

مدل‌سازی با زنجیره مارکوف، مطالعه موردی: رخساره‌های سنگی یکی از مخازن نفتی جنوب باختر ایران

هانیه نیکوگفتار^۱، عباس بحرودی^۲، بهزاد تخم‌چی^۳، غلامحسین نوروزی^۴ و بهزاد مهرگینی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۵ دانشجوی دکترا، دانشکده اکتشاف معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۸

چکیده

شناسایی و تفسیر ناهمگنی‌های زیرسطحی به‌ویژه رخساره‌های سنگی، همواره نقشی اساسی در ارزیابی و مدیریت منابع هیدروکربوری دارد. روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی ویژگی‌های گسسته مخازن هیدروکربوری، مانند رخساره‌های سنگی، ارائه شده‌اند که در بیشتر موارد به مدل‌سازی درون چاهی پرداخته و در مدل‌سازی دو یا سه بعدی در فضای میان‌چاه کاربرد ندارند. از این‌رو، ارائه روشی نوین که نتایج آن تطابق بهتری با واقعیت رخساره‌های مخزنی داشته باشد، همواره مورد توجه است و می‌تواند در کاهش ریسک تصمیم‌گیری مؤثر باشد. امروزه زنجیره مارکوف به‌عنوان روشی قدرتمند برای مدل‌سازی رخساره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر مبنای احتمالات شرطی و ارائه ماتریس انتقال حالات است. مطالعه حاضر روی یکی از میادین هیدروکربوری جنوب باختر ایران صورت گرفته که در آن سازند آسماری مخزن اصلی هیدروکربور را تشکیل می‌دهد. در این مطالعه با استفاده از روش زنجیره مارکوف مدل‌سازی سه بخش اصلی سازند آسماری و پوش سنگ آن در یک مقطع به طول ۱۲ کیلومتر و ستبرای ۱۱۰ متر انجام شده است. بهترین نتیجه مدل‌سازی با استفاده از اطلاعات نه چاه و چهار افق لرزه‌ای بوده که به‌طور میانگین دقت ۸۸ درصد را به همراه داشته است.

کلیدواژه‌ها: زنجیره مارکوف، رخساره سنگی، ماتریس انتقال حالات، مخازن هیدروکربوری.

*نویسنده مسئول: هانیه نیکوگفتار

E-mail: hanienikoo@yahoo.com

۱- پیش‌گفتار

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 افزون 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 توسط اندرسون، گودمن و بیلین جسی نشان داد که زنجیره مارکوف می‌تواند نقش شایانی در مدل‌سازی ناهمگنی‌های زیرسطحی به‌ویژه رخساره سنگی داشته باشد (Anderson & Goodman, 1957; Billingsley, 1961). از این‌رو در ادامه پژوهشگران بسیاری از این ابزار برای تجزیه و تحلیل چینه‌های رسوبی و مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از اطلاعات رخنمون‌ها و گمانه‌های اکتشافی استفاده کردند (Dacey & Krumbein, 1969). لازم به یادآوری است که افزون بر این مطالعات، پژوهش‌هایی نیز در ارتباط با گسترش ابعاد مدل‌سازی با استفاده از زنجیره مارکوف صورت گرفته است (Li, 2007). هر چند در همه این مطالعات از ابزار فوق تنها در راستای مدل‌سازی رخساره‌های کم ژرفا استفاده شده و تاکنون مطالعات جامعی در ارتباط با رخساره‌های ژرف به‌ویژه در میادین نفتی صورت نگرفته است.

مطالعه حاضر به بررسی کاربرد زنجیره مارکوف در مدل‌سازی رخساره‌های سنگی در یکی از میادین هیدروکربوری جنوب باختر ایران پرداخته است. در این مطالعه، پس از معرفی تئوری زنجیره مارکوف و چگونگی مدل‌سازی با این روش در حیطه زمین‌شناسی، مدلی از رخساره‌های زیرسطحی در مخزن مورد نظر ارائه شده است. در پایان، نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل ساخته شده و دقت آن نشان داده شده است.

شناسایی و تفسیر ناهمگونی‌های زیرزمینی، نقشی اساسی در توصیف هرچه بهتر مخازن هیدروکربوری دارند. مدل‌سازی رخساره‌ها در شناسایی ناهمگنی‌های زیرسطحی، تعیین گسترش هندسی و تغییرات جانبی رخساره‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. هم‌چنین می‌توان با مدل‌سازی رخساره‌ها، مناطق متخلخل و تراوا را مشخص کرده و به‌شناسایی مناطق با پتانسیل بیشتر از حضور هیدروکربور پرداخت. از طرفی دیگر، با شناخت جنس لایه‌های رسوبی موجود در مخازن و ارزیابی کیفیت آن و توان تولید هیدروکربور در رخساره‌ها می‌توان به بررسی و تحلیل اقتصادی بهره‌برداری مخزن از مورد مطالعه دست یافت. ضمن آن‌که شناسایی مناطق با پتانسیل بالای هیدروکربوری نقش بسزایی در تعیین محل‌های بهینه حفاری دارد (Mukerji et al., 2001).

