

ارائه راهکاری جدید در مدل‌سازی رخساره‌های سنگی با استفاده از روش زنجره مارکوف در یکی از میادین نفتی ایران

هانیه نیکوگفتار^{۱*}، بهزاد مهرگینی^۱، عباس بحرودی^۱، بهزاد تخم‌چی^۲، غلامحسین نوروزی^۱

^۱دانشکده فنی، دانشگاه تهران

^۲دانشگاه صنعتی شاهرود

*hanienikoo@yahoo.com

تاریخ دریافت: فروردین ۹۲، تاریخ پذیرش: خرداد ۹۲

چکیده

شناسایی و تفسیر ناهمگنی‌های زیرسطحی به ویژه رخساره‌های سنگی، همواره نقشی اساسی در ارزیابی و مدیریت منابع هیدروکربوری دارد. روش‌های متنوعی برای مدل‌سازی ویژگی‌های گسسته مخازن هیدروکربوری، نظیر رخساره‌های سنگی، ارائه شده‌اند که از این میان ارائه روشی نوین که نتایج آن تطابق بهتری با واقعیت رخساره‌های مخزنی داشته باشد، همواره مورد توجه بوده است. امروزه زنجره مارکوف به عنوان روشی قدرتمند برای مدل‌سازی رخساره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که بر مبنای احتمالات شرطی و ارائه ماتریس انتقال حالات است. در این مطالعه علاوه بر معرفی روش مدل‌سازی زنجره مارکوف، جهت بهبود این روش به پیشنهاد راهکاری پرداخته شده است. این راهکار بر مبنای تغییر نوع حرکت زنجره در روش مارکوف استوار است. مطالعه حاضر بر روی یکی از میادین هیدروکربوری جنوب غرب ایران صورت گرفته است که در آن سازند آسماری مخزن اصلی هیدروکربور را تشکیل می‌دهد که به مدل‌سازی سه بخش اصلی سازند آسماری و پوش سنگ آن در یک مقطع به طول ۱۲ کیلومتر و ضخامت ۱۱۰ با استفاده از فرآیند مارکوف و راهکار پیشنهادی پرداخته شده است. بهترین نتیجه مدل‌سازی با استفاده از اطلاعات دو چاه و پنج افق لرزه‌ای برای حالت به کارگیری حرکت رفت و برگشتی بوده که بطور متوسط دقت ۹۰ درصد را به همراه داشته است.

کلمات کلیدی: زنجره مارکوف، رخساره سنگی، ماتریس انتقال حالت، مخازن هیدروکربوری، سازند آسماری.

۱. مقدمه

ارزیابی ناهمگنی‌های زیرسطحی، به ویژه شناسایی رخساره‌های سنگی همواره نقشی کلیدی در شناخت و مدیریت مخازن هیدروکربوری دارد. از این رو به کارگیری روش‌هایی با حداکثر کارایی و دقت که بتوانند با استفاده از اطلاعات موجود دیدی صحیح و روشن از این ناهمگنی‌ها (رخساره‌های سنگی) را ارائه دهند، ضروری می‌باشد [۱]. امروزه روش‌های متنوعی جهت تفسیر کمی رخساره‌های نفتی توسعه یافته است که به‌طور کلی به دو دسته تعینی و احتمالاتی تقسیم‌بندی می‌شوند. 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 [۲]. روش زنجیره مارکوف که به افتخار "آندری مارکوف" (Andry Markov) ریاضیدان اهل روسیه این گونه نام‌گذاری شده است، یک روش احتمالاتی است که کاربرد آن در علوم زمین به سرعت در طول چند سال اخیر افزایش یافته است.

زنجیره مارکوف در زمین‌شناسی برای مدل‌سازی متغیرهای گسسته (رخساره‌ها) به کار می‌رود. بسیاری از تکنیک‌های پیشین توسط واریوگرام‌ها و کواریوگرام‌ها، ساختارهای فضایی خواص 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 [۳].

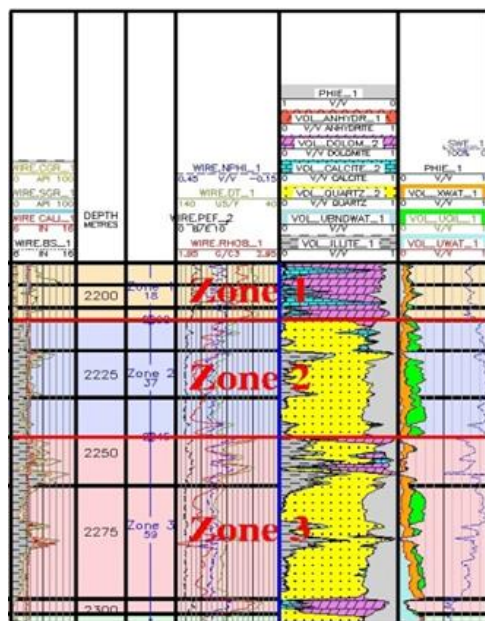
مطالعاتی توسط اندرسون، گودمنو بیلین جسللی، نشان داد که زنجیره مارکوف می‌تواند نقش شایانی در مدل‌سازی ناهمگنی‌های زیرسطحی به ویژه رخساره سنگی داشته باشد [۴]. از این رو، در ادامه محققان بسیاری از این ابزار برای تجزیه و تحلیل چینه‌های رسوبی و مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از اطلاعات رخنمون‌ها و گمانه‌های اکتشافی پرداختند [۵]. لازم به ذکر است که علاوه بر مطالعات نام برده، پژوهش‌هایی نیز در ارتباط با توسعه ابعاد مدل‌سازی با استفاده از زنجیره مارکوف صورت گرفته است [۶]. نکته قابل ذکر آن که در تمامی این مطالعات از ابزار فوق صرفاً در راستای مدل‌سازی رخساره‌های کم عمق به کمک اطلاعات رخنمون‌ها، استفاده شده است. تاکنون مطالعات جامعی در ارتباط با رخساره‌های عمیق به ویژه در میدین نفتی با استفاده از زنجیره مارکوف صورت نگرفته است. به کارگیری روش مارکوف در مدل‌سازی رخساره‌های سنگی میدین نفتی نیازمند استفاده از برخی اطلاعات ویژه، نظیر اطلاعات لرزه‌ای و چاه نمودارها می‌باشد که به منظور افزایش دقت نتایج مدل‌سازی، بایستی تغییراتی در روند فرآیند مارکوف صورت پذیرد.

