

تعیین پارامترهای مدل سازی عددی شبکه درزه های مجزا با استفاده از داده های لاگ تصویری FMI

احمدرضا ملایوسفی^۱؛ علیرضا باغبانان^{۲*}؛ نادر فتحیان پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ Email: A.Mollayousefi@mi.iut.ac.ir

۲- استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن؛ Email: Bagh110@cc.iut.ac.ir

۳- دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن؛ Email: Fathian@cc.iut.ac.ir

(دریافت ۱ اسفند ۱۳۸۸، پذیرش ۲۱ آذر ۱۳۸۹)

چکیده

برداشت پارامترهای هندسی شکستگی های طبیعی در ارزیابی ذخایر هیدروکربوری بسیار مهم است. با توجه به تفاوت زیاد ویژگی های شکستگی های زیر سطحی در مقایسه با ویژگی های شکستگی های آشکار شده از سطح رخنمون ها و بیرون زدگی ها، بهترین راه برای مدل سازی شکستگی های یک مخزن، استفاده از ابزارهای تصویر گر است. ابزارهای تصویر گر از قبیل FMI (Formation Micro Imager) با قدرت تفکیک مناسب در آشکار سازی ناپیوستگی های کوچک مقیاس، می توانند در فهم بهتر شکستگی های مخزن موثر واقع شوند. لاگ FMI بر مبنای اختلاف مقاومت الکتریکی بین سازند و گل حفاری، تصویر مجازی از دیواره چاه می دهد. یکی از کاربردهای اصلی لاگ FMI آشکار سازی شکستگی های طبیعی باز و بسته است. در این مطالعه با استفاده از داده های ثبت شده برای شکستگی های باز در یک چاه واقع در میدان گازی پارس جنوبی، ابتدا مناسب ترین توابع توزیع احتمال برای پارامترهای هندسی شکستگی ها تعیین می شوند. با استفاده از توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی شکستگی ها و روش شبیه سازی مونت کارلو، تعدادی از مدل های شبکه درزه های مجزا (Discrete Fracture Network-DFN) تولید می شوند. سپس با به کارگیری آزمون آماری Watson-Williams (W-W)، بهترین مقاطعی تعیین می شوند که همخوانی بیشتری با الگوی اولیه شکستگی های چاه نشان می دهند. نتایج این پژوهش می تواند در مدل سازی عددی جریان سیال به داخل شبکه درزه های مجزا، بررسی تنسور نفوذپذیری و مدل سازی میزان تولید مخازن هیدروکربوری عمیق استفاده شد.

کلمات کلیدی

شکستگی های طبیعی، ابزارهای تصویر گر، شبکه درزه های مجزا، میدان گازی پارس جنوبی، لاگ FMI

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات

۱- مقدمه

فهم درست از شکستگی‌ها در پروژه‌های مهندسی مکانیک سنگ می‌تواند به شناخت بیشتر پایداری شیب‌ها، پی سدها، حفريات زیرزمینی، مخازن زمین گرمایی و مناطق دفن زباله‌های هسته‌ای منجر شود و این امر مستلزم شناسایی شکستگی‌ها در توده‌های سنگی است. مطالعات شناسایی شکستگی‌ها می‌تواند شامل درزه‌نگاری سطح زمین و یا رخنمون‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها و یا مطالعات عمقی مانند گمانه‌ها و چاه‌ها باشد. برای بدست آوردن داده‌های ناپیوستگی‌ها برداشت آن‌ها الزامی است. برداشت درزه‌ها به دو گروه الف) برداشت مستقیم از سطح رخنمون‌ها و بیرون‌زدگی‌ها و مطالعه مغزه‌ها؛ ب) برداشت غیرمستقیم با روش‌های ژئوفیزیکی تقسیم می‌شود. در سطح زمین با استفاده از روش‌هایی مانند برداشت خطی^۱ برداشت سطحی (پنجره‌ای^۲)، فتوگرامتری و لیزر اسکن سه بعدی می‌توان حجم گسترده‌ای از مناطق شکستگی را با دقت و سرعت زیاد بررسی کرد، اما در مطالعات زیر سطحی بررسی‌های زمین‌شناسی فاقد مشاهده مستقیم پدیده‌ها بوده و ناگزیر باید از روش‌های غیرمستقیم چون لاگ‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی بهره جست [۱]. به دلیل دسترسی نداشتن مستقیم به درون چاه، تهیه تصاویر از دیواره چاه‌های نفت و گاز ضروری است و از دیرباز، زمین‌شناسان به دنبال شناسایی جزئیات بیشتری از خصوصیات لایه‌های زمین‌شناسی از طریق تصویربرداری مستقیم دیواره چاه بوده‌اند. با وجود این‌که نمودارهای تصویر گر درزه‌های مهمی را آشکار می‌کنند به کارگیری آن‌ها در همه چاه‌ها هزینه‌بر است [۲]. در سال ۱۹۸۶، شرکت شلومبرژه با ارائه اولین تصویرگر مقاومت‌سنج، که آن را Formation Micro Scanner (FMS) نامیده بود، تحولی بزرگ در عرصه تصویر گرها به وجود آورد. با این ابزار زمین‌شناسان می‌توانستند سازندها، لایه‌بندی، ترک‌ها، شکاف‌ها و تخلخل ثانویه را با جزئیات قابل قبولی مشاهده کنند. با تکمیل ابزار FMS، لاگ Formation Micro Imager (FMI) به‌وجود آمد و برای نخستین بار در سال ۱۹۹۱، به تنهایی در چاه رانده شد [۳]. ابزار FMI برای مطالعات پدیده‌های موجود در سازندهای زمین‌شناسی بسیار جدید و فناوری بالایی دارد. این ابزار بر اساس اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سازند و سیال درون چاه کار می‌کند. لاگ FMI با داشتن تعداد زیادی حسگر الکتریکی و قدرت تفکیک قائم و افقی بالا (در حد ۵ میلی‌متر) تصویر تقریباً کاملی از دیواره چاه می‌دهد و قادر است در اعماق زیاد شکستگی‌های باز را از پدیده‌های زمین‌شناسی دیگر متمایز نماید. هر چه قطر چاه کمتر باشد، پوشش دیواره چاه بیشتر خواهد بود، به طوری که در چاه با قطر ۸

