

تعیین واحد ژئومکانیکی با کمک روش‌های خوشه‌بندی و نتایج آزمایشگاهی برای سازندهای مخزنی کنگان و دالان

محمدعلی چمن‌زاد^۱؛ مجید نیکخواه^{۲*}؛ احمد رمضان‌زاده^۲؛ میسا پزشکی^۳؛ ایمان‌دخت مصطفوی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- ۲- دانشیار مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود شاهرود، ایران.
- ۳- استاد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- ۴- کارشناس ارشد شرکت نفت و گاز پارس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

(**نویسنده مسئول: m.nikkhah@shahroodut.ac.ir)

چکیده

تعیین واحد ژئومکانیکی گام نخست برای درک صحیح شرایط مخزن و اجرای بهینه فرایندهای مهندسی است. در این تحقیق، واحدهای ژئومکانیکی برای دو سازند کنگان و دالان، به عنوان اصلی‌ترین مخازن هیدروکربنی خلیج فارس، تعیین شده‌اند. به منظور کاهش خطای ناشی از قضاوت‌های مهندسی و افزایش دقت تحلیل‌ها، از سه روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، مبتنی بر چگالی و کی-میانگین با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB* برای تعیین واحدهای ژئومکانیکی بهره گرفته شد. داده‌های ورودی مدل خوشه‌بندی شامل نگاره‌های پتروفیزیکی چگالی، نوترون، گاما، و صوتی برشی و فشاری هستند که مزیت آن‌ها در دسترسی آسان و کاربرد در ساخت مدل ژئومکانیکی می‌باشد. در ادامه، ۴۳ نمونه مغزه براساس تخلخل و نفوذپذیری دسته‌بندی شده و میزان تطابق میان واحدهای ژئومکانیکی تعیین شده با این دسته‌بندی بررسی شد. علاوه بر این، از شاخص سیلوئت (*Silhouette*) برای ارزیابی کیفیت خوشه‌بندی در هر یک از روش‌ها استفاده گردید. در نهایت، پنج واحد ژئومکانیکی با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، بر پایه معیار متریک اقلیدسی استاندارد و روش پیوند کمترین واریانس، تعیین شدند. نتایج نشان داد که روش مورد استفاده بیش از ۹۰ درصد تطابق با داده‌های آزمایشگاهی دارد و مقدار شاخص سیلوئت برابر ۰/۴۸ به دست آمده است.

واحد ژئومکانیکی، الگوریتم خوشه‌بندی، نگاره‌های پتروفیزیکی، تخلخل و نفوذپذیری و مخازن کربناته

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

خصوصیات ژئومکانیکی (مانند مدول الاستیک و نسبت پواسون استاتیکی) یا پتروفیزیکی مشابه بر اساس تحلیل‌های مهندسی است [۲]. تعیین واحدهای ژئومکانیکی مزیت‌های بسیاری در مدل‌سازی و برنامه‌ریزی آزمایشگاهی دارد و به محدودیت‌های ناشی از کمبود داده‌های مغزه و ساخت مدل

شناسایی پارمترهای ژئومکانیکی سنگ، از جمله مدول یانگ و ضریب پواسون یکی از چالش‌های مهندسیین و زمین‌شناسان در تمام طول عمر مخازن نفت و گاز به شمار می‌آید [۱]. واحد ژئومکانیکی به بخشی از سازند اطلاق می‌شود که دارای

اقدام به تعیین واحد ژئومکانیکی کرده‌اند. در این تحقیق، نگاره صوتی برشی برای تعیین واحدها به کار رفته و کیفیت تقسیم‌بندی آن‌ها بر اساس توزیع در سایر نگاره‌ها ارزیابی شده است [۱۰]. شهنازی با استفاده از الگوریتم مبتنی بر گراف واحدهای ژئومکانیکی سازندهای گچساران، آسماری، پابده، گورپی و گدوان را تعیین کرده و از آن برای انتخاب مغزه و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها بهره برده است [۱۱]. روییز و باتزلی یک میدان در برزیل را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، درون‌چاهی، نگاره‌ها و مقاطع نازک به روش کی-میانگین^۳ طبقه‌بندی کرده‌اند [۱۲]. الکعبی و همکاران سه روش مبتنی بر گراف، SOM^4 و خوشه‌بندی سلسله مراتبی را برای تعیین و مقایسه واحدهای ژئومکانیکی در سازندهای کنگان و دالان به کار برده‌اند [۱۳].

