

روش زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی رخساره‌های سنگی در یکی از مخازن

هیدروکربوری جنوب غرب ایران

هانیه نیکوگفتار^{۱*}، بهزاد مهرگینی^۲، عباس بمرودی^۳، بهزاد تهمچی^۴ و غلاممسین نوروزی^۵

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، hanienikoo@yahoo.com

۲) دانشجوی دکترای مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۳) استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۴) استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۵) دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

* عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۹۱/۵/۱۵؛ دریافت اصلاح شده: ۹۲/۲/۲۵؛ پذیرش: ۹۲/۲/۳۰؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۲/۵/۳۱

چکیده

شناسایی و تفسیر ناهمگنی‌های زیرسطحی به ویژه رخساره‌های سنگی، همواره نقشی اساسی در ارزیابی و مدیریت منابع هیدروکربوری دارد. ارائه روشی نوین که نتایج آن تطابق بهتری با واقعیت رخساره‌های مخزنی داشته باشد، همواره مورد توجه بوده و می‌تواند در کاهش ریسک تصمیم‌گیری موثر باشد. امروزه زنجیره مارکوف به عنوان روشی قدرتمند برای مدل‌سازی رخساره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که بر مبنای احتمالات شرطی و ارائه ماتریس انتقال حالت است. در این مطالعه، پس از مدل‌سازی رخساره با زنجیره مارکوف، به بررسی تعمیم‌پذیری این روش برای مقاطع بدون اطلاعات لرزه‌ای پرداخته شد. هم‌چنین به منظور افزایش دقت تعمیم‌پذیری، راهکاری بر مبنای تغییر نوع حرکت زنجیره ارائه گردید. این پژوهش بر روی یکی از میادین هیدروکربوری جنوب غرب ایران انجام شد که در آن سازند آسماری مخزن اصلی هیدروکربور را تشکیل می‌دهد. با استفاده از روش زنجیره مارکوف، مدل‌سازی سه بخش اصلی سازند آسماری و پوش سنگ آن در یک مقطع به طول ۱۲ کیلومتر و ضخامت ۱۱۰ متر انجام شد. بهترین نتیجه مدل‌سازی، برای حالت بکارگیری راهکار پیشنهادی بوده که دقت آن بطور متوسط حدود ۸۲ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره مارکوف، مدل‌سازی، رخساره سنگی، مخازن هیدروکربوری.

۱- مقدمه

رخساره‌ها، می‌توان مناطق متخلخل و تراوا را مشخص نموده و مناطق با پتانسیل هیدروکربوری بالا را شناسایی نمود. همچنین با شناخت جنس لایه‌های رسوبی موجود در مخازن و ارزیابی کیفیت و توان تولید هیدروکربور در رخساره‌ها می‌توان به بررسی و تحلیل اقتصادی بهره‌برداری مخزن مورد مطالعه دست یافت. شناسایی مناطق با پتانسیل

شناسایی و تفسیر ناهمگونی‌های زیرزمینی، نقشی اساسی در توصیف هرچه بهتر مخازن هیدروکربوری دارند. مدل‌سازی رخساره‌ها نیز در شناسایی ناهمگنی‌های زیرسطحی، تعیین گسترش هندسی و تغییرات جانبی رخساره‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. به کمک مدل‌سازی

این پژوهش به بررسی کاربرد زنجیره مارکوف در مدل‌سازی رخساره‌های سنگی در یکی از میادین هیدروکربوری جنوب غرب ایران پرداخته است. در این مطالعه، پس از معرفی تئوری زنجیره مارکوف و چگونگی مدل‌سازی با این روش در حیطه زمین‌شناسی، به ارائه روشی برای مدل‌سازی رخساره‌ها در مقاطعی که از آنها اطلاعات لرزه‌ای موجود نمی‌باشد، پرداخته شده است. هم‌چنین به منظور افزایش دقت و بهبود مدل‌سازی با روش مارکوف، تغییراتی در فرآیند مدل‌سازی این زنجیره انجام شد. در این راستا راهکاری پیشنهاد شده که نقش بسزایی در افزایش دقت مدل‌سازی داشته و بر مبنای تغییر نوع حرکت زنجیره استوار است. در نهایت، نتایج حاصل از تعمیم‌پذیری توسط روش مارکوف و راهکار پیشنهادی ارائه شد.

۲- زمین‌شناسی میدان نفتی مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در دشت خوزستان، در ناحیه فروافتادگی دزفول شمالی واقع است. این میدان هیچ رخنمونی در سطح نداشته و از طریق اکتشافات زیرزمینی و به کمک عملیات لرزه‌نگاری در سال ۱۹۶۲ کشف شده است.

با حفر اولین چاه اکتشافی در سال ۱۹۶۳، وجود هیدروکربور در هر دو مخزن آسماری و بنگستان تایید شد. ساختار این میدان نیز مانند بسیاری از میادین این ناحیه از روند زاگرس (شمال غرب - جنوب شرق)، تبعیت می‌کند (EDCO Kish International Company 2006).

این میدان دارای سه مخزن نفتی آسماری، بنگستان و خامی می‌باشد که این مطالعه بر روی مخزن آسماری و پوش سنگ آن انجام شده است. ضخامت سازند آسماری در میدان مورد مطالعه بین ۴۵۰ تا ۵۱۵ متر متغیر است. از نظر سنگ‌شناسی، سازند آسماری غالباً از ماسه سنگ و سنگ‌های کربناته تشکیل شده است. بر اساس تغییرات لیتولوژی و تخلخل، در این میدان سازند آسماری به‌طور قائم به هشت بخش و نوزده زیربخش متمایز شامل سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگی و رسی تقسیم شده است. بخش‌های یک، دو و سه بالای سطح جدایش نفت و آب قرار داشته و لایه‌های نفت‌ده را تشکیل می‌دهند (EDCO Kish International Company 2006).

در این مطالعه به مدل‌سازی بخش‌های نفت‌ده پرداخته شده است. بخش یک عمدتاً از آهک‌های دولومیتی و دولومیت‌های آهکی تشکیل شده که میزان تخلخل آن خوب تا خیلی خوب می‌باشد. میزان ضخامت خالص در این بخش از مقدار کمتر از ۱ متر تا ۲۱ متر متغیر است. این ضخامت در قسمت‌های مرکزی طاقدیس نسبت به یال‌های آن بیشتر است (EDCO Kish International Company 2006).

بالای هیدروکربوری نقش بسزایی را در تعیین محل‌های بهینه حفاری دارد (Mukerji et al. 2001).

همواره دست‌یابی به درکی روشن و صحیح از مخزن به ویژه در رخساره‌های نفتی، نیازمند استفاده از روش‌هایی با کارایی و دقت بالا است. امروزه، روش‌های متنوعی جهت تفسیر کمی رخساره‌های نفتی توسعه یافته که در یک تقسیم‌بندی کلی به دو دسته تعینی و احتمالاتی تقسیم می‌شوند (Ross 2009). روش‌های تعینی برخلاف سادگی فرآیند مدل‌سازی، قادر به ارائه خطا یا میزان صحت مدل به دست آمده نیستند، اما با استفاده از روش‌های احتمالاتی، علاوه بر کمی کردن خطای مدل و برآورد میزان احتمال صحت آن می‌توان ارزش هر یک از اطلاعات را نیز در افزایش دقت مدل بررسی کرد (Mukerji et al. 2005).