اینچ (۲۰/۳۲ سانتی‌متر) ۸۰ درصد پوشش خواهد داشت [۳]. با استفاده از داده‌های شکستگی‌های شناسایی شده با این لاگ، می‌توان پارامترهای هندسی شکستگی‌ها را در ساخت شبکه درزه‌های مجزا^۴ (DFN) تعیین نمود. نتایج مدل‌سازی شبکه تصادفی درزه‌های مجزا، هم در مطالعات سطحی و هم در مطالعات عمقی نتایج قابل قبولی ارائه داده است [۴]. تعداد و کیفیت داده‌های برداشت شده، قابلیت اطمینان به مدل‌های ساخته شده بر اساس آن‌ها سبب تغییر می‌شود و برای کاهش خطاها و ایجاد مدل‌های واقعی‌تری از شرایط موجود زمین، استفاده از مدل‌سازی شبکه درزه‌های مجزا بر اساس توزیع آماری- هندسی پارامترهای برداشت شده صحرائی از رایج‌ترین روش‌هاست [۴]. شبکه‌های درزه معمولاً دارای هندسه پیچیده- ای است و از محلی به محل دیگر فرق می‌کنند. به منظور توصیف محیط‌های شکستگی به روشی ساده و کلی برای اندازه‌گیری هندسه شبکه نیاز است. چنین اندازه‌گیری‌هایی به مهندسان برای شناخت بهتر ویژگی‌های مکانیکی توده‌های سنگ و بررسی حضور شکستگی‌ها کمک می‌کند. هندسه درزه در تغییر شکل‌پذیری و قابلیت نفوذ توده‌های سنگی درزه‌دار تاثیر زیادی دارد. شکستگی‌های باز به دلیل ایجاد شبکه‌ای از کانال‌های جریان، حامل‌های اصلی جریان سیال محسوب می‌شوند و نقش عمده‌ای در تولید ثانویه از مخازن بر عهده دارند؛ برای مثال چنان‌چه نفوذپذیری و تخلخل سنگ زمینه در مقایسه با نفوذپذیری و تخلخل شکستگی‌ها ناچیز باشد، عملاً شکستگی‌ها نقش اول را در تولید هیدروکربور از مخزن دارند و مشخصات هندسی این شکستگی‌ها مبین کیفیت و کمیت تولید است و بر این اساس باید با دقت زیاد به آشکارسازی و شناسایی ویژگی‌های ذاتی شکستگی‌های مؤثر در روند تولید مبادرت ورزید [۵].

این مطالعه بر اساس مشاهده نواقص و کمبودهای مدل‌سازی عددی شبکه تصادفی درزه‌های مجزا در ارتباط با شکستگی‌های عمقی برای نخستین بار به ارائه موضوع جدید می‌پردازد. همان‌طور که اشاره شد با توجه به ناممکن بودن مشاهده مستقیم شکستگی‌های عمقی مشابه شکستگی‌های سطحی، در اکثر مطالعات انجام شده تاکنون کمتر به مدل‌سازی شبکه تصادفی درزه‌های مجزای واقع در اعماق زمین با استفاده از داده‌های لاگ‌های تصویری پرداخته شده است. تحقیق بر آن است با تلفیق داده‌های مربوط به شکستگی‌های عمقی حاصل از لاگ FMI و مفاهیم روش عددی DFN، نحوه ساخت شبکه درزه‌های مجزای موجود را در اعماق زمین توضیح دهد و یک مثال کاربردی نیز تبیین شود.