واحدهای ژئومکانیکی در این تحقیق براساس نگاره‌های پتروفیزیکی با استفاده از سه روش خوشه‌بندی تعیین و سپس با استفاده از نمونه‌های سنگی و شاخص سیلوئت ارزیابی خواهد شد. سازند مورد مطالعه، اطلاعات و روش تحقیق در ادامه توضیح داده خواهد شد و سپس واحدهای ژئومکانیکی تعیین شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۲- مطالعه موردی

بازه‌ی مورد بررسی شامل بخشی از چاه حفاری شده در سازندهای کنگان و دالان جهت تولید مواد هیدروکربوری است. ستون چینه‌شناسی این ناحیه در شکل ۱ نشان داده شده است. این دو سازند که متعلق به گروه دهرم هستند، از مهمترین مخازن گازی ناحیه‌ی خلیج فارس محسوب می‌شوند. این سازندها براساس لیتولوژی و خواص مخزنی به چهار بخش KI تا $K4$ تقسیم شده‌اند. عمده لیتولوژی زمین در این بازه آهکی بوده و شامل ترکیبی از آهک کلسیتی و دولومیتی شده است.

ژئومکانیکی کمک می‌کند [۳، ۴]. در سازهایی که دسترسی به مصالح یا داده‌های عمقی محدود است، مانند تونل‌ها، طبقه‌بندی ژئومکانیکی اغلب از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام می‌شود. به‌عنوان مثال، طبقه‌بندی ژئومکانیکی کنگلومرا در یک تونل با عمق ۱/۸ کیلومتر یکی از این موارد است [۵]. با این حال، در مخازن کربناته، به دلیل حجم بالای اطلاعات پتروفیزیکی و محدودیت داده‌های مغزه، تعیین واحدهای ژئومکانیکی با چالش‌های بیشتری همراه است.

تاکنون تحقیقات متعددی برای تعیین واحدهای ژئومکانیکی بر اساس تحلیل‌های مهندسی و به‌منظور استفاده در مدل‌سازی ژئومکانیکی انجام شده است. مهرگینی و همکاران واحدهای ژئومکانیکی را برای ۴۰۰ متر سازند گچساران مشخص کرده‌اند. در این پژوهش، ابتدا مرز بین واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از لاگ‌های صوتی برشی و فشاری، چگالی و تخلخل نوترونی و با تکیه بر تحلیل‌های مهندسی تعیین شده است. در ادامه، پنج واحد ژئومکانیکی تفکیک شده و برای بررسی‌های میکروسکوپی، از سه مقطع نازک به ازای هر متر استفاده شده است. در نهایت، مطابقت بین واحدهای ژئومکانیکی و نتایج آزمایش‌های مغزه ارزیابی شده است [۶]. نظری و ریاحی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و الگوریتم مبتنی بر گراف ($MRGC^1$)، واحدهای ژئومکانیکی میدان منصوری را تعیین کرده‌اند. در این تحقیق، خواص مقاومتی و مکانیکی بر اساس روابط تجربی و مدول یانگ دینامیکی تخمین زده شده است [۷]. کدخدایی اثر تعیین واحدهای ژئومکانیکی را برای ارزیابی پایداری چاه بررسی کرده است. وی پنج واحد ژئومکانیکی را در سازند عرب بر اساس مقادیر مدول یانگ و مقاومت فشاری تک‌محوری تخمین زده‌شده از روی نگاره‌ها مشخص کرده است [۸]. قره‌چلو و همکاران پنج واحد ژئومکانیکی را برای یکی از سازندهای کربناته جنوب غرب ایران تعیین کرده‌اند. شاخص‌های ظاهری پلاگ شامل ترکیب کانی‌شناسی، ویژگی‌های میکروسکوپی، تخلخل بصری، سیمان‌شدگی و دولومیتی‌شدن مورد استفاده قرار گرفته است [۹].

پوررضا و همکاران با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی^۲

³ K-means

⁴ Self-organizing map

¹ Multi-Resolutional Graph-Based clustering

² Hierarchical clustering

مربوط به رفتار نمونه در روابط انتخاب شدند. تخلخل نیز یک پارامتر موثر، در بررسی رفتار تراکم‌پذیری سنگ است که با نگاره نوترون قابل دستیابی است.

۲-۲- خواص نمونه‌ها

در ابتدا از خواص فیزیکی ۵۱ نمونه‌ی سنگی استوانه‌ای یا پلاگ با قطر ۳۸ میلی‌متر برای کالیبراسیون و ارزیابی دقت واحدهای ژئومکانیکی استفاده شده است. به همین منظور تخلخل و نفوذپذیری این نمونه پلاگ‌ها اندازه‌گیری شد.

