

روشی جهت خوشه بندی خصوصیات مخزن و بررسی مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی محاسبه شده با ستون سنگ شناسی و مقدار تخلخل حاصل از لاگ و مغزه

حامد امرایی

کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

hamedamraei0@gmail.com

دریافت خرداد ۱۴۰۴، پذیرش شهریور ۱۴۰۴

چکیده

تعیین گونه‌های سنگی و محاسبه پارامترهای الاستیسیته و مقاومتی سازند از اصلی‌ترین و پیچیده‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی- ژئومکانیکی مخازن هیدروکربوری بوده که محاسبه دقیق آن‌ها مبنای بسیاری از مطالعات مهندسی نفت و ژئومکانیک مخزن است. به این منظور در پژوهش حاضر در مرحله اول تعداد بهینه الکتروفاسیس‌ها با روش خوشه‌سازی چند تفکیکی بر پایه گراف⁽¹⁾ (MRGC)، برای چاه مورد مطالعه از ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی، نمودارهای معمول و مصنوعی (NDS² و VDL³) بدست آمد. الگوریتم معرفی شده شامل اعمال اثر لیتولوژی (سنگ‌شناسی) و نوع تخلخل در محاسبات جهت گروه بندی دقیق مخزن است. در این مرحله تعداد ۵ کلاس و گروه بهینه الکتروفاسیس‌ها با روش خوشه-سازی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC)، برای چاه مورد مطالعه بدست آمد. در مرحله دوم با توجه به اینکه محاسبه و تخمین ضرایب الاستیک و مقاومت سنگی از الزامات مطالعات ژئومکانیکی است و از طرفی داده مغزه در تمام طول چاه در دسترس نیست، به محاسبه مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول بالک، مدول برشی، میزان مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی تک محوری از نمودار صوتی دو قطبی برشی (DSI⁴) پرداخته شد. مقایسه مقادیر محاسبه شده مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی با تغییرات ستون سنگ شناسی و میزان تخلخل حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی و مغزه گواه این است که با افزایش تخلخل مغزه و لاگ میزان مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی کاهش یافته پس بنابراین تخلخل با مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی رابطه عکس دارد. در این پژوهش، ضریب همبستگی مدول بالک محاسبه شده با تخلخل ($R^2=0.82$)، مدول برشی ($R^2=0.73$)، مدول یانگ ($R^2=0.77$)، ضریب پواسون ($R^2=0.049$)، مقاومت فشاری تک محوره ($R^2=0.84$) و مقاومت کششی تک محوره ($R^2=0.65$) بدست آمد.

کلمات کلیدی: گروه بندی مخزن، خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف، پارامترهای الاستیسیته و مقاومتی.

¹ Multi- resolution graph- based clustering

² Neutron- Density Separation

³ Velocity Deviation Log

⁴ Dipole Shear Sonic Imager

۱- مقدمه

تعیین گونه‌های سنگی بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی- پتروفیزیکی و مطالعات ژئومکانیکی سازند از اصلی‌ترین و پیچیده‌ترین پارامترها در مخازن هیدروکربنی بوده که در صنعت نفت و گاز اشراف کامل بر آنها جهت مدیریت مخازن و جلوگیری از هدر رفت هزینه‌ها غیر قابل انکار است. دسته بندی داده‌ها به گروه‌هایی معین، به نحوی که داده‌هایی که در یک گروه قرار گرفته دارای بیش‌ترین شباهت و همبستگی با همان گروه و در عین حال بیش‌ترین تفاوت با گروه‌های دیگر باشد را خوشه‌بندی یا کلاس بندی می‌نامند. در خوشه‌بندی هر خوشه‌ای که به دست می‌آید دارای ویژگی‌های مشترک و خاصی بوده که موجب تفکیک آن از مابقی خوشه‌ها می‌گردد [۱۳].