۲- مفاهیم (متدولوژی) ساخت شبکه درزه‌های مجزا

در تعریف ساده این مفهوم پیچیده می‌توان گفت که در این نوع مدل‌سازی فضای شکستگی‌ها به صورت مجموعه‌ای از اشکال هندسی مانند خط در فضای دو بعدی و صفحات دایره-ای یا چند ضلعی در فضای سه بعدی متناظر شده و تحلیل اندرکنش این اشکال بیانگر رفتار شکستگی‌ها محسوب می‌شود. در ایجاد شبکه درزه‌های مجزا سیستم پیچیده‌ای از شکستگی-ها بر مبنای تغییرات موقعیت فضایی، شکستگی‌های متقاطع با هم با طول‌های متفاوت و شبکه نامنظم به‌وجود می‌آید [۶]. تفاوت اساسی روش مدل‌سازی درزه‌های مجزا با روش‌هایی مانند محیط‌های معادل و دسته درزه‌های منظم، در نحوه قرارگیری شکستگی‌هاست؛ به این معنا که در اغلب موارد، ساده‌سازی مسئله و لحاظ محیط‌های معادل و دسته درزه‌های منظم تطابق با شبکه شکستگی‌های موجود در زمین ندارد و چنین تحلیل‌هایی ساده انگارانه و همراه با خطای زیاد خواهد بود.

برای ساخت مدل‌های عددی نحوه حرکت سیال از درون شکستگی‌ها، ابتدا به ساخت مدل شبکه درزه‌های مجزا نیاز است. مدل‌های شبکه درزه‌های مجزا با کاربرد شبیه‌سازی مونت کارلو و طبق توابع توزیع آماری طول، جهت و موقعیت فضایی سیستم‌های شکستگی ایجاد می‌شوند. هرکدام از پارامترهای شکستگی‌ها مانند فاصله‌داری، مکان فضایی، جهت-داری و اندازه می‌توانند با توابع توزیع آماری مانند توزیع‌های نرمال، لاگ نرمال، یکنواخت، گوسی و یا توابع توزیع دیگر بیان شوند [۷]. در ساخت شبکه درزه‌های مجزا باید توزیع آماری هر یک از پارامترهای مکان قرارگیری، امتداد، طول خط اثر و میزان دهانه بازشدگی شکستگی‌ها مشخص گردد و چنانچه مدل‌سازی دو بعدی برای شبکه درزه‌های مجزا در نظر گرفته شود با داشتن تعداد شکستگی‌ها در واحد سطح می‌توان مدل هندسی- فضایی شکستگی‌ها را ایجاد نمود [۷]. در اینجا هر یک از پارامترهای هندسی فوق توضیح داده می‌شوند:

۱- موقعیت قرارگیری شکستگی‌ها^۴

در محیط‌های همگن فرض می‌شود شکستگی‌ها به طور کاملاً تصادفی پخش شده‌اند. موقعیت مکانی شکستگی‌ها با فرآیند آماری پواسون یا روش BART، که کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی شبکه درزه‌های مجزا دارد، تعیین می‌شوند. فرآیند پواسون به طور خاص بیانگر تابع توزیع آماری محل قرارگیری شکستگی‌هاست و دانسیته متوسط شکستگی‌ها به عنوان کنترل‌کننده این فرآیند تصادفی است. با وجود این‌که تراکم شکستگی‌ها می‌تواند متغیر باشد، استفاده از نقاط ناهمگن در

فرآیند پواسون بر صحت بیشتر شبیه‌سازی موقعیت شکستگی-ها می‌افزاید.

۲- جهت‌داری شکستگی‌ها^۵

جهت‌داری شکستگی‌ها (شامل شیب و جهت شیب) با استفاده از داده‌های تحلیلی زمین‌شناسی شبیه‌سازی می‌شوند. جهت فضایی شکستگی‌ها عمدتاً به نوع شکستگی یعنی برشی، کششی و فشاری بستگی دارد. جهات محلی تنش‌های اصلی که بردارهای ویژه تانسور تنش می‌باشند، کنترل‌کننده روند غالب شکستگی‌های به‌وجود آمده هستند.