مطالعه حاضر به بررسی کاربرد زنجیره مارکوف در مدل‌سازی رخساره‌های سنگی در یکی از میدین هیدروکربوری جنوب غرب ایران پرداخته است. در این مطالعه، در ابتدا به معرفی تئوری زنجیره مارکوف و چگونگی مدل‌سازی با این روش در حیطه زمین‌شناسی پرداخته شده و پس از پیشنهاد راهکاری جهت بهبود دقت مدل‌سازی، مدلی از رخساره‌های زیرسطحی در مخزن مورد نظر ارائه شده است. راهکار معرفی شده در ارتباط با تغییر نوع حرکت زنجیره مارکوف در شبیه‌سازی شرطی می‌باشد که نقش بسزایی در افزایش دقت مدل‌سازی داشته است. در انتها، نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل ساخته شده و دقت آن برای شرایط مختلف ارائه شده است.

۲. زمین‌شناسی منطقه

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

میدان نیز مانند بسیاری از میداین این ناحیه از روند زاگرس (شمال غرب- جنوب شرق)، تبعیت می کند. این میدان دارای سه مخزن نفتی آسماری، بنگستان و خامی می باشد که مطالعه حاضر 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 دید سنگ شناسی، سازند آسماری غالباً از ماسه سنگ و سنگ های کربناته تشکیل شده است. بر اساس تغییرات لیتولوژی و تخلخل، در این میدان سازند آسماری به طور قائم به هشت بخش و نوزده زیربخش متمایز شامل سنگ های آهکی، ماسه سنگی و رسی تقسیم شده است. بخش های یک، دو و سه بالای سطح جدایش نفت و آب قرار داشته و لایه های نفت ده را تشکیل می دهند، که در این مطالعه به مدل سازی این بخش های نفت ده پرداخته شده است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، می توان سازند آسماری را در سه زون مختلف در نظر گرفت که به شرح زیر است [۷].



شکل ۱: نمایشی از زون های مخزنی آسماری در یک چاه [۷].

بخش یک: این بخش عمدتاً از آهک های دولومیتی و دولومیت های آهکی، آهک تشکیل یافته و از میزان تخلخل خوب تا خیلی خوب برخوردار است. میزان ضخامت خالص در این بخش متنوع بوده و از مقدار کمتر از یک متر تا ۲۱ متر متغیر است. مقدار ضخامت خالص در قسمت های مرکزی طاق دیس، نسبت به یال های آن بیشتر است [۷].

بخش دو: این بخش عمدتاً از ماسه سنگ های تحکیم یافته همراه با مقادیر کمی شیل و آهک تشکیل یافته و از توسعه تخلخل متوسط، خوب و خیلی خوب برخوردار و هیدروکربن دار می باشد [۷].

بخش سه: این بخش عمدتاً از ماسه سنگ تحکیم نیافته همراه با مقادیر قابل توجهی از شیل تشکیل یافته و دارای تناوبی از تخلخل پایین تا خیلی خوب است [۷].

در این پژوهش هم چنین به مدل سازی بخش پوش سنگ انیدریتی سازند آسماری علاوه بر سه بخش مخزنی، پرداخته شده است.

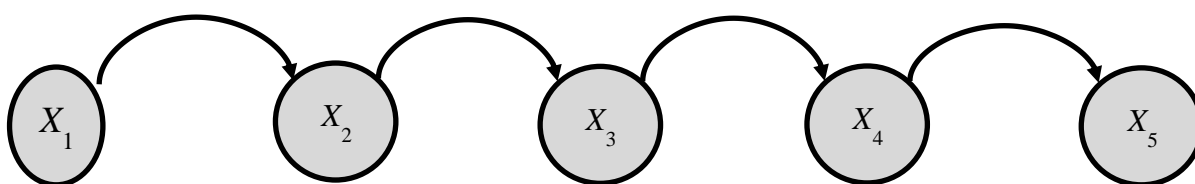
۳. تئوری روش مارکوف و مدل سازی توسط آن

یک فرایند تصادفی مجموعه ای از متغیرهای تصادفی است که با $\{X(n), n \in N\}$ نمایش داده می شود که در آن مقادیر ممکن $X(n)$ ، حالت (State) فرایند نامیده می شوند. زنجیره مارکوف یک فرایند تصادفی است که در متغیرهای تصادفی آن،

انتقال از یک حالت به حالت دیگر صورت می‌گیرد. ویژگی مارکوف (Property Markov) بیان می‌دارد که حالت بعدی یک متغیر تنها به حالت فعلی آن متغیر بستگی دارد و به وقایع قبل از آن وابسته نیست [۸]. فرض کنید $\{X(n)\}$ یک فرایند تصادفی و $\{S(n)\}$ حالت‌های فرایند تصادفی را نشان دهد، گفته می‌شود فرایند در ویژگی مارکوف صدق می‌کند، اگر رابطه زیر برقرار باشد:

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

فرایند تصادفی‌ای را که در ویژگی مارکوف صدق کند، فرایند مارکوف (Markov process) و چنین 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. شکل ۲ بیانگر ویژگی مارکوف است، همان‌طور که نشان داده شده است هر سلول فقط به سلول قبل از خود وابسته بوده و مستقل از رخداد دیگر سلول‌ها می‌باشد [۹].



