

مدل سازی سه بعدی واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای در یکی از میادین گازی جنوب ایران

پوریا ادب‌نژاد^{۱*}، علی کدخدایی^۲، غلامحسین نوروزی^۱ و امیرشهریار رستمی^۲

۱- پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، ایران

۳- شرکت نفت و گاز پارس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۱۷

چکیده

در این مطالعه ابتدا مدل‌های الاستیک دینامیک مانند مدول یانگ، بالک و برشی، نسبت پواسون و مقاومت فشاری تک‌محوری سازند با استفاده از سرعت‌های امواج برشی و تراکمی که توسط نگارگر صوتی دوقطبی فراهم آمده‌اند، در ۸ چاه محاسبه شدند. در ۵ چاه که داده‌های سرعت برشی موجود نبودند، سرعت این امواج از طریق روابط تجربی، همبستگی چند متغیره و رابطه گرینبرگ-کاستاگنا تخمین زده شد. پس از محاسبه مدول‌های الاستیک دینامیک، این مقادیر با استفاده از فرمول‌های تجربی به دست آمده از طریق تعیین سرعت امواج برشی و تراکمی در ۱۴ نمونه مغزه و آزمایش چکش اشمیت در یکی از میدان‌های مجاور به مدول‌های استاتیک تبدیل شدند. سپس، حجم مدول‌های استاتیک محاسبه شده با استفاده از خوشه‌بندی گراف‌پایه با توان تفکیک چندگانه (MRGC) و از طریق ایجاد واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از این خوشه‌ها کاهش یافت. ایجاد یک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی با استفاده از این واحدهای ژئومکانیکی می‌تواند تخمینی قابل اطمینان از خواص مخزنی از نقطه نظر مقاومت سنگ‌های مخزنی مهیا کند. پس از تولید واحدهای ژئومکانیکی توسط خوشه‌بندی گراف‌پایه با توان تفکیک چندگانه (MRGC)، این واحدها از طریق مقایسه با داده‌های چاه‌پیمایی مانند نگارگر قطرسنجی، اشعه گاما و تخلخل نوترون و همچنین داده‌های مغزه مورد بررسی قرار گرفتند. این مقایسه، انطباق خوبی میان این داده‌ها و واحدهای ژئومکانیکی نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه بیانگر تاثیرپذیری بالای واحدهای ژئومکانیکی از تخلخل و محتوای رس سنگ‌های سازندی هستند. در نهایت مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی مخزن با استفاده از این واحدهای ژئومکانیکی و مدل امپدانس صوتی مخزن که حاصل از روش وارون‌سازی و الگوریتم ژنتیک است، ساخته شد. از مدل امپدانس صوتی به عنوان پارامتر دوم کوکریجینگ برای مدل‌سازی استفاده شده است. مقادیر مدل ژئومکانیکی ساخته شده در محدوده یکی از چاه‌ها که برای مدل‌سازی استفاده نشده بود، دارای انطباقی حدود ۷۷٪ با داده‌های چاه است. این امر بیانگر اعتبار بالای روش مدل‌سازی مورد استفاده است.

کلمات کلیدی: واحدهای ژئومکانیکی، خوشه‌بندی گراف‌پایه با توان تفکیک چندگانه، مدل‌های الاستیک، داده‌های استاتیک، داده‌های دینامیک، وارون‌سازی لرزه‌ای

مقدمه

در اختیار قرار دهد.

روش تحقیق

داده‌های موجود

اطلاعات موجود و در دسترس، شامل داده‌های نگارگر صوتی دوقطبی، نگارهای چگالی، تخلخل نوترون، اشعه گاما و قطر سنجی برای ۸ چاه می‌باشد. علاوه بر این نگارها، داده‌های لرزه‌ای سه بعدی پس از برانبارش^۱، داده‌های مرتبط با افق‌های سازندی و سرسازندها و شوت‌های کنترل^۲ نیز برای محدوده مدل‌سازی در دسترس بوده‌اند. از جمله دیگر داده‌های مورد استفاده، اندازه‌گیری‌های استاتیک در میدان سلمان واقع در مجاورت میدان گازی مورد مطالعه بوده است.

تخمین سرعت امواج برشی

از آنجایی که در چاه‌های چهار تا هشت داده‌های مرتبط با سرعت امواج برشی موجود نبود، می‌بایست این مقادیر تخمین زده می‌شدند. به این منظور از نرم‌افزار ژئونگارگر^۳ و مدل گرینبرگ-کاستاگنا^۴ برای محاسبه سرعت امواج برشی در چاه‌های یک تا سه استفاده شد [۶]. مقادیر به دست آمده در این روش علی‌رغم ضریب انطباق بالا با سرعت‌های امواج برشی اصلی، مقادیر کمتری را نسبت به آنها نشان می‌دادند. این امر به علت کمبود داده‌های مرتبط با لیتولوژی سازندی و استفاده از مقادیر پیش فرض به جای این داده‌ها در نرم‌افزار است. بنابراین از مدل گرینبرگ-کاستاگنا برای تخمین سرعت امواج برشی استفاده نشد. روش بعدی ایجاد یک رابطه تجربی میان سرعت‌های امواج برشی و تراکمی در خود میدان و یا یکی از میداین مجاور با لیتولوژی کم و بیش یکسان با میدان مورد مطالعه است.