روش زنجیره مارکوف (Markov Approach modeling) که به افتخار "آندری مارکوف" ریاضی‌دان اهل روسیه نام‌گذاری شده، یک روش احتمالاتی است که در طول چند سال اخیر، کاربرد آن در علوم زمین به سرعت افزایش یافته است. این روش در زمین‌شناسی برای مدل‌سازی متغیرهای گسسته مانند لیتولوژی و رخساره‌ها به کار می‌رود. بسیاری از روش‌های پیشین توسط واریوگرام‌ها و کواریوگرام‌ها، ساختارهای فضایی ناهمگونی مخزن را مشخص می‌کنند. مدل‌سازی در زمین‌شناسی توسط زنجیره مارکوف، از واریوگرام‌ها و کواریوگرام‌ها استفاده نمی‌کند، بلکه بر پایه احتمالات شرطی می‌باشد. استفاده از ابزار احتمالات شرطی علاوه بر ارائه نتایج دقیق‌تر، این مزیت را دارند که تفسیر زمین‌شناسی آنها بسیار آسان‌تر از واریوگرام‌ها بوده و همین دلیلی بر محبوبیت استفاده از زنجیره مارکوف در میان زمین‌شناسان شده است (Elfeki & Dekking 2001).

مطالعات بیلین‌جسلی، اندرسون و گودمن (Billingsley 1961, Anderson & Goodman 1957) نشان داد که زنجیره مارکوف می‌تواند نقش بسزایی را در مدل‌سازی ناهمگنی‌های زیرسطحی به ویژه رخساره سنگی داشته باشد. محققان بسیاری نیز از این ابزار برای تجزیه و تحلیل چینه‌های رسوبی و مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از اطلاعات رخنمون‌ها و گمانه‌های اکتشافی پرداختند (Krumbein & Dacey 1969). علاوه بر این مطالعات، پژوهش‌هایی نیز در ارتباط با توسعه ابعاد مدل‌سازی با استفاده از زنجیره مارکوف صورت گرفته است (Li 2007). در تمامی این مطالعات از ابزار فوق تنها در راستای مدل‌سازی رخساره‌های کم عمق استفاده شده و تاکنون مطالعات جامعی در ارتباط با رخساره‌های عمیق به ویژه در میادین نفتی صورت نگرفته است.

بخش دو دارای هیدروکربن است و بیشتر از ماسه‌سنگ‌های تحکیم یافته همراه با مقادیر کمی شیل و آهک تشکیل شده است. این بخش دارای تخلخل متوسط، خوب و خیلی خوب می‌باشد (EDCO Kish International Company 2006)

بخش سه عمدتاً از ماسه‌سنگ تحکیم نیافته همراه با مقادیر قابل توجهی شیل تشکیل شده و دارای تناوبی از تخلخل پایین تا خیلی خوب است (EDCO Kish International Company 2006). در این مطالعه علاوه بر سه بخش مخزنی، به مدل‌سازی بخش پوش سنگ انیدریتی سازند آسماری نیز پرداخته شده است.

۳- تئوری زنجیره مارکوف

بر اساس ویژگی مارکوف (Property Markov)، حالت بعدی یک متغیر تنها به حالت فعلی آن بستگی دارد و به وقایع قبل از آن ارتباطی ندارد (Higgins & Keller-McNulty 1995). اگر $\{X(n)\}$ یک فرایند تصادفی و $\{S(n)\}$ حالت‌های فرایند تصادفی را نشان دهد، در این صورت می‌توان گفت که اگر رابطه (۱) برقرار باشد، فرایند در ویژگی مارکوف صدق می‌کند.

یک فرایند تصادفی، مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که با

$$P[X(n+1) = S(n+1) | X(n) = S(n), X(n-1) = S(n-1), \dots, X(0) = S(0)] = P[X(n+1) = S(n+1) | X(n) = S(n)] \quad (1)$$

دارد. استفاده از ماتریس تغییر حالت یک مرحله‌ای، ابزاری کارآمد جهت ارائه احتمال‌های تغییر حالت یک زنجیره مارکوف است. جدول ۱، مثالی از ماتریس احتمال انتقال برای سه حالت است که در آن درایه‌های ماتریس تغییر حالت متناظر با احتمال‌های تغییر حالت i به حالت j است. ابعاد این ماتریس با تعداد حالت‌های ممکن برای متغیر تصادفی تعریف شده و اندیس سطری با حالت کنونی i و اندیس ستونی با حالت بعدی j متناظر است (Modica & Poggiolini 2012).

فرایند تصادفی که در ویژگی مارکوف صدق کند، فرایند مارکوف (Markov process) و فرایندهایی را که دارای حالت‌های گسسته هستند، زنجیره مارکوف (Markov chain) می‌نامند. واژه زنجیره به این نکته که هر برآمد به برآمد بلافاصله قبل از خودش وابسته است، اشاره دارد (Papoulis 2002). احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای بر اساس احتمالات شرطی به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$P(i \rightarrow j) = P[X=j | X-1=i] \quad (2)$$

احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای، برابر با احتمال انتقال از حالت i به حالت j است که در نظریه و کاربرد زنجیره مارکوف نقش کلیدی

جدول ۱- ماتریس احتمال انتقال بین سه حالت (Modica & Poggiolini 2012).

حالت	۱	۲	۳
۱	۰/۶۵	۰/۲۸	۰/۰۷
۲	۰/۱۵	۰/۶۷	۰/۱۸
۳	۰/۱۲	۰/۳۶	۰/۵۲

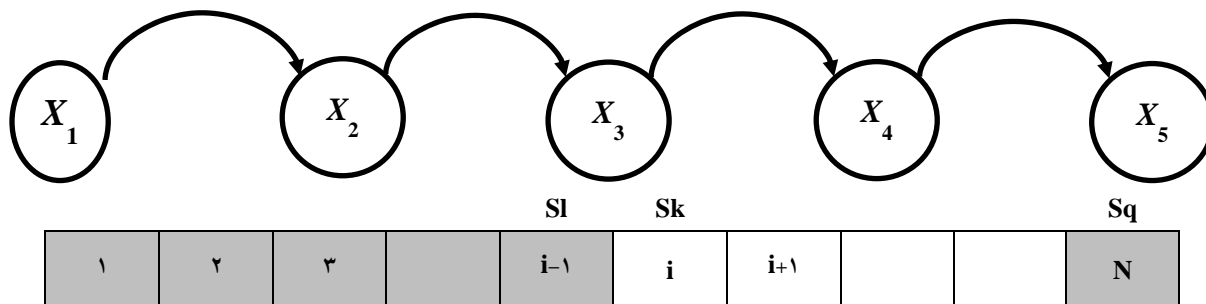
در جدول ۱، درایه سطر سوم و ستون دوم بیانگر آن است که احتمال انتقال از حالت سه به حالت بعدی اگر دو باشد، برابر با ۰/۳۶ است. بدیهی است که جمع درایه‌های یک سطر برابر یک می‌باشد. در تصویر ۱، توالی از رخدادها نمایش داده شده که ویژگی مارکوف را دارا می‌باشند. سلول x در حالت S_k ، سلول $x-1$ در حالت S_l و سلول N در حالت S_q قرار دارد. رخداد S_k نیز مشروط به رخداد S_l