همواره دستیابی به دیدی روشن و صحیح از مخزن به‌ویژه در رخساره‌های نفتی، نیازمند استفاده از روش‌هایی با کارایی و دقت بالا است. امروزه روش‌های گوناگونی برای تفسیر کمی رخساره‌های نفتی گسترش یافته است که در یک تقسیم‌بندی کلی به دو دسته تعینی و احتمالاتی تقسیم می‌شوند. روش‌های تعینی برخلاف سادگی فرایند مدل‌سازی، قادر به ارائه خطا یا میزان درستی مدل به‌دست آمده نیستند. ولی با استفاده از روش‌های احتمالاتی، افزون بر کمی کردن خطای مدل و برآورد میزان احتمال درستی آن می‌توان ارزش هر یک از اطلاعات را نیز در افزایش دقت مدل بررسی کرد (Mukerji et al., 2005). روش زنجیره مارکوف که به افتخار «آندری مارکوف» (Andry Markov) ریاضی‌دان اهل روسیه نام‌گذاری شده، یک روش احتمالاتی است که در طول چند سال اخیر، کاربرد آن در علوم زمین به‌سرعت افزایش یافته است.

روش زنجیره مارکوف در زمین‌شناسی برای مدل‌سازی متغیرهای گسسته مانند سنگ‌شناسی و رخساره‌ها به کار می‌رود. بسیاری از روش‌های پیشین

۲- زمین‌شناسی میدان نفتی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در دشت خوزستان، در ناحیه فروافتادگی دزفول شمالی قرار دارد. این میدان هیچ رخنه‌مونی در سطح نداشته و از طریق اکتشافات زیرزمینی و به کمک عملیات لرزه‌نگاری در سال ۱۹۶۲ کشف شده است. با حفز اولین چاه اکتشافی در سال ۱۹۶۳ وجود هیدروکربور در هر دو مخزن آسماری و بنگستان تأیید شد. ساختار این میدان نیز مانند بسیاری از میدان‌های این ناحیه از روند زاگرس (شمال باختر - جنوب خاور)، پیروی می‌کند (EDCO Kish International Company, 2006).

این میدان دارای سه مخزن نفتی آسماری، بنگستان و خامی است؛ که مطالعه حاضر روی مخزن آسماری و پوش سنگ آن انجام شده است. ستبرای سازند آسماری در میدان مورد مطالعه میان ۴۵۰ تا ۵۱۵ متر متغیر است. از دید سنگ‌شناسی، سازند آسماری غالباً از ماسه‌سنگ و سنگ‌های کربناتی تشکیل شده است. بر پایه تغییرات سنگ‌شناسی 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) و در این مطالعه به مدل‌سازی این بخش‌های نفت‌ده پرداخته شده است.

بخش یک: این بخش بیشتر از آهک‌های دولومیتی و دولومیت‌های آهکی تشکیل شده و از میزان تخلخل خوب تا خیلی خوبی برخوردار است. میزان ستبرای خالص در این بخش گوناگون است و از مقدار کمتر از یک متر تا ۲۱ متر متغیر است. مقدار ستبرای خالص در بخش‌های مرکزی طاق‌دیس، نسبت به یال‌های آن بیشتر است (EDCO Kish International Company, 2006).

بخش دو: این بخش بیشتر از ماسه‌سنگ‌های تحکیم یافته همراه با مقادیر کمی شیل و آهک تشکیل شده و از گسترش تخلخل متوسط، خوب و خیلی خوب برخوردار و هیدروکربن‌دار است (EDCO Kish International Company, 2006).

بخش سه: این بخش بیشتر 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 افزون بر سه بخش مخزنی، به مدل‌سازی بخش پوش سنگ انیدریتی سازند آسماری نیز پرداخته شده است.

۳- تئوری زنجیره مارکوف

یک فرایند تصادفی مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که با $\{X(n), n \in \mathbb{N}\}$ نمایش داده می‌شود و در آن مقادیر ممکن $X(n)$ حالت (State) فرایند نامیده می‌شوند. در عمل، مجموعه اندیس N معمولاً به زمان اشاره دارد، و مقادیر $X(n)$ اندازه‌ها یا مشاهداتی روی یک سیستم در زمان n را نشان می‌دهد. 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 پیش از آن وابسته نیست (Higgins & Keller-McNulty, 1995).

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 پیش از خودش وابسته است، اشاره دارد. شکل ۱ بیانگر ویژگی مارکوف است، همان‌گونه که نشان داده شده است هر سلول تنها به سلول پیش از خود وابسته است و مستقل از رخداد دیگر سلول‌ها است (Papoulis, 2002).

