

مدل سازی سه بعدی پهنه‌های هرزروی گل حفاری با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی گستافسون-کسل تعمیم یافته (مطالعه موردی: یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران)

کیومرث طاهری^{۱*} و امین حسین مرشدی^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

۲- معاونت زمین شناسی گسترشی، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲۴

چکیده

عوامل بسیاری در هرزروی سیال حفاری موثر هستند که مدل‌سازی همه آنها کار دشواری است. در این پژوهش، الگوریتم پهنه‌بندی فازی با توجه به شرایط هرزروی گل حفاری و با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی گوستافسون-کسل بهبود یافته ارائه شده است، که قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف را داراست. برای ارزیابی الگوریتم، از لایه‌های اطلاعاتی مختلف از جمله هرزروی سیال حفاری، وزن گل حفاری و پهنه‌بندی زمین‌شناسی (به همراه موقعیت فضایی ویژگی‌های مورد بررسی) استفاده و چهار ترکیب از لایه‌های اطلاعاتی مختلف در نظر گرفته شد. به منظور تعیین تعداد بهینه پهنه‌ها، شاخص‌های مختلف اعتبارسنجی خوشه‌بندی شامل ضریب افراز (PC)، آنتروپی افراز (CE)، شاخص افراز (SC) و شاخص ژی و بنی (XB) به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت. بهترین ترکیب اطلاعاتی، تلفیقی از هرزروی گل حفاری، پهنه‌بندی زمین‌شناسی با توجه به موقعیت نمونه‌ها مشخص شد، تعداد بهینه پهنه‌ها، برابر ۱۲ پهنه و مقدار توان فازی بهینه برابر ۱/۱ تعیین شد. در الگوریتم خوشه‌بندی گوستافسون-کسل بهبود یافته، پارامتر وزنی برای مقیاس سازی بین کواریانس تمام داده‌ها و داخل خوشه‌ها به کار برده شده است و مقدار بهینه آن ۰/۴ به دست آمد. در نهایت، پهنه‌بندی سه بعدی فازی در میدان مورد مطالعه انجام شد و با توجه روش تجزیه و تحلیل تمایز فیشر، پهنه‌بندی به دست آمده از روش خوشه‌بندی از عملکرد بهتری نسبت به روش پهنه‌بندی زمین‌شناسی (شاخص فیشر ۰/۰۸۸ در مقابل ۰/۰۱۱) به منظور مدل‌سازی هرزروی برخوردار است.

کلمات کلیدی: هرزروی گل حفاری، پهنه‌بندی فازی، روش خوشه‌بندی گستافسون-کسل، مخزن آسماری، ایران

مقدمه

هرزروی سیال حفاری یکی از مهمترین مشکلات در طول عملیات حفاری یک چاه به شمار می‌آید، که با رخ دادن آن، هزینه‌های بسیاری (ساختن گل جدید، اضافه کردن مواد جلوگیری کننده از هرزروی و مشکلات جانبی آن) را به پروژه تحمیل می‌کند و باعث اختلالات جدی در عملیات حفاری از قبیل گیر کردن لوله‌ها و عدم کنترل فوران چاه صدمه زدن به مخزن می‌شود. این مسئله، همواره مهندسين حفاری را به تحقیق و پژوهش در این راه و یافتن راهکاری برای مقابله با این مشکل هدایت کرده است. هرزروی گل هم به‌صورت طبیعی اتفاق می‌افتد، هم ممکن است ناشی از خطای انسانی باشد. هرزروی طبیعی در سازندهای متخلخل و تراوا یا دارای شکستگی‌های طبیعی رخ می‌دهد. در مواردی نیز ممکن است عوامل زیادی شدت هرزروی سیال حفاری را تحت تأثیر قرار دهند که از جمله آنها می‌توان به گرادیان فشار سازند، گرادیان فشار شکست سازند، خصوصیات سیال حفاری، لیتولوژی سازند در حال حفاری، وجود درزه‌ها و شکاف‌ها در سازند، پارامترهای حفاری (فشار و دبی پمپ) و پارامترهای شناخته نشده دیگری که پیش بینی مقدار هرزروی سیال، هنگام حفاری چاه در یک سازند مخزنی را بسیار مشکل می‌کنند، اشاره کرد. سازندهای سطحی دارای تخلخل و تراوایی بالا، سازندهای آهکی و گچی دارای شکاف‌های طبیعی و سازندهای دولومیتی دارای حفرات بزرگی هستند که شرایط لازم برای هرزروی سیال را دارند. همچنین، هرزروی سیال حفاری ممکن است به علل متفاوتی از جمله وجود سازند های با تراوایی بالا، فیلترشدن سیال حفاری، نفوذ سیال داخل ماتریکس سنگ و یا ایجاد و گسترش شکاف در داخل سنگ ایجاد شود، که مورد آخر از عمده ترین دلایل هرزروی کامل سیال حفاری به شمار می‌رود و بیش از ۹۰٪ هزینه‌های صرف شده برای حل مشکل هرزروی به این مورد اختصاص دارد [۱].

با بررسی هرزروی و چگونگی انتشار آن در هر نقطه از مخزن، می‌توان بر کیفیت مخزن احاطه و برنامه ریزی‌های توسعه میدانی را در بخش‌های عملیات حفاری، مهندسی مخزن و ازدیاد برداشت از مخازن را کنترل کرد [۲]. مدل‌سازی هرزروی در میدان مورد مطالعه از آنجایی اهمیت پیدا می‌کند که نه تنها کمک شایانی به جلوگیری از آسیب دیدگی مخزن می‌کند، بلکه با جلوگیری از هدر رفتن گل حفاری و کاهش زمان غیر مفید دکل، موجب کاهش هزینه حفاری می‌شود. همچنین هرزروی، باعث آسیب دیدگی مخزن می‌شود و کنترل چاه را با مشکل مواجه می‌کند [۳]. مطالعات بسیاری در زمینه هرزروی سیال حفاری تاکنون صورت گرفته که به برخی از اهم آنها در ادامه به آن اشاره شده است. در سال ۲۰۱۰، یک مدل جدید برای هرزروی سیالات حفاری غیر نیوتنی در سازندهای با شکستگی طبیعی ارائه شد. نتایج به‌دست آمده بر اساس راه حل نیمه عددی و ترسیمی از نظر حجم هرزروی در برابر زمان به دست آمده است، که رئولوژی سیال حفاری و شکل‌گیری خواص سیال می‌تواند جریان گل را تحت تأثیر قرار دهد و از حجم هرزروی بکاهد [۴]. در سال ۲۰۱۴، روش جدیدی برای پیش‌بینی و حل مشکل هرزروی سیال حفاری ارائه شد که با استفاده از سیستم شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی مجموع ذرات داده‌های هرزروی مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته شد و خروجی‌های بسیار مطلوبی در جهت کاهش میزان هرزروی به‌دست آمد [۵]. در سال ۲۰۱۵، در میدان نفتی اریدو واقع در ایالت ادو نیجریه، مطالعه‌ای بر روی چاه‌های این میدان صورت گرفت و با توجه به هرزروی‌های اتفاق افتاده در این چاه‌ها در حین حفاری و عملیات تکمیل، باعث آسیب دیدگی شدید مخزن و کاهش شاخص تولید آن شده بود که با پیشنهاد برنامه اسید زنی و شکاف هیدرولیکی، تا حد زیادی به بازگشت شاخص تولید چاه‌های آن کمک شده بود [۶].

حفاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه میدان مورد مطالعه با مشکل هرزروی‌های شدید در سازند آسماری مواجه است، لذا هدف از انجام این مطالعه شناسایی مناطق دارای هرزروی و به روز رسانی مدل پهنه‌بندی میدان با توجه به مقدار هرزروی گل است. در انجام این تحقیق ابتدا کلیاتی از روند کار، موقعیت جغرافیایی میدان و همچنین زمین‌شناسی سازند مخزنی آسماری بررسی شده است. در ادامه به پهنه‌بندی هرزروی سیالات حفاری با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی و شاخص‌های اعتبارسنجی خوشه‌بندی، که هدف اصلی تحقیق است پرداخته شده است. در پایان مدلسازی پهنه‌های هرزروی برای بخش‌های مختلف سازند آسماری توسط نرم‌افزار متلب ارائه شد و مرز بندی بین پهنه‌های هرزروی انجام شده است.