در جدول ۱، درایه سطر سوم و ستون دوم بیانگر آن است که احتمال انتقال از حالت سه به حالت بعدی اگر دو باشد، برابر با ۰/۳۶ است. بدیهی است که جمع درایه‌های یک سطر برابر یک می‌باشد. در تصویر ۱، توالی از رخدادها نمایش داده شده که ویژگی مارکوف را دارا می‌باشند. سلول x در حالت S_k ، سلول $x-1$ در حالت S_l و سلول N در حالت S_q قرار دارد. رخداد S_k نیز مشروط به رخداد S_l

$$pr(Z_i = S_k | Z_{i-1} = S_l, Z_n = S_q) \quad (3)$$

رابطه ۳ را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت (رابطه ۴).

$$\text{pr}(Z_i=S_k | Z_{i-1}=S_l, Z_N=S_q) = \frac{\text{pr}(Z_{i-1}=S_l, Z_i=S_k, Z_N=S_q)}{\text{pr}(Z_{i-1}=S_l, Z_N=S_q)} \quad \text{رابطه (۴)}$$



تصویر ۱- یک توالی از رخساره‌ها برای زنجیره مارکوف یک بعدی. سلول‌های خاکستری دارای مقدار و سلول‌های سفید مورد تخمین با روش مارکوف هستند (Modica & Poggiolini 2012).

با توجه به ویژگی مارکوف می‌توان احتمالات شرطی در رابطه ۴ را به صورت رابطه ۵ بیان کرد.

$$\text{pr}(Z_x=S_k | Z_{x-1}=S_l, Z_N=S_q) = \frac{P_{kq}^{(N-x)} P_{lk}}{P_{lq}^{(N-x+1)}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

پژوهش هدف مدل‌سازی پوش سنگ (انیدریت)، بخش یک (کربناته)، دو (ماسه‌سنگ) و سه (ماسه‌سنگ شیلی) مخزن میدان مورد مطالعه است، بنابراین، فضای حالت دارای چهار عضو خواهد بود (جدول ۲).

در این رابطه، $P_{kq}^{(N-x)}$ احتمال انتقال از حالت k به حالت q به فاصله $(N-x)$ سلول و هم‌چنین $P_{lq}^{(N-x+1)}$ احتمال انتقال از حالت l به حالت q به فاصله $(N-x+1)$ سلول است (Li & Zhang 2008).
با مفروض بودن یک مقدار آغازی و یک ماتریس تغییر حالت یک مرحله‌ای، مسیرهای یک زنجیره مارکوف را می‌توان شبیه‌سازی کرد.

جدول ۲- مشخص کردن تعداد حالت‌ها و رخساره‌ها در منطقه مورد مطالعه

حالت	رخساره
حالت اول	انیدریت
حالت دوم	آهک
حالت سوم	ماسه‌سنگ
حالت چهارم	ماسه‌شیلی

۴- مدل سازی رخساره‌ها با استفاده از زنجیره مارکوف

حضور ویژگی مارکوف در یک توالی از رخساره‌ها بیانگر وابستگی بین رخساره‌ها است. با توجه به قانون والتر (سال ۱۸۹۳ تا ۱۸۹۴)، محیط‌های رسوبی که در آنها رخساره‌های متفاوت گسترش پیدا می‌کنند، دارای ارتباط طبیعی (ارتباط در شرایط محیطی) می‌باشند. بر این اساس، مجموعه واحدهای رسوبی که مجاور یکدیگر تشکیل می‌شوند، دارای یک وابستگی طبیعی در شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند. با توجه به این قانون می‌توان گفت که تشکیل توالی‌های رسوبی به صورت تصادفی و مستقل از هم نبوده و وابستگی معناداری بین رخساره‌ها وجود دارد (امینی ۱۳۸۸).
مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از زنجیره مارکوف به چهار گام تقسیم می‌شود.

گام دوم؛ داده‌های مورد استفاده در این مدل‌سازی، رخساره‌های مشخص شده توسط چاه‌نمودارها و اطلاعات لرزه‌ای می‌باشند. در یک مقطع دوبعدی، داده‌های چاه (رخساره‌های مشخص شده توسط چاه‌نمودارها) در راستای قائم و داده‌های لرزه‌ای (رخساره‌های مشخص شده توسط داده‌های لرزه‌ای) در راستای افقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس تصویر ۲، دو چاه در راستای قائم و اطلاعات لرزه‌ای در راستای افقی (رنگ خاکستری)، به عنوان فضای مشاهده شده در نظر گرفته می‌شوند. در تصویر ۲، چاه سمت چپ در بازه $(i, 0)$ و N_y و ... و $i=2$ ، چاه سمت راست در بازه (i, N_x) و N_y

گام اول؛ تعیین فضای حالت بر مبنای متغیر مورد بررسی می‌باشد. در این مطالعه، متغیر رخساره‌های سنگی می‌باشند. بنابراین، فضای حالت برابر با تعداد رخساره‌های موجود در توالی رسوبی است. در این

جدول ۳- ماتریس انتقال و ماتریس احتمال انتقال در دو راستای افقی و قائم

طول مقطع قائم ۱۱۰ متر					طول مقطع افقی ۱۲ کیلومتر				
فاصله نمونه‌برداری در راستای قائم یک متر					فاصله نمونه‌برداری در راستای افقی ۲۰ متر				
ماتریس تعداد انتقال در راستای قائم					ماتریس تعداد انتقال در راستای افقی				
حالت	۱	۲	۳	۴	حالت	۱	۲	۳	۴
۱	۴۹	۸	۲	۶	۱	۳۴۰	۵	۲	۳
۲	۱	۱۰	۳	۱	۲	۲	۱۳۷	۸	۳
۳	۱	۱	۱۵	۲	۳	۲	۳	۴۹	۶
۴	۲	۱	۲	۶	۴	۱	۱	۳	۳۵

ماتریس احتمال انتقال در راستای قائم					ماتریس احتمال انتقال در راستای افقی				
حالت	۱	۲	۳	۴	حالت	۱	۲	۳	۴
۱	۰/۷۵۴	۰/۱۲۳	۰/۰۳۱	۰/۰۹۲	۱	۰/۹۷۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹
۲	۰/۰۴۰	۰/۰۹۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰	۲	۰/۰۱۳	۰/۰۹۱۳	۰/۰۰۵۴	۰/۰۲۰
۳	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۵۳	۰/۰۷۸۹	۰/۱۰۰	۳	۰/۰۳۳	۰/۰۰۵۰	۰/۰۸۱۷	۰/۱۰۰
۴	۰/۰۱۸۲	۰/۰۰۹۱	۰/۰۱۸۲	۰/۰۵۴۵	۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰/۰۸۷۵

گام پنجم؛ در این مرحله، تخمین حالت هر یک از سلول‌ها با استفاده از ماتریس احتمال انتقال و داده‌های مشاهده شده انجام می‌پذیرد. زنجیره مارکوف در دو بعد بیانگر رفتار دو زنجیره مستقل از یکدیگر است که هر کدام بر اساس قوانین کلاسیک مارکوف یک بعدی عمل می‌کنند. این دو زنجیره به صورت (X_i) و (Y_j) تعریف می‌شوند که به ترتیب معرف توالی رخساره‌ها در راستای افقی و قائم می‌باشند. احتمال انتقال در راستای افقی به صورت رابطه ۷ بیان می‌شود.