۳- طول خط اثر شکستگی‌ها^۶

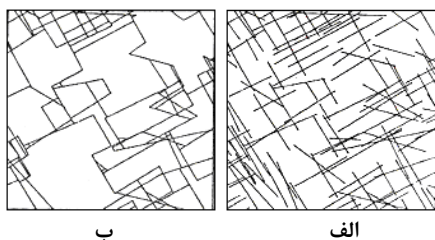
طول خط اثر شکستگی‌ها معمولاً از تابع توزیع نمایی یا توانی تبعیت می‌کند. طول اثر شکستگی‌ها با محل قرارگیری شکستگی در ارتباط است و در مناطقی که امکان انتشار ترک و شکاف نیست (مانند لایه‌های نمکی که دارای رفتار خمیری هستند و محل‌های مناسبی برای دفن زباله‌های هسته‌ای محسوب می‌شوند) طول شکستگی‌ها شدیداً کاهش می‌یابد. همچنین طول اولیه شکستگی‌ها می‌تواند در برخورد با شکستگی‌های جدید دچار تغییر شوند. طول خط اثر و امتداد فضایی شکستگی‌ها به طور تصادفی^۷ با استفاده از روش شبیه-سازی مونت کارلو تولید می‌شوند.

۴- دهانه بازشدگی شکستگی‌ها^۸

دهانه بازشدگی شکستگی‌ها، که متوسط فاصله عمودی میان صفحات شکستگی است، مهم‌ترین نقش را در عبور جریان دارد. شکستگی‌های باز به صورت منفرد و یا در ارتباط با شبکه شکستگی‌ها و با ایجاد کانال‌های جریان هدایت سیالات را بر عهده دارند، در صورتی که شکستگی‌های بسته به عنوان سدهای جریان محسوب می‌شوند. وجود شکستگی‌های بسته خود می‌تواند در هدایت سیال به نقاط دیگر مؤثر واقع شود و به صورت غیر مستقیم در هدایت جهت جریان شرکت نمایند [۹،۸]. دهانه بازشدگی شکستگی‌ها معمولاً به صورت توابع توزیع احتمال نرمال، لاگ نرمال یا توانی بیان می‌شود.

با توجه به این‌که طول خط اثر شکستگی‌ها و میزان دهانه بازشدگی آن‌ها از پارامترهای اساسی و تأثیرگذار در مدل‌سازی شبکه درزه‌های مجزا هستند، می‌توان همبستگی بین این دو پارامتر را در مدل‌سازی لحاظ کرد به طوری که بر اساس تحقیقات انجام شده روی وابستگی طول خط اثر شکستگی‌ها و میزان بازشدگی دهانه آن‌ها، مدل‌سازی شبکه درزه‌های مجزا این انعطاف‌پذیری را دارد که به شکستگی‌های با طول بیشتر دهانه بازشدگی بیشتر و به شکستگی‌های با طول اثر کمتر دهانه بازشدگی کمتری نسبت دهد [۶]. اگرچه اثبات شده است که

مرتبط به هم پدید می‌آید [۱۳] و [۱۴]. شکل ۱ نمونه‌ای از شبکه ناپیوستگی‌های دو بعدی و پیوسته شدن آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱: الف- شبکه شکستگی‌های اولیه دو بعدی که به صورت تصادفی ایجاد شده است؛ ب- شبکه شکستگی‌های پیوسته پس از حذف شکستگی‌های غیر مرتبط بهم و منفرد [۱]

۳- مطالعه موردی ساخت شبکه درزه‌های مجزا با استفاده از داده‌های شکستگی‌های طبیعی ثبت شده با ابزار FMI در یک چاه هیدروکربوری

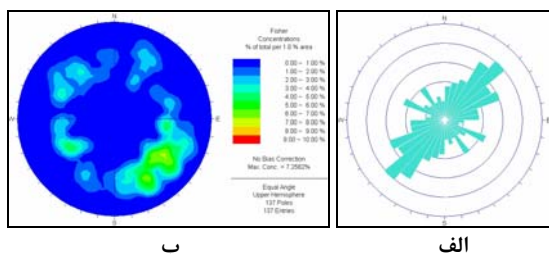
چاه مورد مطالعه در میدان گازی پارس جنوبی قرار دارد و لاگ تصویری FMI در ناحیه تولید آن از محدوده عمقی ۲۸۵۲/۱۵ الی ۳۳۰۹ متری رانده شده که شامل چهار واحد زمین‌شناسی با نام-های K1 تا K4 در سازندهای کنگان و دالان است. قطر چاه در این محدوده از عمق ۲۲ سانتی‌متر (۸/۵ اینچ) می‌باشد. برای شکستگی‌های باز مواردی چون عمق قرارگیری شکستگی‌ها، متوسط دهانه بازشدگی هیدرولیکی تجمعی شکستگی‌ها، متوسط دهانه بازشدگی تجمعی شکستگی‌ها، تعداد تجمعی شکستگی‌ها، دهانه بازشدگی الکتریکی، دهانه بازشدگی هیدرولیکی- الکتریکی، تراکم شکستگی‌ها، تخلخل ظاهری الکتریکی شکستگی‌ها و طول تجمعی خط اثر شکستگی‌ها در هر پنجره برداشت به ثبت رسیده‌اند [۱]. جدول ۱ تعداد شکستگی‌های طبیعی را در هر یک از این واحدها نشان می‌دهد.