زنجیره مارکوف به‌عنوان یک روش حافظه‌دار در نظر گرفته می‌شود. از این رو به‌طول حافظه‌ای که مقادیر احتمال ممکن برای حالت بعدی به کمک آن محاسبه می‌شود، به‌عنوان مرتبه (Order) نام برده شده است. در این پژوهش، در مدل‌سازی رخساره‌ها از مرتبه یک مارکوف استفاده می‌شود. بنابراین احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای بر پایه احتمالات شرطی به‌صورت زیر 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. احتمال تغییر حالت یک مرحله‌ای، در نظریه و کاربرد زنجیره مارکوف نقش کلیدی دارد. استفاده از ماتریس تغییر حالت یک مرحله‌ای ابزاری کارآمد برای 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 (Papoulis, 2002).

در جدول ۱، درایه سطر سوم و ستون دوم بیانگر این است که احتمال انتقال از حالت سه به حالت بعدی اگر ۲ باشد برابر با ۰/۳۶ است. بدیهی است که جمع درایه‌های یک سطر برابر یک است.

در شکل ۲، یک توالی از رخدادها وجود دارد که ویژگی مارکوف را دارا هستند. سلول x در حالت S_k ، سلول $x-1$ در حالت S_1 و سلول N در حالت S_q قرار دارد؛ رخداد S_k نیز مشروط به رخداد S_1 و S_q است (Z_i بیانگر حالت سلول $x=1, \dots, N$ است). احتمال انتقال حالت (pr) از حالت i به حالت j به‌صورت رابطه زیر ارائه می‌شود (Li & Zhang, 2008):

$$pr(Z_x = S_k | Z_{(x-1)} = S_1, Z_N = S_q) \quad (3)$$

رابطه ۳ را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$pr(Z_x = S_k | Z_{(x-1)} = S_1, Z_N = S_q) = \frac{pr(Z_{(x-1)} = S_1, Z_x = S_k, Z_N = S_q)}{pr(Z_{(x-1)} = S_1, Z_N = S_q)} \quad (4)$$

با توجه به ویژگی مارکوف می‌توان احتمالات شرطی در معادله (۴) را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$p(Z_x = S_k | Z_{(x-1)} = S_1, Z_N = S_q) = \frac{p_{kq}^{N-x} p_{1k}}{p_{1q}^{(N-x+1)}} \quad (5)$$

که در آن، $p_{kq}^{(N-x)}$ احتمال انتقال از حالت k به حالت q ، به فاصله $(N-x)$ سلول و همچنین $p_{1q}^{(N-x+1)}$ احتمال انتقال از حالت 1 به حالت q به‌فاصله $(N-x+1)$ سلول است (Li & Zhang, 2008).

با مفروض بودن یک مقدار آغازی به‌عنوان فضای دیده شده و یک ماتریس تغییر حالت یک مرحله‌ای، مسیرهای حرکت زنجیره مارکوف را می‌توان شبیه‌سازی کرد.

۴- مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از زنجیره مارکوف

می‌دانیم، حضور ویژگی مارکوف در یک توالی از رخساره‌ها مبین وابستگی میان رخساره‌هاست. از سوی دیگر طبق قانون والتر (۱۸۹۳ تا ۱۸۹۴) محیط‌های رسوبی که در آنها رخساره‌های متفاوت گسترش پیدا می‌کنند، دارای ارتباط طبیعی (ارتباط در شرایط محیطی) هستند. بر این اساس مجموعه واحدهای رسوبی که مجاور یکدیگر تشکیل می‌شوند، دارای یک وابستگی طبیعی در شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند. به عبارت دیگر تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی

دو بعدی از اطلاعات ۹ چاه با فاصله‌های معلوم و ۴ افق اطلاعات لرزه‌ای با فاصله ۳۰ متر (شکل ۴) به‌عنوان فضای دیده شده، استفاده شده است. بنابراین مقدار داده دیده شده در این مدل‌سازی، ۵ درصد است.

در این تقسیم‌بندی همه سلول‌ها میان اطلاعات دیده شده از دو چاه و دو افق لرزه‌ای قرار می‌گیرند. به‌منظور برآورد حالت هر سلول، با توجه به شماره سطر و ستون آن، از ماتریس احتمال عمودی چاه سوی چپ و ماتریس احتمال افقی لرزه‌ای که در سطر بالایی قرار گرفته، استفاده می‌شود. چاه سمت راست هر سلول در شبیه‌سازی شرطی به‌کار گرفته می‌شود.