منطقه مورد مطالعه

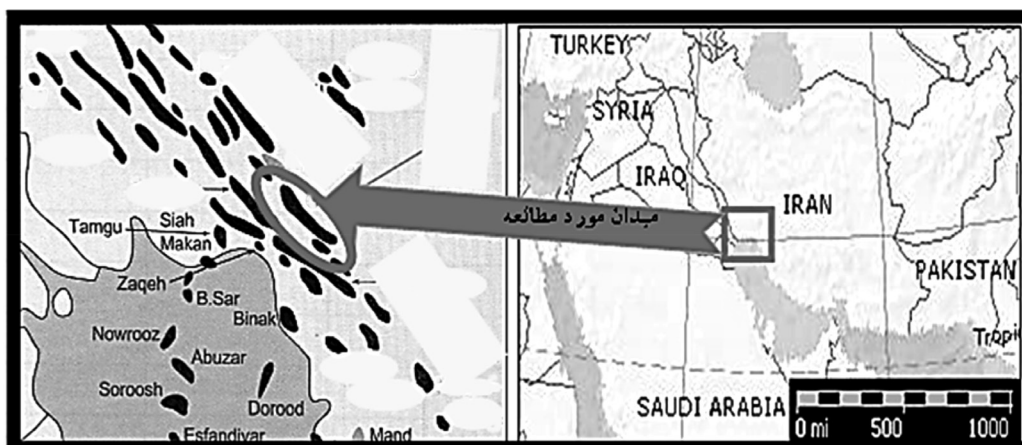
میدان مورد بررسی یکی از بزرگترین و پیچیده‌ترین میادین کربناته جنوب غرب کشور است و در ۲۰۰ km جنوب شرق شهرستان اهواز واقع شده است. ساختمان این میدان بر روی افق آسماری تاقدیسی کشیده و نامتقارن به طول ۶۳ km و عرض متغیر بین ۶ تا ۱۲ km است (شکل ۱). مقدار شیب بر روی یال جنوبی آسماری این میدان عمدتاً زیاد (بیش از ۵۰ درجه و حداکثر ۸۰ درجه در جنوب شرقی میدان) است، که نسبت به مقدار شیب در یال شمالی (متوسط ۴۰ درجه) بیشتر می‌باشد [۱۰]. ویژگی‌های ساختاری از قبیل تنوع شیب ساختمان، بروز گسلش متعدد، ایجاد و توزیع شکستگی‌ها، تأثیر بالآمدگی قدیمی در دماغه شرقی آن، میدان مورد مطالعه را به ساختمانی ویژه مبدل ساخته است که به دلایل فوق این میدان به مرور با افزایش اطلاعات جدید چاه‌های حفاری شده، بارها مورد مطالعه قرار گرفت.

در علوم زمین، کاربرد پهنه‌بندی قادر است به طور قابل توجهی موجب بهبود دقت و مدیریت عدم قطعیت مدل‌سازی شود. تغییر فضایی عمده در یک منطقه، می‌تواند موجب نقض فرض پایایی و برآورد اریب شود. در مطالعات علوم زمین، به‌طور معمول میدان مورد مطالعه به‌صورت پیوسته و یکپارچه مورد بررسی قرار می‌گیرد، این در حالی است که ممکن است عواملی مثل ناپیوستگی، گسل، تغییر سازند و توزیع هرزروی باعث تقسیم مخزن به پهنه‌های مختلف، با ویژگی‌های متفاوت شده باشد. لذا برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و بر اساس میزان انحراف از فرض پایایی، ابتدا باید منطقه مورد مطالعه را به چند پهنه تقسیم کرد. طبق تعریف، متغیر یا ویژگی مورد بررسی در یک پهنه باید با هم حداکثر شباهت و با پهنه‌های دیگر، حداکثر تفاوت را داشته باشد.

یکی از مسائل کلیدی در پهنه‌بندی، تعیین مرز بین دو پهنه است که می‌تواند به‌صورت ناگهانی، فازی یا تدریجی تعیین شود. بنابراین در مواردی که منطقه دارای ناهمسانگردی متفاوت است، تقسیم منطقه به پهنه‌های کوچکتر مختلف پیشنهاد می‌شود [۹-۷].

برای بالا بردن سطح دقت و پیش‌بینی دقیق‌تر، مخزن آسماری به تفکیک پهنه‌ها که شامل یازده پهنه زمین‌شناسی است مدل‌سازی دقیق‌تر پهنه‌ها براساس هرزروی انجام شده است. همچنین برای خروجی هرچه بهتر مدل، اطلاعات زمین‌شناسی و حفاری ۳۶۳ چاه حفر شده در این میدان به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و اطلاعات مورد نیاز استخراج گردید.

در این پژوهش سعی شده با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی گوستافسون-کسل بهبود یافته که یکی از روش‌های تشخیص الگو به حساب می‌آید، مدل‌سازی پهنه‌های هرزروی در مخزن آسماری، با توجه به داده‌های هرزروی موجود در ۳۶۳ حلقه چاه و اطلاعات مربوط به وزن گل



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مورد مطالعه در بین میداين جنوب غرب، واقع در فرو افتادگی دزفول جنوبی.

در حین حفاری توجه شده است و هرزروی‌هایی که در حالت ساکن چاه اتفاق می‌افتد ارزش فنی خاصی ندارد. در فرآیند تعیین ضخامت واقعی سازند آسماری در هر چاه یک بررسی عمقی در جدول پهنه بندی انجام شد. به دلیل اینکه در برخی از چاه‌ها تنها مخزن آسماری مورد حفاری قرار نگرفته بود و عمق نهایی برخی چاه‌ها تا مخازن بنگستان نیز ادامه داشته است. با استفاده از جدول پهنه‌بندی مخازن آسماری و بنگستان میدان مورد بررسی، سرسازند آسماری در هر چاه مشخص شد. با داشتن جدول پهنه‌بندی، مرز سازند آسماری از مخازن بنگستان در ۳۶۳ حلقه چاه تفکیک گردید و با استفاده از ضخامت‌های به‌دست آمده از مخزن آسماری در هر چاه، میزان هرزروی و وزن گل مربوط به آن تفکیک و متمایز گردید. همچنین میزان هرزروی سیال حفاری در فواصل عمقی مختلف، بر حسب بشکه بر ساعت و وزن گل حفاری مورد استفاده در هر یک از چاه‌ها بر حسب پوند بر فوت مکعب استخراج شد. برای ورود داده‌ها به نرم افزار، داده‌ها در پنج ستون، که ستون‌های اول و دوم شامل نام و مختصات شرقی و شمالی چاه یا X و Y ، ستون سوم بازه عمقی که هرزروی در آن اتفاق افتاده است، ستون چهارم میزان هرزروی بر حسب بشکه بر ساعت و ستون پنجم وزن گل حفاری می‌باشد.

سازند آسماری با قرار گرفتن اکثر مخازن نفتی جنوب غرب در آن، حجم زیادی از هیدروکربن درجا، میزان نفت تولیدی بالا و هرزروی نسبتاً شدید گل حفاری در این سازند اهمیت مطالعاتی بسیاری دارد. مخزن آسماری در میدان مورد مطالعه بر پایه تغییرات جنس سنگ‌ها، تغییرات تخلخل و با استفاده از نمودارهای چاه پیمایی به ۱۱ پهنه و زیر پهنه تقسیم شده است. این مخزن دارای ۴ پهنه اصلی A_1 ، A_2 ، B ، C و D می‌باشد، که پهنه A خود به دو بخش A_1 و A_2 و پهنه B به پنج بخش B_1 ، B_2 ، B_3 ، B_4 و B_5 و پهنه C به دو بخش C_1 و C_2 و پهنه D به دو بخش D_1 و D_2 تقسیم می‌شود.

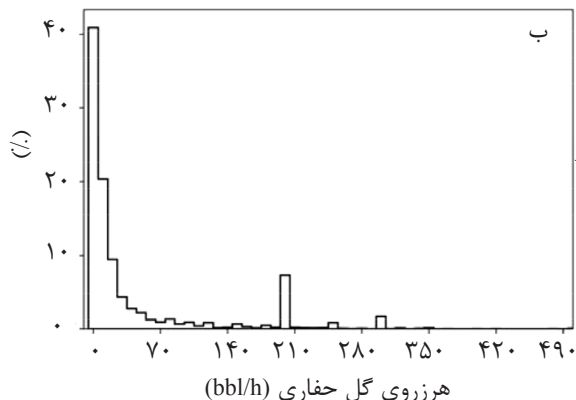
مجموعه داده‌ها و ساخت پایگاه داده

برای تخمین هرزروی و ویژگی‌های مورد نظر که نیاز بوده در مدلسازی الگوریتم خوشه بندی فازی اعمال شود، از قبیل نام چاه‌ها، مختصات چاه‌ها، عمق هرزروی، میزان هرزروی سیال حفاری بر حسب بشکه بر ساعت و وزن گل، به صورت مجموعه داده بیان شده است. در این مرحله از گزارشات نهایی حفاری و زمین‌شناسی، اطلاعات مهندسی مخازن، اطلاعات CDR (نمودار انحراف مسیر چاه) مربوط به حفاری و انحراف چاه‌ها و آزمایش چاه مورد استفاده قرار گرفته است. در فرآیند استخراج داده‌های میزان هرزروی و وزن گل، فقط به هرزروی‌های

فازای شبیه پهنه‌بندی تدریجی است، با این تفاوت که گسترش ناحیه گذار محدود بوده و خارج از این ناحیه، شرایط یک پهنه‌بندی ناگهانی برقرار است [۱۲ و ۱۳].