خوشه‌بندی یک روش آموزش و یادگیری است که هدف آن پیدا کردن گروه‌هایی از داده‌ها، در بین ورودی‌ها (نمودارهای چاه‌پیمایی) تعریف شده برای آن است. در واقع می‌توان گفت که در هر خوشه داده‌هایی مخصوص به خود، قرار دارد. الگوریتم خوشه بندی چند تفکیکی بر پایه گراف جهت شناسایی و تشخیص خوشه‌ها از داده‌های ورودی، برای هر کلاس به محاسبه اندیس همسایگی می‌پردازد. سپس دسته‌های طبیعی کوچکی از نقاط که به آنها دسته‌های جذب گویند، بر اساس استفاده از نزدیک‌ترین همسایه برای هر نقطه بوجود می‌آیند. به غیر از تشکیل گروه‌هایی بر اساس اندیس همسایگی، به منظور تعیین جذب طبیعی، تعدادی خوشه بهینه بر مبنای اندیس شاخص کرنل (KRI) محاسبه می‌گردد. این اندیس ترکیبی از اندیس همسایگی، فاصله و تابع وزن داده‌ها است که درجه همسایگی را تعیین می‌کند و سپس در ادامه، بر اساس داده‌هایی که از مرحله قبل تعیین شده، با ادغام دسته‌های جذب، خوشه‌های نهایی تشکیل می‌شوند. این تکنیک یک روش نوین و قدرتمند آماری- عصبی برای تخمین پارامترهای مخزنی است که مشکل بعد را از بین می‌برد و اطلاعات مفیدی در خصوص رخساره‌های زمین شناسی از ساختار خود داده‌ها را در دسترس قرار می‌دهد [۱۳، ۱۴، ۱۶]. روش یاد شده از معدود روش‌های غیر پارامتریک، و دقیق جهت تحلیل داده‌های حاصل شده از نمودارهای چاه‌پیمایی است [۱۳]. قدرت شناسایی الگوهای طبیعی موجود در نگاره‌ها، بی‌نیازی از دانش قبلی در خصوص داده‌ها، پیشنهاد بهینه و خودکار تعداد خوشه‌ها و عدم مشکل بعد از مزایای دیگر روش MRGC در نرم افزار ژئولاگ می‌باشد [۱۶]. سلیمانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای مخازن گروه بنگستان میدان منصوری به تشخیص انواع رخساره‌های سنگی و تخمین تراوایی به کمک موج استونلی پرداختند. نتایج بررسی‌ها گواه همبستگی بالای موج استونلی در تخمین تراوایی با تراوایی مغزه بود [۱۵]. امیرسرداری در سال ۲۰۲۰ به تعیین گونه‌های سنگی مخزنی کربناته در خلیج فارس بر اساس آنالیز مغزه و داده‌های معمول پتروفیزیکی پرداخت [۵]. عزتی و همکاران در سال ۲۰۲۰ جهت تحلیل پایداری چاه و مدل‌سازی ژئومکانیکی به محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی مخزن کربناته سروک در سه حلقه چاه یکی از میدین نفتی در دشت آبادان در جنوب غربی ایران پرداختند [۸]. عمارلو و همکاران در سال ۲۰۲۵ به توسعه یک مدل ژئومکانیکی یک بعدی در یک میدان نفتی در جنوب غربی ایران پرداختند، در این پژوهش از تطابق داده‌های اشباع آب به دست آمده از آنالیز ویژه مغزه و تفسیرهای چاه‌پیمایی به منظور کلاس بندی مخزن استفاده شد [۶]. خامه‌چی و عباسی در سال ۱۴۰۱، به محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ مخزن با هدف ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه برای بررسی ایجاد شکاف هیدرولیکی در یکی از چاه‌های میدان سراجا پرداختند [۱]. صارم و ابراهیم‌آبادی در سال ۱۴۰۱، به محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی

سنگ مخزن جهت ساخت مدل ژئومکانیکی برای مخزن آسماری میدان شادگان با هدف تعیین پنجره ایمن گل حفاری و معرفی راستای بهینه حفاری پرداختند [۳]. سعادت‌نیا و همکاران در سال ۱۴۰۱، پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ مخزن را برای ساخت مدل ژئومکانیکی و بررسی یکپارچگی پوش سنگ برای یکی از میداین بزرگ کربناته جنوب غرب ایران محاسبه نمودند [۲]. با توجه به اینکه تعیین گونه‌های سنگی و بررسی‌های ژئومکانیکی سازند جهت تولید موثر، توسعه، حفاری‌های آتی در میدان و بهره‌برداری بهینه از آن غیرقابل انکار بوده و از آنجا که نمودارهای چاه‌پیمایی به عنوان ابزاری کم‌هزینه و در دسترس تقریباً در تمامی چاه‌های یک میدان موجودند، بدین منظور در این پژوهش به معرفی روشی دقیق و بهینه جهت تعیین گونه‌های سنگی بر مبنای نمودارهای پتروفیزیکی مرسوم و مصنوعی با استفاده از روش خوشه بندی چند تفکیکی بر پایه گراف پرداخته شد و سپس مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی از نمودارهای چاه‌پیمایی محاسبه گردید و در انتها پارامترهای بدست آمده با تغییرات ستون سنگ شناسی و میزان تخلخل حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی و مغزه مقایسه گردیدند.

۲) موقعیت منطقه مورد مطالعه

میدان نفتی مورد مطالعه در منطقه دشت آبادان در پی برداشت‌های لرزه نگاری دو بعدی کشف گردید. این میدان دارای ساختمانی با شیب ملایم و مساحتی در حدود ۲۲۰ کیلومتر مربع است. ساختار میدان مذکور حاوی چندین مخزن کرتاسه شامل سازندهای ایلام، سروک و فهلیان بوده که سازند ایلام مخزن اصلی تولید کننده نفت آن است [۱۰]. مخزن ایلام در چاه مورد مطالعه در عمق ۲۹۰۵ تا ۳۰۳۰ متری حاوی نفت با گرانیوی ۲۲-۲۳ درجه API می‌باشد [۱۰].

۳) مواد و روش‌ها

پژوهش مورد نظر بر روی مخزن ایلام با لیتولوژی آهک، دولومیت و اندکی شیل به عنوان اصلی‌ترین لایه مخزنی میدان مذکور انجام گردیده است. برای انجام پژوهش حاضر از مجموعه داده‌های کامل نگاره‌های معمول، داده‌های تخلخل مغزه و نمودار صوتی دو قطبی برشی مربوط به عمق ۲۹۰۵ تا ۳۰۳۰ متری چاه A میدان مورد مطالعه استفاده گردید. بدین منظور در مرحله اول پژوهش حاضر با توجه به اینکه تعیین گونه‌های سنگی از اصلی‌ترین مراحل جهت بررسی مخازن هیدروکربوری به حساب آمده به معرفی الگوریتمی شامل اعمال اثر لیتولوژی (سنگ‌شناسی) و نوع تخلخل جهت گروه بندی و کلاس بندی دقیق مخزن مورد مطالعه با روش خوشه‌سازی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC)، از ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی، نمودارهای معمول و مصنوعی (NDS و VDL) پرداخته شد. سپس در مرحله دوم به محاسبه مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول بالک، مدول برشی و میزان مقاومت فشاری تک محوری از نمودار صوتی دو قطبی برشی (DSI) با هدف مقایسه با تغییرات ستون لیتولوژی و مقدار تخلخل سازند پرداخته شد.