گام پنجم: 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 هم 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 زیر معرفی می‌شود:

$$p_{ik}^h = \Pr(X_{x+i} = S_k | X_x = S_i) \quad (7)$$

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 به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن بیانگر احتمال انتقال حالت از سلول Y_j به سلول Y_{j+1} است. به منظور تعیین حالت هر سلول در دو بعد (z_{ij}) (از هر دو زنجیره X_i و Y_j استفاده می‌شود. از این رو با بسط رابطه (۵) در دو بعد خواهیم داشت:

$$\Pr(Z_{i,j} = S_k | Z_{i-1,j} = S_1, Z_{i,j-1} = S_m, Z_{i,N_x,j} = S_q) \quad (9)$$

$$= \frac{(p_{ik}^h \cdot p_{kq}^{h(N_x-j)} \cdot p_{mk}^v)}{\sum_f p_{if}^h \cdot p_{kq}^{h(N_x-j)} \cdot p_{mf}^v} \quad k=1, \dots, n$$

در این رابطه، هر سلول ناشناخته Z_{ij} توسط حالت‌های معلوم سلول‌های $(i-1, j)$ و $(i, j-1)$ و (i, N_x) با توزیع شرطی $\Pr(Z_{(i,j)} = S_k | Z_{(i-1,j)} = S_m, Z_{(i,j-1)} = S_1, Z_{(i,N_x)} = S_q)$ مورد برآورد قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۳، سلول $(i-1, j)$ دارای حالت S_m در همسایگی قائم، سلول $(i, j-1)$ دارای حالت S_1 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 همه حالات رخداد رخساره‌ها است، برای نرمال نمودن \Pr استفاده می‌شود. همان‌گونه که در رابطه (۹) دیده می‌شود از چاه دوم برای شرطی کردن شبیه‌سازی استفاده شده تا این شبیه‌سازی دقت بالاتری را به همراه داشته باشد.

در پایان نتایج مدل‌سازی رخساره‌ها در مقطع مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است. در این شکل بخش الف بیانگر حالت واقعی تغییرات رخساره‌ها در مقطع مورد نظر است. در بخش‌های بعدی در سمت چپ موقعیت قرار گرفتن چاه‌ها و در سمت راست مدل‌سازی انجام شده، نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش تعداد چاه‌ها، مدل ارائه شده به ساختار واقعی نزدیک‌تر می‌شود. در پایان با به‌کارگیری نه چاه، مدل‌سازی با روش مارکوف با دقت ۸۸ درصد انجام شده است (شکل ۵-ج، سمت راست).

بدیهی است که با افزایش اطلاعات افقی‌های لرزه‌ای می‌توان به دقت بالاتری در مدل‌سازی رسید؛ که در شکل ۶ نمایش داده شده است. در این شکل دقت مدل‌سازی بر مبنای تعداد سلول‌هایی که میان دو افق اطلاعات لرزه‌ای قرار می‌گیرد، برای تعداد ثابت نه چاه، ارائه شده است. در این مطالعه فاصله میان افق‌های اطلاعات لرزه‌ای ۳۰

و بیولوژیکی آنها به پیروی از شرایط محیط تشکیل‌شان به‌صورت پیوسته و تدریجی است. از این رو با توجه به این قانون می‌توان بیان کرد که تشکیل توالی‌های رسوبی به‌صورت تصادفی و مستقل از هم نبوده و وابستگی معناداری میان رخساره‌ها وجود دارد (امینی، ۱۳۸۸).

۴-۱. الگوریتم مدل‌سازی با روش مارکوف

مدل‌سازی رخساره‌ها با استفاده از زنجیره مارکوف به چهار گام آتی تقسیم می‌شود: **گام اول:** تعیین فضای حالت بر مبنای متغیر مورد بررسی است. در این مطالعه متغیر مورد بررسی رخساره‌های سنگی است. از این رو فضای حالت برابر با شمار رخساره‌های موجود در توالی رسوبی است. با توجه به این که هدف، مدل‌سازی پوش سنگ (انیدریت)، بخش یک (کربناتی)، دو (ماسه‌سنگ)، سه (ماسه‌سنگ شیلی) مخزن میدان مورد مطالعه است؛ در نتیجه فضای حالت دارای چهار عضو خواهد بود (جدول ۲).