که در آن p_{ik}^h بیانگر احتمال انتقال حالت از سلول X_i به سلول X_{i+1} است. هم‌چنین در راستای قائم رابطه احتمال انتقال به صورت زیر بیان می‌شود:

$$p_{mk}^v = \text{pr}(Y_{j+1} = S_k | Y_j = S_m) \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این رابطه، p_{mk}^v بیانگر احتمال انتقال حالت از سلول Y_j به سلول Y_{j+1} است. به منظور تعیین حالت هر سلول در دو بعد $(Z_{i,j})$ از هر دو زنجیره X_i و Y_j استفاده می‌شود. از این رو با بسط رابطه ۵ در دو بعد، رابطه ۹ بدست می‌آید.

$$p_{ik}^h = \text{pr}(X_{x+1} = S_k | X_x = S_i) \quad \text{رابطه (۷)}$$

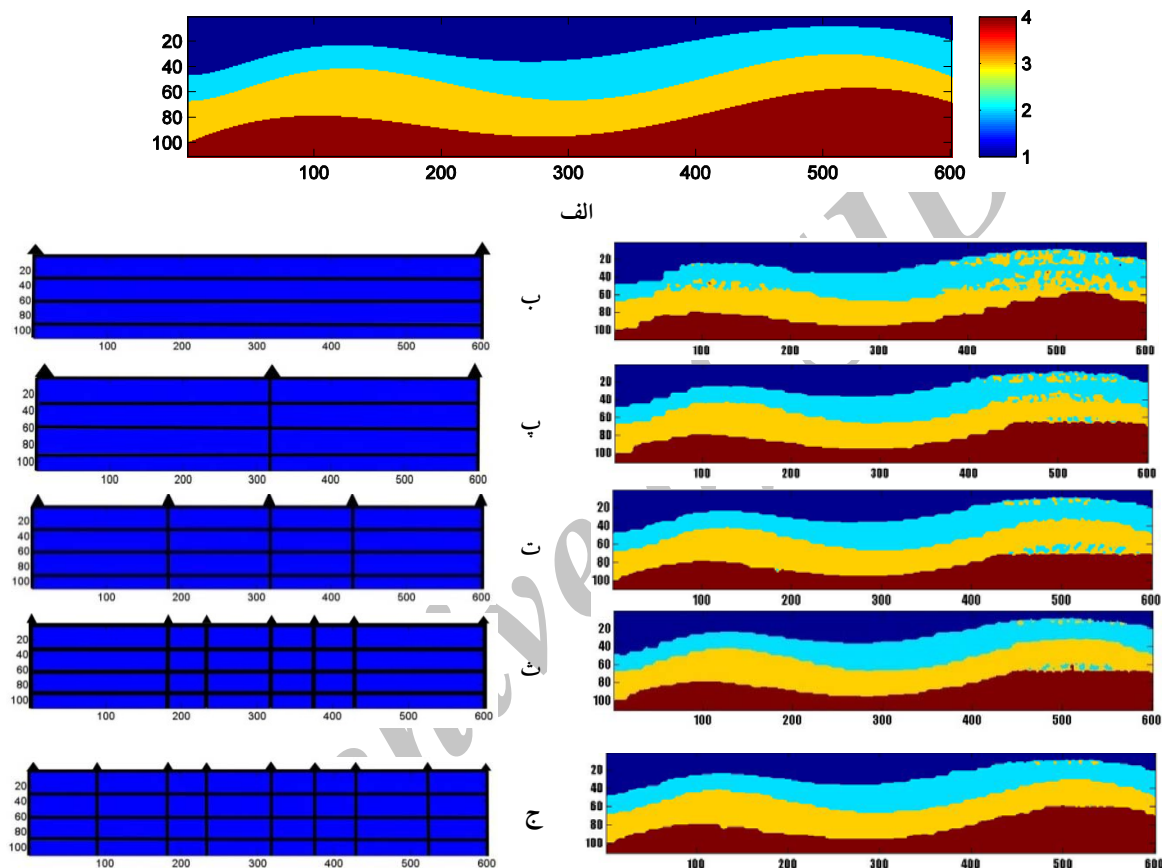
$$\text{Pr} \left(Z_{i,j} = S_k \mid \begin{matrix} Z_{i-1,j} = S_1, Z_{i,j-1} = S_m \\ Z_{N_x,j} = S_q \end{matrix} \right) = \frac{p_{ik}^h \cdot p_{kq}^{h(N_x-j)} \cdot p_{mk}^v}{\sum_r p_{ir}^h \cdot p_{rq}^{h(N_x-j)} \cdot p_{mf}^v} \quad k=1, \dots, n \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، هر سلول ناشناخته $Z_{i,j}$ توسط حالت‌های معلوم سلول‌های $(i-1, j)$ و $(i, j-1)$ و (i, N_x) با توزیع شرطی $\text{Pr}(Z_{i,j} = S_k | Z_{i-1,j} = S_m, Z_{i,j-1} = S_1, Z_{i,N_x} = S_q)$ مورد تخمین قرار می‌گیرد. با توجه به تصویر ۲، سلول $(i-1, j)$ دارای حالت S_m در همسایگی قائم، سلول $(i, j-1)$ دارای حالت S_1 در همسایگی افقی و

که در مرز سمت راست سلول (چاه سمت راست) قرار دارد، دارای حالت S_q است. با داشتن این پارامترها در رابطه ۹، حالت S_k سلول (i, j) تخمین زده می‌شود. در این حالت، $p_{kq}^{h(N_x-j)}$ ، بیانگر احتمال انتقال از حالت k به حالت q در ماتریس افقی می‌باشد که به توان اختلاف فاصله (N_x-j) سلول مورد تخمین تا چاه سمت راست آن

مقطع مورد نظر است. در تصویر ۴، در سمت چپ موقعیت قرار گرفتن چاه‌ها و در سمت راست مدل‌سازی انجام شده، نمایش داده شده است. بر این اساس، با افزایش تعداد چاه‌ها، مدل ارائه شده به ساختار واقعی نزدیک‌تر می‌شود. در نهایت، با بکارگیری نه چاه، مدل‌سازی با روش مارکوف با دقت ۹۴ درصد انجام شد (تصویر ۴-ج، سمت راست).