۴) بحث و نتایج

نتایج حاصل از این پژوهش در دو بخش اصلی ذیل آورده شده است.

۴-۱) تعیین گونه‌های سنگی در مخزن ایلام چاه مورد مطالعه

در این پژوهش تعداد بهینه الکتروفاسیس‌ها با روش خوشه‌سازی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC)، برای چاه مورد مطالعه بدست آمد. جهت تعیین رخساره‌های الکتریکی و افزایش دقت کار از مجموعه کامل همه نگاره‌ها استفاده شد. هدف این بود که یکسری الگوهای پنهان از داده‌های نگاره‌ها بدست آید تا بتوان با دقت بهتر و بیشتری به گروه‌بندی و خوشه‌بندی پرداخت. برای پیدا کردن این الگوهای پنهان دو نگاره مصنوعی NDS و VDL به کمک نمودارهای معمول ساخته شدند. با توجه به اینکه در این قسمت از کار، هدف اعمال نوع تخریل مخزن و خوشه‌بندی بر مبنای نوع تخریل‌ها و اطلاعات سنگ شناسی بود. در ابتدا نگاره VDL بصورت مصنوعی از تلفیق نگاره‌های صوتی با نمودار نوترون-دانشیته ساخته شد [۴]. این نگاره ابزاری مهم جهت بدست آوردن و دانستن نوع تخریل در کربناته‌ها به حساب می‌آید. این نمودار در واقع اختلاف بین مقادیر موج تراکمی واقعی (V_{preal}) و موج تراکمی مصنوعی (V_{psyn}) می‌باشد [۴]. موج تراکمی واقعی طبق رابطه ۱ به دست می‌آید. در این رابطه، DT_{log} میزان قرائت نمودار صوتی بر حسب $\mu s/ft$ می‌باشد [۱۱]:

$$V_{P_{real}} = \frac{304.8}{DT_{log}} \quad \text{رابطه ۱:}$$

موج تراکمی مصنوعی را نیز می‌توان طبق رابطه ۲ بدست آورد [۱۱]:

$$V_{P_{syn}} = \frac{304.8}{DT_{syn}} \quad \text{رابطه ۲:}$$

برای محاسبه نمودار صوتی مصنوعی^۵ (DT_{syn}) از روابط تخریل استفاده می‌شود. تخریل حاصل از نمودار صوتی از طریق رابطه ۳ بدست می‌آید [۱۱]. در این رابطه به جای تخریل صوتی، تخریل نوترون یا چگالی قرار داده می‌شود و نمودار DT_{syn} از طریق این رابطه محاسبه می‌شود. همچنین مقدار زمان گذر موج صوتی در سیال چاه^۶ (DT_{fl}) نیز بر اساس نوع سیال حفاری درون چاه می‌بایست در نظر گرفته شود.

$$\phi_S = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \rightarrow \phi_{ND} = \frac{DT_{syn} - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}} \quad \text{رابطه ۳:}$$

بدین ترتیب می‌توان نمودار انحراف سرعت را طبق رابطه ۴ از اختلاف حاصل از دو نمودار سرعت واقعی و سرعت مصنوعی به دست آورد [۱۱]:

$$VDL = V_{P_{real}} - V_{P_{syn}} \quad \text{رابطه ۴:}$$

⁵ Synthetic Sonic Log

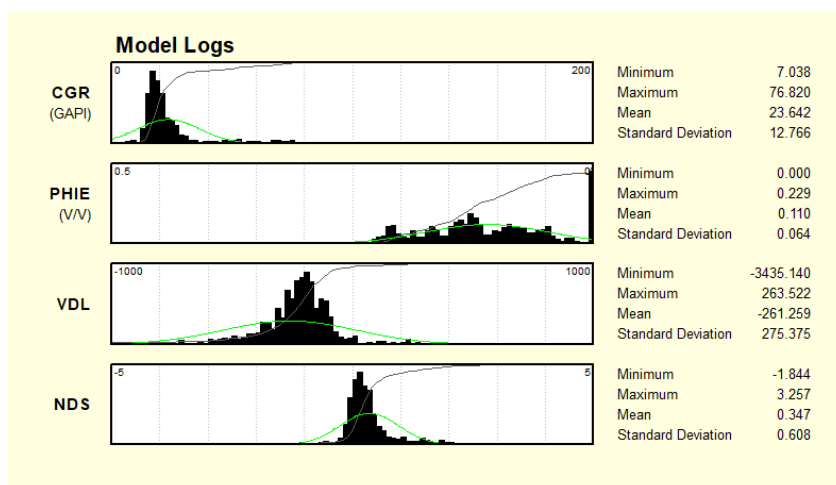
⁶ Fluid Interval Transit Time

بر اساس روابط گفته شده نمودار انحراف سرعت (VDL) برای چاه مورد مطالعه ساخته شد. در ادامه نگراره مصنوعی NDS از جدایش نمودارهای نوترون و دانسیته از رابطه ۵ محاسبه گردید [۱۲].