شکل ۲. طرح شماتیکی از ویژگی مارکوف

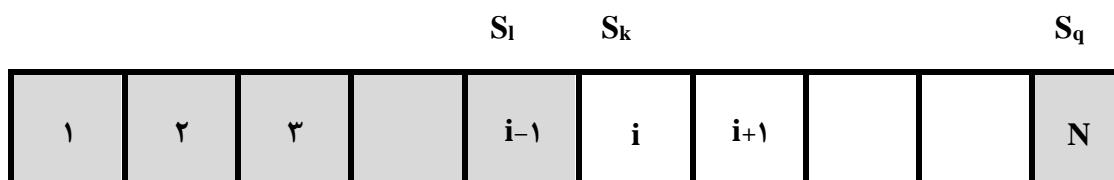
احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای بر اساس احتمالات شرطی است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای، برابر با احتمال انتقال از حالت i به حالت j است. احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای، در نظریه و کاربرد زنجیره‌های مارکوف نقش کلیدی دارد. استفاده از ماتریس تغییر حالت یک مرحله‌ای ابزاری کارآمد جهت ارائه احتمال‌های تغییر حالت یک زنجیره مارکوف است. درایه‌های ماتریس تغییر حالت متناظر با احتمال‌های تغییر حالت i به حالت j می‌باشد. 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 [۹ و ۱۰].

در شکل ۳، یک توالی از رخدادها وجود دارد که ویژگی مارکوف را دارا هستند. سلول i در حالت S_k ، سلول $i-1$ در حالت S_l و سلول N در حالت S_q قرار دارد که رخداد S_k مشروط به رخداد S_l و S_q است Z_i بیانگر حالت سلول $i=1, \dots, N$ می‌باشد. احتمال انتقال حالت pr از i به حالت j به صورت رابطه زیر ارائه می‌شود:

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



شکل ۳: یک توالی از رخدادها برای زنجیره مارکوف یک بعدی. سلول‌های خاکستری دارای مقدار و سلول‌های سفید مورد تخمین با روش مارکوف هستند [۱۰].

رابطه ۳ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$pr(Z_i = S_k | Z_{i-1} = S_l, Z_N = S_q) = \frac{pr(Z_{i-1} = S_l, Z_i = S_k, Z_N = S_q)}{pr(Z_{i-1} = S_l, Z_N = S_q)} \quad (4)$$

با توجه به ویژگی مارکوف می توان احتمالات شرطی در معادله (۴) به صورت زیر بیان کرد:

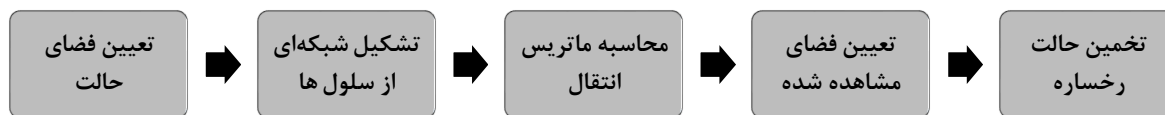
$$pr(Z_i = S_k | Z_{i-1} = S_l, Z_N = S_q) = \frac{p_{kq}^{(N-i)} p_{lk}}{p_{lq}^{(N-i+1)}} \quad (5)$$

که در آن، $p_{kq}^{(N-i)}$ در واقع احتمال انتقال از حالت k به حالت q ، به فاصله $(N-i)$ سلول و همچنین $p_{lq}^{(N-i+1)}$ احتمال انتقال از حالت l به حالت q به فاصله $(N-i+1)$ سلول است [۱۱].

۱-۳ مدل سازی رخساره ها با استفاده از زنجیره مارکوف

همان طور که می دانیم حضور ویژگی مارکوف در یک توالی از رخساره ها مبین وابستگی بین رخساره ها است. از طرف دیگر طبق قانون والتر (۱۸۹۳ الی ۱۸۹۴) محیط های رسوبی که در آنها رخساره های متفاوت گسترش پیدا می کنند، دارای ارتباط طبیعی (ارتباط در شرایط محیطی) هستند. بر این اساس مجموعه واحدهای رسوبی که مجاور یکدیگر تشکیل می شوند، دارای یک وابستگی طبیعی در شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند. از این رو، با توجه به این قانون می توان بیان کرد که تشکیل توالی های رسوبی به صورت تصادفی و مستقل از هم نبوده و وابستگی معناداری بین رخساره ها وجود دارد [۱۲].

با توجه به شکل ۴، مدل سازی رخساره ها با استفاده از زنجیره مارکوف در چهار مرحله مختلف تقسیم بندی می شود که در زیر تشریح شده است:



شکل ۴: نمایشی از مراحل مختلف مدل سازی رخساره ها توسط روش زنجیره مارکوف

گام اول: تعیین فضای حالت بر مبنای متغیر مورد بررسی می باشد. در این مطالعه متغیر مورد بررسی رخساره های سنگی است، از این رو فضای حالت برابر با تعداد رخساره های موجود در توالی رسوبی است. با توجه به اینکه هدف، مدل سازی پوش سنگ (انیدریت)، بخش یک (کربناته)، دو (ماسه سنگ)، سه (ماسه سنگ شیلی) مخزن میدان مورد مطالعه است، در نتیجه فضای حالت دارای چهار عضو خواهد بود.