کاربرد الگوریتم خوشه‌بندی به منظور پهنه‌بندی

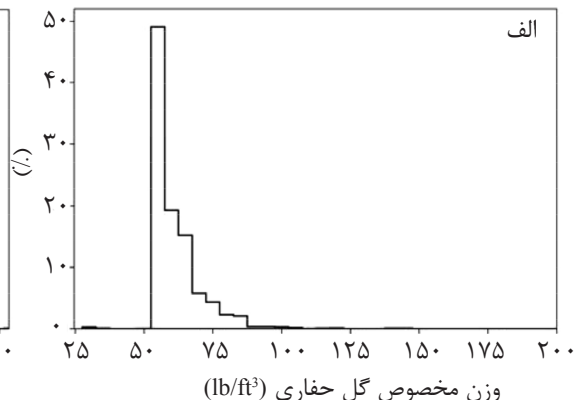
تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، هنر یافتن گروه‌های مناسب در مجموعه داده‌ها است [۱۴]. مسائل مربوط به تجزیه تحلیل خوشه‌ای در بسیاری از رشته‌ها از جمله زیست‌شناسی، پزشکی، روانشناسی، جغرافیا، بازاریابی، پردازش تصویر، باستان‌شناسی و غیره به کار می‌رود. در حقیقت، هیچ تعریف واحدی برای خوشه و خوشه‌بندی، که واجد همه شرایط باشد وجود ندارد. این تصویر ممکن است موجب ایجاد مفاهیم دقیق همگن‌سازی و جدایش ریاضیاتی به صورت شاخص‌های عددی باشد که منجر به ایجاد معیارهای متعدد و متنوع شده است. به طور واضح نمی‌توان، پراکندگی یک خوشه را وقتی بر روی یک صفحه به نمایش در می‌آید، تعیین کرد، اما یکی از ویژگی‌های معمول در فرآیند شناسایی، محاسبه فواصل نسبی بین نقاط است [۱۵]. الگوریتم‌های افرازبندی را می‌توان به دو گروه سخت و فازای تقسیم نمود. روش‌های خوشه‌بندی سخت هر نمونه تنها و فقط تنها به یک کلاس اختصاص داده می‌شود، در حالی که در روش‌های خوشه‌بندی فازای، یک نمونه به چند خوشه با درجه عضویت‌های مختلف اختصاص داده می‌شود [۱۶ و ۱۷].



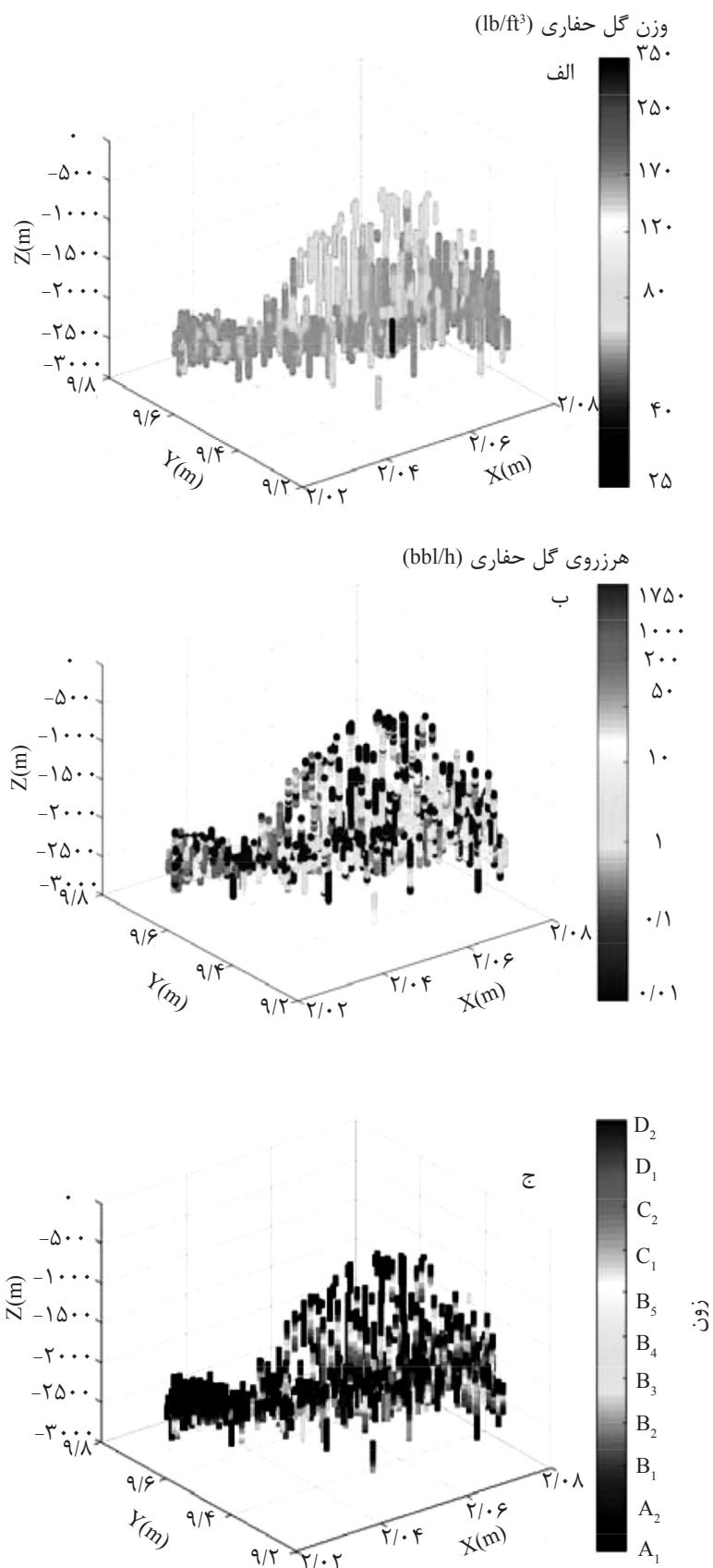
اولین قدم در بررسی‌های عددی، مطالعات آماری پایه و استخراج خصوصیات آماری مربوط به داده‌ها است. در این مطالعه، خصوصیات آماری هرزروی و وزن گل حفاری محاسبه شده که یکی از ابزارهای گرافیکی آماری و نمایش توزیع احتمالاتی، هیستوگرام است. در شکل ۲، هیستوگرام پارامترهای هرزروی و وزن گل از توزیع غیر نرمال تبعیت می‌کند و دارای چولگی مثبت است. در شکل ۳ نمودارهای مربوط به هرزروی و وزن گل در ۳۶۳ حلقه چاه حفاری شده را نشان می‌دهد، که در قسمت الف وزن گل استفاده شده در طول حفاری تمامی چاه‌ها نمایش داده شده است. در قسمت ب، میزان حجم هرزروی‌ها در بازه‌های عمقی حفاری شده در هر چاه را در جهت محور z را نشان می‌دهد. در قسمت ج، پهنه‌بندی هرزروی در ۱۱ پهنه نسبت به بازه‌های عمقی (در جهت محور z) به دست آمده است.

کاربرد پهنه‌بندی در علوم زمین

در فرآیند پهنه‌بندی، تعداد پهنه‌ها و محدوده هر پهنه مورد توجه است. بیشترین عدم قطعیت در این فرآیند مربوط به تعیین موقعیت مرزها است. در حالت مرز فازای، مناطق بصورت تدریجی در یک فاصله محدود مرزی به هم رسیده و در بقیه قسمت‌ها از هم جدا می‌شوند [۷]. در بعضی از محیط‌ها، یک پهنه با پهنه دیگر مرتبط است و داده‌های یک پهنه با درجه عضویت مشخص برای تخمین متغیر فضایی در پهنه دیگر به کار می‌رود. ارتباط مرزهای



شکل ۲ نمودار فراوانی بخش اصلی متغیرهای مورد مطالعه: الف- وزن گل حفاری، ب- هرزروی سیال حفاری.