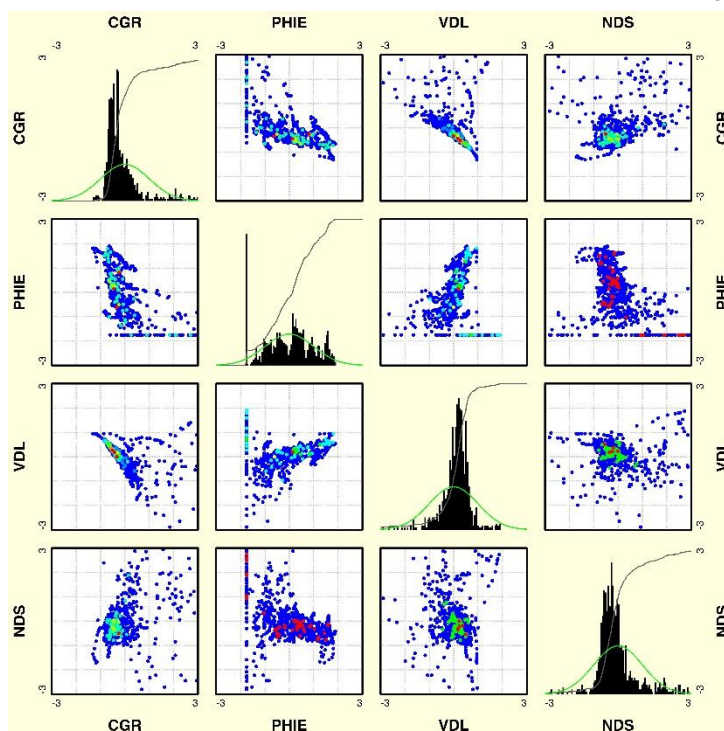
$$NDS = \left[\frac{(RHOB-1.95)}{(2.95-1.95)} \right] * 10 - \left[\frac{(0.45-NPHI)}{((-0.15)-0.45)} \right] * 10$$

رابطه ۵:

جهت خوشه‌بندی از روش MRGC در ابتدا با روش رگرسیون گام به گام ورودی‌های مدل (شکل ۱) در نرم‌افزار ژئولاگ انتخاب شدند، در ادامه داده‌های ورودی شبکه نرم‌الایز گردید و سپس ورودی‌های مدل کنترل گردید (شکل ۲) و در آخر از روش سعی و خطا پارامترهای بهینه مدل شامل تعداد نورون‌ها و تعداد کلاس‌ها بدست آمدند.



شکل ۱ ورودی‌های بکار گرفته شده در گروه بندی مخزن مورد مطالعه به روش MRGC.

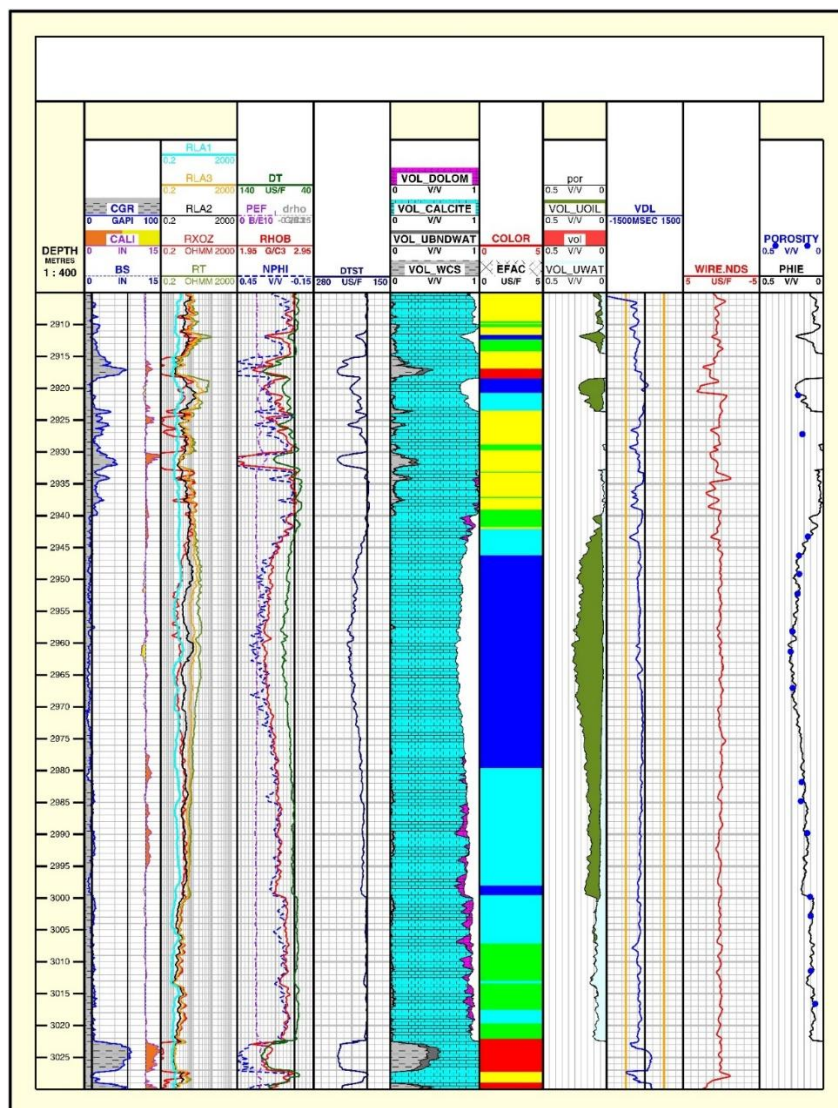


شکل ۲ مرحله کنترل کردن داده‌های ورودی جهت خوشه بندی به روش MRGC بعد از نرمالایز کردن.