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. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، دو چاه در راستای قائم و اطلاعات لرزه‌ای در راستای افقی (رنگ خاکستری) به‌عنوان فضای دیده شده، در نظر گرفته می‌شود. در این شکل چاه سمت چپ در بازه $(i, 1)$ و N_y و $2=i$ ، چاه سمت راست در بازه (i, N_x) ، N_y و $2=i$ و داده‌های لرزه‌ای در بازه $(1, j)$ و N_x و $1=j$ ، قرار گرفته و فضای میان دو چاه به سلول‌هایی تقسیم‌بندی شده است. ابعاد سلول‌ها با توجه به قدرت جدایش (Resolution) داده‌های چاه و لرزه‌ای مشخص می‌شوند. طول مقطع مورد بررسی ۱۲ کیلومتر بود، که با توجه به قدرت جدایش داده‌های لرزه‌ای (به‌ازای هر ۲۰ متر، رخساره‌ها از روی داده‌های لرزه‌ای مشخص شده‌اند)، این مقطع به ۶۰۰ سلول ۲۰ متری در راستای افقی تقسیم شده است. هم‌چنین ستبرای این مقطع ۱۱۰ متر بود، که با توجه قدرت جدایش داده‌های چاه (به‌ازای هر ۱ متر، رخساره‌ها از روی داده‌های چاه مشخص شده‌اند) به ۱۱۰ سلول یک متری در راستای قائم تقسیم شده است. به‌ازای هر سلول یک شماره سطر i ، یک شماره ستون j و یک حالت از رخساره S وجود دارد.

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 از i به j (می‌تواند $i=j$ باشد) شمارش شده و سپس برای به‌دست آوردن احتمال انتقال هر حالت به خودش و حالت‌های دیگر، تعداد شمارش‌ها تقسیم بر کل شمارش‌های هر سطر می‌شود. احتمال انتقال درایه (P_{ij}) منعکس‌کننده احتمال گذر از حالت i به حالت j است؛ که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

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 ۳ که ماتریس انتقال و ماتریس احتمال انتقال در هر دو راستای قائم و افقی در منطقه مورد مطالعه است؛ در راستای افقی، ۳۵۰ شمارش رخساره انیدریت وجود دارد؛ که سهم انتقال به رخساره ماسه تنها ۲ شمارش است. بنابراین احتمال انتقال آن $\frac{2}{350} = 0.0057$ می‌شود.

گام چهارم: در این مرحله فضای داده‌های دیده شده، مشخص می‌شود. فضای مورد مطالعه در این پژوهش یک مقطع زمین‌شناسی به طول ۱۲ کیلومتر (۶۰۰ سلول به طول ۲۰ متر) و ستبرای ۱۱۰ متر (۱۱۰ سلول به طول ۱ متر) است. برای مدل‌سازی این مقطع

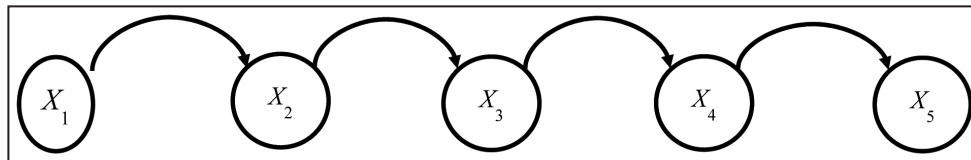
و این مقدار از اطلاعات دقت قابل قبولی ارائه می‌دهند. در مطالعه حاضر در مقطع مورد مدلسازی تنها از ۵ درصد اطلاعات فضای مورد تخمین به عنوان اطلاعات ورودی استفاده شده است.

نتایج نشان داد که اطلاعات حاصل از چاه‌ها در ارائه مدلهایی با هندسه مشابه مقطع واقعی نسبت به اطلاعات لرزه‌ای تأثیر بیشتری دارد. بهترین نتیجه مدلسازی و جدایش چهار رخساره انیدریت، آهک، ماسه و ماسه شیلی با کمک روش زنجیره مارکوف و استفاده از اطلاعات نه چاه و چهار افق لرزه‌ای به دست آمد که دقتی برابر، ۸۸ درصد دارد. البته می‌توان پیش‌بینی کرد که با اعمال تغییراتی در فرایند مدلسازی مارکوف، بتوان دقت مدلسازی را به بیش از ۸۸ درصد نیز افزایش داد. برای مثال می‌توان گفت شرطی کردن مدلسازی به دو مرز (چاه سمت راست و افق لرزه‌ای تحتانی سلول) در بهبود دقت مدل، مؤثر خواهد بود.

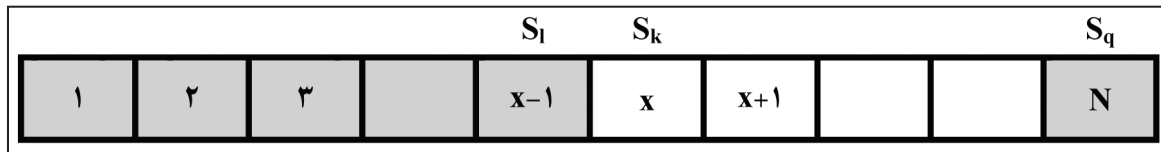
سلول بوده که بر این اساس دقت مدلسازی، ۸۸ درصد است. به‌منظور مقایسه نتایج، شکل ۷ نمودار احتمال موفقیت دسته‌بندی هر رخساره، جدول ۴ ماتریس درهم ریختگی و جدول ۵ میزان خطای همراه با هر دسته و خطای کلی دسته‌بندی رخساره‌ها را نشان می‌دهند.