با توسعه و پیشرفت روز افزون روش‌ها و تکنیک‌های استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی، مطالعات بیشتر و دقیق‌تری بر روی مخازن هیدروکربوری انجام می‌شود. ارزیابی مخازن هیدروکربوری با استفاده از روش‌های لرزه‌نگاری، مشاهده و کنترل بازیافت ثانویه، افزایش میزان تولید نفت و جزئیات نگار صوتی با هم ترکیب شده و سعی می‌شود تا با استفاده از تمامی آنها به شناختی صحیح و دقیق از محدوده مورد مطالعه دست یافت. در این میان تخمین ضرایب الاستیک نقش بسزایی داشته و با شناخت آنها می‌توان به برخی از پارامترهای متغیر در مخزن پی برد. با محاسبه ضرایب الاستیک، وضعیت همسان‌گردی و ناهمسان‌گردی را می‌توان مطالعه نمود. همچنین، دانستن ضرایب الاستیک از اصول اولیه محاسبات ژئومکانیک است. فاکتورهای مختلفی مانند اندازه دانه‌ها، تخلخل، کانی‌شناسی و نوع سیمان کنترل‌کننده رفتار الاستیک سنگ می‌باشند [۱]. روابط مشخصی برای محاسبه پارامترهای الاستیک از طریق سرعت امواج تراکمی و برشی و چگالی سنگ ارائه شده است. برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری سنگ از طریق سرعت امواج الاستیک نیز روابط تجربی متعددی از طرف محققان مختلف ارائه شده است [۲]. در این مطالعه مقاومت فشاری تک محوری سنگ از طریق رابطه میلیتزر [۳] و دیر و میلر [۴] مورد محاسبه قرار گرفته است. برای مجتمع‌سازی پارامترهای الاستیک می‌توان از مفهوم واحدهای ژئومکانیکی استفاده کرد. یک واحد ژئومکانیکی به بازه‌ای عمقی از یک مخزن گفته می‌شود که در آن پارامترهای الاستیک دارای رفتار یکسان هستند [۵]. برای ساخت واحدهای ژئومکانیکی می‌توان از روش‌های مختلف خوشه‌بندی استفاده کرد. ساخت یک مدل سه‌بعدی از این واحدهای ژئومکانیکی در یک مخزن می‌تواند درک صحیحی از رفتار مکانیکی مخزن در تمامی قسمت‌های آن

1. Post-stack
2. Check Shots
3. Geolog
4. Greenberg-castagna

V_p سرعت موج تراکمی بر حسب کیلومتر بر ثانیه، V_s سرعت موج برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه و ρ چگالی توده سنگ بر حسب gr/cc است.

$$G_d = \left(\frac{\rho_b}{DT_s^2} \right) \times 10^3 \quad (3)$$

در رابطه ۳، G_d مدول برشی دینامیک بر حسب GPa، DT_s زمان گذر موج برشی بر حسب $\mu\text{sec/m}$ و ρ_b چگالی توده سنگ بر حسب km/s است.

$$K_d = \rho V_p^2 - \frac{4}{3} \rho V_s^2 \quad (4)$$

در رابطه ۴، K_d مدول بالک دینامیک بر حسب GPa، V_p ، V_s ، سرعت موج تراکمی بر حسب km/s، V_s ، سرعت موج برشی بر حسب km/s و ρ چگالی توده سنگ بر حسب kg/m^3 است.

$$v_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5)$$

در رابطه ۵، v_d نسبت پواسون، V_p ، V_s ، سرعت موج تراکمی بر حسب km/s و V_s ، V_s ، سرعت موج برشی بر حسب km/s است.

محاسبه مقاومت فشاری تک محوری UCS

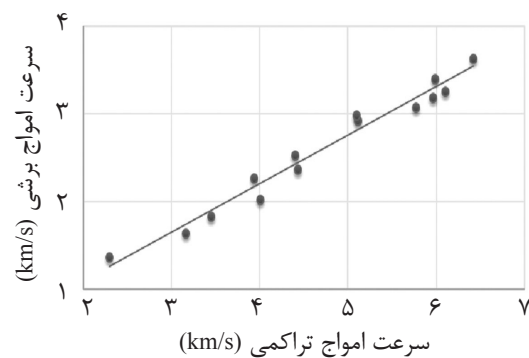
جهت محاسبه مقاومت فشاری تک محوری در ۸ چاه مورد مطالعه می بایست از روابط تجربی استفاده کرد. روابط تجربی بسیاری جهت محاسبه مقاومت فشاری تک محوری وجود دارد. از بین این روابط از رابطه میلیتزر و استول^۱ جهت محاسبه مقاومت فشاری تک محوری در سنگ های کربناته استفاده شد [۳]. رابطه میلیتزر برای سنگ های کربناته ارائه شده است و سنگ های سازندهای کنگان و دالان از میدان مورد مطالعه به طور عمده آهکی هستند.

جدول ۱ ضرایب انطباق سرعت های برشی.

چاه شماره	ضریب انطباق
۱	۰/۸۹۱۸۳۳
۲	۰/۸۷۱۳۹۷
۳	۰/۸۹۲۶۱۵

در این تحقیق با استفاده از اندازه گیری اولتراسونیک سرعت امواج برشی و تراکمی در نمونه های مغزه به دست آمده از میدان سلمان که مجاور میدان گازی مورد مطالعه است، رابطه ای تجربی میان سرعت امواج برشی و تراکمی به دست آمد. برای تعیین سرعت موج برشی و تراکمی از استاندارد ASTM-D2845-83 استفاده شده است [۷]. با انجام اندازه گیری ها و انجام آنالیز رگرسیون دو متغیره روی داده های حاصل، رابطه همبستگی بین سرعت امواج اولتراسونیک تراکمی و برشی به دست آمد (معادله ۱ و شکل ۱) [۸].

$$V_s = 0.553 \times V_p - 0.016 \quad R^2 = 0.971 \quad (1)$$



شکل ۱ نمودار همبستگی میان سرعت امواج اولتراسونیک تراکمی و برشی در نمونه های مغزه گرفته شده از میدان سلمان مقادیر سرعت امواج برشی تخمین زده شده از طریق این روش در چاه های یک تا سه ضریب انطباق بسیار بالایی با مقادیر سرعت برشی موجود در این سه چاه نشان می دهند (جدول ۱) و به همین علت از این رابطه برای تخمین سرعت امواج برشی در ۵ چاه دیگر استفاده شد.