تخلخل نمونه‌ها براساس قانون گاز بویل و در یک سیستم بسته بدست آمده است. مقدار نفوذپذیری نیز با استفاده از قانون دارسی و جریان عبوری از پلاگ بدست آمده است. براساس نتایج آزمایش‌ها و با کمک نگاره‌های مربوط به عمق و جنس سنگ، تقسیم‌بندی اولیه پلاگ‌ها در پنج دسته مطابق جدول ۱ صورت پذیرفت. نمونه‌ها به ترتیب تخلخل در این جدول آورده شده‌اند که دسته اول از نمونه‌ها به رغم تخلخل بالا، از نفوذپذیری کمی برخوردارند.

قراردادن نمونه‌ها در یک دسته با چالش‌هایی همراه هست که از آن جمله می‌توان پلاگ‌های نزدیک به مرز دو واحد ژئومکانیکی قرار اشاره کرد. تقسیم‌بندی پلاگ‌ها در این موارد، پس از تعیین واحدهای ژئومکانیکی به صورت مجدد بازبینی شد. در نهایت نیز از نتایج ۴۳ پلاگ برای ارزیابی نتایج خوشه‌بندی استفاده شد.

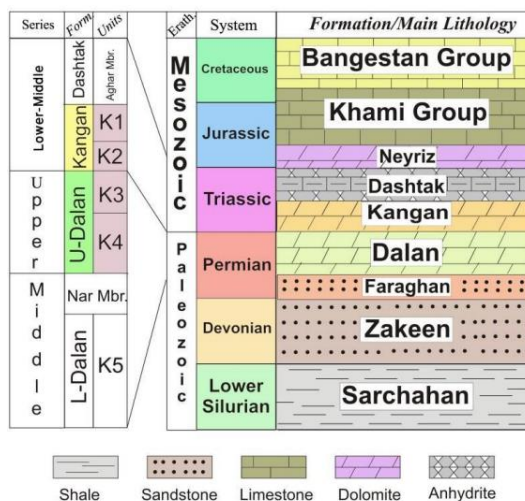
جدول ۱- دسته‌بندی اولیه نمونه‌ها براساس تخلخل و

نفوذپذیری اندازه‌گیری شده

شماره دسته	تعداد نمونه	تخلخل (درصد)	نفوذپذیری (میلی‌داری)
۱	۱۳	بیشتر از ۱۸	کمتر از ۵
۲	۹	بین ۱۲ تا ۱۸	بیشتر از ۵
۳	۱۲	بین ۵ تا ۱۲	بیشتر از ۵
۴	۳	کمتر از ۵	کمتر از ۵
۵	۶	کمتر از ۱	کمتر از ۵

۳- روش خوشه‌بندی

در این تحقیق از سه روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی، مبتنی بر چگالی^۵ و کی-میانیگین با استفاده از نرم‌افزار MATLAB



شکل ۱- ستون چینه‌شناسی سازندهای کنگان و دالان [۱۴]

۲-۱- نگاره‌های پتروفیزیکی

از نگاره‌های پتروفیزیکی برای تعیین تعیین واحد ژئومکانیکی استفاده شده است چرا که می‌توان از نتایج آن در سایر چاه‌ها در صورت وجود داده‌های مشابه نگاره استفاده کرد. اطلاعات نگاره‌ها شامل چگالی، نوترون، گاما، صوتی برشی و فشاری در حفره‌ی ۸/۵ اینچی کامل بوده و ارزیابی آماری داده‌ها در همین بازه صورت پذیرفته است. مقدار مدول یانگ و نسبت پواسون دینامیکی به منظور مقایسه واحدهای ژئومکانیکی به‌ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) تعیین شده‌اند. در این روابط چگالی (ρ) برحسب (kg/m^3) و سرعت موج فشاری و برشی (V_p و V_s) برحسب (m/s) و مدول یانگ دینامیکی بر حسب GPa است [۱۵].

$$E_{dyn} = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (1)$$

$$v_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

نگاره کانی‌ها در این طبقه بندی به صورت مستقیم لحاظ نشده و از نگاره گاما به عنوان راهنمایی از تغییرات لیتولوژی استفاده شده است. پنج نگاره چگالی، نوترون، گاما، صوتی فشاری و برشی برای طبقه بندی استفاده شده‌اند. سه نگاره چگالی، صوتی فشاری و برشی به عنوان پارامترهای

⁵ Density-base

۴- واحدهای ژئومکانیکی

واحدهای ژئومکانیکی براساس نگاره‌های پتروفیزیکی چگالی، نوترون، گاما، صوتی فشاری و برشی و با کمک سه الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی، مبتنی بر چگالی و کی-میانگین تعیین شده است. تعریف واحدهای ژئومکانیکی در بازه‌ی ۳۰۰ متری از این دو سازند با هدف ارزیابی ناپایداری بوده است و از همین رو برای هر ۱۵ سانتی‌متر از چاه واحد ژئومکانیکی مشخص شده است.