جدول ۱: مشخص کردن تعداد حالت ها و رخساره ها

حالت	رخساره
حالت اول	انیدریت
حالت دوم	آهک
حالت سوم	ماسه سنگ
حالت چهارم	ماسه شیلی

گام دوم: داده‌های مورد استفاده در این مدل‌سازی، رخساره‌های مشخص شده توسط چاه‌نمودارها و اطلاعات لرزه‌ای است. 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. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است دو چاه در راستای قائم (مرز اول و سوم) و اطلاعات لرزه‌ای (مرز دوم) در راستای افقی (رنگ خاکستری تیره) به عنوان فضای مشاهده شده، در نظر گرفته شده است. در این شکل، چاه سمت چپ در بازه (۱ و i) و N_y و ... و $i=2$ چاه سمت راست در بازه (i و N_x) و N_y و ... و $j=2$ و داده‌های لرزه‌ای در بازه (j و 1) و N_x و ... و $j=1$ قرار گرفته و فضای بین دو چاه به سلول‌هایی تقسیم‌بندی شده است. ابعاد سلول‌ها با توجه به قدرت تفکیک (Resolution) داده‌های چاه و لرزه‌ای مشخص می‌شوند. طول مقطع مورد بررسی ۱۲ کیلومتر بوده که با توجه به قدرت تفکیک داده‌های لرزه‌ای (به ازای هر ۲۰ متر، رخساره‌ها از روی داده‌های لرزه‌ای مشخص شده‌اند)، این مقطع به ۶۰۰ سلول ۲۰ متری در راستای افقی تقسیم شده است. همچنین ضخامت این مقطع ۱۱۰ متر بوده که با توجه به قدرت تفکیک داده‌های چاه (به ازای هر ۱ متر، رخساره‌ها از روی داده‌های چاه مشخص شده‌اند) به ۱۱۰ سلول یک متری در راستای قائم تقسیم شده است. به ازای هر سلول یک شماره سطر i ، یک شماره ستون j و یک حالت از رخساره s وجود دارد.

$1, N_x$									
$N_y, 1$									N_y, N_x

شکل ۵: شبکه‌بندی فضای بین اطلاعات دوچاه (راستای عمودی) و لرزه (راستای افقی) با توجه به قدرت تفکیک چاه و داده‌های لرزه‌ای. سلول‌های خاکستری تیره نقاط مشاهده شده، سلول‌های خاکستری روشن سلول‌های تخمین زده شده و سلول‌های سفید مجهول هستند.

گام سوم: هدف این مرحله تشکیل ماتریس احتمال انتقال در دو راستای افقی و قائم است. از این رو با توجه به شبکه‌بندی انجام داده شده در راستای قائم (چاه) و در راستای افقی (لرزه)، انتقال حالت‌ها را از i به j (می‌تواند $i=j$ باشد) شمارش شده و سپس برای به دست آوردن احتمال انتقال هر حالت به خودش و حالت‌های دیگر، تعداد شمارش‌ها را تقسیم بر کل شمارش‌های هر سطر می‌شود. احتمال انتقال درایه p_{ij} منعکس‌کننده احتمال گذر از حالت i به حالت j است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{T_i} \quad (6)$$

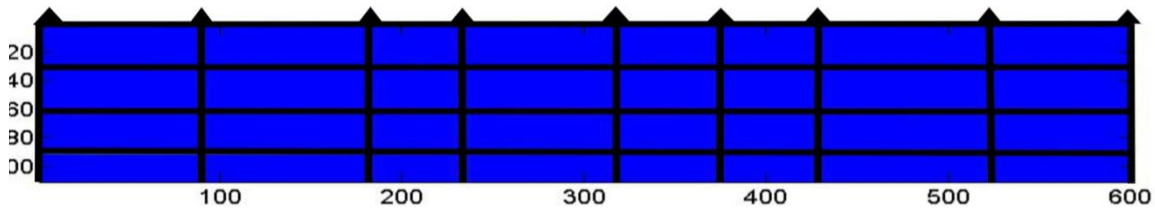
که در آن f_{ij} تعداد انتقال‌های صورت گرفته از رخساره i به رخساره j ، T_i تعداد کل انتقال‌های رخساره اول یا به عبارتی مجموع سطر اول ماتریس انتقال و p_{ij} نسبت این دو پارامتر و یا احتمال انتقال صورت گرفته می‌باشد. برای مثال، در جدول ۲ در راستای افقی، ۳۵۰ شمارش رخساره انیدریت وجود دارد که سهم انتقال به رخساره ماسه تنها ۲ شمارش است، بنابراین احتمال انتقال آن $0/006 = (2/350)$ می‌شود.

جدول ۲: ماتریس انتقال و ماتریس احتمال انتقال در دو راستای افقی و قائم

طول مقطع قائم ۱۱۰ متر					طول مقطع افقی ۱۲ کیلومتر				
فاصله نمونه برداری در راستای قائم یک متر					فاصله نمونه برداری 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	۰/۹۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰	۲	۰/۰۱۳	۰/۹۱۳	۰/۰۵۴	۰/۰۲۰
۳	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۷۸۹	۰/۱۰۵	۳	۰/۰۳۳	۰/۰۵۰	۰/۸۱۷	۰/۱۰۰
۴	۰/۱۸۲	۰/۰۹۱	۰/۱۸۲	۰/۵۴۵	۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰/۸۷۵

گام چهارم: در این مرحله به مشخص نمودن فضای داده‌های مشاهده شده پرداخته می‌شود. فضای مورد مطالعه یک مقطع زمین‌شناسی به طول ۱۲ کیلومتر (۶۰۰ سلول به طول ۲۰ متر) و ضخامت ۱۱۰ متر (۱۱۰ سلول به طول ۱ متر) است. برای مدل‌سازی این مقطع دو بعدی از اطلاعات ۹ چاه با فاصله‌های معلوم و ۴ افق اطلاعات لرزه‌ای با فاصله ۳۰ متر (شکل ۶) به عنوان فضای مشاهده شده استفاده شده است.