محاسبه مدول های الاستیک دینامیک

در این قسمت مدول های یانگ، برشی و حجمی و همچنین نسبت پواسون با استفاده از روابط ۲ تا ۵ میان سرعت امواج برشی، سرعت امواج تراکمی و چگالی توده سنگ، برای هر ۸ چاه محاسبه شدند [۹].

$$E_d = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2)$$

در رابطه ۲، E_d مدول یانگ دینامیک بر حسب GPa،

میدان در دسترس بودند. می‌بایست این نکته را در نظر گرفت که اندازه‌گیری مقادیر استاتیک در شرایط سطحی صورت گرفته و درجه حرارت و فشار برجا بر خلاف مقادیر دینامیک در محاسبات منظور نشده است. از طریق انجام برآزش میان تعداد بسیار زیادی از داده‌های استاتیک موجود در تمام ۵ چاه در دسترس از میدان و مقادیر دینامیک حاصل از نمودارهای چاه‌پیمایی در این میدان، روابط تجربی دقیقی (روابط ۷ تا ۱۰) میان مدول‌های یانگ، بالک و برشی و نسبت پواسون دینامیک و مقادیر استاتیک این پارامترها به دست آمد (شکل ۲).

$$E_s = 0.725304 \times E_d + 0.01779 \quad \text{و} \quad R^2 = 0.999952 \quad (۷)$$

$$K_s = -0.01723 \times K_d^2 + 0.728 \times K_d + 0.852 \quad \text{و} \quad R^2 = 0.994738 \quad (۸)$$

$$U_s = 0.5865 \times U_d + 0.5841 \quad \text{و} \quad R^2 = 0.998232 \quad (۹)$$

$$v_s = 0.08056 \times v_d^3 - 0.03024 \times v_d^2 + 0.011 \times v_d + 0.2818$$

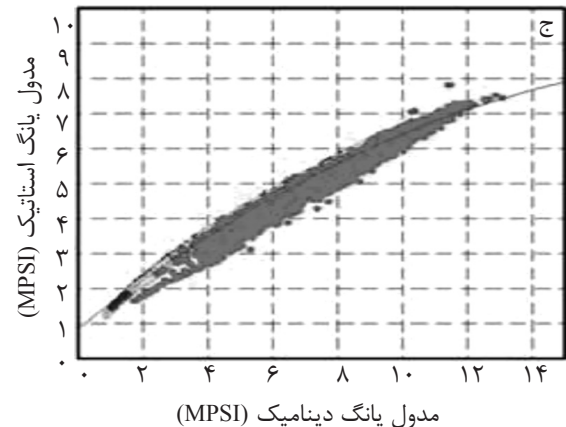
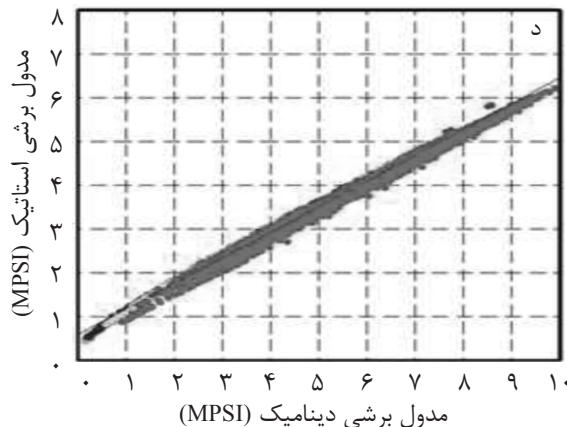
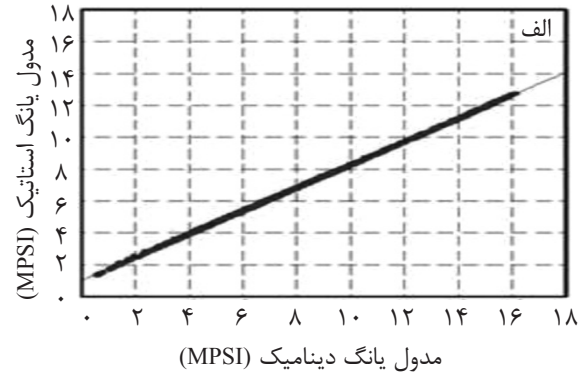
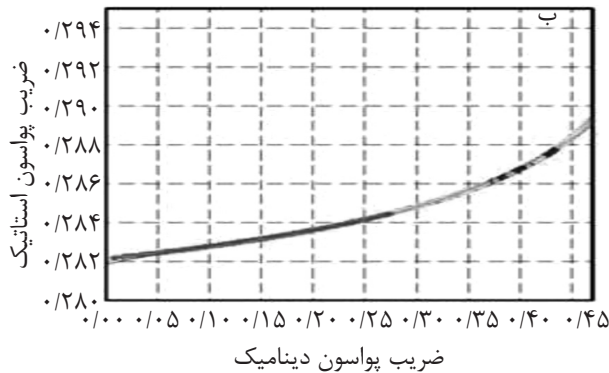
$$R^2 = 0.99925 \quad (۱۰)$$

$$UCS = (7682 / \Delta t)^{1.82} / 145 \quad (۶)$$

در این رابطه UCS میزان مقاومت تک‌محوری بر حسب MPa و Δt زمان گذر امواج تراکمی بر حسب $\mu\text{sec/ft}$ می‌باشد.

تبدیل مدول‌های الاستیک دینامیک به مدول‌های الاستیک استاتیک

برای تبدیل مدول‌های دینامیک به دست آمده به مدول‌های استاتیک باید داده‌های مغزه جدیدی از میدان مورد مطالعه تهیه می‌شد که با توجه به محدودیت‌های موجود این امر امکان‌پذیر نبود. بنابراین از نمونه‌های سازندهای کنگان و دالان در محدوده میدان سلمان که در مجاورت میدان گازی مورد مطالعه قرار داشت، استفاده شد. در این میدان مقادیر ژئومکانیکی مانند مدول‌های برشی، یانگ و بالک و نسبت پواسون از طریق آزمایش‌های مکانیک سنگی انجام شده در جزیره لاوان و همچنین داده‌های مکانیک سنگی موجود برای یکی از چاه‌های این



شکل ۲ نمودارهای برآزش مدول‌های استاتیک و دینامیک (الف) مدول یانگ، (ب) ضریب پواسون، (ج) مدول بالک و (د) مدول برشی