رسیده است. مخرج این کسر بیانگر مجموع احتمال تمامی حالات رخداد رخصاره‌ها می‌باشد که جهت نرمال نمودن Pr استفاده می‌شود. بر اساس رابطه ۹، برای شرطی کردن و افزایش دقت شبیه‌سازی، از چاه دوم استفاده شد. نتایج مدل‌سازی رخصاره‌ها در مقطع مورد مطالعه در تصویر ۴ ارائه شده است. تصویر ۴-الف بیانگر حالت واقعی تغییرات رخصاره‌ها در



تصویر ۴-الف) تصویر واقعی تغییرات رخصاره‌ها را در مقطع مورد مطالعه نشان می‌دهد. تصاویر سمت چپ موقعیت، تعداد چاه‌ها (با نشانگر مثلث نشان داده شده است) و افق‌های لرزه‌ای و تصاویر سمت راست مدل‌سازی رخصاره‌ها را با استفاده از روش مارکوف نمایش می‌دهند. مدل‌سازی رخصاره‌ها با (ب) دو چاه، (پ) سه چاه، (ت) پنج چاه، (ث) هفت چاه و (ج) تمامی چاه‌ها (نه چاه). (ج) بهترین نتیجه را با دقت ۹۴ درصد نشان می‌دهد

۵- تعمیم‌پذیری مدل‌سازی رخصاره‌ها با روش مارکوف

برخوردار می‌باشد. بنابراین، می‌توان از نتایج حاصل از مدل‌سازی در یک مقطع با حضور اطلاعات لرزه‌ای برای مدل‌سازی در مقاطع دیگر بدون حضور این اطلاعات، با دقت قابل قبولی استفاده کرد. به منظور بررسی تعمیم‌پذیری روش مدل‌سازی مارکوف در مقاطع مورد مطالعه باید موارد زیر در نظر گرفته شوند. مقاطع آزمون (Test) و مقطع آموزش (Train) باید از نظر ساختمانی وضعیت مشابهی داشته باشند، به عنوان مثال همگی در راستای ساختمان طاقدیس مورد مطالعه یا عمود بر محور آن باشند. توالی چینه‌شناسی و رخصاره‌ها در هر یک از

به منظور مدل‌سازی با روش مارکوف، از اطلاعات داده‌های چاه‌نمودار و اطلاعات لرزه‌ای استفاده می‌شود. در بسیاری از مقاطع مورد مطالعه در این پژوهش تنها اطلاعات چاه‌ها موجود بوده (اطلاعات عمقی جانبی از این مقاطع در دسترس نمی‌باشد) بنابراین، بررسی قابلیت تعمیم مدل‌سازی با استفاده از روش مارکوف امری ضروری است. با توجه به نتایجی که در ادامه بیان می‌شود، اساساً مدل‌سازی مارکوف با اعمال شرایطی، از خاصیت تعمیم‌پذیری

انتقال افقی تشکیل می‌شود. این ماتریس به عنوان ماتریس احتمال انتقال افقی در مدل‌سازی مقطع آزمون به کار گرفته می‌شود. در مرحله سوم برای تشکیل ماتریس احتمال انتقال قائم در مقاطع آزمون، از اطلاعات چاه‌های همان مقاطع استفاده می‌شود. در این صورت فقط ماتریس احتمال انتقال افقی از مقطع آموزش بدست می‌آید.

در مرحله چهارم برای انجام مدل‌سازی جهت تخمین هر سلول، به سلول سمت چپ و بالای آن نیاز است. بنابراین، در تخمین سلول‌های ردیف دوم شبکه باید حالت سلول‌های ردیف اول مشخص باشد.

همچنین به علت نداشتن این اطلاعات می‌توان از اطلاعات ردیف اول مقطع آموزش به عنوان ردیف اول مقطع آزمون استفاده کرد. به عبارتی در مدل‌سازی این مقطع فقط اطلاعات یک افق به عنوان فضای مشاهده شده موجود است.

در مرحله پنجم با داشتن ماتریس احتمال افقی، قائم و فضای مشاهده شده (چاه‌ها و یک افق لرزه‌ای)، توسط رابطه ۹ به تخمین سلول‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به تصویر ۵، مقطع یک مقطع آموزش و مقاطع دو و سه به عنوان مقاطع آزمون انتخاب شدند.

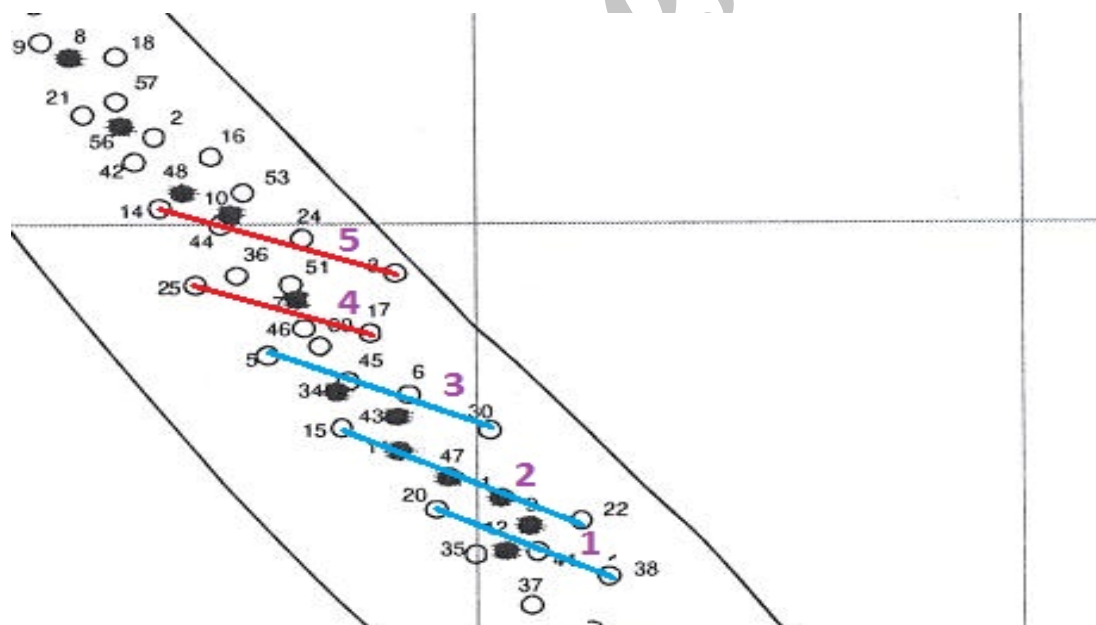
مقاطع آزمون و آموزش باید مشابه باشد، یعنی ترتیب قرار گرفتن رخساره‌ها مشابه یکدیگر باشد. مقاطع هدف و مرجع باید از تعداد و حالت رخساره یکسان برخوردار باشند.

از نظر تعداد به این معنا که، نباید یک مقطع دارای چهار رخساره و دیگری دارای پنج رخساره باشد، زیرا ابعاد ماتریس‌ها در این حالت با یکدیگر متفاوت خواهند بود. هم‌چنین برای حالت رخساره‌ها، به عنوان مثال اگر در یک مقطع دارای حالت رخساره شیل و در مقطع دیگر به جای شیل، انیدریت موجود باشد در این حالت نیز ماتریس‌ها در دو مقطع با هم متفاوت خواهند بود.