جدول ۱: فراوانی انواع شکستگی‌های طبیعی در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی چاه مورد مطالعه [۱].

نوع شکستگی	K1	K2	K3	K4
باز	۱۶	۱۸	۲۳	۲۳۲
بسته	۲۵	۰	۳۶	۴۷

در این چاه ترسیم نمودار تراکم شکستگی‌ها بر اساس عمق قرارگیری، بیشترین تمرکز شکستگی‌ها را در واحد K4 نشان می‌دهد بنابراین این واحد نسبت به واحدهای فوقانی بستر مناسب‌تری را برای هدایت سیالات به طرف چاه ایجاد کرده است. همچنین نمودارهای بازشدگی هیدرولیکی- الکتریکی شکستگی‌ها و تخلخل الکتریکی ظاهری نیز نشان‌دهنده مناسب بودن واحد K4

جریان سیال عبوری از طریق توده سنگی شکسته، به تعداد و بازشدگی دسته‌های ناپیوستگی وابسته است، فرض گسترش ناپیوستگی‌ها در سراسر ناحیه مورد مطالعه (که عمدتاً به صورت صفحات نامحدود در نظر گرفته می‌شوند)، این ویژگی مهم ساختار سنگ را که ناپیوستگی‌ها می‌توانند طول محدود داشته باشند، نادیده می‌گیرد [۱۰]. تلاش زیادی انجام شده تا در روش‌هایی که بین ویژگی‌های ساختاری سنگ و ویژگی‌های هیدرولوژی ماکروسکوپیک آن ارتباط برقرار می‌کنند، تأثیر شکستگی‌هایی با طول محدود نیز لحاظ شود. شکستگی‌هایی با طول محدود دارند، در توده سنگ یک شبکه پیچیده ایجاد می‌کنند به این ترتیب که جریان در هر مسیر به جریان در شکستگی‌های دیگر وابسته است [۶]. یک شبکه تصادفی، شبکه-ای پیچیده و یکتا از کانال‌های جریان با بازشدگی متفاوت است. یک شبکه، از شکستگی‌های اصلی، پیوسته و شکستگی‌های دیگری که جدا و مستقل هستند، تشکیل شده است. شکستگی‌های جدا شده یا آن‌هایی که شامل بخش مستقل هستند معمولاً با نام شکستگی‌های غیر مرتبط به هم خوانده می‌شوند و هیچ نقشی در انتقال سیال ندارند و تنها حجم محاسبات مورد نیاز را برای رسیدن به همگرایی و حل با دقت مورد نظر افزایش می‌دهند و یا می‌توانند یک ناپایداری عددی ایجاد کنند که به هیچ حلی نمی‌رسد. این گروه شکستگی‌های غیر فعال باید با آنالیزهای هندسی شبکه، شناسایی و حذف شوند. اگرچه این روش برای حل دستی ساده و آسان است، برای شبکه‌های واقعی و اجرای کامپیوتری به فرمول‌های سخت و گاهی عملیات طولانی نیاز دارد [۱۱] و [۱۲]. برای شناسایی شبکه‌های متصل گسترده شده، زیرمجموعه‌هایی مشخص می‌شوند که با هم به طور مستقیم یا از طریق شکستگی‌های دیگر و یا با مرزهای هندسی مدل متقاطعند. برای انجام یافتن این کار به وسیله چهار خط، یک چهار ضلعی مانند مربع یا مستطیل تشکیل می‌شود که در واقع این خطوط مرزهای هندسی مدل شبکه ناپیوستگی‌ها هستند. ناپیوستگی‌های موجود در شبکه شماره‌گذاری و نقاط تقاطع آن‌ها با یکدیگر مشخص می‌شود. این فرایند برای تمامی ناپیوستگی‌ها تکرار می‌شود. هر شکستگی به صورت یک بلوک اطلاعاتی نشان داده و اطلاعاتی در مورد نقاط تقاطع آن بلوک گردآوری می‌شود. هر بلوک اطلاعاتی که کمتر از دو تقاطع داشته باشد باید به صورت شکستگی مستقل یا بدون پتانسیل در نظر گرفته شود. چنین شکستگی‌هایی به دلیل نبودن در بخش فعال شبکه و نقش نداشتن در انتقال سیال حذف می‌شوند. در نتیجه این فرایند، با حذف شکستگی‌های غیر فعال و غیر موثر، شبکه پیوسته‌ای از شکستگی‌های



شکل ۳: الف- امتداد شکستگی‌های طبیعی؛ ب- نمودار تمرکز قطب صفحات شکستگی

واحد سطح شبکه (P_{20}) از روابط ریاضی بهره جست [۷]. بر این اساس می‌توان از معادله ۱ استفاده نمود:

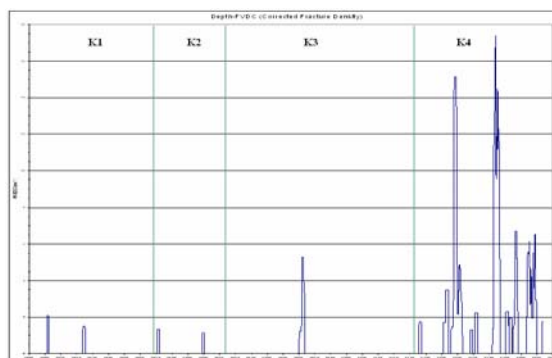
$$\mu_1 = \int_{L_{min}}^{L_{max}} L \times PDF(L) dl \quad (1)$$

که در آن $PDF(L)$ تابع توزیع احتمال طول شکستگی‌ها، L_{min} و L_{max} به ترتیب کمترین، بیشترین و میانگین طول خط اثر شکستگی‌هاست. تعداد شکستگی‌ها در واحد سطح (P_{20}) از معادله ۲ به دست می‌آید:

$$P_{20} = \mu_1 * P_{10} \quad (2)$$

هم‌چنین برای آماده‌سازی پارامترهای مورد نیاز برای ساخت مدل شبکه تصادفی درزه‌های مجزا از نتایج تحلیل‌های آماری استفاده شد. در گام اول با استفاده از نرم‌افزارهای آماری مناسب-ترین توابع توزیع احتمال بیان‌کننده جهت شیب، طول خط اثر و میزان بازشدگی دهانه شکستگی‌ها در سطح احتمال ۹۵ درصد مشخص گردید. طبق نتایج تحلیل‌های میزان دهانه بازشدگی و طول اثر شکستگی‌ها از توابع توزیع نرمال و لاگ نرمال پیروی می‌کنند [۱]. خلاصه نتایج آماری در جدول ۳ گردآوری شده‌اند. در گام دوم بر مبنای داده‌های جدول ۳ ابتدا ۱۰۰۰ مقطع قائم (به موازات محور چاه) از شکستگی‌ها برای هر کدام از واحدهای زمین‌شناسی چهارگانه ساخته شد و با استفاده از آزمون آماری Watson-Williams (W-W) مقاطعی انتخاب شدند که بیشترین همخوانی را با داده‌های اولیه (شامل شیب و جهت شیب) از خود نشان می‌دادند. در گام سوم مقاطع قائم انتخاب گردید، برای ایجاد مقاطع دو بعدی افقی (عمود بر محور چاه) از شکستگی‌ها استفاده شد. به منظور بررسی همبستگی میان طول شکستگی‌ها و دهانه بازشدگی آن‌ها روی میزان تولید، برای هر کدام از مقاطع قائم انتخابی در هر واحد، دو مقطع افقی با لحاظ همبستگی میان طول خط اثر و میزان بازشدگی دهانه شکستگی‌ها و عدم همبستگی میان طول خط اثر و میزان بازشدگی دهانه شکستگی‌ها تولید شدند. به عبارت دیگر در

برای تولید نسبت به دیگر واحدها می‌باشد [۱]. زون‌های با دانسیته زیاد شکستگی‌های باز از نظر تولید هیدروکربن مهم است و لذا ترسیم نمودار دانسیته شکستگی‌های باز نشان از وجود سه زون مناسب برای تولید در این چاه دارد (شکل ۲).



شکل ۲: نمودار تراکم شکستگی‌های باز در واحدهای زمین‌شناسی K4 تا K1 [۱].

همچنین جدول ۲ مشخصات ساختاری شکستگی‌های طبیعی را نشان می‌دهد. این شکستگی‌ها در واحدهای زمین‌شناسی کربناته غالباً از جنس آهک و دولومیت قرار دارند.

جدول ۱: مشخصات شکستگی‌های طبیعی در همه واحدهای زمین‌شناسی به تفکیک [۱].

متوسط زاویه شیب (درجه)	جهت شیب شکستگی‌ها	امتداد شکستگی‌ها	تعداد	نوع شکستگی طبیعی
۷۰	SE (major trend) NW, SW, NE (minor trend)	NE-SW NW-SE	۶۵	باز
۶۴	SE (major trend) NE, SW (minor trends)	NE-SW NW-SE	۷۲	نیمه باز
۶۵	S45E (major trend) S15E (minor trend)	N45E- S45W N75E- S75W	۱۳	بسته

بر پایه داده‌های موجود در این چاه، تحلیل‌های استریوگرافیکی انجام شد. بر اساس این تحلیل‌ها امتداد غالب شکستگی‌های طبیعی باز شمال‌شرق- جنوب‌غرب است [۱]. شکل ۳ تحلیل استریوگرافیکی انجام شده روی شکستگی‌های باز را نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که لاگ FMI تعداد شکستگی‌ها را بر واحد طول (P_{10}) ثبت می‌کند، می‌توان برای محاسبه تعداد شکستگی‌ها بر

جدول ۳: تعیین آماری پارامترهای لازم برای ساخت مدل DFN [۱].