آزمایش چکش اشمیت

از آنجایی که مقادیر استاتیک برای مقاومت تک محوری نمونه های میدان سلمان موجود نبود، می بایست این مقادیر از طریق آزمایش چکش اشمیت به دست آیند. آزمایش سختی چکش اشمیت در شرایط کمبود داده نزدیک ترین مقدار را به مقادیر استاتیک به دست می دهد. این آزمایش در مورد سنگ های خیلی نرم یا خیلی سخت دارای محدودیت بوده و نتایج قابل اطمینانی نمی دهد [۸]. در این آزمایش پلانگر^۱ (میله چکش) روی نمونه قرار گرفته و با فشار دادن چکش به سنگ، به داخل بدنه چکش فرو میرود. این عمل باعث فشرده شدن فنر داخل چکش می گردد. ضامن فنر در سطح انرژی تراکمی مشخصی آزاد شده و به وزنه ای* که روی پلانگر قرار گرفته ضربه می زند. ارتفاع واجهش وزنه از روی خط کش، عدد سختی واجهش چکش اشمیت را ایجاد می کند [۱۰]. روابط مختلفی مابین عدد واجهش اشمیت و مقاومت تک محوری سنگ وجود دارد و در این تحقیق از رابطه دیر و میلر [۴] (معادله ۱۱) برای تعیین مقاومت تک محوری سنگ استفاده شده است.

$$UCS = 6.9 \times 10^{[0.16 + 0.0087(R_n \rho)]} \quad (11)$$

در این رابطه R_n عدد واجهش چکش اشمیت و ρ چگالی سنگ در محل آزمایش است. پس از محاسبه مقادیر تقریبی مقاومت فشاری تک محوری نمونه

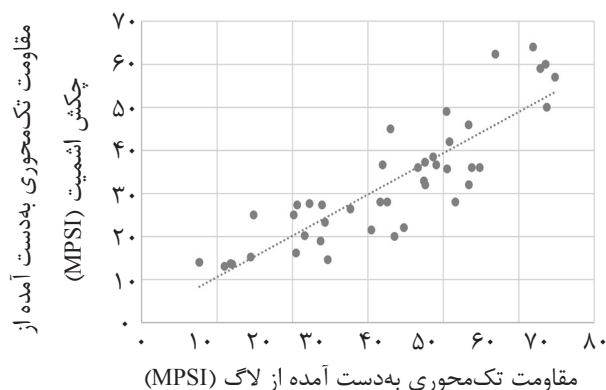
مغزه های میدان سلمان از طریق آزمایش چکش اشمیت، میان مقادیر به دست آمده و مقادیر مقاومت حاصل از نگارگرها در اعماق متناظر با این نمونه های مغزه در میدان سلمان برآزش صورت گرفت (شکل ۳) و رابطه تجربی مورد نیاز جهت تبدیل مقاومت تک محوری دینامیک به مقاومت تک محوری استاتیک به دست آمد (رابطه ۱۲).

(۱۲) $R^2 = 0.076$ و $UCS_s = 0.959 \times UCS_d - 18.18$
پس از ایجاد روابط تجربی مرتبط با سازندهای کنگان و دالان در میدان سلمان این روابط بر مدول های الاستیک دینامیک به دست آمده در میدان گازی مورد مطالعه اعمال شدند. مقادیر مدول های الاستیک استاتیک حاصل از این روش منطقی به نظر می رسیدند و هیچگونه مقدار منفی در آنها موجود نبود. شکل ۴ مقادیر مقاومت تک محوری و مدول های استاتیک و دینامیک را برای بازه های از چاه شماره ۱ نشان می دهد. همان طور که در شکل ۴ دیده می شود، مقادیر مدول های استاتیک به دلیل فرکانس بیشتر در اندازه گیری های نگارگر، کمتر از مدول های دینامیک می باشند.

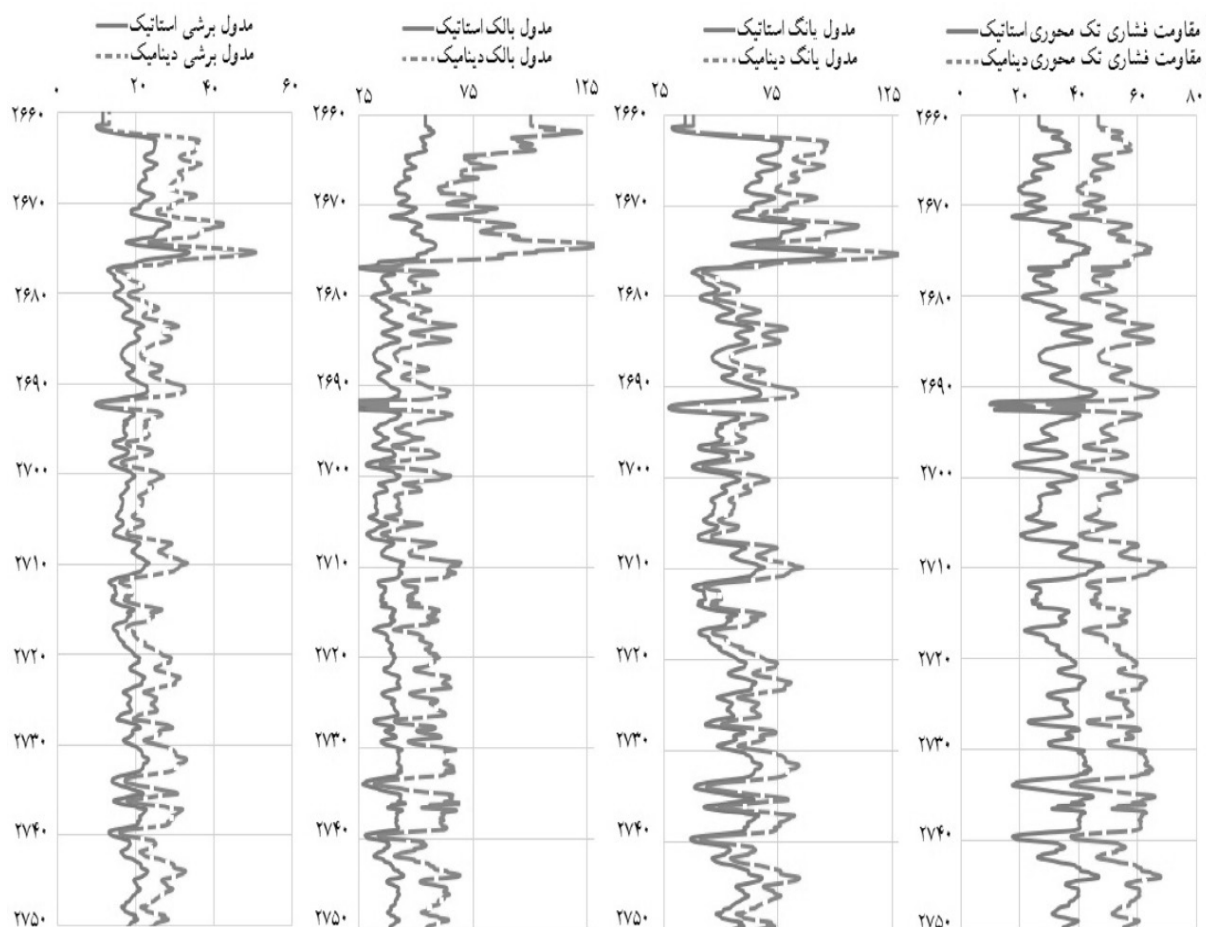
خوشه بندی داده های استاتیک با استفاده از روش های

