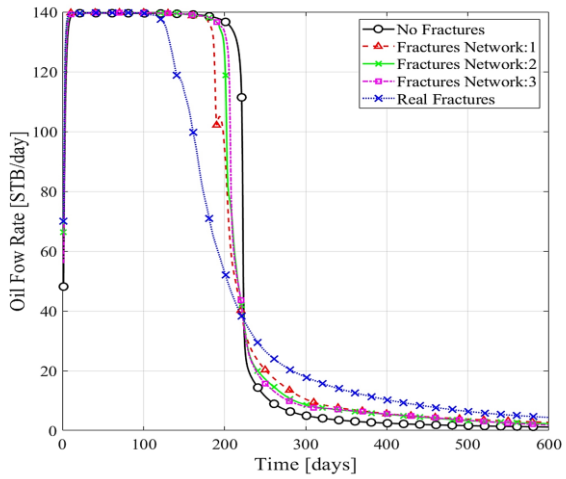
در بخش کنونی، تأثیر پارامترهای فیزیکی مخزن، شامل میزان بازشدگی‌ترک‌ها و نفوذپذیری ماتریس (سنگ) بررسی شده‌اند؛ که هر یک از آن‌ها در جریان سیال تأثیر می‌گذارند و نتایج شبیه‌سازی را تغییر می‌دهند. مخزن مطالعه‌شده، همان مخزن در بخش تعریف مسئله در نظر گرفته شده است. در ادامه، تأثیر هر یک از پارامترهای فیزیکی مخزن در نتایج بررسی شده است.

۱.۳.۳. بررسی اثر بازشدگی ترک‌ها

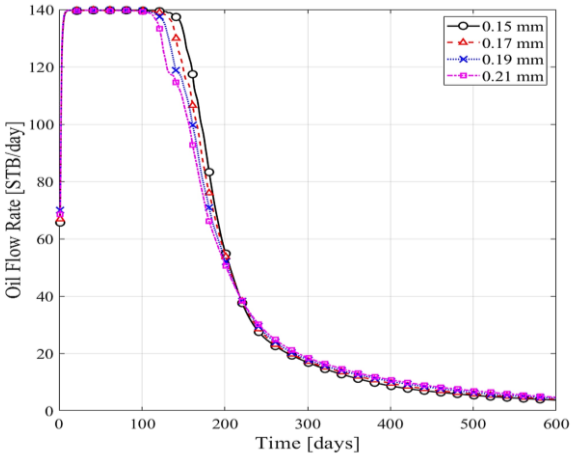
در ابتدا، یک مطالعه‌ی پارامتری بر روی بازشدگی ترک‌ها در شبیه‌سازی مخزن انجام شده است. در شبکه‌ی ترک‌های مطالعه‌ی بیسدوم و همکارانش (۲۰۱۶)،[۴] بازشدگی ترک‌ها، ۰/۱۵ تا ۰/۲۱ میلی‌متر فرض شده است؛ که ارتباط مستقیمی با نفوذپذیری ترک دارد (قانون مکعب،[۳۲]). در شکل ۱۰، تغییرات نرخ تولید نفت به ازاء مقادیر مختلف بازشدگی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش بازشدگی ترک‌ها، نرخ تولید نفت کاهش یافته است. در حضور ترک‌ها، به‌دلیل نفوذپذیری بسیار بالاتر آن‌ها نسبت به سنگ، جریان آب تزریق‌شده بیشتر در مسیر ترک‌ها حرکت می‌کند، زیرا با مقاومت کمتری روبرو می‌شود. این امر باعث می‌شود که بخشی از نفت موجود در مخزن، تحت تأثیر



شکل ۸. بررسی اثر آستانه‌ی پایین در مقادیر تنظیم‌شده در: (a) ۴۵، (b) ۷۵، و (c) ۱۰۵.



شکل ۹. بررسی اثر متغیرهای لبه‌یابی در نرخ تولید نفت روزانه.