شکل ۳ نمایش سه بعدی متغیرهای مورد بررسی در فواصل مختلف چاه: الف- وزن گل حفاری، ب- هرزروی سیال حفاری، ج- پهنه‌بندی زمین‌شناسی.

$$F_i^{(t)} = \frac{\sum_{k=1}^N (u_{ik}^{(t)})^m (x_k - v_i)^T (x_k - v_i)}{\sum_{k=1}^N (u_{ik}^{(t)})^m} \quad (2)$$

ماتریس همانی مقیاس شده جدید محاسبه می‌شود

که n تعداد ویژگی ماتریس ورودی است [۲۰].

$$F_i^{new} = (1 - \gamma)F_i + \gamma \det(F_0)^{1/n} I \quad (3)$$

که $\gamma \in [0, 1]$ پارامتر وزنی برای مقیاس‌سازی (میزان سازی) و F_0 ماتریس کوواریانس مجموعه همه داده‌ها است. بسته به مقدار γ ، شکل خوشه‌ها نسبت به هم شبیه یا متفاوت‌تر می‌باشد. در صورتی که γ برابر با یک باشد، تمام ماتریس‌های کوواریانس برابر و دارای اندازه یکسان است و در الگوریتم عادی گوستافسون - کسل، مقدار γ برابر صفر است. مقادیر ویژه λ_{ij} و بردار ویژه ϕ_{ij} از ماتریس F_i استخراج شده و با جاگذاری $\lambda_{ij} = \max_j \lambda_{ij}$ را خواهیم داشت:

$$\lambda_{i \max} / \lambda_{ij} > \beta \Rightarrow \lambda_{ij} = \lambda_{i \max} / \beta \quad \forall j \quad (4)$$

F_i به صورت زیر بازسازی می‌شود:

$$F_i = [\phi_{i1} \dots \phi_{im}] \text{diag}(\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{im}) [\phi_{i1} \dots \phi_{im}]^{-1} \quad (5)$$

فواصل در الگوریتم گوستافسون - کسل با استفاده از

ماتریس القایی A به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{ik}^2 = (x_k - v_i)^T A (x_k - v_i) \quad (6)$$

$$A = \rho_i \det(F_i)^{1/n} F_i^{-1}$$

مراحل دیگر الگوریتم شامل از محاسبه مراکز خوشه‌ها، به‌روزرسانی ماتریس درجه عضویت‌های فازی و در نهایت معیار توقف، همانند الگوریتم خوشه بندی معمول از جمله FCM است. گوستافسون کسل برای تعیین محدوده پهنه‌ها و نوع ارتباط بین پهنه‌ای به کار گرفته شده است.

به‌منظور کمیته‌سازی معیار J_m ، الگوریتم کمیته‌سازی تکرار شونده تعریف می‌شود و پس از انتخاب تعداد خوشه‌ها، توان وزن دهی فازی مناسب تعیین شده و بر روی مقادیر تابع عضویت اعمال می‌شود. در ادامه، به‌طور تصادفی ماتریس ضرائب فازی تصادفی U_0 در زمان تکرار $t=0$ تولید می‌شود.

در این پژوهش، از الگوریتم خوشه‌بندی گوستافسون - کسل^۱ تعمیم یافته، به منظور پهنه‌بندی استفاده شده است.

الگوریتم خوشه‌بندی گوستافسون - کسل

الگوریتم گوستافسون - کسل (GK) تعمیم داده محلی فواصل با شکل هندسی خوشه با استفاده از برآورد ماتریس کوواریانس خوشه‌ای و انطباق متقابل فاصله - ماتریس القایی صورت می‌گیرد و معایب روش فازی C میانگین را پوشش داده است. این روش خوشه‌بندی قدرتمند دارای کاربرد گسترده در زمینه‌های مختلف شناخت الگو است. با این حال، مشکلات عددی اغلب در روش استاندارد خوشه‌بندی GK زمانی رخ می‌دهد که تعداد نمونه‌ها (در برخی از خوشه‌ها) کم باشد و یا هنگامی که داده‌های موجود در خوشه‌ها (تقریباً) دارای رابطه خطی باشند. در چنین حالتی، ماتریس کوواریانس خوشه‌ای تکین شده و نمی‌توان برای محاسبه ماتریس القایی از معکوس آن استفاده نمود. الگوریتم اصلاح شده گوستافسون - کسل یک روش برای رفع مشکل تکین شدن با به‌کارگیری نسبت بین مقادیر ویژه بیشینه و کمینه ماتریس کوواریانس است. در الگوریتم GK، از معیار فاصله ماهالانوبیس^۲ با در نظر گرفتن ماتریس کوواریانس خوشه‌ای و حجم خوشه‌ها (ρ_i) استفاده می‌شود [۲۰-۱۸]. هدف از اجرای الگوریتم، یافتن یک افراز بهینه فازی و پیش نمونه‌های متناظر برای کمیته‌سازی تابع هدف J_m است.

$$J_m(U, V; X) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m D_{ik}^2 \quad (1)$$

که D_{ik} بیانگر فاصله بین نقاط داده‌های ورودی، u_{ik} بیانگر درجه عضویت k_x در کلاستر i ($i=1, \dots, c$)، $V = (v_1, \dots, v_c)$ ، m توان وزندهی فازی در دامنه $[1, \infty)$ انتخاب شده و بر روی مقادیر تابع عضویت اعمال می‌شود. ماتریس‌های کوواریانس F و مراکز خوشه V در هر تکرار t محاسبه می‌شود:

1. Gustafson - Kessel Clustering Algorithm

2. Mahalanobis Distance

تعیین تعداد خوشه‌ها در حالت فازی، از معیارهایی چون ضریب افراز (PC)، آنتروپی افراز (CE)، شاخص افراز (SC) و شاخص ژی و بنی (XB) استفاده شده که در ادامه هریک از شاخص‌ها توضیح داده شده است.

- **ضریب افراز^۱ (PC):** این ضریب میزان هم پوشانی بین خوشه‌ها را به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$PC = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^c (u_{ik})^2 \quad (9)$$

u_{ik} بیانگر درجه عضویت داده k در خوشه i (با تعداد داده در تعداد c خوشه) است. نقطه ضعف PC، در عدم ارتباط مستقیم با برخی از خصوصیات داده‌ها است. تعداد بهینه خوشه متناظر با بیشینه مقدار این ضریب است [۲۵].

- **آنتروپی افراز^۲ (PE):** آنتروپی افراز یا آنتروپی طبقه‌بندی تنها درجه فازی بودن افراز خوشه را اندازه‌گیری می‌کند که شبیه به ضریب افراز است. تعداد بهینه خوشه با توجه به کمینه‌سازی مقدار آنتروپی افراز به دست می‌آید [۲۶ و ۲۷].

$$PE = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^c (u_{ik}) \log_2(u_{ik}) \quad (10)$$

- **شاخص افراز^۳ (CS):** این شاخص نمایانگر نسبت مجموع فشردگی و جدایش خوشه‌ها است. این شاخص مجموع مقادیر اعتبارسنجی خوشه به صورت مجزا که از طریق تقسیم به عدد فازی هر خوشه نرمال‌سازی می‌شود.

$$SC = \frac{\sum_{k=1}^c (u_{ik})^m \|x_k - v_i\|^2}{N_i \sum_{j=1}^c \|v_i - v_j\|^2} \quad (11)$$

شاخص CS برای مقایسه افرازهای مختلف با تعداد مساوی خوشه مفید و مقدار کمتر آن بهینه است [۸۲].

- **شاخص ژی و بنی (XB):** هدف شاخص ژی و بنی، کمی‌سازی نسبت کل تغییرات داخل تمام خوشه‌ها

دو گام تکرار شونده در ادامه بدین صورت است:

i. با تعیین مقدار درجه عضویت $u_{ik}^{(t)}$ مراکز خوشه

$$v_i^{(t)} \text{ توسط رابطه ۷ محاسبه می‌شود:} \\ v_i^{(t)} = \frac{\sum_{k=1}^N (u_{ik}^{(t)})^m x_k}{\sum_{k=1}^N (u_{ik}^{(t)})^m} \quad (7)$$

ii. با تعیین مراکز خوشه جدید، مقادیر درجه عضویت به روز رسانی می‌شود:

$$u_{ik}^{(t+1)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c [D_{ik}(x_k, v_i^{(t)}) / D_{jk}(x_k, v_j^{(t)})]^{2/(m-1)}} \quad (8)$$

معیار توقف الگوریتم به صورت $|U^{(t+1)} - U^{(t)}| \leq \epsilon$ یا تعداد تکرار از پیش تعیین شده بیان می‌شود که یک مقدار ثابت مثبت کوچک است.

به کارگیری شاخص‌های اعتبارسنجی در تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها (پهنه‌ها)

پهنه‌بندی را می‌توان بر اساس شواهد فیزیکی زمین مانند ویژگی‌های ساختاری و زمین‌شناسی یا با استفاده از خوشه‌بندی داده‌ها انجام داد. محاسبه درستی اعتبار خوشه‌بندی به صورت نسبی بر اساس پارامترهای مختلف خوشه‌بندی و تعداد خوشه‌ها صورت می‌گیرد. اعتبارسنجی خوشه‌بندی، یکی از مسائل بسیار مهم در تحلیل خوشه‌بندی است که نتایج خوشه‌بندی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شاخص اعتبارسنجی خوشه‌بندی، روشی برای تعیین کیفیت و بهینه‌سازی افراز به دست آمده است [۲۱-۲۳]. در اغلب الگوریتم‌های خوشه‌بندی، تعداد خوشه‌ها به عنوان یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش‌ها و شاخص‌های زیادی برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها وجود دارد که براساس بیشینه تفاوت بین خوشه‌ای و بیشینه تشابه درون خوشه‌ای تعیین می‌شود. بنابراین، شاخص اعتبارسنجی خوشه‌بندی را می‌توان برای یافتن تعداد بهینه خوشه‌ها (c) مورد استفاده قرار داد [۱۹ و ۲۴]. شاخص‌های اعتبارسنجی ارائه شده، هیچ یک به تنهایی کامل نیستند، بنابراین، استفاده همزمان از چند شاخص برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها پیشنهاد می‌شود. در این مقاله، به منظور

1. Partition Coefficient
2. Partition Entropy
3. Partition Index

مختلف ترکیب لایه‌های اطلاعات ورودی نمایش داده شده است.