در این تقسیم‌بندی همه سلول‌ها بین اطلاعات مشاهده شده از دو چاه و دو افق لرزه‌ای قرار می‌گیرند. به منظور تخمین حالت هر سلول، با توجه به شماره سطر و ستون آن، از ماتریس احتمال عمودی چاه سمت چپ (مرز اول) و ماتریس احتمال افقی لرزه‌ای که در سطر بالایی (مرز دوم) قرار گرفته استفاده می‌شود. چاه سمت راست (مرز سوم) هر سلول در شبیه‌سازی شرطی بکارگرفته می‌شود.



شکل ۶: نحوه قرار گرفتن چاه‌ها و افق‌های لرزه‌ای در مقطع مورد بررسی. نه چاه با فاصله‌های مشخص در راستای قائم و چهار افق لرزه‌ای با فاصله ۳۰ متر در راستای افقی

گام پنجم: در مرحله آخر 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 هم است که هر کدام بر اساس قوانین 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 [۱۲]. احتمال انتقال در راستای افقی به صورت رابطه زیر معرفی می‌شود:

$$p_{ik}^h = pr(X_{i+1} = S_k | X_i = S_l) \quad (7)$$

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:

$$p_{mk}^v = pr(Y_{j+1} = S_k | Y_j = S_m) \quad (8)$$

که در آن 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 [۱۳]. از این رو با بسط رابطه (۵) در دو بعد خواهیم داشت:

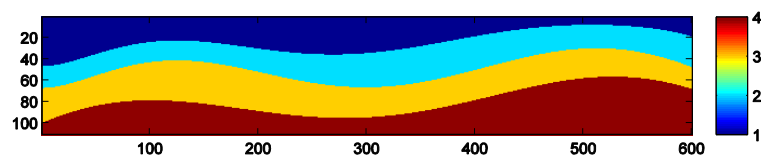
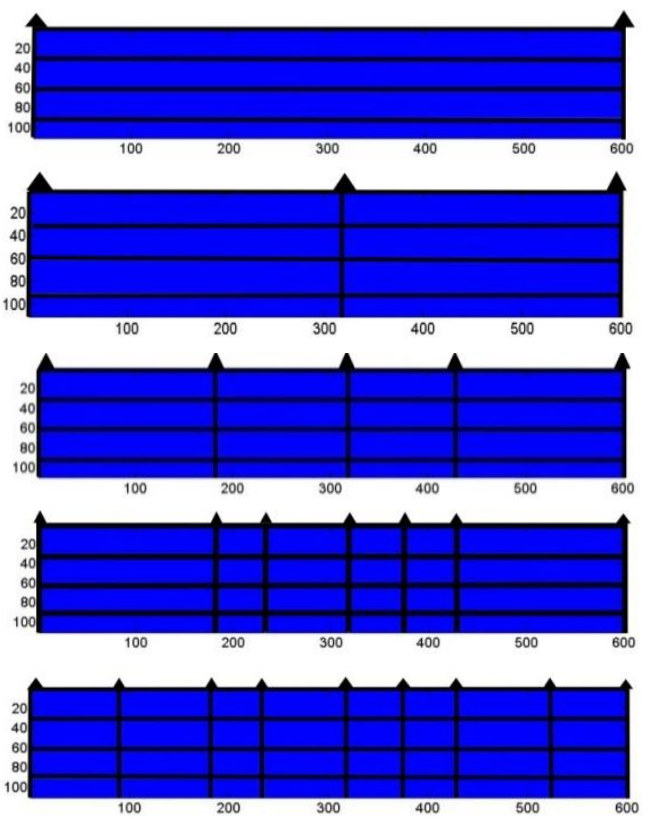
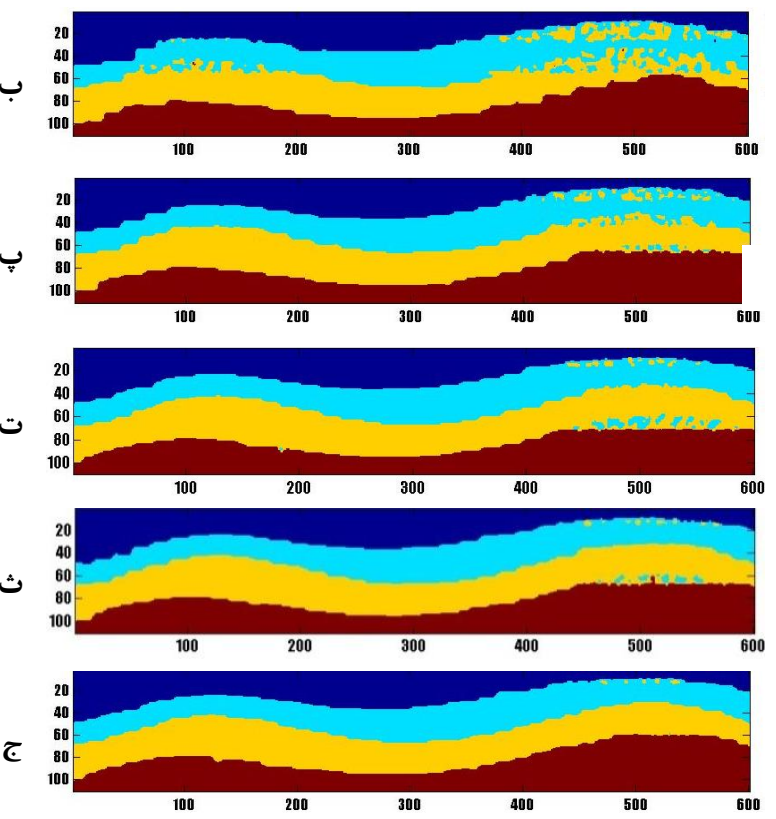
$$\Pr(Z_{i,j} = S_k | Z_{i-1,j} = S_l, Z_{i,j-1} = S_m, Z_{N_x,j} = S_q) = \frac{p_{ik}^h \cdot p_{kq}^{h(N_x-j)} \cdot p_{mk}^v}{\sum_f p_{lf}^h \cdot p_{fq}^{h(N_x-j)} \cdot p_{mf}^v} \quad k = 1, \dots, n \quad (9)$$