SOM, MRGC, AHC

پس از محاسبه مدول های الاستیک استاتیک می بایست این مدول ها توسط نرم افزار ژئونگارگر خوشه بندی شوند.



شکل ۳ نمودار برآزش میان مقاومت فشاری تک محوری استاتیک و مقاومت فشاری تک محوری دینامیک برای ایجاد رابطه تجربی

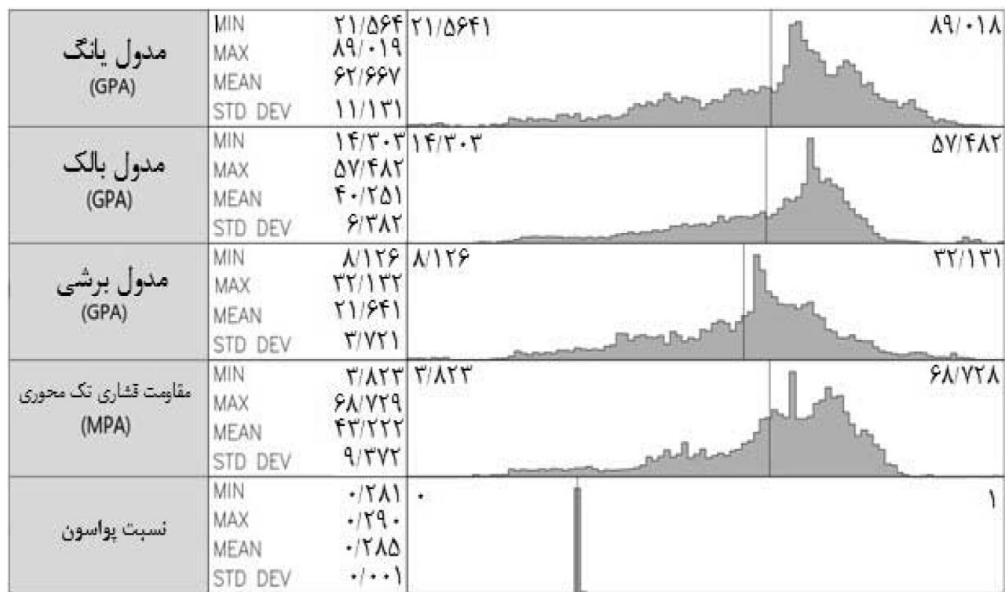


شکل ۴ مقادیر مقاومت تک‌محوری و مدول‌های استاتیک و دینامیک برای بازه‌ای از چاه شماره ۱

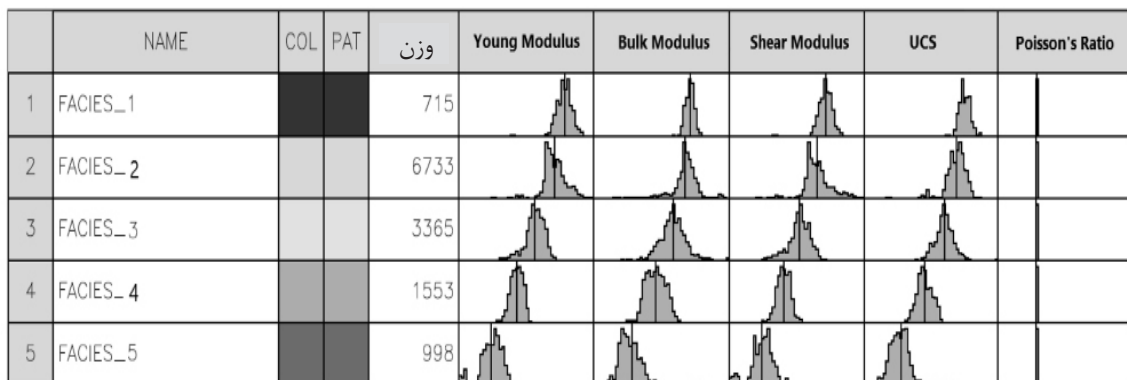
برای ساخت واحدهای ژئومکانیکی خوشه‌بندی کرد، بنابراین از هر سه روش استفاده شد. نتایج حاصل از این سه روش در ادامه آورده شده است (شکل‌های ۶ تا ۸). همان‌طور که در رخساره‌های به‌دست آمده از خوشه‌بندی مشاهده می‌شود، خوشه‌های حاصل از روش MRGC به‌دلیل روند کاهش برای تمام مدول‌ها از خوشه ۱ تا ۵ و عدم وجود پراکندگی در داده‌های هر خوشه، دارای بهترین کیفیت هستند [۱۱]. از روش AHC نمی‌توان برای این خوشه‌بندی و ایجاد واحدهای ژئومکانیکی استفاده کرد زیرا هیچ‌گونه روند افزایشی یا کاهش‌ی در میزان پارامترهای الاستیک از رخساره ۱ تا ۵ در آن دیده نمی‌شود.