برای تعیین تعداد بهینه پهنه‌ها، شاخص‌های اعتبارسنجی خوشه‌بندی مختلف برای تعداد دو تا پانزده پهنه (براساس حداقل تعداد پهنه ممکن تا حداکثر تعداد پهنه‌های زمین‌شناسی) محاسبه شد. از این رو شاخص‌ها برای ترکیب چهار لایه ورودی مختلف (جدول ۱) براساس الگوریتم خوشه‌بندی فازی گوستافسون-کسل مورد مطالعه قرار گرفت. روش‌های خوشه‌بندی فازی علاوه بر حساسیت به تعداد خوشه، به توان وزندهی فازی وابسته است. در شکل ۴، مدل‌سازی سه بعدی، شاخص‌های اعتبارسنجی نسبت به تعداد خوشه و توان وزندهی فازی نمایش داده شده است. به‌منظور بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف اعتبارسنجی (CVI) با یکدیگر، مقادیر در بازه ۰-۱ استاندارد شده و یک تابع ترکیبی براساس رابطه مستقیم یا معکوس شاخص‌ها با تعداد خوشه‌ها تعریف شد. سپس تغییر بین شاخص‌های استاندارد (CVIS) مختلف می‌تواند در مقابل تعداد خوشه‌ها و ضریب توانی در نظر گرفت. برای تعیین یک شاخص جامع ضریبی (رابطه ۱۴)، شاخص‌های اعتبارسنجی با رابطه مستقیم و معکوس، به ترتیب در قسمت صورت و مخرج این کسر قرار گرفتند. مقدار بیشینه این شاخص ضریبی، بیانگر تعداد بهینه خوشه‌ها و همچنین توان وزندهی فازی است [۳۱].

$$CVI_{S,i} = \frac{CVI_i - CVI_{Min}}{CVI_{Max} - CVI_{Min}} \quad (13)$$

$$Index_{Multiplicative} = \frac{(PC_S + 1)}{(CE_S + 1) \times (SC_S + 1) \times (XB_S + 1)} \quad (14)$$

به جدایش خوشه‌ها است. در تعداد بهینه خوشه‌ها، این شاخص کمینه می‌شود [۹۲].

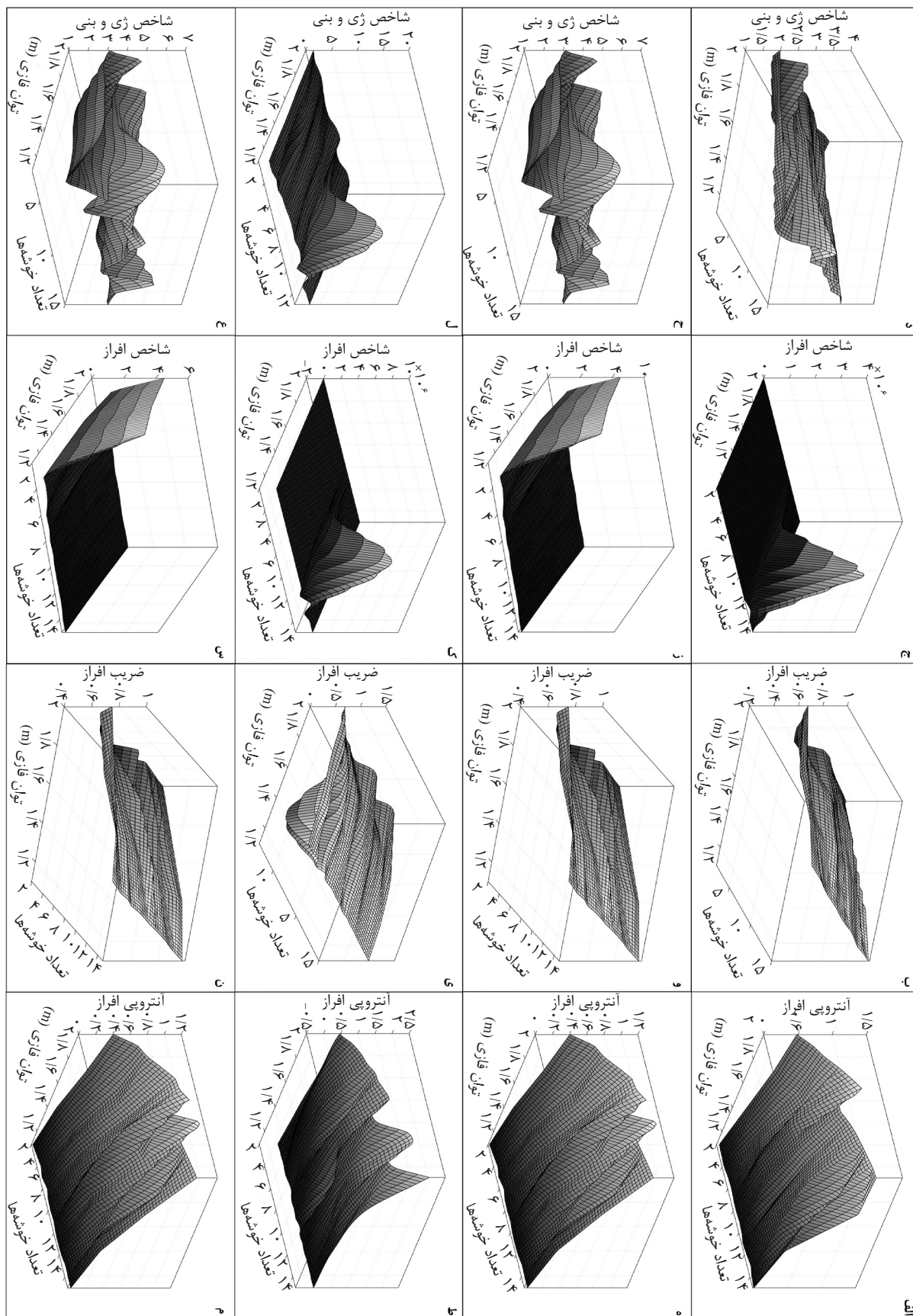
$$XB = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (u_{ik})^m \|x_k - v_i\|^2}{N \times (\min_{i \neq k} \|x_k - v_i\|^2)} \quad (12)$$

شایان ذکر است که تنها تفاوت شاخص‌های SC و XB رویکرد جدایی خوشه‌ها است. در واقع، هیچ شاخص اعتبارسنجی به تنهایی قابل اعتماد نیست، به همین دلیل است که شاخص‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و تعداد خوشه بهینه از مقایسه نتایج مختلف به دست می‌آید. این نکته قابل توجه است، هنگامی که تفاوت‌های جزئی بین مقادیر مختلف شاخص اعتبارسنجی وجود دارد، افزایش با خوشه کمتر در اولویت است. مشکل اصلی ضرائب PC و PE به ترتیب یکنواختی، روند کاهشی و افزایشی مقدار آنها با تغییر c است [۱۹ و ۳۱].

به منظور یافتن تعداد بهینه خوشه‌ها که بین تعداد پهنه‌ها در یک منطقه است، شاخص‌های اعتبارسنجی خوشه‌بندی بر اساس چهار ترکیب از لایه‌های ورودی اطلاعات مختلف (با توجه به الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی گوستافسون-کسل) استفاده شد. این داده‌های ورودی شامل هرزروی سیال حفاری (MI)، وزن گل حفاری (MW)، پهنه‌بندی زمین‌شناسی (Zone) و به دلیل بررسی متغیرهای ناحیه‌ای و فضایی مختصات را می‌توان به عنوان یک ویژگی مورد بررسی قرار داد و این ویژگی‌ها به عنوان ورودی شاخص‌های اعتبارسنجی خوشه بندی محسوب می‌شوند. در جدول ۱، حالت‌های

جدول ۱ چهار حالت مختلف ترکیب مختلف لایه‌های اطلاعاتی.