در نهایت مخزن مورد مطالعه به ۵ گروه تقسیم و تفکیک شد (شکل ۳). که ویژگی‌های هر یک در جدول ۱ نشان داده شده است. در شکل شماره ۳ نمودارهای موجود از چاه مورد مطالعه، گروه‌بندی و کلاس‌بندی انجام شده برای چاه مذکور، نمودارهای مصنوعی ساخته شده انحراف سرعت و NDS نشان داده شده است.

جدول ۱ ویژگی و تعداد گروه‌های بدست آمده از روش MRGC در چاه مورد مطالعه

NDS	VDL	PHIE	CGR	رنگ هر گروه	گروه بندی
۰/۰۹	-۱۷۶/۹۶	۰/۱۸	۱۸/۳۳	آبی پررنگ	۱
۰/۱۹	-۱۸۸/۴۶	۰/۱۴	۱۷/۲۸	آبی کم رنگ	۲
۰/۱۸	-۳۰۵/۳۲	۰/۰۹	۲۱/۲۱	سبز	۳
۰/۶۴	-۳۴۰/۹۷	۰/۰۴	۲۹/۶۹	زرد	۴
۲/۰۸	۹۹/۶۱	۰/۰۰	۶۴/۱۶	قرمز	۵



شکل ۳ نمودارهای موجود از چاه مورد مطالعه به همراه گروه‌بندی مخزن و نمودارهای ساخته شده VDL و NDS.

۴-۲) محاسبه پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ مخزن

محاسبه و تخمین ضرایب الاستیک و مقاومت سنگی را می‌توان از پایه‌ای ترین مطالعات ژئومکانیک مخزن دانست [۷]. نمودار سرعت موج برشی^۷ (DTS) و سرعت موج فشارشی^۸ (DTC) از پارامترهای اساسی در محاسبات مخازن هیدروکربنی هستند که با ترکیب این دو نمودار با نمودار چگالی^۹ (RHOB) می‌توان ثابت‌های الاستیک سنگ مخزن را محاسبه نمود. از آن جایی که سرعت موج برشی از پارامترهای مختلف سنگ تأثیر می‌پذیرد، می‌تواند بیانگر خصوصیات فیزیکی سنگ نیز باشد. از این رو، سرعت موج برشی در تعیین نوع لیتولوژی سازند، سیال منفذی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند منجمله؛ مدول برشی، مدول حجمی و غیره کاربرد دارد. اما نمودار موج برشی با ابزارهای متداول اندازه‌گیری ویژگی‌های مخزنی قابل برداشت نمی‌باشد. در نتیجه اطلاعات این نمودار در تمامی چاه‌ها در دسترس نیست. یکی از ابزارهایی که اطلاعات موج برشی را بصورت پیوسته در اختیار قرار می‌دهد، ثبت موج کامل بوسیله ابزار صوتی دوقطبی برشی (DSI) است. این ابزار هر دو موج برشی و فشارشی را برداشت می‌کند. برای محاسبه پارامترهای مذکور از روابط جدول ۲ استفاده گردید [۷].

جدول ۲ فرمول‌ها و روابط استفاده شده جهت محاسبه پارامترهای الاستیک در مخزن مورد مطالعه [۱، ۹]

$v_d = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	ضریب پواسون	رابطه ۶
$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$	ضریب یانگ دینامیک	رابطه ۷
$G = \rho_b * V_s^2$	ضریب برشی	رابطه ۸
$K_d = \frac{E_{dyn}}{3(1 - 2\nu)}$	ضریب حجمی	رابطه ۹
$E_s = 0.7 * E_d$	ضریب یانگ استاتیک	رابطه ۱۰
$\nu_s = \nu_d$	نسبت پواسون	رابطه ۱۱
$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \nu)}$	ضریب برشی استاتیک	رابطه ۱۲
$K_s = \frac{E_s}{3(1 - 2\nu)}$	ضریب حجمی استاتیک	رابطه ۱۳

⁷ Shear wave velocity

⁸ Compressive Wave velocity

⁹ Density log

E_d ضریب یانگ دینامیک، ρ چگالی، V_s سرعت موج برشی، V_p سرعت موج فشاری، ν ضریب پواسون، G ضریب برشی و K ضریب حجمی می‌باشد. پارامترهای مقاومتی سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مقاومت کششی (T) و زاویه اصطکاک داخلی سنگ (ϕ) است. جهت به دست آوردن نمودار پیوسته‌ای از مقاومت فشاری تک-محوری نیز باید از رابطه‌ی تجربی حاصل از آزمایشگاه استفاده نمود. رابطه مذکور را می‌توان از رسم منحنی مربوط به مقادیر UCS در مقابل تخلخل یا ضریب یانگ استاتیک برقرار نمود. در مطالعه حاضر به دلیل کربناته بودن توالی مخزن مورد مطالعه، از رابطه ۱۴ استفاده شد.