واحد	متوسط شیب (درجه)	آزیموت جهت شیب (درجه)	ثابت فیشر	تابع توزیع احتمال بازشدگی شکستگی‌ها	تابع توزیع احتمال طول شکستگی‌ها	تعداد شکستگی-ها بر واحد طول (m^{-1})	تعداد شکستگی‌ها بر واحد سطح (m^{-2})
K1	76	N217	35.79	Normal $\mu = 0.00289$ $\sigma = 0.00082$	Normal $\mu = 1.33925$ $\sigma = 0.66585$	0.17	0.20
K2	65	N137	23.10	Log Normal $\mu = -6.87730$ $\sigma = 0.73931$	Normal $\mu = 1.07346$ $\sigma = 0.42685$	0.45	0.40
K3	75	N46 N142	28.78	Normal $\mu = 0.00019$ $\sigma = 0.00009$	Log Normal $\mu = 0.49351$ $\sigma = 0.894$	0.23	1.10
K4	66	N133 N231	10.35	Log Normal $\mu = -6.34051$ $\sigma = 1.17267$	Normal $\mu = 1.15295$ $\sigma = 0.20339$	1.54	3.90

بیانگر فضای سیستم‌های شکستگی اطراف چاه باشند، راه را برای درک عملکرد بهتر شکستگی‌های مخزن هموار می‌نماید. در مطالعه موردی که روی یکی از چاه‌های میدان گازی پارس جنوبی انجام شد، در تحلیل‌های آماری روی داده‌های شکستگی این چاه به منظور نیل به پارامترهای موردنیاز برای ساخت شبکه تصادفی درزه‌های مجزا برای مدل‌سازی عددی توزیع نفوذپذیری در اطراف چاه به نتایج ذیل منجر گردید.

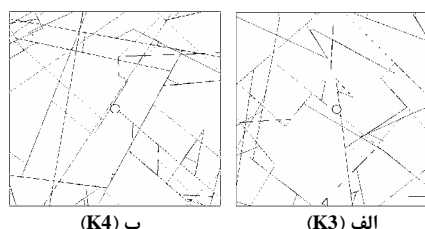
۱- شناسایی شکستگی‌های طبیعی و تفکیک هر یک از آن‌ها از یکدیگر (باز یا بسته)؛

۲- شکستگی‌های طبیعی باز به دلیل داشتن بستر مناسب برای عبور سیالات از خود در سراسر ناحیه تولید هیدروکربور، فراوانی زیادی داشت و عمدتاً در واحد زمین‌شناسی K4 پراکنده هستند. روند کلی شکستگی‌های باز شمال‌شرق- جنوب‌غرب است. ترسیم نمودارهای هرزروی گل حفاری و لاگ قطرسنجی نیز تراکم زیاد شکستگی‌های باز را در واحد K4 تأیید می‌کنند؛

۳- شکستگی‌های بسته در ناحیه تولید فراوانی زیادی نداشتند و عمدتاً دارای امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرق هستند. این شکستگی‌ها به دلیل بسته بودن دهانه بازشدگی شان به- وسیله کانی‌ها به‌عنوان سدهای جریان عمل می‌کنند و موجب هدایت سیالات به نقاط دیگر می‌شوند؛

۴- در ساخت شبکه درزه‌های مجزا از پارامترهای آماری شکستگی‌های باز استفاده می‌شود و در مطالعه موردی انجام شده توابع توزیع احتمال مربوط به طول خط اثر، دهانه بازشدگی، موقعیت و تعداد شکستگی‌ها بر واحد سطح تعیین شدند. طول خط اثر شکستگی‌ها در واحدهای K4، K2، K1 دارای توزیع نرمال و در واحد K3 دارای

مقاطع گروه اول به شکستگی‌های با طول زیاد دهانه بازشدگی بیشتر و به شکستگی‌هایی با طول کمتر دهانه بازشدگی کمتر نسبت داده شد. در مقاطع گروه دوم به شکستگی‌ها با طول‌های متفاوت مقادیر مختلفی از میزان دهانه بازشدگی اختصاص داده شد. در شکل ۴ نمونه‌هایی از مقاطع افقی شبکه درزه‌های مجزا آورده شده است. ابعاد شبکه، مربعی به ضلع ۵ متر می‌باشد. چاه در مرکز مدل و به قطر ۲۲ سانتی‌متر قرار دارد.



شکل ۴: نمونه‌ای از مقاطع دو بعدی شبکه درزه‌های مجزا ساخته شده با استفاده از داده‌های جدول ۳ [۱].