ارزیابی خروجی برای هر کدام از روش‌ها با کمک نتایج آزمایش شده بر روی نمونه‌های سنگی و شاخص سیلوئت خواهد بود. تطابق بین نتیجه‌ی خوشه‌بندی و دسته‌بندی پلاگ‌ها برحسب درصد و همچنین شاخص سیلوئت براساس روش سلسله مراتبی برای هر کدام از معیارها در جدول ۲ بیان شده است. همچنین متوسط شاخص سیلوئت برای روش خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی برابر ۰/۵۶- و تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی ۴۲ درصد شده است. این مقدار برای روش خوشه‌بندی کی-میانگین با دقت ۷۹ درصدی در نتایج آزمایشگاهی و مقدار شاخص سیلوئت ۰/۳۸ همراه بوده است.

جدول ۲- درصد تطابق شاخص آزمایشگاهی و شاخص سیلوئت برای هر کدام از معیارهای متریک و پیوند روش سلسله‌مراتبی

معیار پیوند	پارامتر متریک	
	مجدور	اقلیدسی
<i>average</i>	(۰/۴۹،/۷۳)	(۰/۳۵،/۷۶)
<i>centroid</i>	(۰/۴۶،/۸۵)	(۰/۴۸،/۶۱)
<i>complete</i>	(۰/۴۱،/۶۱)	(۰/۴۸،/۸۲)
<i>median</i>	(۰/۳۵،/۷۳)	(۰/۳۱،/۷۶)
<i>single</i>	(۰/۲۱،/۳۹)	(۰/۲۱،/۳۹)
<i>ward</i>	(۰/۴۸،/۹۴)	(۰/۴۵،/۹۴)
<i>weight</i>	(۰/۴۴،/۹۱)	(۰/۴۷،/۸۵)

همانطور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، پارامتر متریک اقلیدسی استاندارد بازای اغلب معیارهای متریک دقت کمتری برای خوشه‌بندی دارد و همچنین معیار پیوند

برای خوشه‌بندی واحدهای ژئومکانیکی استفاده شده است. در روش سلسله مراتبی، ابتدا مقادیری در یک خوشه محسوب شده و در طی مراحل خوشه‌بندی، نزدیکترین مقادیرها (براساس تابع فاصله تعریف شده) با یکدیگر ادغام شده و خوشه جدیدی می‌سازند. بر اساس روش مبتنی بر چگالی که یک خوشه در یک فضای داده، یک منطقه پیوسته با تراکم نقطه بالا است، که از دیگر خوشه‌ها توسط مناطق به هم پیوسته نقطه پایین جدا شده است. تراکم نقاط داده در مناطق جداکننده با چگالی نقطه پایین معمولاً نويز در نظر گرفته می‌شوند. کی-میانگین یک روش محبوب با هدف تجزیه هر یک از داده‌ها با k خوشه است که هر داده به متعلق به خوشه‌ای با نزدیکترین میانگین آن است [۱۶].

در روش سلسله مراتبی نیاز است تا فاصله بین دو داده و همچنین فاصله بین دو مجموعه جدید (مجموعه‌ای از داده‌ها) تعیین شود. فاصله بین دو داده را با استفاده از پارامتر متریک^۶ و فاصله بین دو مجموعه را با معیار پیوند^۷ ارزیابی می‌کنند [۱۷]. در این تحقیق انواع معیارهای متریک شامل فاصله اقلیدسی (*euclidean*)، مجذور فاصله اقلیدسی (*squared euclidean*) و اقلیدسی استاندارد (*standardized euclidean*) و همچنین انواع معیار پیوند فاصله دو مجموعه شامل میانگین‌گیری (*average*)، فاصله مرکزی (*centroid*)، دورترین (*complete*)، کوتاهترین (*single*)، میانه (*median*)، الگوریتم کمترین واریانس (*ward*) و میانگین‌گیری وزن‌دار (*weighted*) استفاده شده است. بهترین روش خوشه‌بندی با توجه به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و شاخص سیلوئت -مقداری بین منفی ۱ (کمترین مطابقت) و مثبت یک (بیشترین مطابقت) - مشخص شده است.