۵- نتیجه‌گیری

روش زنجیره مارکوف یکی از ابزارهای توانمند برای مدلسازی رخساره‌های سنگی است که تاکنون در بیشتر مطالعات صورت گرفته در این زمینه در ارتباط با رخساره‌های کم ژرفا همراه با رخنمون به کار گرفته شده است. در این مطالعه به تشریح روند مدلسازی رخساره‌های ژرف با استفاده از اطلاعات چاه نمودارها و داده‌های لرزه‌ای پرداخته شده است. همان‌گونه که نشان داده شد مدلسازی رخساره‌ها با استفاده از روش زنجیره مارکوف به اطلاعات دیده شده کمی نیاز داشته



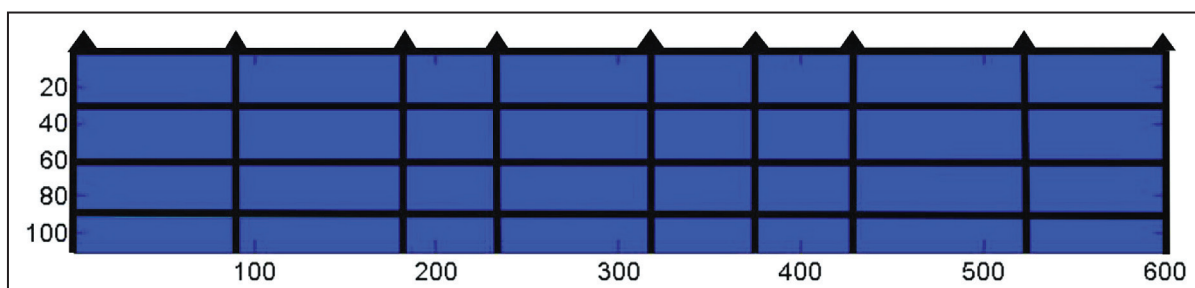
شکل ۱- طرح شماتیکی از ویژگی مارکوف.



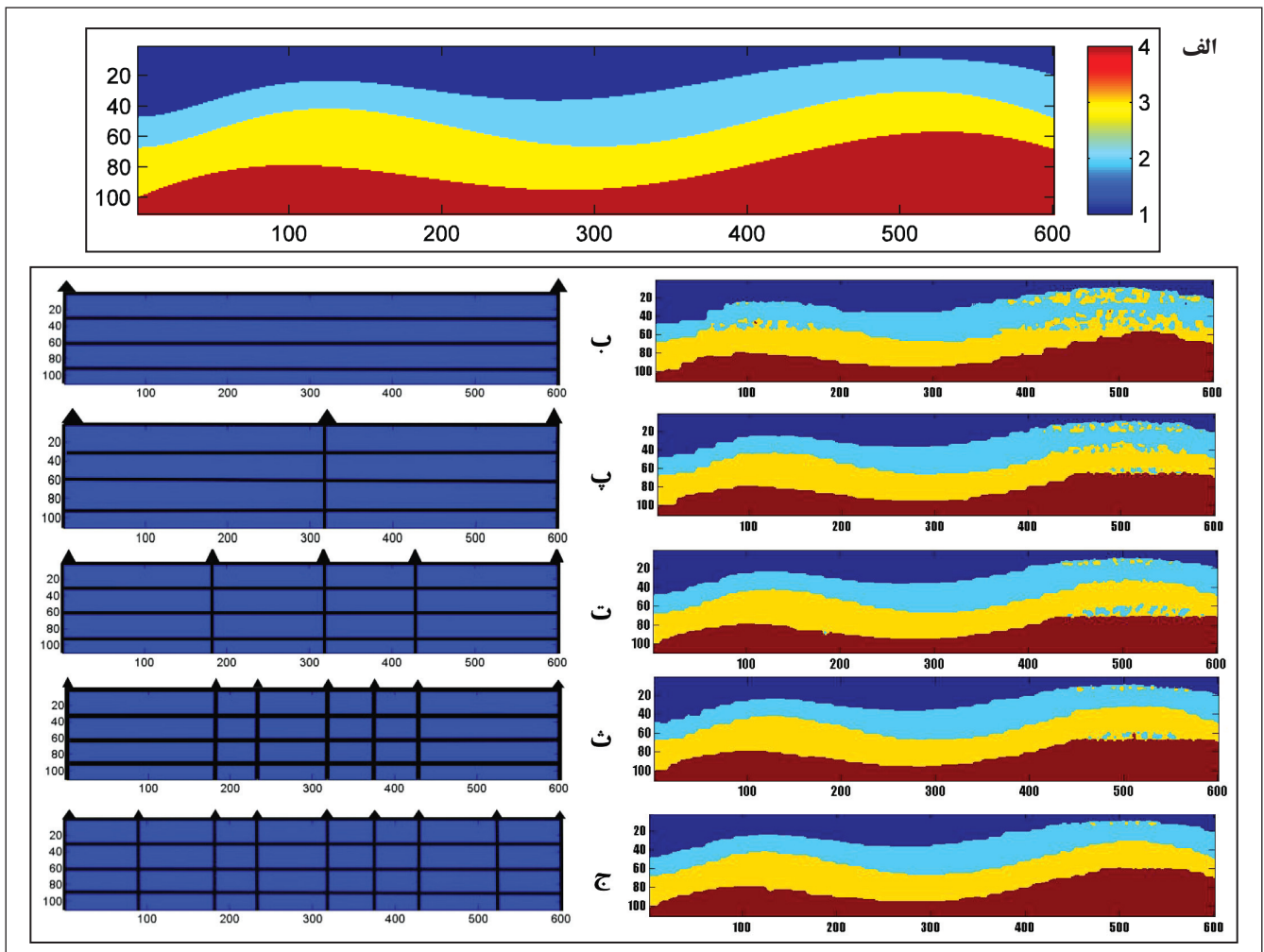
شکل ۲- یک توالی از رخدادهای برای زنجیره مارکوف یک بعدی. سلول‌های خاکستری دارای مقدار و سلول‌های سفید مورد تخمین با روش مارکوف هستند (Li & Zhang, 2008).