در این تحقیق سه روش خوشه‌بندی گراف پایه با توان تفکیک چندگانه^۱ (MRGC)، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی^۲ (AHC) و نقشه خود سازمان‌دهنده^۳ (SOM) مورد بررسی قرار گرفتند [۱۲، ۱۱ و ۱۳]. برای خوشه‌بندی می‌بایست چاهی که دارای بیشترین و با کیفیت‌ترین اطلاعات است، جهت ساخت مدل انتخاب شود. با توجه به بازه طولانی نمودارگیری در چاه شماره ۳ این چاه جهت ساخت مدل انتخاب شد و داده‌های آن به عنوان نگارگرهای مدل در ماژول Facimage از نرم‌افزار ژئونگارگر وارد شد. پس از آن، داده‌ها در قسمت آموزش داده^۴ وارد شدند و هیستوگرام‌ها و نمودارهای آنها رسم شد (شکل ۵). پس از این مرحله می‌بایست با استفاده از یکی از روش‌های MRGC، AHC و SOM که خوشه‌های با کیفیت‌تری را حاصل می‌کند، داده‌های مورد نظر را

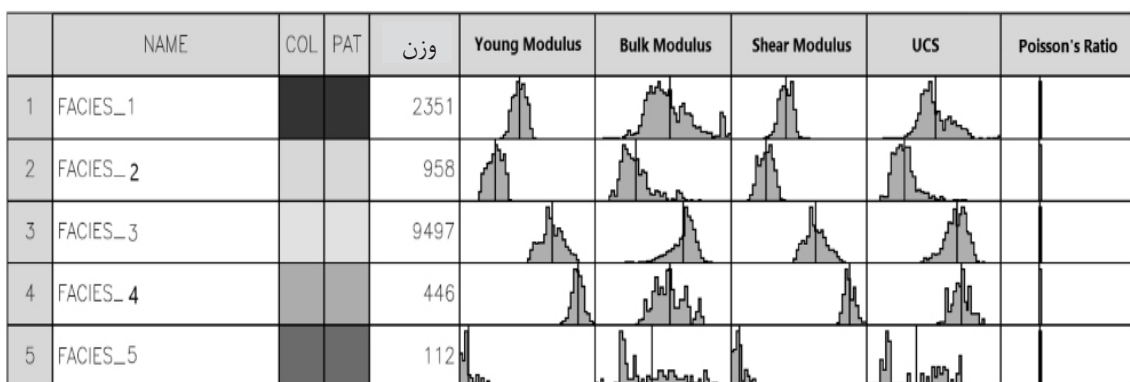
1. Multi Resolutional Graph Based Clustering
 2. Ascendant Hierarchical Clustering
 3. Self-Organizing Map
 4. Data Training



شکل ۵ هیستوگرام‌های حاصل از آموزش داده



شکل ۶ خوشه‌های حاصل از MRGC



شکل ۷ خوشه‌های حاصل از AHC

	NAME	COL	PAT	وزن	Young Modulus	Bulk Modulus	Shear Modulus	UCS	Poisson's Ratio
1	FACIES_1			2708					
2	FACIES_2			1853					
3	FACIES_3			5590					
4	FACIES_4			3213					

شکل ۸ خوشه‌های حاصل از SOM.

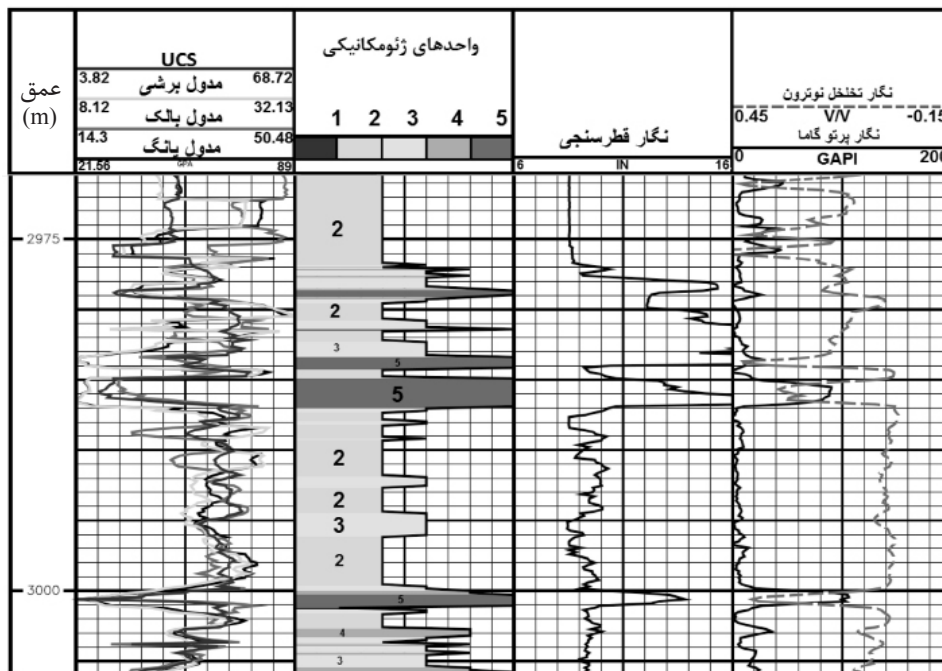
ستون دوم در شکل ۹ بیانگر واحدهای ژئومکانیکی یک تا پنج است. با توجه به مقیاس نشان داده شده در بالای این ستون، واحدهای ژئومکانیکی از کمترین مقدار (واحدهای شماره دو) در سمت راست به بیشترین مقدار (واحدهای شماره پنج) در سمت چپ افزایش پیدا می‌کنند. سنگ‌های واحدهای دو و سه مقادیر الاستیک بالاتری نسبت به واحدهای چهار و پنج دارند. سنگ‌های موجود در واحد پنج پایین‌ترین میانگین مقادیر الاستیک را دارند و از این رو همان‌طور که در نگار قطرسنجی در ستون سوم دیده می‌شود، چاه در اعماق مرتبط با این واحدها ریزش داشته است. همچنین بر اساس مقدار نگار نوترون در ستون چهارم، تخلخل این واحدها بالا است و در صورتی که میزان شیل در آنها پایین باشد می‌توانند به نوعی بیانگر سنگ‌های مخزنی با تخلخل بالا باشند. در واحد ژئومکانیکی یک میانگین مقادیر الاستیک از سایر خوشه‌ها بالاتر است و چاه‌ها در محدوده این واحدها پایدار هستند.