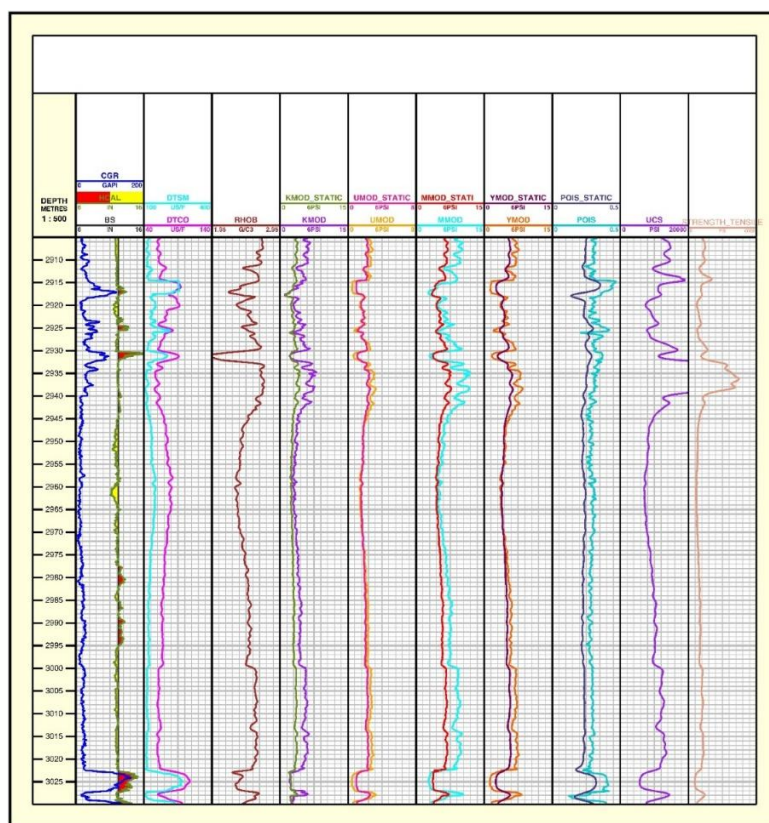
$$UCS = 2.65 \times (E_{sta}^{0.8} / \phi_e^{0.2}) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در آن UCS مقاومت فشاری تک محوری، E_{sta} مدول یانگ استاتیک و ϕ_e تخلخل موثر در طول مخزن می‌باشد. مقاومت کششی سنگ (Tensile Strength) بر اساس نوع سازند غالباً در حدود $\frac{1}{12}$ تا $\frac{1}{8}$ مقاومت فشاری تک محوری است. جهت محاسبه زاویه اصطکاک داخلی سنگ (ϕ) از رابطه پلامب (Plumb) در سال ۱۹۹۴ استفاده می‌شود که تخلخل حاصل از نمودار نوترون (NPHI) و حجم شیل متغیرهای این معادله‌اند [۹]:

$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad \text{رابطه ۱۵}$$

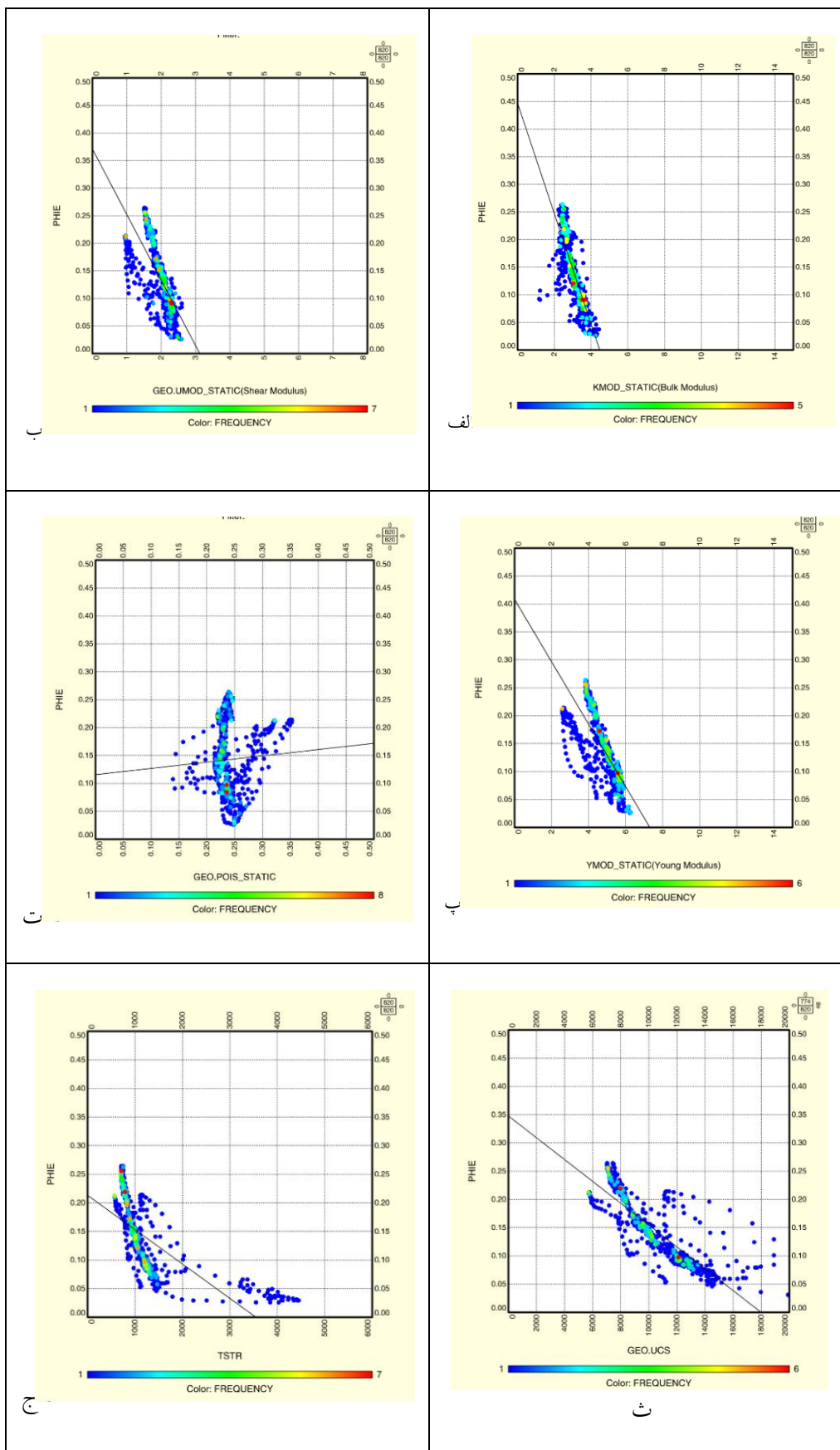
$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