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

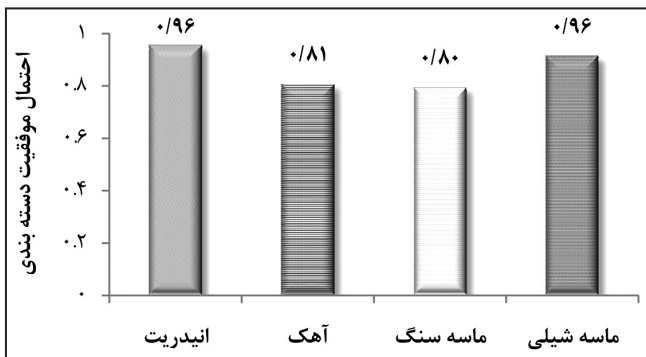
شکل ۳- شبکه‌بندی فضای میان اطلاعات دوچاه (راستای عمودی) و لرزه (راستای افقی) با توجه به قدرت جدایش چاه و داده‌های لرزه‌ای. سلول‌های خاکستری تیره نقاط دیده شده، سلول‌های خاکستری روشن سلول‌های تخمین زده شده و سلول‌های سفید مجهول هستند.



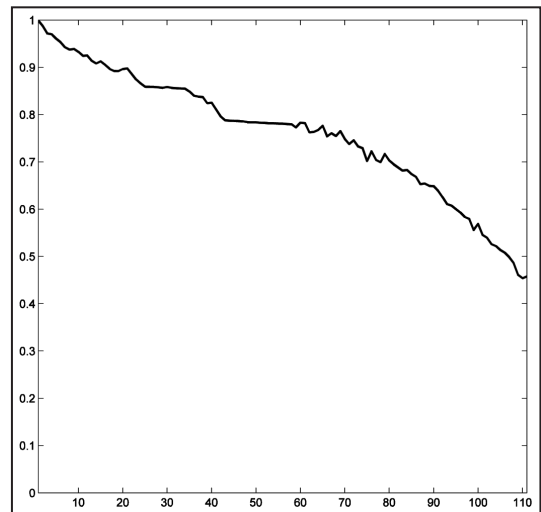
شکل ۴- نحوه قرار گرفتن چاه‌ها و افق‌های لرزه‌ای در مقطع مورد بررسی. نه چاه با فاصله‌های مشخص در راستای قائم و چهار افق لرزه‌ای با فاصله ۳۰ متر در راستای افقی.



شکل ۵- الف) شکل واقعی تغییرات رخصاره‌ها در مقطع مورد مطالعه. 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 (ب) با دو چاه، (پ) با سه چاه، (ت) با پنج چاه، (ث) با هفت چاه و (ج) با همه چاه‌ها (نه چاه). شکل ج بهترین نتیجه با دقت ۸۸ درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودار احتمال موفقیت دسته‌بندی هر رخصاره



شکل ۶- نمودار دقت بر پایه تعداد سلول‌های بین افق‌های اطلاعات لرزه‌ای

جدول ۱- ماتریس احتمال انتقال میان سه حالت (Papoulis, 2002).