با استفاده از مقادیر حجمی کانی‌های مختلف که توسط مازول مالتی‌مین در نرم‌افزار ژئونگارگر به دست آمده می‌توان گفت میزان ریزش در چاه شماره ۳ متأثر از محتوای رس موجود در سازند است. با استفاده از مقادیر حجمی کانی‌های انیدریت، دولومیت و کلسیت رابطه‌ای مشخص میان واحدهای ژئومکانیکی و لیتولوژی سازند به دست نیامد.

در روش SOM علی‌رغم وجود افزایش میانگین هر پارامتر الاستیک از خوشه ۱ تا ۴، میزان پراکندگی زیاد پارامترهای الاستیک در هر رخساره (به‌خصوص در رخساره شماره ۱) از دقت کار خواهد کاست. بنابراین از خوشه‌های حاصل از روش MRGC برای ساخت واحدهای ژئومکانیکی استفاده شد. در خوشه‌بندی انجام شده پنج واحد ژئومکانیکی حاصل شده است. در این واحدها از آنجایی که مقادیر پارامترهای الاستیک در این خوشه بندی از رخساره یک به سمت رخساره پنج کاهش یافته است، کیفیت از واحد ژئومکانیکی ۱ تا ۵ کاهش می‌یابد و سنگ‌های سازندی حالت ریزشی به خود می‌گیرند. با توجه به خوشه‌بندی انجام شده برای هر واحد می‌توان بازه‌ای جهت مقادیر پارامترهای الاستیک تعیین کرد و به درکی کلی از میزان مقاومت یک واحد نسبت به واحدهای دیگر دست یافت.

ارزیابی واحدهای ژئومکانیکی حاصل با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی

برای ارزیابی واحدهای ژئومکانیکی حاصل از روش MRGC این واحدها با نگارگرهای قطرسنجی (HCAL)، اشعه گاما و تخلخل نوترون (NPHI) اعتبارسنجی شدند. در شکل ۹ نمونه‌ای از این اعتبارسنجی برای چاه شماره ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، واحدهای ژئومکانیکی ایجاد شده کاملاً با نگار قطرسنجی، اشعه گاما و نوترون هم‌خوانی نشان می‌دهند.



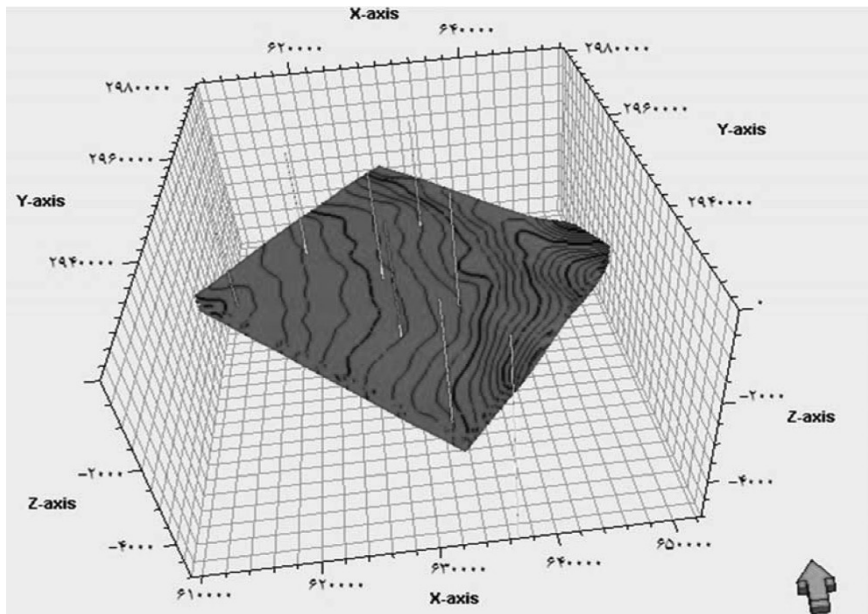
شکل ۹ ارزیابی واحدهای ژئومکانیکی در چاه شماره ۳

مدل سازی سه بعدی واحدهای ژئومکانیکی

استفاده نشده است دیده شد. بنابراین می بایست از داده های دیگری که تغییرات جانبی را مشخص می کنند نیز برای مدل سازی استفاده کرد. برای این منظور در این بخش داده لرزه ای میدان گازی مورد مطالعه وارد نرم افزار شد. داده لرزه ای موجود در حوزه زمان است. از آنجایی ساخت مدل سرعت برای این داده ها بسیار وقت گیر بود، تغییر حوزه عمقی سایر داده ها از جمله افق ها و چاه ها به حوزه زمان مد نظر قرار گرفت. این کار با استفاده از چک شات ها و ایجاد رابطه بین آنها و داده های عمقی صورت پذیرفت. پس از ساخت سایر داده ها در حوزه زمان تمامی مراحل گذشته روی داده های جدید مجددا انجام شد. در این مرحله از مطالعه، مدل امپدانس صوتی نسبی با استفاده از وارون سازی و الگوریتم ژنتیک ساخته شد. امپدانس صوتی از حاصل ضرب سرعت در چگالی به دست می آید و از این جهت دارای بیشترین ارتباط با واحدهای ژئومکانیکی می باشد [۱۵].