ویژگی	حالت	موقعیت نمونه	هرزروی گل حفاری (MI)	وزن گل حفاری (MW)	پهنه‌بندی زمین‌شناسی (Zone)
اول	✓	✓	✓	-	-
دوم	✓	✓	✓	✓	-
سوم	✓	✓	✓	-	✓
چهارم	✓	✓	✓	✓	✓

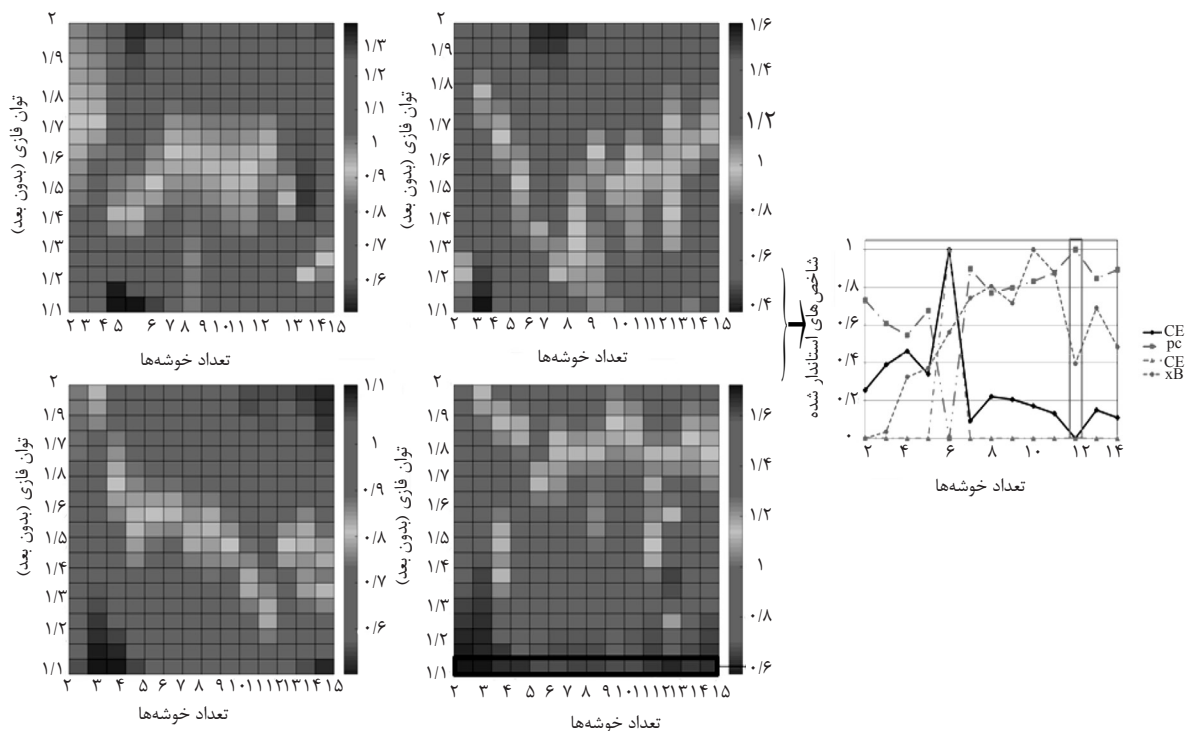


شکل ۴ مدل سه بعدی شاخص‌های اعتبارسنجی خوشه‌بندی در برابر تعداد خوشه‌ها و توان وزندهی فازی برای چهار ترکیب لایه‌های اطلاعاتی مختلف

یکی از اهداف اصلی روش‌های آماری چند متغیره، یافتن بهترین ترکیب از داده‌ها با کمترین حجم در مقابل مدل‌سازی بیشترین تغییرپذیری است. انتخاب حالت سوم در این مطالعه به‌عنوان ترکیب بهینه بدین دلیل است که قسمت عمده‌ای از تغییرپذیری فضایی متغیر وزن گل حفاری، توسط متغیرهای هرزروی گل حفاری و پهنه‌بندی زمین‌شناسی پوشش داده و در ساختار این دو متغیر نهفته است. بنابراین با توجه به رابطه بین متغیر وزن گل حفاری با دو متغیر دیگر، این متغیر به منظور کاهش ابعاد داده‌های ورودی (بدون کاهش قابل توجه دقت مدل‌سازی) از ترکیب حذف شده است.

در الگوریتم گوستافسون-کسل بهبود یافته، پارامتر وزنی ۷ برای مقیاس‌سازی (میزان‌سازی) بین ماتریس کوواریانس خوشه‌ها و مجموعه همه داده‌ها تعریف شده است. بسته به مقدار ۷، شکل خوشه‌ها نسبت به هم شبیه یا متفاوت‌تر می‌باشد [۱۹].

با بررسی تعداد چهار لایه اطلاعاتی، شاخص ضریبی شدت بخشی برای هر یک از موارد ترکیب اطلاعاتی محاسبه شد. تعداد بهینه خوشه‌ها، براساس بیشینه‌سازی شاخص شدت بخشی محاسبه می‌شود که با به‌کارگیری شاخص‌های اعتبارسنجی، تعداد خوشه‌های کمتر با در نظر گرفتن تفاوت جزئی بین شاخص‌های مختلف مطلوب‌تر است. با توجه به بررسی شاخص‌ها و شاخص ضریبی، بهترین ترکیب اطلاعاتی تلفیق حالت سوم (هرزروی گل حفاری، پهنه‌بندی زمین‌شناسی با توجه به موقعیت نمونه‌ها)، تعداد بهینه پهنه‌ها، برابر ۱۲ پهنه است و مقدار توان فازی بهینه برابر ۱/۱ تعیین شد. اشکال ۵ الف-د، بیانگر تغییر شاخص ضریبی شدت بخشی در مقابل تعداد خوشه‌ها و ضریب توانی در چهار ترکیب لایه اطلاعاتی است و در شکل ۵ ه، تغییر هر شاخص در مقابل تعداد خوشه و تعیین تعداد بهینه آن نمایش داده شده است.



شکل ۵ نمایش شاخص ضریبی شدت بخشی در مقابل تعداد خوشه‌ها و ضریب توانی در چهار ترکیب لایه اطلاعاتی: الف- حالت اول، ب- حالت دوم، ج- حالت سوم، د- حالت چهارم و ه- بررسی شاخص‌ها به صورت مجزا در ترکیب اطلاعاتی حالت سوم.

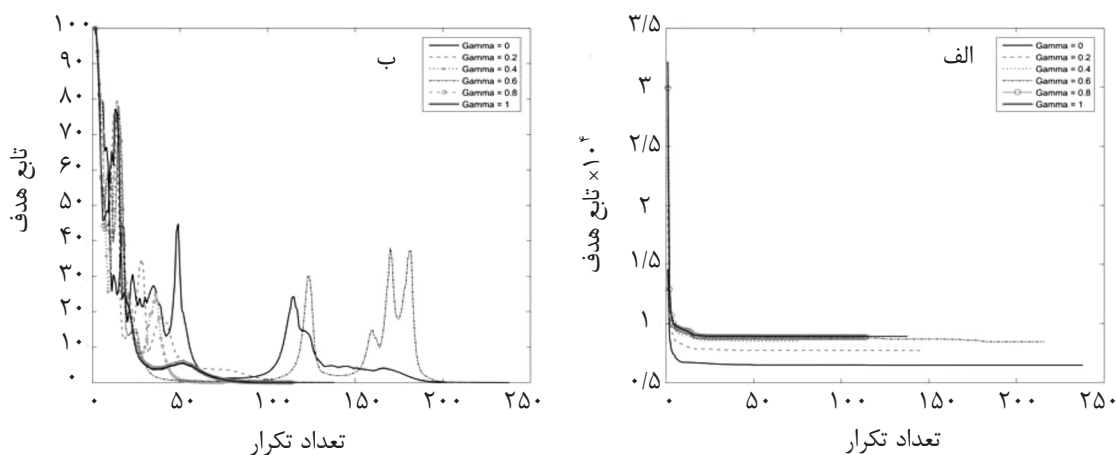
چند پهنه اختصاص داده شده است که بیانگر مرز بین دو پهنه است.