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 $\Pr(Z_{i,j} = S_k | Z_{i-1,j} = S_m, Z_{i,j-1} = S_l, Z_{i,N_x} = S_q)$ مورد تخمین قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۵، سلول $(i-1,j)$ دارای حالت S_m در همسایگی قائم، سلول $(i,j-1)$ دارای حالت S_l در همسایگی افقی و (i,N_x) که در مرز سمت راست سلول (چاه سمت راست) قرار دارد، دارای حالت S_q است. با داشتن این چهار پارامتر توسط رابطه (۹) حالت S_k سلول (i,j) تخمین زده می‌شود؛ که در آن $p_{kq}^{h(N_x-j)}$ بیانگر احتمال انتقال از حالت k به حالت q در ماتریس افقی که به توان اختلاف فاصله (N_x-j) سلول مورد تخمین تا چاه سمت راست آن رسیده، می‌باشد. مخرج کسر فوق که بیانگر مجموع احتمال تمامی حالات رخداد رخساره‌ها می‌باشد، جهت نرمال نمودن \Pr استفاده می‌شود. با توجه جهت حرکت تخمین حالت سلول‌ها (از چپ به راست)، همان‌طور که در رابطه (۹) مشاهده می‌شود از چاه دوم (مرز سوم) برای شرطی کردن شبیه‌سازی استفاده شده است تا نتایج بهتری را به همراه داشته باشد [۱۳].

نتایج مدل‌سازی کلاسیک رخساره‌ها در مقطع مورد مطالعه در شکل ۷ ارائه شده است. شکل الف، بیانگر حالت واقعی تغییرات رخساره‌ها در مقطع مورد نظر است. در اشکال بعدی در سمت چپ موقعیت قرار گرفتن چاه‌ها و در سمت راست مدل‌سازی انجام شده، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چاه‌ها، مدل ارائه شده به ساختار واقعی نزدیک‌تر می‌شود. به بیان دیگر دقت مدل‌سازی به شدت تحت تاثیر تعداد و فاصله بین اطلاعات عمودی

شکل ۷. الف) شکل واقعی تغییرات رخصاره‌ها در مقطع مورد مطالعه را نشان می‌دهد. اشکال سمت چپ موقعیت، تعداد چاهها (با نشانگر مثلث نشان داده شده است) و افق‌های لرزهای و اشکال سمت راست مدل‌سازی رخصاره‌ها با استفاده از روش مارکوف را نمایش می‌دهند. مدل‌سازی رخصاره‌ها با (ب) در چاه، پ) سه چاه، ت) پنج چاه، ث) هفت چاه و (ج) تمامی چاهها (نه چاه). شکل (ج) بهترین نتیجه با دقت ۹۴ درصد را نشان می‌دهد

الف



۴. 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 اشکال ۸ و ۹ در این راهکار جهت حرکت در دو سطر متوالی از سلول‌های شبکه عکس یکدیگر می‌باشد. 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.

۱, ۱									۱, N _x
					(i-1, j) = S _m				
				(i, j-1) = S _l	(i, j) = S _k				(i, N _x) = S _q
N _y , ۱									N _y , N _x

شکل 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.

۱, ۱									۱, N _x
					(i-1, j) = S _m				
				(i, ۱) = S _w	(i, j) = S _k	(i, j+۱) = S _l			
N _y , ۱									N _y , N _x

شکل 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.

با توجه به شکل ۸ هنگامی که حرکت زنجیره از چپ به راست (رفت) می باشد ماتریس احتمال انتقال قائم از چاه سمت چپ (مرز اول) به دست آمده و چاه سمت راست به عنوان مرز شرطی در نظر گرفته می شود. هم چنین برای محاسبه ماتریس احتمال افقی، شمارش انتقالها از چپ به راست صورت می گیرد.

حال اگر مسیر حرکت زنجیره از راست به چپ (برگشت) باشد (شکل ۹)، برای محاسبه ماتریس احتمال قائم از چاه سمت راست (مرز دوم) استفاده شده و چاه سمت چپ به عنوان مرز شرطی فرض می شود. با توجه به این که جهت حرکت زنجیره در شمارش انتقالها موثر است، از این رو ماتریس احتمال افقی برای حرکت از راست به چپ بار دیگر محاسبه می شود.

با توجه به حرکت زنجیره که از چپ به راست و یا از راست به چپ باشد دو رابطه زیر برای تخمین حالت سلولها در نظر گرفته می شود. برای حرکت از چپ به راست همان طور که پیش تر اشاره شد از رابطه (۹) استفاده می شود.