۵-۱- الگوریتم بررسی تصمیم‌پذیری

برای مدل‌سازی به کمک روش مارکوف در مقاطعی که اطلاعات لرزه‌ای وجود ندارد (تعمیم مدل‌سازی) طبق مراحل زیر عمل می‌شود. در ابتدا مقاطع آزمون و آموزش با توجه به شرایط ذکر شده در بخش قبل انتخاب می‌شوند.

در مرحله دوم برای استفاده از اطلاعات افقی (لرزه) مقطع آموزش، با در نظر گرفتن یک فاصله مناسب بین افق‌های لرزه‌ای، ماتریس احتمال

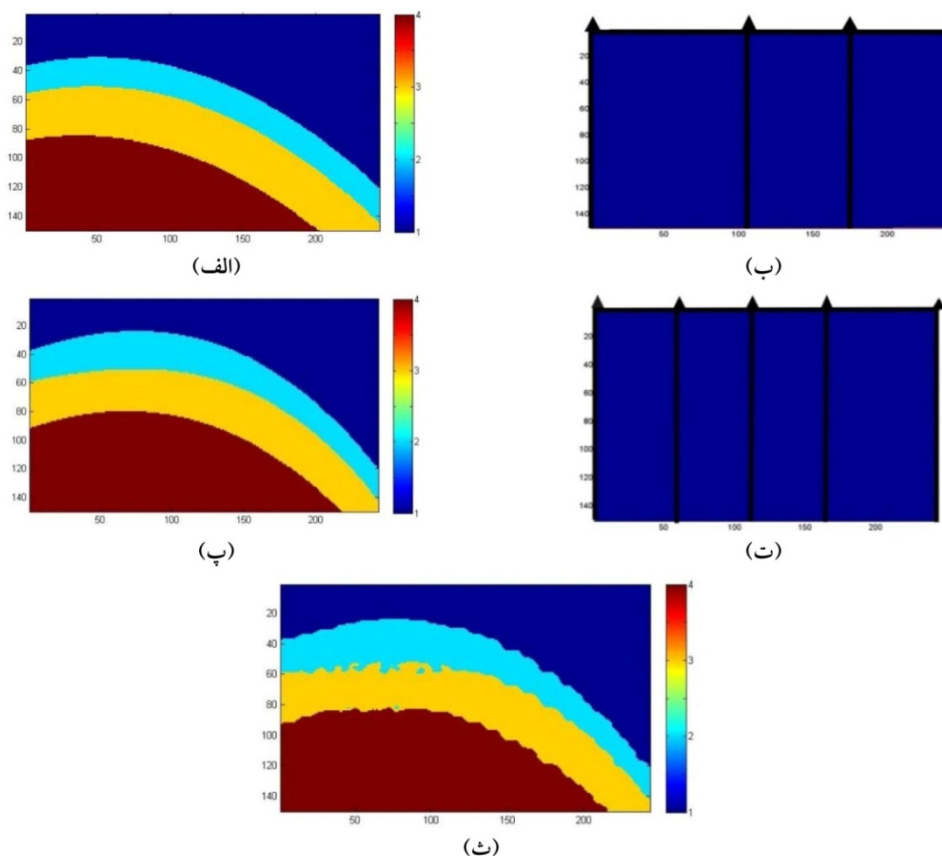


تصویر ۵- نمایی از چاه‌های موجود در میدان مورد مطالعه، مقاطع آموزش و آزمون

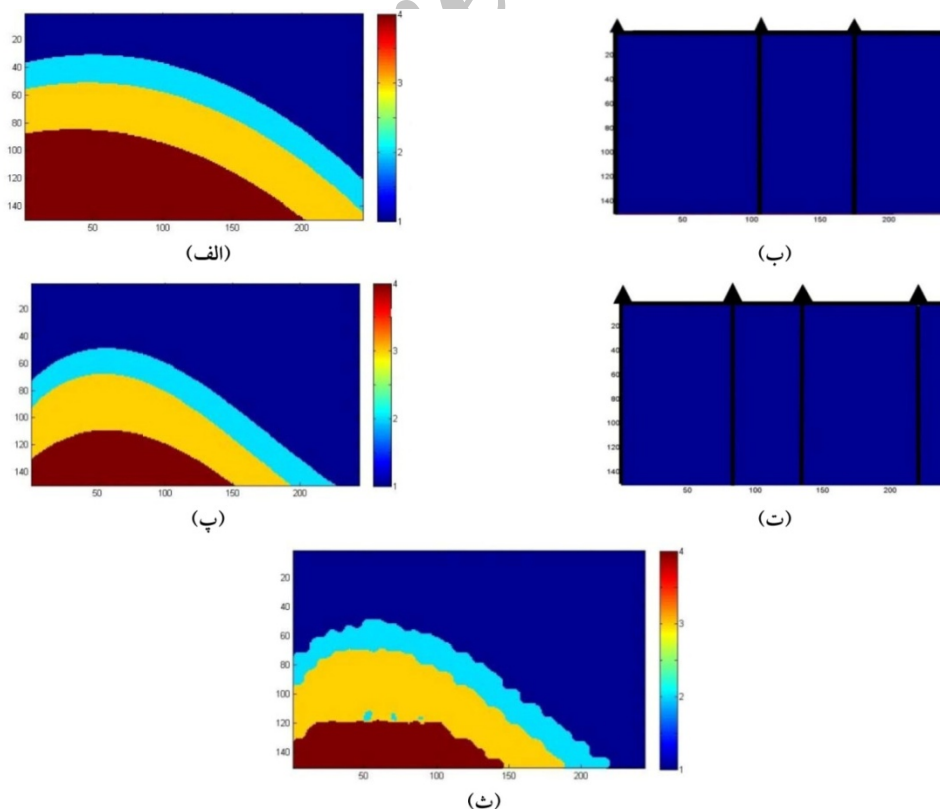
آزمون دو و سه در جدول ۴ آورده شده است. بر این اساس، مدل‌سازی مقاطع آزمون با دقت نسبتاً بالایی صورت گرفته، به طوری که مقدار آن برای مقطع دو ۸۵ درصد و برای مقطع سه ۷۸ درصد می‌باشد.

مقطع دو با مقطع یک شباهت بسیاری دارد، درحالی که مقطع سه از نظر گستردگی و شکل لایه‌ها تفاوت بارزی با مقطع آموزش دارد. مقاطع مورد اشاره به همراه نتایج مدل‌سازی و موقعیت قرارگیری چاه‌ها در تصاویر ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

ماتریس درهم ریختگی و میزان خطای این مدل‌سازی برای مقاطع



تصویر ۶- نمایشی از تعمیم‌پذیری روش مارکوف در مدل‌سازی. الف) مقطع آموزش یک، ب) موقعیت قرارگیری چاه‌ها و افق‌های لرزه‌ای در مقطع آموزش، پ) مقطع آزمون دو، ت) موقعیت قرارگیری چاه‌ها و افق‌های لرزه‌ای در مقطع آزمون، ث) مدل‌سازی مقطع آزمون با استفاده از مقطع آموزش.