بحث و نتایج

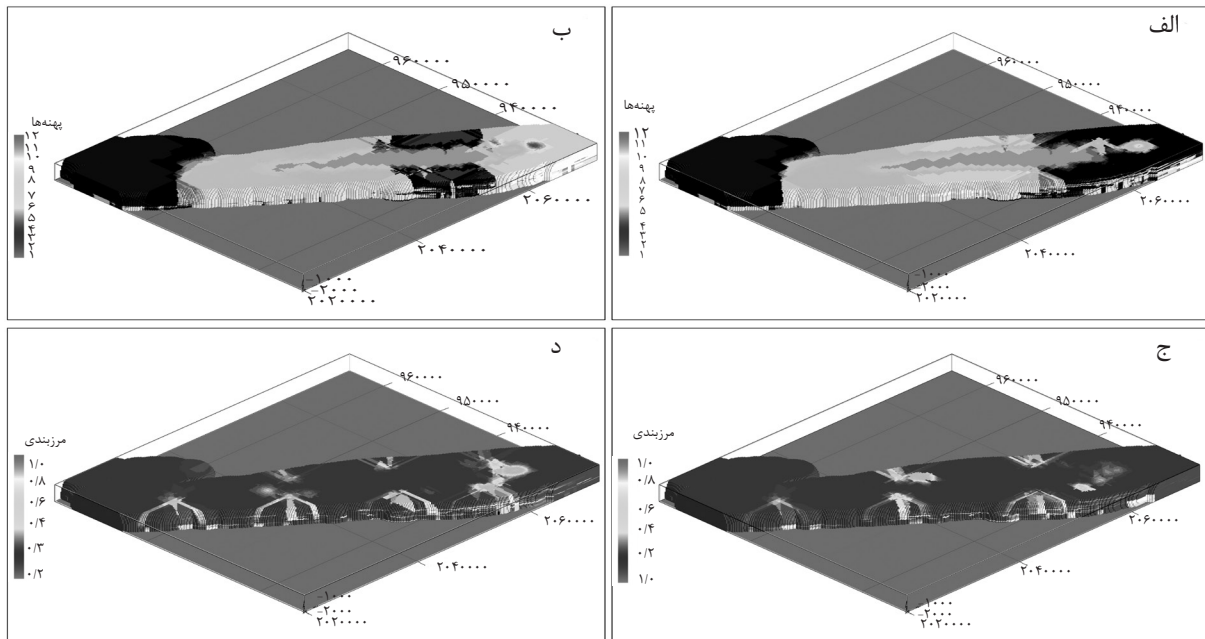
به منظور بررسی الگوریتم ارائه شده، پهنه‌بندی خروجی حاصل از اجرای الگوریتم گوستافسون-کسل (مقادیر گامای ۰ و ۰/۴) با پهنه‌بندی زمین‌شناسی مقایسه شد، در بعضی از پهنه‌های خروجی خوشه‌بندی، هم‌پوشانی بالای ۵۰٪ با پهنه‌های زمین‌شناسی است و در بعضی از موارد، نمونه‌های یک پهنه، به چند پهنه اختصاص داده شده است. پهنه‌های C_2 ، D_1 و D_2 دارای هم‌خوانی بالایی با پهنه‌های ۱۰ و ۱۱ دارد (شکل ۸).

در راستای بررسی خروجی‌های پهنه‌بندی با مقادیر گاماهای مختلف، داده‌های مربوط به هرزروی سیال حفاری به پهنه‌های تعیین شده، اختصاص داده می‌شود. در مرحله بعد، به منظور اعتبارسنجی شاخص‌های آماری میانگین و انحراف معیار هرزروی برای هر پهنه تعیین و از روش تجزیه و تحلیل تمایز فیشر^۱ استفاده می‌شود. شاخص اعتبارسنجی فیشر به صورت بیشینه‌سازی اختلاف بین مراکز خوشه‌ها و کمینه‌سازی مجموع واریانس داخلی خوشه‌ها تعریف می‌شود.

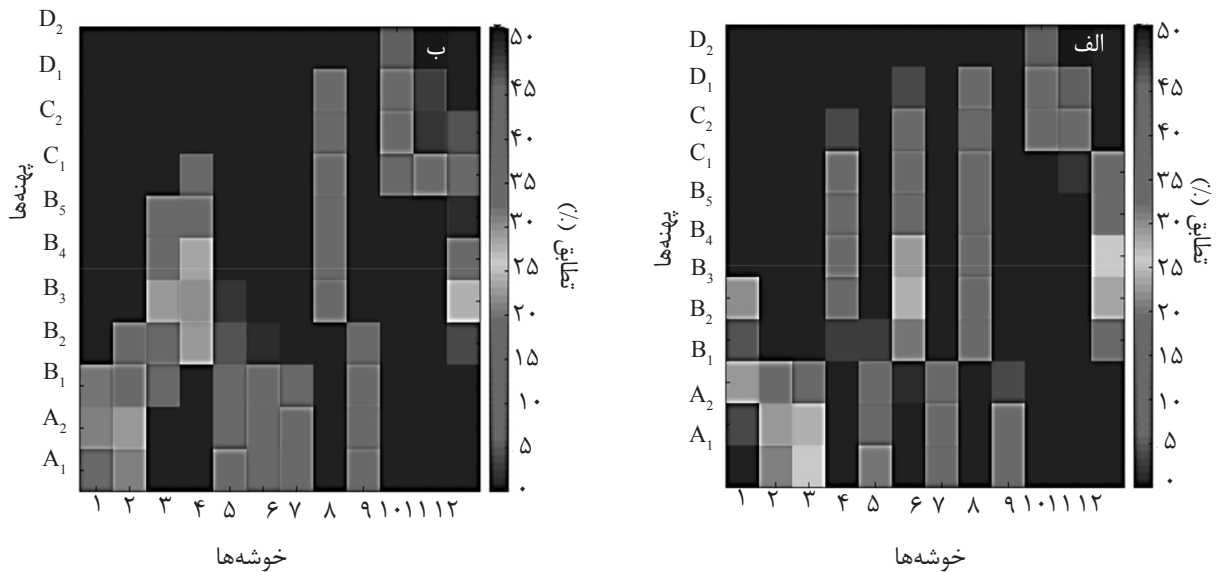
مقدار گاما، براساس کمینه‌سازی دو معیار مقدار خطا و تابع هدف در تعداد تکرارهای مشخص مورد بررسی قرار گرفت. بهینه‌ترین پاسخ بر اساس کمینه‌سازی توابع کارایی در مقدار گاما برابر صفر و براساس سریع‌ترین همگرایی (کمترین تکرارها) در مقدار گاما برابر ۰/۴ مشاهده شد. در شکل ۶، تحلیل حساسیت تابع خطا و هدف برای مقادیر گاما در بازه ۰-۱ مورد بررسی قرار گرفته است. با اجرای پهنه خوشه‌بندی فازی گوستافسون-کسل، هر داده به چند خوشه با درجه عضویت اختصاص داده می‌شود که مجموع درجه عضویت برای هر داده، برابر یک است. هر چه درجه عضویت‌ها به صورت یکنواخت‌تری بین چند پهنه تقسیم شده باشد، با اطمینان کمتری می‌توان آن را به یک پهنه اختصاص، در حالی که اگر درجه عضویت در یک پهنه به سایر پهنه‌ها غالب باشد، با اطمینان بیشتری می‌توان آن را به یک پهنه اختصاص داد [۳۲]. در اشکال ۷ الف و ب، مدل سه بعدی فضایی پهنه‌بندی فازی برای حالت ۱۲ پهنه برای مقادیر گاما ۰ و ۰/۴ رسم شده است. در اشکال ۷ ج و د، میزان قطعیت پهنه‌ها و مرزبندی بین پهنه‌ها نمایش داده شده است، در مناطق قرمز رنگ (نزدیک به ۱)، نمونه‌ها به یک پهنه خاص و در مناطق (نزدیک به ۰/۵) نمونه‌ها به



شکل ۶ الف- تغییرات خطا در تکرارها و مقادیر گامای مختلف؛ ب- تغییرات تابع هدف در تکرارها و مقادیر گامای مختلف.



شکل ۷ نمایش مدل سه بعدی: الف- پهنه‌بندی برای مقدار گامای صفر؛ ب- پهنه‌بندی برای مقدار گامای ۰/۴، ج- قطعیت و مرزبندی برای مقدار گامای صفر، د- قطعیت و مرزبندی برای مقدار گامای ۰/۴



شکل ۸ نمایش میزان انطباق: الف- پهنه‌بندی زمین‌شناسی با خوشه‌بندی (گامای صفر)؛ ب- پهنه‌بندی زمین‌شناسی با خوشه‌بندی (گامای ۰/۴)

است. در این پهنه‌بندی، بیشترین و کمترین مقدار میانگین هرزروی به ترتیب مربوط به پهنه هشتم و هفتم است که در شکل ۸ ب، قابل مشاهده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله برای شناسایی مناطق با هرزروی شدید و مدل‌سازی پهنه‌های هرزروی گل حفاری

شاخص فیشر برای پهنه‌بندی زمین‌شناسی و پهنه‌بندی توسط خوشه‌بندی گوستافسون-کسل (مقادیر گامای ۰ و ۰/۴) محاسبه شد و برای سه حالت به ترتیب مقادیر ۰/۰۱۱، ۰/۰۸۶ و ۰/۰۸۸ به دست آمد که بیانگر عملکرد بهتر فرآیند پهنه‌بندی داده‌های هرزروی سیال حفاری، توسط خوشه‌بندی فضای گوستافسون-کسل به ازای پارامتر وزن‌دهی (گاما) ۰/۴