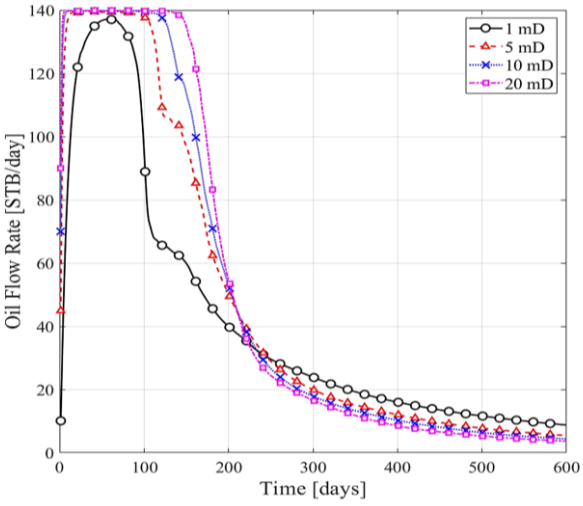


شکل ۱۰. بررسی اثر بازشدگی‌ترک‌ها در نرخ تولید نفت روزانه.

جریان آب قرار نگیرند؛ و در نتیجه، میزان نرخ تولید نفت کاهش می‌یابد. هر چه میزان نفوذپذیری ترک‌ها بیشتر باشد، بازسازی دقیق‌تر شبکه‌ی ترک‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت 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 کرد، تا از اتصال ترک‌ها به یکدیگر اطمینان حاصل شود. همچنین، در چنین مخازنی اهمیت کیفیت تصاویر (به‌دلیل بازسازی بهتر ترک‌ها) دو چندان می‌شود.

۲.۳.۳. بررسی اثر نفوذپذیری ماتریس

برای بررسی تأثیر نفوذپذیری ماتریس در شبیه‌سازی، یک مطالعه‌ی پارامتری با تغییر مقدار نفوذپذیری ماتریس (۱، ۵، ۱۰، ۲۰ میلی‌دارسی) انجام شده است.



شکل ۱۱. بررسی اثر نفوذپذیری ماتریس در نرخ تولید نفت روزانه.

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 یافته است. با کاهش نفوذپذیری ماتریس، شبکه‌ی ترک‌ها مسیر جریان را کنترل می‌کند و اتصال ترک‌ها به یکدیگر نقش مؤثری در نتایج می‌گذارد. در مخازن با نفوذپذیری بسیار پایین، اهمیت کیفیت تصاویر و متغیرهای پردازش تصویر دو چندان می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی مخازن ترک‌دار طبیعی به دو دلیل اصلی، یک چالش جدی برای مهندسان محسوب می‌شود:

۱) بازتولید شبکه‌ی ترک به‌طوری که تا حد خوبی به واقعیت نزدیک باشد، بسیار دشوار است.

۲) شبیه‌سازی یک مخزن با صدها یا هزاران ترک، مستلزم داشتن ابزار محاسباتی کارآمد و البته هزینه‌ی محاسباتی زیاد است.

در نوشتار حاضر، یک رویکرد یکپارچه بر مبنای پردازش تصویر برای بازسازی شبکه‌ی ترک از روی تصاویر هوایی به‌دست‌آمده از رخنمون ارائه شده است. به‌منظور شبیه‌سازی جریان دو فاز آب و نفت در مخزن از روش ترک مجزای افزوده (EDFM) استفاده شده است، که قادر است تعداد زیادی ترک را به‌طورهمزمان در مدل‌سازی لحاظ کند و اندرکنش بین سنگ و ترک و ترک‌ها با یکدیگر را با دقت بسیار خوبی منظور کند. همچنین پارامترهای مؤثر در عملکرد پردازش تصویر و روش EDFM بررسی شده‌اند.