در نهایت پارامترهای الاستیسیته مخزن مورد مطالعه محاسبه شد. تغییر مقادیر محاسبه شده در این پارامترها بخوبی با تغییرات ستون سنگ شناسی و مقدار تخلخل سازند قابل مقایسه است. شکل ۴ پارامترهای محاسبه شده الاستیک و مقاومتی مخزن ایلام چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۴ پارامترهای الاستیک و مقاومتی محاسبه شده برای سازند ایلام چاه مورد مطالعه.

ضریب همبستگی (R^2) مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی محاسبه شده در مقابل تخلخل سازند ایلام در چاه مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ مدول الاستیک و پارامترهای مقاومتی محاسبه شده در مقابل تخلخل در مخزن ایلام چاه مورد مطالعه، (الف) ضریب همبستگی مدول بالک محاسبه شده با تخلخل ($R^2=0.82$)، (ب) مدول برشی ($R^2=0.73$)، (پ) مدول یانگ ($R^2=0.77$)، (ت) ضریب پواسون ($R^2=0.049$)، (ث) مقاومت فشاری تک محوره ($R^2=0.84$) و (ج) مقاومت کششی تک محوره ($R^2=0.65$).

۵) نتیجه گیری

این مطالعه با هدف تعیین گونه‌های سنگی و بررسی‌های ژئومکانیکی با تکیه بر نمودارهای مرسوم، مصنوعی و ویژه چاه پیمایی در سازند ایلام یکی از میداین نفتی جنوب غرب ایران انجام گردیده است. در پژوهش حاضر الگوریتمی شامل اعمال اثر لیتولوژی (سنگ‌شناسی) و نوع تخلخل در محاسبات جهت گروه بندی دقیق مخزن با روش خوشه‌سازی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC) از ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی، نمودارهای معمول و مصنوعی (VDL و NDS) معرفی گردید. مخزن مورد مطالعه بر اساس روش معرفی شده به ۵ کلاس و گروه بر مبنای خواص خود تفکیک گردید. با بررسی نتایج کلاس‌بندی مخزن و بررسی‌های پتروفیزیکی نیز مشخص گردید که گروه ۱ دارای بیشترین تراوایی و گروه ۴ و ۵ کمترین میزان تراوایی را در این مخزن دارند. در ادامه مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول بالک، مدول برشی و میزان مقاومت فشاری تک محوری از نمودار صوتی دو قطبی برشی (DSI) محاسبه گردید. مقایسه مقادیر محاسبه شده مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی با تغییرات ستون سنگ شناسی و میزان تخلخل حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی و مغزه گواه این است که با افزایش تخلخل مغزه و لاگ میزان مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی کاهش یافته پس بنابراین تخلخل با مدول‌های الاستیک و پارامترهای مقاومتی رابطه عکس داشته که در تمام بخش‌های سازند ایلام چاه مورد مطالعه قابل مشاهده است. در این پژوهش، ضریب همبستگی مدول بالک محاسبه شده با تخلخل ($R^2=0.82$)، مدول برشی ($R^2=0.73$)، مدول یانگ ($R^2=0.77$)، ضریب پواسون ($R^2=0.049$)، مقاومت فشاری تک محوره ($R^2=0.84$) و مقاومت کششی تک محوره ($R^2=0.65$) بدست آمد.

سپاس و قدردانی

از داوران مقاله آقایان دکتر بهمن سلیمانی (استاد دانشگاه شهید چمران اهواز) و دکتر بابک سامانی (دانشیار دانشگاه شهید چمران اهواز) تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- [۱] خامه چی، ا.، و عباسی، ام.، ۱۴۰۱. مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی و بررسی ایجاد شکاف هیدرولیکی در یکی از چاه‌های سراجه جهت بهبود تولید (مطالعه موردی)، چهارمین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت نوآوری و فناوری، تهران.
- [۲] سعادت نیا، ن.، شرقی، ی.، مقدسی، ج.، عزتی، م.، ۱۴۰۱. مدل‌سازی ژئومکانیکی و بررسی یکپارچگی پوش سنگ برای یکی از میدان‌های بزرگ کربناته جنوب غربی ایران، نشریه علمی ژئومکانیک نفت.
- [۳] صارم، م.، و ابراهیم‌آبادی، آ.، ۱۴۰۱. طراحی ژئومکانیکی میدان نفتی شادگان به منظور مدل‌سازی و برنامه‌ریزی چاه‌های ERD در سازندهای بنگستان، نشریه علمی ژئومکانیک نفت.