تصویر ۷- نمایشی از تعمیم‌پذیری روش مارکوف در مدل‌سازی. الف) مقطع آموزش یک، ب) موقعیت قرارگیری چاه‌ها و افق‌های لرزه‌ای در مقطع آموزش، پ) مقطع آزمون سه، ت) موقعیت قرارگیری چاه‌ها و افق‌های لرزه‌ای در مقطع آزمون، ث) مدل‌سازی مقطع آزمون با استفاده از مقطع آموزش.

جدول ۴- ماتریس درهم ریختگی دسته‌بندی برای چهار رخساره در مقطع آزمون دو و سه

مقطع ۳	مقطع ۲	مقطع
3.1024	3.387	اثر ماتریس درهم ریختگی
0.7756	0.85	CCR
0.2244	0.15	متوسط احتمال خطا

ماتریس درهم ریختگی

۶- راهکار در جهت بهبود دقت مدل‌سازی با روش مارکوف

به منظور افزایش دقت مدل‌سازی، تغییراتی در فرآیند مدل‌سازی زنجیره مارکوف صورت پذیرفت که در ادامه به معرفی این راهکار پرداخته می‌شود. با توجه به تصاویر ۸ و ۹، در این راهکار جهت حرکت در دو سطر متوالی از سلول‌های شبکه عکس یکدیگر است. به عنوان مثال حرکت زنجیره در سطر دوم از چپ به راست بوده و مرز شرطی چاه سمت راست است، در صورتی که در سطر سوم حرکت از راست به چپ و مرز شرطی چاه سمت چپ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تصویر ۸، هنگامی که حرکت زنجیره از چپ به راست (رفت)

می‌باشد، ماتریس احتمال انتقال قائم از چاه سمت چپ (مرز اول) به دست آمده و چاه سمت راست به عنوان مرز شرطی در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین برای محاسبه ماتریس احتمال افقی، شمارش انتقال‌ها از چپ به راست صورت می‌گیرد. بر اساس تصویر ۹، اگر مسیر حرکت زنجیره از راست به چپ (برگشت) باشد، برای محاسبه ماتریس احتمال قائم از چاه سمت راست (مرز دوم) استفاده شده و چاه سمت چپ به عنوان مرز شرطی فرض می‌شود. با توجه به این که جهت حرکت زنجیره در شمارش انتقال‌ها موثر است، بنابراین ماتریس احتمال افقی برای حرکت از راست به چپ، مجدداً محاسبه می‌شود.

1, 1								1, N _x
							(i-1, j) = S _m	
			(i, j-1) = S _l	(i, j) = S _k				(i, N _x) = S _q
N _y , 1								N _y , N _x

تصویر ۸- نمایش حرکت رفت و برگشتی از سمت چپ به راست در شبکه‌بندی از فضای بین اطلاعات دو چاه (راستای عمودی) و یک افق لرزه‌ای (راستای افقی). سلول‌های خاکستری تیره نقاط مشاهده شده، سلول‌های خاکستری روشن سلول‌های تخمین زده شده، سلول‌های سفید ناشناخته هستند.

1, 1								1, N _x
							(i-1, j) = S _m	
(i, 1) = S _w							(i, j-1) = S _l (i, j) = S _k	
N _y , 1								N _y , N _x

تصویر ۹- نمایش حرکت رفت و برگشتی از سمت راست به چپ در شبکه‌بندی از فضای بین اطلاعات دو چاه (راستای عمودی) و یک افق لرزه‌ای (راستای افقی) با توجه به قدرت تفکیک چاه و لرزه. سلول‌های خاکستری تیره نقاط مشاهده شده، سلول‌های خاکستری روشن سلول‌های تخمین زده شده، سلول‌های سفید ناشناخته هستند.

می‌شود. برای حرکت از چپ به راست همان طور که پیش‌تر اشاره شد از رابطه (۹) استفاده می‌شود.

با توجه به حرکت زنجیره که از چپ به راست و یا از راست به چپ باشد از رابطه (۱۰) و (۱۱) برای تخمین حالت سلول‌ها در نظر گرفته

$$\Pr(Z_{i,j} = S_k | Z_{i-1,j} = S_m, Z_{i,j-1} = S_l, Z_{i, N_x} = S_q) = \frac{p_{lk}^{h1} \cdot p_{kq}^{h1(N_x-j)} \cdot p_{mk}^v}{\sum_f p_{lf}^{h2} \cdot p_{fq}^{h2(N_x-j)} \cdot p_{mf}^v} \quad k=1, \dots, n \quad (10)$$

در رابطه بالا منظور از p^{h1} ماتریس احتمال انتقال افقی در حرکت از چپ به راست است. در حرکت از راست به چپ، با توجه به توضیحاتی که در قبل بیان شد و تصویر ۹، شرایط مرزی تغییر پیدا می‌کند از این رو رابطه (۱۰) به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$\Pr(Z_{i,j} = S_k | Z_{i+1,j} = S_m, Z_{i,j-1} = S_l, Z_{i,1} = S_w) = \frac{p_{lk}^{h2} \cdot p_{kw}^{h2(j-1)} \cdot p_{mk}^v}{\sum_f p_{lf}^{h2} \cdot p_{fw}^{h2(j-1)} \cdot p_{mf}^v} \quad k = 1, \dots, n \quad (11)$$

تخمین مدل‌سازی در حرکت دو نسبت به حرکت یک در هر تعداد از افق‌های لزه‌ای از افزایش قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

با توجه به نتایج جداول بالا همان‌طور که مشاهده می‌شود دقت

مدل‌سازی در این راهکار نسبت به روش مارکوف بالاتر بوده و با افزایش تعداد چاه‌ها، دقت به طور قابل مشخصی افزایش می‌یابد.

از مزایای این روش این است که در واقع بدون اینکه تغییری در

حجم اطلاعات مورد استفاده صورت گیرد اثر هر دو چاه در تخمین

حالت هر سلول لحاظ می‌شود. به عبارت دیگر در این راهکار از هر دو چاه برای شمارش انتقال حالت‌ها و شبیه‌سازی شرطی استفاده

می‌شود و فقط محدود به یک چاه نیست. هم‌چنین برای تشکیل ماتریس احتمال افقی نیز شمارش انتقال‌ها در هر دو جهت حرکت (از چپ به راست و از راست به چپ) در نظر گرفته می‌شود.

p^{h2} بیانگر احتمال انتقال افقی برای حرکت از راست به چپ می‌باشد. توان در پارامتر $p_{kw}^{h2(j-1)}$ اختلاف سلول مورد تخمین تا چاه

مرزی اول (چاه سمت چپ) می‌باشد.