نتایج حاصل از پردازش تصویر نشان داده است که انتخاب نامناسب پارامترهای لبه‌یابی (فیلتر گاوسی، آستانه‌ی بالا، و آستانه‌ی پایین) در فرآیند لبه‌یابی منجر به ایجاد شبکه‌ی ترک غیرواقعی می‌شود. انتخاب نامناسب آستانه‌ی بالا منجر به عدم شناسایی ترک‌های ریز یا شناسایی ترک‌های غیرواقعی می‌شود. انتخاب نامناسب آستانه‌ی پایین، بازسازی اتصال ترک‌ها به یکدیگر را به‌طورمنفی تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، کیفیت تصویر هوایی، تأثیر بسیار زیادی در دقت نتایج دارد؛ به طوری که در صورت استفاده از تصاویر هوایی با کیفیت پایین، شناسایی ترک‌ها تقریباً غیرممکن می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی جریان توسط EDFM نشان داده‌اند 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، حائز اهمیت بیشتری هستند.

References- منابع

1. Egya, D.O., Geiger, S., Corbett, P.W.M., March, R., Bisdom, K., Bertotti, G. and Bezerra, F.H., 2019. Analysing the limitations of the dual-porosity response during well tests in naturally fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, *25*(1), pp.30-49. doi: https://doi.org/10.1144/petgeo2017-053.
2. Moinfar, A., Narr, W., Hui, M.H., Mallison, B. and Lee, S.H., 2011, 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 .
3. Odling, N.E., Gillespie, P., Bourgine, B., Castaing, C., Chiles, J.P., Christensen, N.P., Fillion, E., Genter, A., Olsen, C., Thrane, L. and Trice, R., 1999. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, *5*(4), pp.373-384. doi: https://doi.org/10.1144/petgeo.5.4.373.
4. Bisdom, K., 2016. 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/10.4233/uuid:f1b6f6e0-1542-4744-943e-04c7c551213b
5. Bruna, P.O., Straubhaar, J., Prabhakaran, R., Bertotti, G., Bisdom, K., Mariethoz, G. and Meda, M., 2019. A new methodology to train fracture network simulation using multiple-point statistics. *Solid Earth*, *10*(2), pp.537-559. doi: https:/doi.org/10.5194/se-10-537-2019.
6. Shah, S., Møyner, O., Tene, M., Lie, K.A. and Hajibeygi, H., 2016. The multiscale restriction smoothed basis method for fractured porous media (F-MsRSB). *Journal of Computational Physics*, *318*, pp.36-57. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.05.001.
7.. Bisdom, K., Gauthier, B.D.M., Bertotti, G. and Hardebol, N.J., 2014. Calibrating discrete fracture-network models with a carbonate three-dimensional outcrop fracture network: Implications for naturally fractured reservoir modeling. *AAPG bulletin*, *98*(7), pp.1351-1376. doi: https://doi.org/10.1306/02031413060 .

8 Geiger, S., Dentz, M. and Neuweiler, I., 2013. A novel multirate dual-porosity model for improved simulation of fractured and multiporosity reservoirs. *SPE journal*, *18*(04), pp.670-684. doi: https://doi.org/10.2118/148130-PA.

9. Bisdom, K., Bertotti, G. and Bezerra, F.H., 2017. Inter-well scale natural fracture geometry and permeability variations in low-deformation carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*, *97*, pp.23-36. doi: https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.02.011.

10. Sonka, M., Hlavac, V. and Boyle, R., 2013. Image processing, analysis and machine vision. *Springer*.

11. Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P. and Micklethwaite, S., 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, *69*, pp.22-32. doi: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012.

12. Li, L. and Lee, S.H., 2008. Efficient field-scale simulation of black oil in a naturally fractured reservoir through discrete fracture networks and homogenized media. *SPE Reservoir evaluation & engineering*, *11*(04), pp.750-758. doi: https://doi.org/10.2118/103901-PA.

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/2152/21393

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*(02), 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.106229. doi: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106229.

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. Ţene, 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*(04), 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/s41598-022-26536-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 Method. *Lithosphere*, 2021(Special 1), p.4254028. doi: https://doi.org/10.2113/2022/4254028.

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.404-412. 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/1721.1/6939.

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 6988). *Society of Petroleum Engineers Journal*, *18*(03), 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/WR016i006p01016.