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

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 شکل ۹، شرایط مرزی تغییر پیدا می کند از این رو رابطه (۱۰) به شکل زیر تغییر می یابد:

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

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

برای بررسی تاثیر این راهکار بر روی دقت مدل سازی از جداول ۳ و ۴ استفاده شده است. جدول ۳ نتایج دقت تخمین رخسارهها را برای تعداد افقهای لرزه ای ثابت سه (اختلاف بین افقهای لرزه ۲۰ سلول می باشد) و تعداد چاههای متغیر در هر دو حالت از نوع حرکت تخمین را نشان می دهد. همان طور که در جدول ۳ مشخص است اثر مثبت حرکت رفت و برگشتی بر روی دقت مدل سازی نسبت به حرکت رفت قابل مشاهده است. در جدول ۴ نتایج دقت تخمین رخسارهها برای تعداد افقهای لرزه ای متغیر و تعداد چاههای ثابت (دو چاه) در هر دو حالت از نوع حرکت ارائه شده است. برای تعداد ثابت دو چاه دقت تخمین مدل سازی در حرکت دو نسبت به حرکت یک در هر تعداد از افقهای لرزه ای از افزایش قابل ملاحظه ای برخوردار است.

جدول ۳: میزان دقت مدل‌سازی با استفاده از سه افق لرزه‌ای و تعداد چاه‌های متغیر با استفاده از حرکت رفت و برگشتی

تعداد افق لرزه‌ای		تعداد چاه
۳ افق	۱ حرکت رفت ۲ حرکت رفت و برگشتی	
۰/۷۷۱۲	۰/۷۵۳۲	۲ چاه
۰/۷۹۲۱	۰/۷۶۶۷	۳ چاه
۰/۸۵۳۸	۰/۸۲۵۴	۵ چاه
۰/۹۰۴۲	۰/۸۴۶۵	۷ چاه
۰/۹۲۵۷	۰/۸۶۱۲	۹ چاه

جدول ۴: میزان دقت مدل‌سازی با استفاده از دو چاه و تعداد افق‌های لرزه‌ای متغیر برای حرکت رفت و برگشتی

تعداد چاه		تعداد افق لرزه‌ای
۲ چاه	۱ حرکت رفت ۲ حرکت رفت و برگشتی	
۰/۹۰۱۰	۰/۸۴۱۲	۵ افق
۰/۸۵۲۱	۰/۸۰۶۷	۴ افق
۰/۷۷۱۲	۰/۷۵۳۲	۳ افق
۰/۷۱۸۴	۰/۷۰۳۸	۲ افق

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 تشخیصی 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.

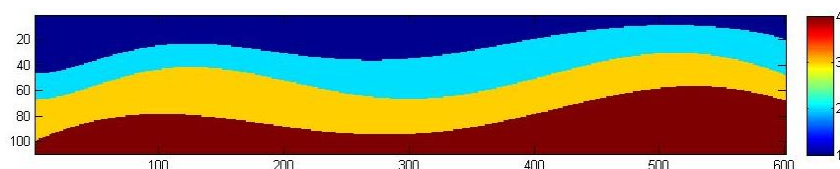
۵. مقایسه نتایج حاصل از راهکار پیشنهادی با روش مارکوف

به منظور مقایسه نتایج حاصل از راهکار مذکور با روش مارکوف از جداول ماتریس درهم‌ریختگی و خطای تخمین استفاده شده است. در این راستا اطلاعات دو چاه و پنج افق لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفت تا بتوان به خوبی نشان داد که راهکار پیشنهادی در این تحقیق، مدل‌سازی قابل قبولی از رخساره‌ها را ارائه می‌دهد. در ادامه ماتریس درهم‌ریختگی و خطای کلی دسته‌بندی رخساره‌ها برای روش مارکوف و حرکت رفت و برگشتی در جدول ۵ ارائه شده است.

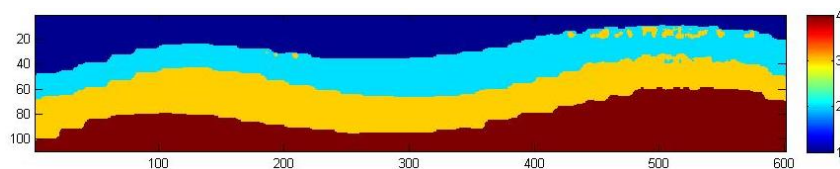
جدول ۵. ماتریس درهم ریختگی و متوسط احتمال خطای حاصل از روش مارکوف و حرکت رفت و برگشتی

روشن	مارکوف	حرکت رفت و برگشتی
ماتریس درهم ریختگی	$\begin{bmatrix} 0.951 & 0.049 & 0 & 0 \\ 0.1858 & 0.7699 & 0.0443 & 0 \\ 0 & 0.2501 & 0.7448 & 0.0051 \\ 0 & 0 & 0.113 & 0.887 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1777 & 0.812 & 0.0103 & 0 \\ 0 & 0.0679 & 0.7980 & 0.1341 \\ 0 & 0 & 0.0166 & 0.9834 \end{bmatrix}$
اثر ماتریس درهم ریختگی	3.35	3.59
CCR	0.8382	0.8984
متوسط احتمال خطا	0.1618	0.1016

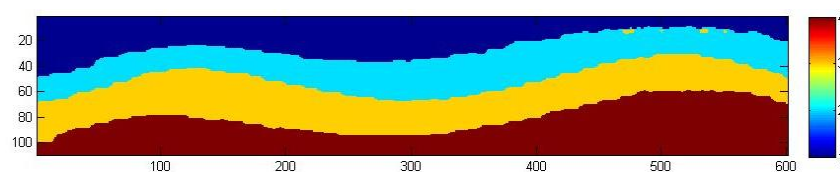
همان طور که از نتایج جدول بالا مشخص است راهکار پیشنهادی دارای دقت بالاتری نسبت به روش مارکوف است. هم چنین نتایج مدل سازی رخساره ها با روش مارکوف و حرکت رفت و برگشتی برای تعداد دو چاه و پنج افق لرزه ای به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مدل سازی با حرکت رفت و برگشتی با دقت ۹۰٪، بهترین مدل ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۰. الف) شکل واقعی از مقطع مورد مطالعه، مدل سازی با استفاده از اطلاعات دو چاه و پنج افق لرزه ای توسط، ب) روش مارکوف، پ) حرکت رفت و برگشتی. حرکت رفت و برگشتی با دقت ۹۰٪، بهترین مدل است.