تعداد واحد ژئومکانیکی مورد انتظار به عنوان ورودی برای روش خوشه‌بندی باید از قبل مشخص شود. پنج واحد ژئومکانیکی در این تحقیق با توجه به تقسیم‌بندی روی پلاگ‌ها و توزیع داده‌های نگاره‌ها فرض گرفته شد. همچنین شعاع همسایگی برای روش مبتنی بر چگالی برابر ۰/۱۳ بوده است.

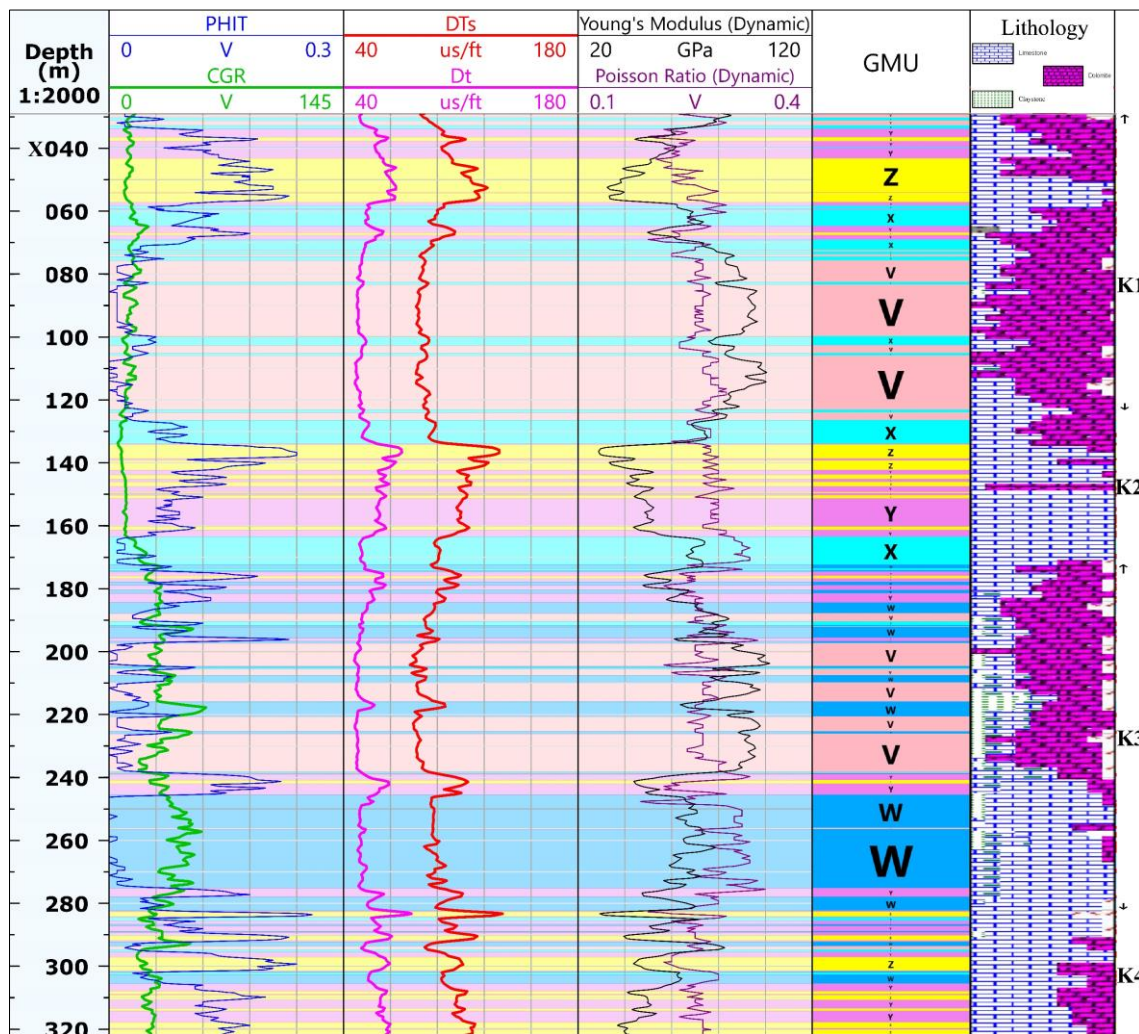
⁷ linkage

⁶ Metric

V, W, X, Y و Z به ترتیب دارای فراوانی ۲۹، ۲۰، ۱۴، ۲۲ و ۱۵ درصدی در دو سازند دالان و کنگان هستند. همچنین توزیع واحدهای ژئومکانیکی، تغییرات نگاره‌ها، نسبت پواسون و مدول یانگ دینامیکی و لیتولوژی دو سازند کنگان و دالان در شکل ۲ نشان داده شده است.