به دلیل عدم گسترش و کم بودن تعداد شکستگی‌های باز در واحدهای K1 و K2، تنها مقاطع افقی شکستگی‌های واحدهای K3 و K4 در اینجا نمایش داده شده‌اند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

ابزار پیشرفته FMI با قدرت تفکیک زیاد راهی را برای شناخت هر چه بهتر پدیده‌های واقع در عمق فراهم نموده است. نمونه‌ای از کاربردهای مهم این لاگ را می‌توان در شناسایی شکستگی‌های طبیعی دانست. شناسایی ویژگی‌های هندسی شکستگی‌ها و ایجاد مدل‌های تصادفی از شبکه شکستگی‌ها، که هر کدام می‌توانند

- [6] Baghbanan A., Jing, L.; 2007, "Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture". *Int. J. Mech. Min. Sci.* Vol. 44, No. 5, 704-719.
- [7] Baghbanan, A.; 2008, "Scale and stress effects on Hydro-Mechanical properties of fractured rock masses". PhD thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [8] Maryška J., Severý O. and Vohralík M.; 2009, "Application of discrete stochastic fracture networks for modelling of groundwater flow". Czech Republic.
- [9] Adler PM, Thovert JF. 1999, "Fractures and fracture networks". Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [10] Andersson J.; 1984, "A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information". *Water Resour Res*; 20(1):79-88.
- [11] Doe TW, Wallmann PC.; 1995, "Hydraulic characterization of fracture geometry for discrete fracture modeling". *Proceedings of the Eighth Congress on IRAM, Tokyo*, p. 767-72.
- [12] Jing L.; 2003, "A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering". *Int J Rock Mech Min Sci*; 40:283-353.
- [13] Odling, N.E.; 1992, "Network properties of a two-dimensional fracture pattern". *Pure Appl. Geophys.*; 138, 95-114.
- [14] Dershowitz W. S. and La Pointe P.; 1994, "Discrete fracture approaches for oil and gas applications". In: Nelson, P. P. and Laubach, S. E. (eds), *Rock mechanics*, pp. 19-30, Balkema, Rotterdam.

پی‌نوشت

- ¹ Scanline
² Box Counting
³ Discrete Fracture Network
⁴ Fracture Location
⁵ Fracture Orientation
⁶ Fracture Trace Length
⁷ Stochastic
⁸ Fracture Aperture

توزیع لاگ نرمال است. همچنین دهانه بازشدگی شکستگی‌ها در واحدهای K3, K1 دارای توزیع نرمال و در واحدهای K4, K2 دارای توزیع لاگ نرمال است.

۵- تعداد ۱۰۰۰ مقطع قائم از شکستگی‌ها برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی (در مجموع ۴۰۰۰ مقطع) ساخته شد و پس از انجام آزمون آماری Watson-Williams، مقاطعی که بیشترین تطابق را با داده‌های ثبت شده از لاگ FMI نشان می‌دادند برای ساخت مقاطع افقی سیستم شکستگی‌های اطراف چاه انتخاب شدند؛

۶- بر پایه مطالعات آماری و استریوگرافی انجام شده، مدل‌های تصادفی مختلفی برای سیستم‌های شکستگی به ثبت رسیده با ابزار FMI، ساخته شده‌اند و در دو گروه مجزا به بررسی همبستگی میان طول اثر و میزان دهانه بازشدگی شکستگی‌ها روی میزان تولید پرداخته شد؛

۷- مدل‌سازی عددی شبکه درزه‌های مجزا غالباً به دلیل مبتنی بودن بر محاسبات آماری نسبت به روش‌های دیگر مانند مدل‌سازی محیط معادل و شبکه درزه‌های منظم روش مطمئن‌تر و کارآمدی محسوب می‌شود [۱۴].

با فراخوانی مقاطع مختلف تولید شده می‌توان به تحلیل هیدرولیکی و نیز هیدرومکانیکی و تاثیر هر یک از آن‌ها بر میزان تولید دست یافت.

منابع

- [۱] ملایوسفی، احمدرضا. گزارش پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی اصفهان در دست انجام با عنوان "کاربرد لاگ تصویری FMI در تحلیل شکستگی‌ها، تنش‌های برجا و مدل‌سازی عددی توزیع نفوذپذیری مخزن در اطراف چاه با مطالعه موردی در مخازن میدان گازی پارس جنوبی"؛ ۱۳۸۸.
- [2] <http://www.slb.com/geomechanics>
- [3] Schlumberger; 2002, "Borehole geology, geomechanics and 3D reservoir modeling (FMI)", SMP-5822.
- [4] Laetitia Mac'é, Laurent Souche and Jean-Laurent Mallet; 2004, "3D Fracture Modeling Integrating Geomechanics and Geologic Data". AAPG International Conference: October 24-27. Cancun, Mexico.
- [5] Nelson, R.A.; 2001, "Geological analysis of naturally fractured reservoirs". Second Edition. Gulf Professional Publishing.