مناسب در الگوریتم خوشه‌بندی گوستافسون-کسل بهبود یافته، استفاده شده است که در نتیجه بهترین مقدار بهینه آن، برابر ۰/۴ به دست آمد. با پهنه‌بندی سه بعدی فازی انجام شده در میدان مورد مطالعه، مشخص شد که با توجه به روش تجزیه و تحلیل تمایز فیشر، پهنه بندی به دست آمده از روش خوشه‌بندی فازی، از عملکرد بهتری نسبت به روش پهنه‌بندی زمین‌شناسی به منظور مدل‌سازی هرزروی سیال حفاری برخوردار است. نتایج به دست آمده با توجه به پهنه‌بندی جدید توسط روش خوشه‌بندی فازی، نشان می‌دهد که هرزروی سیال حفاری در شمال غرب و جنوب شرق میدان متمرکز است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از اداره پژوهش و فناوری مناطق نفتخیز جنوب به واسطه حمایت‌های مادی و معنوی در انجام این طرح تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

در بخش‌های مختلف مخزن آسماری، از الگوریتم خوشه‌بندی فازی استفاده شده است که نتایج نشان داده است با به‌کارگیری چهار شاخص اعتبارسنجی، دوازده پهنه برای بررسی مناطق با هرزروی شدید تعیین شده است. در ارزیابی الگوریتم خوشه‌بندی، با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی مختلف از جمله هرزروی سیال، وزن گل و پهنه‌بندی زمین‌شناسی با توجه به موقعیت فضایی آنها، چهار ترکیب لایه اطلاعاتی مختلف در نظر گرفته شد. در این پژوهش، شاخص‌های مختلف اعتبارسنجی خوشه‌بندی شامل ضریب افراز (PC)، آنتروپی افراز (CE)، شاخص افراز (SC) و شاخص ژی و بنی (XB) برای تعیین تعداد بهینه پهنه‌ها، بصورت همزمان در نظر گرفته شد و در نتیجه بهترین ترکیب اطلاعاتی، تلفیقی از هرزروی گل حفاری، پهنه‌بندی زمین‌شناسی با توجه به موقعیت نمونه‌ها انتخاب شد، که تعداد بهینه پهنه‌ها، برابر دوازده پهنه و مقدار توان فازی بهینه برابر ۱/۱ تعیین شد. برای مقیاس‌سازی بین کواریانس داده‌ها و خوشه‌ها از پارامتر وزنی

منابع

- [1]. Dupriest F. E., "Fracture closure stress (FCS) and lost returns practices," SPE 92192, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, 23-25 February 2005.
- [2]. Ahmed T., "Reservoir Engineering Handbook," 4th ed., Publishing Elsevier, p. 1454, 2010.
- [3]. Pilehvari A. and Nyshadham V. R., "Effect of material type and size distribution on performance of loss/seepage control material," SPE 73791, Texas A&M University-Kingsville, p. 13, 2002.
- [4] مجیدی ر، استفان ل. و جرارد ت. ژ، «مدل‌سازی هرزروی گل حفاری در سازند با شکستگی طبیعی»، کنفرانس سالانه انجمن نفت آمریکا، دنور، کلرادو، ایالات متحده آمریکا، ۲۰۱۰.
- [5]. Toreifi H., Rostami H. and Khaksar manshad A., "New method for prediction and solving the problem of drilling fluid loss using modular neural network and particle swarm optimization algorithm," J. Petrol. Explor. Prod. Technol., Vol. 4, pp. 371-379, 2014.
- [6]. Oluwagbenga O., Oseh J., Oguamah I., Ogungbemi O. and Adeyi A., "Evaluation of formation damage and assessment of well productivity of oredo field, Edo State, Nigeria," American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 4 Issue-3, pp 1-10, 2015.
- [7]. Wingle W. L., "Evaluating subsurface uncertainty using modified geostatistical techniques," PhD Thesis of Philosophy (Geological Engineer), Colorado School of Mines, p. 180. 1997.

- [8]. Dagdelen K. and Turner A. K., "Importance of stationarity for geostatistical assessment of environmental contamination," ASTM Special Technical Publication, STP1283, pp. 117-132, 1996.
- [۹] حسین مرشدی ا. و معاریان ح.، ۱۳۹۱، «پهنه‌بندی شاخص کیفی سنگ در ساختگاه سد سمیلان، بر اساس گسل‌ها و شبکه عصبی خود سازمانده»، فصلنامه علوم زمین، سال ۲۱، شماره ۸۴، ص. ۹۹ تا ۱۱۲.
10. Taheri, K., Mohammad Torab, F. (2017). Applying Indicator Kriging in Modeling of Regions with Critical Drilling Fluid Loss in Asmari Reservoir in an Oil Field in Southwestern Iran. Journal of Petroleum Research, 27(96-4), 91-104. doi: 10.22078/pr.2017.2462.2140
11. Taheri, K., & Mohammad Torab, F. (2017). Modeling Mud Loss in Asmari Formation Using Geostatistics in RMS Software Environment in an Oil Field in Southwestern Iran. Iranian Journal of Petroleum Geology, 11(11), 1.
- [12]. Hagen-Zanker A. and Jin Y., "Adaptive zoning for transport mode choice modeling," Transactions in GIS. Vol. 17, pp. 706-723, 2013.
- [13]. Lee G. S. and Lee K. H., "Application of fuzzy representation of geographic boundary to the soil loss model," Hydrology and Earth System Sciences Discussions Vol. 3, pp. 115-133, 2006
- [14]. Kaufman L. and Rousseeuw P. J., "Finding groups in data: an introduction to cluster analysis," Wiley, New Jersey, p. 342, 2009.
- [15]. Everitt B., Landau S., Leese M. and Stahl D., "Cluster analysis," (5th ed.) Hoboken, NJ: Wiley Publishing, p. 330, 2011.
- [16]. Carvalho F. D. A. D., Tenório C. P. and Cavalcanti Junior N. L., "Partitional fuzzy clustering methods based on adaptive quadratic distances," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 157, pp. 2833-2857, 2006.
- [17]. Nascimento S., Mirkin B. and Moura-Pires F., "A fuzzy clustering model of data and fuzzy c-means," In: Proceedings of 9th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Antonio, pp. 302-307, 2000.
- [18]. Gustafson D. E. and Kessel W.C., "Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix," In: Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control including the 17th Symposium on Adaptive Processes, San Diego, pp. 761-766, 1978.
- [19]. Balasko B., Abonyi J. and Feil B., "Fuzzy clustering and data analysis toolbox," University of Veszprem, Hungary, p. 74, 2002.
- [20]. Babuka R., Van der Veen P. J. and Kaymak U., "Improved covariance estimation for Gustafson-Kessel clustering," In: Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Honolulu, pp. 1081-1085, 2002.
- [21]. Jain A. K., "Data clustering: 50 years beyond K-means," Pattern Recognition Letters Vol. 31, pp. 651-666, 2010.
- [22]. Jain A. K., Murty M. N. and Flynn P.J., "Data clustering: a review," ACM Computing Surveys, Vol. 31, pp. 264-323. 1999.
- [23] Ting I. H., "Web mining techniques for on-line social networks analysis," In: Proceedings of the 5th International Conference on Service Systems and Service Management, Melbourne, pp. 696-700, 2008.

- [24]. Kim D. W., Lee K. H. and Lee D., "On cluster validity index for estimation of the optimal number of fuzzy clusters," Pattern Recognition, Vol. 37, pp. 2009–2025, 2004.
- [25]. Bezdek J. C., "Cluster validity with fuzzy sets," Journal of Cybernetics Vol. 3, pp. 58–73, 1974.
- [26]. Bezdek J. C., "Mathematical models for systematics and taxonomy," 8th International Conference on Numerical Taxonomy. San Francisco, pp. 143-166, 1975.
- [27]. Wu K. L. and Yang M. S., "A cluster validity index for fuzzy clustering," Pattern Recognition Letters, Vol. 26, pp. 1275-1291, 2005.
- [28]. Bensaid A. M., Hall L. O., Bezdek J. C., Clarke L. P., Silbiger M. L., Arrington J. A. and Murtagh R. F., "Validity-guided (re) clustering with applications to image segmentation," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 4, pp. 112-123, 1996.
- [29]. Xie L.X. and Beni G., "A validity measure for fuzzy clustering," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, pp. 841-847, 1991.
- [۳۰] حسین مرشدی ا. و معماریان ح., «پهنه‌بندی کانسار براساس توزیع فضایی عیار کانسنگ با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی نقشه خود-سازمانده (مطالعه موردی: معدن چغارت)». نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱۱، شماره ۳۲، ص. ۷۳ تا ۸۶.
- [31]. Mojarab M., Memarian H., Zare M., Hossein Morshedy A. and Pishahang M. H., "Modeling of the seismotectonic provinces of Iran using the self-organizing map algorithm," Computers & Geosciences, Vol. 67, pp. 150-162, 2014.
- [32]. Morshedy A. H., Torabi S. A. and Memarian H., "A hybrid fuzzy zoning approach for 3-dimensional exploration geotechnical modeling: a case study at Semilan dam, southern Iran," Bulletin of Engineering Geology and the Environment, <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1133-1>, pp. 1-18, 2017. .