برای بررسی تأثیر این راهکار بر روی دقت مدل‌سازی از جداول ۵ و ۶ استفاده شده است. جدول ۵ نتایج دقت تخمین رخساره‌ها را برای

تعداد افق‌های لزه‌ای ثابت سه (اختلاف بین افق‌های لزه ۲۰ سلول می‌باشد) و تعداد چاه‌های متغیر در هر دو حالت از نوع حرکت تخمین

را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است اثر مثبت حرکت رفت و برگشتی بر روی دقت مدل‌سازی نسبت به حرکت رفت

قابل مشاهده است. در جدول ۶ نتایج دقت تخمین رخساره‌ها برای تعداد افق‌های لزه‌ای متغیر و تعداد چاه‌های ثابت (دو چاه) در هر دو

حالت از نوع حرکت ارائه شده است. برای تعداد ثابت دو چاه دقت

جدول ۵- میزان دقت مدل‌سازی با استفاده از سه افق لزه‌ای و تعداد چاه‌های متغیر با استفاده از حرکت رفت و برگشتی

تعداد افق لزه‌ای		تعداد چاه
۳ افق	حکمت ۱ (حرکت رفت)	حکمت ۲ (حرکت رفت و برگشتی)
۲ چاه	۰/۷۵۳۲	۰/۷۷۱۲
۳ چاه	۰/۷۶۶۷	۰/۷۹۲۱
۵ چاه	۰/۸۲۵۴	۰/۸۵۳۸
۷ چاه	۰/۸۶۶۵	۰/۹۰۴۲
۹ چاه	۰/۸۶۱۲	۰/۹۲۵۷

جدول ۶- میزان دقت مدل‌سازی با استفاده از دو چاه و تعداد افق‌های لزه‌ای متغیر برای حرکت رفت و برگشتی

تعداد چاه		تعداد افق لزه‌ای
۲ چاه	حکمت ۱ (حرکت رفت)	حکمت ۲ (حرکت رفت و برگشتی)
۵ افق	۰/۸۶۱۲	۰/۹۰۱۰
۴ افق	۰/۸۰۶۷	۰/۸۵۲۱
۳ افق	۰/۷۵۳۲	۰/۷۷۱۲
۲ افق	۰/۷۰۳۸	۰/۷۱۸۴

جدول ۷- ماتریس درهم ریختگی دسته‌بندی برای چهار رخساره با روش مارکوف و حرکت رفت و برگشتی در تعمیم‌پذیری مقطع سه

تعمیم‌پذیری با روش	مارکوف	رفت و برگشتی
ماتریس درهم ریختگی	$\begin{bmatrix} 0.9471 & 0.0235 & 0.0154 & 0.0140 \\ 0.2703 & 0.6050 & .0907 & 0.034 \\ 0.0611 & 0.1085 & 0.7518 & 0.0786 \\ 0.0366 & 0.0320 & 0.1329 & 0.7985 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9721 & 0.0135 & 0.0124 & 0.0020 \\ 0.2703 & 0.6602 & .0907 & 0.034 \\ 0.0611 & 0.1085 & 0.7812 & 0.0786 \\ 0.0366 & 0.0320 & 0.1329 & 0.8642 \end{bmatrix}$
اثر ماتریس درهم ریختگی	3.1024	3.277
CCR	0.7756	0.819
متوسط احتمال خطا	0.2244	0.181

۷- مقایسه نتایج حاصل از راهکار پیشنهادی با روش مارکوف

در تعمیم‌پذیری مارکوف

تعمیم‌پذیری مقاطع استفاده شد. نتایج مدل‌سازی مقاطع آزمون با استفاده از این راهکار در مقایسه با روش مارکوف در تصویر ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعمیم‌پذیری با استفاده از راهکار پیشنهادی از دقت بالاتری برخوردار است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، راهکار پیشنهادی نقش بسزایی در افزایش دقت مدل‌سازی با روش مارکوف دارد. لذا از این راهکار برای



تصویر ۱۰- میزان دقت تعمیم‌پذیری با استفاده از روش مارکوف و راهکار پیشنهادی در مقاطع دو و سه

افق لرزه‌ای دقت مدل‌سازی مقاطع آزمون با استفاده از روش زنجیره مارکوف ۸۴ درصد و راهکار حرکت رفت و برگشتی ۹۰ درصد به دست آمد؛ هم‌چنین در تعمیم‌پذیری نیز، نتیجه راهکار حرکت رفت و برگشتی نسبت به روش مارکوف دقت بالاتری را برای مدل‌سازی رخساره‌ها با توجه به اطلاعات موجود ارائه کرد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به تشریح روند مدل‌سازی رخساره‌های عمیق با استفاده از اطلاعات چاه نمودارها و داده‌های لرزه‌ای پرداخته شد. همان‌طور که نشان داده شد مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از روش زنجیره مارکوف با اطلاعات نه چاه و بطور متوسط با دقت ۹۴ درصد به دست آمد.

به منظور بررسی تعمیم‌پذیری روش مارکوف با در نظر گرفتن شرایطی، به مدل‌سازی دو مقطع آزمون پرداخته شد؛ که دقت مدل‌سازی در آنها به ترتیب ۸۵ درصد و ۷۸ درصد بدست آمد. در راستای افزایش دقت مدل‌سازی توسط روش مارکوف به پیشنهاد راهکاری تحت عنوان حرکت رفت و برگشتی پرداخته شد.

این راهکار بر مبنای تغییر نوع حرکت زنجیره استوار است. نتایج نشان داد تغییر نوع حرکت زنجیره می‌تواند نقش مهمی بر کاهش خطای تخمین داشته باشد. با در نظر گرفتن اطلاعات دو چاه و پنج

مراجع

امینی، ع.، ۱۳۸۸، "مبانی چینه‌نگاری سکانسی"، انتشارات دانشگاه تهران.

Anderson, T. W. & Goodman, L. A., 1957, "Statistical inference about Markov chains", *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 28 (1): 89-110.

Billingsley, P., 1961, "Statistical methods in Markov chains", *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 32 (1): 12-40.

Krumbein, W. C. & Dacey, M. F., 1969, "Markov chains and embedded Markov chains in geology", *Mathematical Geology*, Vol. 1 (1): 79-96.

EDCO Kish International Company, 2006, "Gological studies report for Mansuri oil field development in Asmari formation".

Elfeki, A.M. & Dekking, F.M., 2001, "A Markov chains model for subsurface characterization: theory and applications", *Mathematical Geology*, Vol. 38 (4): 569-589.

Higgins, J. J. & Keller-McNulty, S., 1995, "Concepts in probability and stochastic modeling", *Duxbury Press*, 432 pp.

Li, W., 2007, "Markov chain random fields for estimation of categorical variables", *Mathematical Geology*, Vol. 39 (3): 321-335.

Li, W. & Zhang, C., 2008, "A single-chain-based multidimensional Markov chain model for subsurface characterization", *Environmental and Ecological Statistics*, Vol. 15: 157-174.

Modica, G. & Poggiolini, L., 2012, "A first course in probability and Markov Chains", *John Wiley & Sons*, 352 pp.

Mukerji, T., Jorstad, A., Avseth, P., Mavko, G. & Granli, J. R., 2001, "Mapping lithofacies and pore-fluid probabilities in a North Sea reservoir: Seismic inversions and statistical rock physics", *Geophysics*, Vol. 66: 988-1001.

Mukerji, T., Jorstad, A., Avseth, P., Mavko, G. & Granli, J. R., 2005, "Mapping lithofacies and pore-fluid probabilities in a North sea reservoir: Seismic inversions and statistical rock physics", *Geophysics*, Vol. 66: 1001-1020.

Papoulis, A., 2002, "Probability, random variables and stochastic", *McGraw-Hill Europe*, 97 pp.

Ross, S. M., 2009, "Introduction to probability models", *Academic press*, 110 pp.