کوتاهترین (*single*) نیز کمترین دقت را برای هر سه پارامتر متریک داشته است. نتیجه ارزیابی می‌دهد که با استفاده از معیار پیوند الگوریتم کمترین واریانس (*ward*) و پارامتر متریک اقلیدسی استاندارد بیشترین دقت برای خوشه‌بندی حاصل می‌شود.

مقدار متوسط نگاره‌ها برای هر واحد ژئومکانیکی در جدول ۳ قابل ملاحظه می‌باشد. واحدهای ژئومکانیکی



شکل ۲- لیتولوژی، نگاره‌ها، واحدهای ژئومکانیکی و پارامترهای دینامیکی سازندهای کنگان و دالان

مهندسی و بصری در تفسیر داده‌ها خواهد شد. در این تحقیق، واحدهای ژئومکانیکی برای هر عمق دارای داده پتروفیزیکی، با ترکیب نتایج آزمایشگاهی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های خوشه‌بندی تعیین شده است.

پنج دسته پلاگ بر اساس نتایج اندازه‌گیری تخلخل و نفوذپذیری مشخص شد و پنج واحد ژئومکانیکی نیز با توجه به توزیع پارامترهای پتروفیزیکی در نظر گرفته شد. بیشترین فراوانی به ترتیب مربوط به واحدهای V, Y, W و Z بوده و روند تغییرات تخلخل و مقاومت فشاری از کم به زیاد و از زیاد به کم به ترتیب در واحدهای V, W, Y, X مشاهده شد. همچنین، نفوذپذیری واحد ژئومکانیکی Z نسبت به دو واحد X و Y کمتر است، با این‌که تخلخل بیشتری دارد.

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی در مقایسه با روش‌های کی-میانگین و مبتنی بر چگالی، نتایج دقیق‌تری برای تعیین واحدهای ژئومکانیکی ارائه داده است. همچنین، این روش با معیار متریک "اقلیدسی استاندارد" و معیار پیوند "الگوریتم کمترین واریانس"، بالاترین میزان تطابق را با نتایج آزمایشگاهی (۹۴ درصد) داشته و شاخص سیلوئت برابر ۰/۴۸ به دست آمده است.

در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی الگوریتم‌های خوشه‌بندی، از داده‌های محدود آزمایشگاهی استفاده شد. در حالی که به‌کارگیری نتایج آنالیز روی کل طول مغزه (مانند آزمون‌های غیرمخرب، شاخص‌های طبقه‌بندی و نگاره مغزه) می‌تواند دقت ارزیابی واحدهای ژئومکانیکی را افزایش دهد. همچنین، واحدهای ژئومکانیکی تعیین‌شده در این مطالعه، مربوط به هر عمق حاوی داده (هر ۱۵ سانتی‌متر) هستند که در صورت نیاز، با ادغام اطلاعات و یک مرحله پردازش دیگر، می‌توان واحدهای ژئومکانیکی را برای فواصل طولانی‌تر تعریف کرد.

جدول ۳- متوسط نگاره‌ها برای پنج واحد ژئومکانیکی در سازند کنگان و دالان

<i>Z</i>	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>W</i>	<i>V</i>	<i>GMU</i>
۶۷/۳	۶۰/۴	۵۲/۷	۵۲/۳	۴۹/۰	<i>DTC</i> ($\mu\text{s}/\text{ft}$)
۱۱۶/۳	۱۰۵/۷	۹۲/۷	۹۴/۴	۸۶/۲	<i>DTS</i> ($\mu\text{s}/\text{ft}$)
۱۸/۰	۱۲/۰	۶/۰	۴/۰	۲/۰	<i>PHIE</i>
۲/۳۸	۲/۵۳	۲/۶۹	۲/۵۷	۲/۸۵	<i>RHOZ</i> (gr/cc)
۱۵/۳	۲۱/۱	۱۴/۱	۳۹/۸	۲۰/۱	<i>GR</i>

برای توصیف واحدهای ژئومکانیکی مطابق جدول بالا می‌توان بیان کرد که واحد ژئومکانیکی W عمدتاً آهک کلسیتی با تخلخل و نفوذپذیری پایین می‌باشد که دارای مقاومت بالایی است. واحد ژئومکانیکی V دارای تخلخل و نفوذپذیری بسیار پایین، مقاومت بسیار بالا و به صورت عمده دولومیتی است. واحد ژئومکانیکی X دارای تخلخل متوسط و نفوذپذیری بالا که مقاومت آن نیز مشابه واحد ژئومکانیکی W ، بالا (در حدود ۱۰۰ مگاپاسکال) می‌باشد. تخلخل و نفوذپذیری واحد ژئومکانیکی Y بالا می‌باشد که مقاومت متوسطی (در حدود ۵۰ مگاپاسکال) دارد. مقاومت و نفوذپذیری واحد ژئومکانیکی Z کم است و این در حالیکه مقدار تخلخل آن بالا می‌باشد.