- [4] ANSELMETTI, F.S. and EBERLI, G.P., 1999. The velocity-deviation log: A tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs. *AAPG bulletin*, **83**(3), pp.450-466.
- [5] AMIRSARDARI, M., 2020. Reservoir Rock Typing Based on Petrophysical and Special Core Data in one of the Carbonate Reservoir in Perisan Gulf. *KJES*; **6** (2) :235-254
- [6] AMMARLOO, H., ZOUGHY, P., MEHRABAN, L. F., & AMIRI, M. (2025). Evaluation of empirical relationships in carbonates by developing a 1D mechanical earth model in an oil field in Southwestern Iran. *Results in Engineering*, **26**, 104799.
- [7] AL-QAHTANI, M.Y. and ZILLUR, R., 2001, March. A mathematical algorithm for modeling geomechanical rock properties of the Khuff and Pre-Khuff reservoirs in Ghawar field. *In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference* (pp. SPE-68194). SPE.
- [8] EZATI, M., AZIZADEH, M., RIAHI, M.A., FATTAHPOUR, V. and HONARMAND, J., 2020. Wellbore stability analysis using integrated geomechanical modeling: a case study from the Sarvak reservoir in one of the SW Iranian oil fields. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, pp.1-19.
- [9] GHOLAMI, R., RASOULI, V., AADNOY, B. and MOHAMMADI, R., 2015. Application of in situ stress estimation methods in wellbore stability analysis under isotropic and anisotropic conditions. *Journal of Geophysics and Engineering*, **12**(4), pp.657-673.
- [10] JAMES, G.A. and WYND, J.G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *AAPG bulletin*, **49**(12), pp.2182-2245.
- [11] KADKHODAIE, R., KADKHODAIE, A. and REZAEI, R., 2021. Study of pore system properties of tight gas sandstones based on analysis of the seismically derived velocity deviation log: a case study from the Perth Basin of western Australia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **196**, p.108077.
- [12] OHEN, H.A., AJUFO, A.O. and ENWERE, P.M., 1996, January. Laboratory NMR relaxation measurements for the acquisition of calibration data for NMR logging tools. *In SPE Western Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers.
- [13] PEREZ, H.H., DATTA-GUPTA, A. and MISHRA, S., 2005. The role of electrofacies, lithofacies, and hydraulic flow units in permeability predictions from well logs: a comparative analysis using classification trees. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **8**(02), pp.143-155.
- [14] SFIDARI, E., KADKHODAIE-ILKHCHI, A. and NAJJARI, S., 2012. Comparison of intelligent and statistical clustering approaches to predicting total organic carbon using intelligent systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **86**, pp.190-205.
- [15] SOLEIMANI, B., MORADI, M. and GHABEISHAVI, A., 2018. Stoneley wave predicted permeability and electrofacies correlation in the Bangestan Reservoir, Mansouri Oilfield, SW Iran. *Geofisica internacional*, **57**(2), pp.107-120.
- [16] YE, S.J. and RABILLER, P., 2000, January. A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering. *In SPWLA 41st annual logging symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

A Method for Reservoir Property Clustering and Analysis of Elastic Modulus and Strength Parameters Calculated Using Lithology Column and Porosity from Logs and Core Data

Hamed Amraei

MSc in Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

hamedamraei0@gmail.com

Received: June 2025, Accepted: September 2025

Abstract

Determining rock types and calculating the elastic and strength parameters of formations are among the most fundamental and complex petrophysical–geomechanical parameters in hydrocarbon reservoirs. Their accurate calculation forms the basis for many petroleum engineering and reservoir geomechanics studies. To this end, in the first stage of the present research, the optimal number of electrofacies was obtained for the studied well using a multi-partition clustering method based on the MRGC¹⁰ graph, derived from a combination of geological data and both conventional and synthetic logs, including VDL¹¹ and NDS¹². The proposed algorithm incorporates lithology effects and porosity types into calculations for accurate reservoir grouping. At this stage, five optimal electrofacies classes and groups were identified for the studied well using the MRGC-based clustering method. In the second stage, considering that calculating and estimating elastic and rock strength coefficients is essential in geomechanical studies – and since core data is not available throughout the entire well – calculations were made for Young’s modulus, Poisson’s ratio, bulk modulus, shear modulus, and uniaxial compressive strength using dipole sonic imaging (DSI) logs. The comparison of calculated elastic moduli and strength parameters with variations in the lithology column and porosity from petrophysical evaluation and core data confirms that as core and log porosity increase, the values of elastic moduli and strength parameters decrease. Hence, porosity has an inverse relationship with elastic moduli and strength parameters. In the present study, the correlation coefficient between the calculated bulk modulus and porosity was found to be ($R^2 = 0.82$), shear modulus ($R^2 = 0.73$), Young’s modulus ($R^2 = 0.77$), Poisson’s ratio ($R^2 = 0.049$), uniaxial compressive strength ($R^2 = 0.84$), and uniaxial tensile strength ($R^2 = 0.65$).

Keywords: Reservoir Grouping, Multi-Resolution Graph-Based Clustering, Elasticity and Strength Parameters

¹⁰ Multi-resolution graph-based clustering

¹¹ Velocity Deviation Log

¹² Neutron- Density Separation