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

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

طول مقطع قائم ۱۱۰ متر فاصله نمونه برداری در راستای قائم یک متر					طول مقطع افقی ۱۲ کیلومتر 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	۳۴۰	۵	۲	۳	۱	۴۹	۸	۲	۶
۲	۲	۱۳۷	۸	۳	۲	۱	۱۰	۳	۱
۳	۲	۳	۴۹	۶	۳	۱	۱	۱۵	۲
۴	۱	۱	۳	۳۵	۴	۲	۱	۲	۶
ماتریس احتمال انتقال در راستای قائم					ماتریس احتمال انتقال در راستای افقی				
حالت	۱	۲	۳	۴	حالت	۱	۲	۳	۴
۱	۰/۹۷۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۱	۰/۷۵۴	۰/۱۲۳	۰/۰۳۱	۰/۰۹۲
۲	۰/۰۱۳	۰/۹۱۳	۰/۰۵۴	۰/۰۲۰	۲	۰/۰۴۰	۰/۹۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰
۳	۰/۰۳۳	۰/۰۵۰	۰/۸۱۷	۰/۱۰۰	۳	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۷۸۹	۰/۱۰۵
۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰/۸۷۵	۴	۰/۱۸۲	۰/۰۹۱	۰/۱۸۲	۰/۵۴۵

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

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

جدول ۵- احتمال خطای هر دسته و متوسط احتمال خطا با نه چاه.

انیدریت	آهک	ماسه سنگ	ماسه شیلی
۰/۰۴۳	۰/۱۹۲	۰/۲۰۵	۰/۰۴۴
متوسط احتمال خطا			
۰/۱۲۱			
انیدریت	آهک	ماسه سنگ	ماسه شیلی
۰/۰۴۳	۰/۱۹۲	۰/۲۰۵	۰/۰۴۴
متوسط احتمال خطا			
۰/۱۲۱			

جدول ۴- ماتریس درهم ریختگی دسته‌بندی برای چهار رخساره با نه چاه.

تخمینی				واقعی
انیدریت	آهک	ماسه سنگ	ماسه شیلی	
۰/۹۵۷	۰/۰۳۱	۰/۰۱۲	۰	انیدریت
۰/۰۷۸	۰/۸۰۸	۰/۱۱۴	۰	آهک
۰	۰/۱۶۸	۰/۷۹۵	۰/۰۳۷	ماسه سنگ
۰	۰	۰/۰۴۴	۰/۹۵۶	ماسه شیلی

کتابنگاری

امینی، ع.ح.، ۱۳۸۸- مبانی چین‌نگاری سکانسی، انتشارات دانشگاه تهران.

References

- Anderson, T. W. & Goodman, L. A., 1957- Statistical inference about Markov chains, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 28 (1): 89-110.
- Avseth, P., Mukerji, T. & Mavko, G., 2005- Quantitative seismic Interpretation, Cambridge university press.
- Billingsley, P., 1961- Statistical methods in Markov chains, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 32 (1): 12-40.
- Dacey, M. F. & Krumbein, W. C., 1969- Markov chains and embedded Markov chains in geology, *Math. Geol.* 79-96, 1 ...
- EDCO Kish International Company, 2006- Geological 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. & Keller-McNulty, S., 1995- Concepts in Probability and Stochastic Modeling, *Duxbury Press; first edition*. [9]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.
- 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.

Modeling with Markov Chains Methodology, Case Study: Lithofacies in a Hydrocarbon Reservoir, SW Iran

H. Nikoogoftar ^{1*}, A. Bahroodi ², B. Tokhmchi ³, H. Norouzi⁴ & B. Mehrgini ⁵

¹ M.Sc. Student, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Tech, Shahrood, Iran

⁴ Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

⁵ Ph.D. Student, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2012 July 07

Accepted: 2013 January 07

Abstract

Identifying and interpreting subsurface heterogeneities, especially Lithofacies, plays definitely an important role in assessing and managing hydrocarbon resources. Variety of methods have been developed in order to model discrete features of hydrocarbon reservoirs, as Lithofacies, which the majority of them have focused on intra-well modeling, and are not applicable for 2D or 3D modeling between oil wells. Furthermore, developing a novel methodology to bring a more factual reservoir facies has always been a matter of attraction, and is effective in lowering risk of decision making in different exploratory stages. These days, Markov Chains is used as a powerful tool for facies modeling. This method is based on conditional probabilistic and providing transitional matrix of states. This study is carried out on an oil field, South-West Iran; where the Asmari Formation is its main reservoir. Here, interval of the Asmari Formation and its cap rock in a 12 kilometers long section, 110 meters width, is classified into three main parts, by the means of Markov Chains modeling. The best result of modeling was obtained with nine wells and four seismic horizons that brought 87% accuracy in average.

Keywords: Markov Chains, Lithofacies, Transitional Matrix of States, Hydrocarbon Reservoirs.

For Persian Version see pages 97 to 102

*Corresponding author: H. Nikoogoftar: E-mail: hanienikoo@yahoo.com