نتیجه گیری

روش زنجیره مارکوف یکی از ابزارهای توانمند جهت مدل سازی رخساره های سنگی بوده که اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه در ارتباط با رخساره های کم عمق همراه با رخنمون می باشد. در این مطالعه به تشریح روند مدل سازی رخساره های عمیق با استفاده از اطلاعات چاه نمودارها و داده های لرزه ای پرداخته شد. همان طور که نشان داده

شد مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از روش زنجیره مارکوف به اطلاعات مشاهده شده کمی نیاز داشته و این مقدار از اطلاعات دقت قابل قبولی ارائه می‌دهد.

به منظور افزایش دقت مدل‌سازی توسط روش مارکوف به پیشنهاد راهکاری تحت عنوان حرکت رفت‌وبرگشتی 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.

دقت مدل‌سازی و تفکیک چهار رخساره انیدریت، آهک، ماسه و ماسه‌شیلی با کمک روش زنجیره مارکوف و استفاده از اطلاعات دو چاه و پنج افق لرزه‌ای برای روش مارکوف ۸۴٪ و راهکار حرکت رفت‌وبرگشتی ۹۰٪ می‌باشد. در نتیجه راهکار حرکت رفت‌وبرگشتی بهترین دقت را برای مدل‌سازی رخساره‌ها با توجه به اطلاعات موجود ارائه کرد.

"هیئت تحریریه مجله از آقایان دکتر عرب امیری و دکتر امین روشن‌دل که داوری مقاله را بر عهده داشته‌اند کمال تشکر و سپاس را دارد"

منابع

- [1] Mukerji, T., P. A. Jorstad, P. Avseth, G. Mavko and R. Granli, 2001, Mapping lithofacies and pore-fluid probabilities in a North Sea reservoir: Seismic inversions and statistical rock physics, *Geophysics*, 66, 988-1001.
- [2] Mukerji, T., A. Jorstad, P. Avseth, G. Mavko and J. R. Granli, 2001, Mapping lithofacies and pore-fluid probabilities in a North Sea reservoir, *Seismic inversions and statistical rock physics*, *Geophysics*, 66, 1001-1020.
- [3] Dacey, M. F. and W.C. Krumbein, 1969, Markov chains and embedded Markov chains in geology, *Math. Geol.*, 1, 79-96.
- [4] Anderson, T.W. and L. A. Goodman, 1957, Statistical inference about Markov chains, *Ann. Math Stat.*, 28, 89-110.
- [5] Billingsley, P., 1961, Statistical methods in Markov chains, *Ann. Math. Stat.*, 32, 12-40.
- [6] Li, W., 2007, Markov chain random fields for estimation of categorical variables, *Math Geol.*, 39, 321-335.
- [7] EDCO Kish International Company, 2006, Geological Studies Report for Mansuri Oil Field development in Asmari Formation.
- [8] J. Higgins, J., Keller and S. McNulty, 1995, *Concepts in Probability and Stochastic Modeling*, Duxbury Press; first edition.
- [9] Papoulis, A., 2002, *Probability, Random Variables and Stochastic*, *Mathematical*, 75, 211-286.
- [10] Modica, G. & L. Poggiolini, 2013, *A first course in probability and Markov Chains*, Wiley, 54pp.
- [11] Li, W. and C. Zhang, 2009, A single-chain-based multidimensional Markov chain model for subsurface characterization, *Environ Ecol Stat.*, 15, 157-174.

[۱۲] امینی، ع.، ۱۳۸۸، مبانی چینه‌نگاری سکانسی، انتشارات دانشگاه تهران.

- [13] Elfeki, A. M. and F. M. Dekking, 2001, A Markov chains model for subsurface characterization: theory and applications, *Math. Geol.*, 33, 569-589.

Proposing new approach for litho-facies modeling by use of Markov Chain method, an Iranian oil field

Nikogoftar, H., Mehrgini, B., Tokhmchi, A., Norozi, Gh.

Abstract

Reconnaissance and interpretation of underground heterogeneity, particularly litho-facies, always plays an important role in evaluation and management of hydrocarbon resources. Between various methods presented for modeling discrete characteristics of hydrocarbon reservoirs such as litho-facies, one with a more proper conformity with actual condition of reservoir facies is of great advantage. Formed on basis of probability and presenting transition matrix, Markov method is widely applied as a powerful tool for modeling the facies. In the present study, first the method is introduced in details; then, in order to optimize it, suggestion is made based on changing the type of the move of chain in simulation procedure. The case study is a 12 km long 110 m thick section of Anhydrite and three major members of Asmari Formation from an oil field, South-West Iran. This section is modeled through Markov procedure and proposed solution. The models set indicated that on basis of using the data from two wells and five seismic horizons, best result, with 90% accuracy, is for reciprocating motion.

Keywords: Markov chain, Litho-facies, Transition matrix, Hydrocarbon reservoirs, Conditional simulation.