بیشترین فراوانی دو واحد ژئومکانیکی X و Y با توجه به خواص مخزنی مناسب (تخلخل و نفوذپذیری بالا)، مربوط به دو بخش $K2$ و $K4$ است. دو واحد ژئومکانیکی V و W با تخلخل و نفوذپذیری پایین در بخش $K3$ قابل ملاحظه هستند که با توجه به مدول بالا برای انجام عملیات شکست هیدرولیکی، کاندید قابل ارزیابی می‌باشد. بخش $K1$ در سازند کنگان، عمدتاً شامل واحدهای ژئومکانیکی V و Z است که دارای خواص مخزنی مناسبی نیز نمی‌باشند.

۵- نتیجه گیری

تعیین واحدهای ژئومکانیکی در سازندهای هیدروکربنی به دلیل حجم بالای اطلاعات پتروفیزیکی و محدودیت داده‌های مغزه‌ای با چالش‌های قابل توجهی همراه است. استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی در این فرآیند موجب کاهش خطای

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
E_{dyn}	Gpa	مدول یانگ دینامیکی
v_{dyn}	-	نسبت پواسون دینامیکی
V_p	m/s	سرعت موج فشاری
V_s	m/s	سرعت موج برشی
ρ	kg/cm ³	چگالی
$RHOZ$	gr/cc	نگاره چگالی اندازه‌گیری شده در چاه
GR	-	نگاره گاما اندازه‌گیری شده در چاه
$PHIE$	-	نگاره تخلخل کل
DTC	$\mu s/ft$	نگاره کندی سرعت موج فشاری
DTS	$\mu s/ft$	نگاره کندی سرعت موج برشی

۷- منابعها

- [1] M. R. Aghakhani Emamqeyssi, M. Sanei, and M. Fatehi Marji, "Prediction of Elastic Parameters of Carbonate Reservoir from Well Logging Data Using Machine Learning and Multivariate Regression Methods," *JOURNAL OF ROCK MECHANICS*, vol. 7, no. 2, pp. 53-70, 2023.
- [2] M. B. Dusseault, "Geomechanical challenges in petroleum reservoir exploitation," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 15, pp. 669-678, 2011.
- [3] R. Nygaard, "Wabamun area CO2 sequestration project (wasp)," *Energy and environmental systems group (EES)*, 2010.
- [4] M. Uwiera-Gartner, M. Carlson, D. Walters, and C. Palmgren, "Geomechanical simulation of caprock performance for a proposed, low pressure, steam-assisted gravity drainage pilot project," in *SPE Canada Unconventional Resources Conference*, 2011: SPE, pp. SPE-148886-MS.
- [5] A. Shafiei and M. Dusseault, "Geomechanical properties of a conglomerate from Iran," in *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2008: Arma, pp. ARMA-08-053.
- [6] B. Mehrgini, H. Memarian, M. B. Dusseault, H. Eshraghi, B. Goodarzi, A. Ghavidel, M. N. Qamsari, and M. Hassanzadeh, "Geomechanical characterization of a south Iran carbonate reservoir rock at ambient and reservoir temperatures," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 34, pp. 269-279, 2016.
- [7] M. Nazari Sarem and M. A. Riahi, "Geomechanical unit modeling using seismic and well log data in one of the southwestern Iranian oilfields," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 10, no. 7, pp. 2805-2813, 2020.
- [8] A. Kadkhodaie, "The impact of geomechanical units (GMUs) classification on reducing the uncertainty of wellbore stability analysis and safe mud window design," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 91, p. 103964, 2021.
- [9] S. Gharechelou, A. Amini, B. Bohloli, V. Tavakoli, A. Ghahremani, and A. Maleki, "An integrated geomechanical model for a heterogeneous carbonate reservoir in SW Iran, using geomechanical unit concept," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 81, no. 7, p. 268, 2022.
- [10] S. Pourreza, F. Hajizadeh, and A. Kadkhodaie, "Estimation of geomechanical units using petrophysical logs, core and supervised intelligent committee machine method to optimize exploration drilling operations," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 16, no. 3, p. 149, 2023.
- [11] A. Shahnazi, M. Bahremandi, A. Ahmadi, M. H. Shahmoradi, M. Saemi, and A. M. Bagheri, "Core sample selection based on MRGC method utilizing geomechanical units," *Carbonates and Evaporites*, vol. 39, no. 2, p. 57, 2024.
- [12] M. L. C. Ruiz and A. Batezelli, "Correlation between geomechanical and sedimentary facies and

- their implications for flow unit definition in the pre-salt carbonate reservoir, Brazil," *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 141, p. 104958, 2024.
- [13] L. F. AL-Kaaby, S. Rashidi, R. Ghamarpoor, S. Hosseini, H. N. Al-Saedi, and E. G. Golab, "Determining the geomechanical units using rock physics methods," *Petroleum Research*, 2024.
- [14] V. Tavakoli, M. Naderi-Khujin, and Z. Seyedmehdi, "The end-Permian regression in the western Tethys: sedimentological and geochemical evidence from offshore the Persian Gulf, Iran," *Geo-Marine Letters*, vol. 38, pp. 179-192, 2018.
- [15] E. Fjaer, R. Holt, P. Horsrud, A. Raaen, and R. Risnes, "Geological aspects of petroleum related rock mechanics," *Developments in petroleum science*, vol. 53, pp. 103-133, 2008.
- [16] O. A. Abbas, "Comparisons between data clustering algorithms," *International Arab Journal of Information Technology (IAJIT)*, vol. 5, no. 3, 2008.
- [17] J. Oyelade, I. Isewon, O. Oladipupo, O. Emebo, Z. Omogbadegun, O. Aromolaran, E. Uwoghiren, D. Olaniyan, and O. Olawole, "Data clustering: Algorithms and its applications," in *2019 19th international conference on computational science and its applications (ICCSA)*, 2019: IEEE, pp. 71-81.



Determining geomechanical units using clustering methods and laboratory results for the Kangan and Dalan reservoir formations

Mohamadali Chamanzad¹; Majid Nikkhah²; Ahmad Ramezanzadeh³; Misha Pezeshki⁴; Imandokht Mostafavi⁴

1- Ph.D. student, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Associate Professor of Rock Mechanics, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Professor of Rock Mechanics, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

4- Pars Oil and Gas Company, Tehran, Iran.

Received: 07. October. 2023

Accepted: 21. December. 2023

(Corresponding author: m.nikkhah@shahroodut.ac.ir)

Keywords

Geomechanical unit
Clustering algorithm
Petrophysical logs
Porosity and permeability
Carbonate reservoirs

Final English Extended Abstract

Summary

Determining geomechanical units is the first step in understanding the reservoir conditions for advancing any engineering process. In this study, geomechanical units are determined for the Kangan and Dalan formations, the main reservoirs of the Persian Gulf. To reduce errors arising from observation and engineering judgment, three clustering methods—hierarchical clustering, density-based clustering, and k-means clustering—were employed using MATLAB software to determine the geomechanical units. The petrophysical logs of density, neutron, gamma, shear sonic, and compressional sonic are used as inputs for the clustering methods. The advantage of using these data lies in their comprehensiveness and availability. Subsequently, 43 core samples were classified based on porosity and permeability, and the correspondence between the determined geomechanical units and the classification of samples was identified. Additionally, the Silhouette index was used to evaluate the clustering quality for each method. Finally, five geomechanical units were determined using the hierarchical clustering algorithm, with the standard Euclidean metric and the linkage criterion of the minimum variance algorithm (ward).

Introduction

Determining geomechanical units significantly aids modelling and laboratory planning, especially given the limitations in accessing core samples from wells. Many studies have been conducted to determine geomechanical units based on engineering judgment for geomechanical modelling. The use of clustering methods in conjunction with laboratory results for determining geomechanical units has been less explored, which is addressed in this research by combining these two factors.

Methodology and Approaches

In this study, clustering was performed over a 300-meter interval in the Kangan and Dalan formations using three clustering methods: hierarchical clustering, density-based clustering, and k-means clustering, with the use of MATLAB software for clustering the geomechanical units. The best clustering method was determined based on permeability and porosity test results on plugs, as well as the Silhouette index (ranging from -1 for the lowest agreement to +1 for the highest agreement).

Results and Conclusions

Finally, five geomechanical units were established, showing a suitable distribution and distinct differentiation in the log values along the wellbore. The hierarchical clustering algorithm provided more acceptable results compared to the k-means and density-based methods for determining the geomechanical units. The hierarchical clustering algorithm, using the standard Euclidean metric and the minimum variance linkage criterion (ward), showed the best agreement with laboratory results (94%) and a Silhouette index of 0.48.