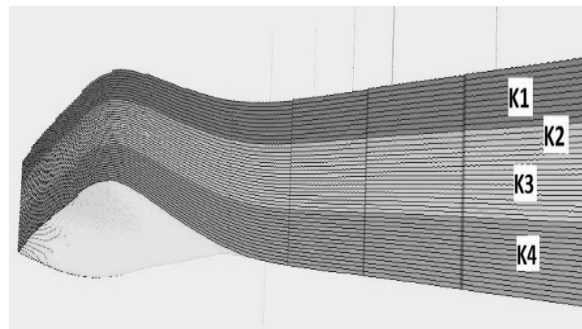
پس از ایجاد واحدهای ژئومکانیکی، مدل ژئومکانیکی واحدهای مربوطه در نرم افزار پترل^۱ براساس این واحدها ساخته شد [۱۴]. برای این امر در مرحله اول داده های چاه ها، شامل نگار گرها، واحدهای ژئومکانیکی و مختصات سر چاه ها در نرم افزار وارد شد. همچنین سطح فوقانی لایه های مخزنی شامل K1، K2، K3، K4 و نار به نرم افزار داده شد (شکل ۱۰). از آنجایی که چاه شماره ۳ خارج از محدوده مدل سازی و افق های در دسترس بوده است، این چاه در نرم افزار وارد نشد. پس از طی مراحل مرتبط با شبکه بندی و درشت نمایی^۲ واحدهای ژئومکانیکی، افق های مخزنی ساخته و لایه بندی شدند (شکل ۱۱). پس از اتمام این مراحل واریوگرافی واحدهای ژئومکانیکی در قسمت آنالیز داده انجام شد و با استفاده از شبیه سازی گوسی متوالی مدل مورد نظر در نرم افزار ساخته شد. همان طور که از قبل انتظار می رفت در این قسمت به دلیل نبود داده بین چاهی و فاصله بسیار زیاد چاه ها از یکدیگر درصد تطابق ۳۶٪ با چاه ۶ که در مدل سازی

1. Petrel
2. Scale Up

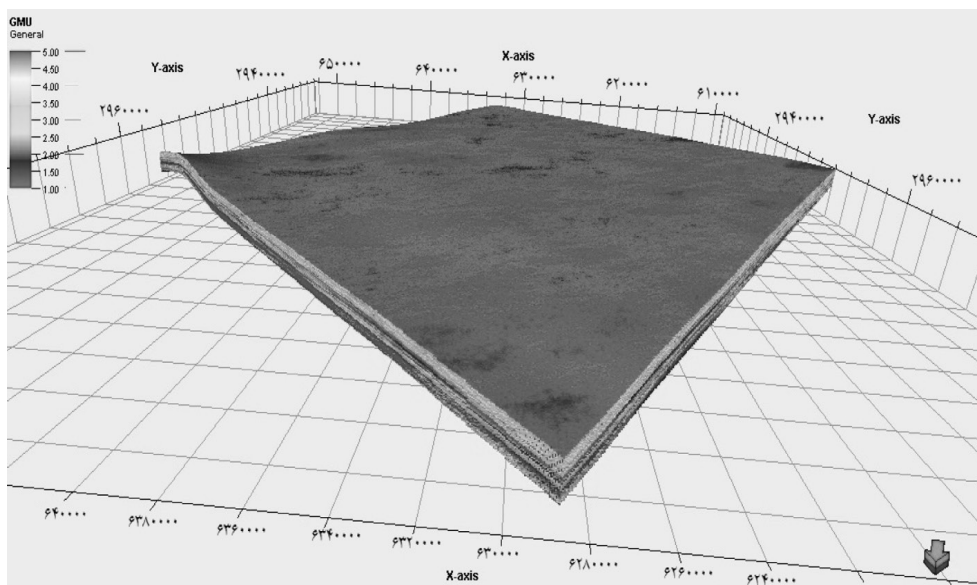


شکل ۱۰ موقعیت افق‌های مخزنی و چاه‌ها

برای این کار ابتدا مقادیر امپدانس صوتی در محدوده چاه‌ها محاسبه شد و رابطه‌ای میان این امپدانس صوتی و داده لرزه‌ای در محل چاه‌ها به دست آمد و در کل میدان در محدوده شبکه‌بندی شده بسط داده شد. این مقادیر برای هر سلول میانگین‌گیری شده و درشت‌نمایی گردید. از مدل امپدانس صوتی ساخته شده به عنوان پارامتر دوم کوکریجینگ برای مدل‌سازی استفاده شد و مدل نهایی به دست آمد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱ موقعیت زون‌های مخزنی k1 تا k4 از جانب شمال شرق



شکل ۱۲ مدل نهایی ساخته شده براساس واحدهای ژئومکانیکی

نرم‌افزار پترل داده شد. ۷۷٪ انطباق به‌دست آمده با استفاده از این روش بیانگر اعتبار بالای آن است. با توجه به پیوسته بودن داده‌های امپدانس صوتی که از داده‌های لرزه‌ای به‌دست آمده‌اند، واحدهای ژئومکانیکی نیز پیوسته در نظر گرفته شدند. البته با توجه به صعودی و نزولی بودن مقادیر داده‌ها در واحدهای ژئومکانیکی این امر امکان‌پذیر است. با توجه به مدل ساخته شده می‌توان گفت مقاومت سنگ‌های سازندی در محدوده زون‌های مخزنی K3 و K4 کاهش می‌یابد و در محدوده واحدهای ژئومکانیکی ۴ و ۵ قرار می‌گیرد. البته مقاومت این زون‌ها در برخی قسمت‌ها به‌طور محلی افزایش یافته و در محدوده واحدهای ژئومکانیکی ۱ و ۲ قرار می‌گیرد. در زون‌های مخزنی K1 و K2 مقاومت در محدوده واحدهای ژئومکانیکی ۱، ۲ و ۳ قرار می‌گیرد. البته در برخی قسمت‌ها واحدهای ژئومکانیکی ۴ و ۵ نیز دیده می‌شوند. در نهایت، با توجه به قسمت‌های مختلف مدل مورد نظر می‌توان گفت این مدل توانایی تعیین مسیر بهینه حفاری را دارد. البته می‌بایست در این تعیین مسیر صرفاً پایداری دیواره چاه در نظر گرفته نشود و تعامل مدل‌های تخلخل و تراوایی با این مدل مد نظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نمی‌توان از فرمول‌های تجربی به دست آمده برای یک سازند غیرمرتبط از لحاظ مکانی و لیتولوژی برای یک سازند استفاده کرد و می‌بایست آزمایش‌های الاستیک استاتیک روی سازند مورد بررسی یا یکی از سازندهای مجاور که دارای لیتولوژی و شرایط تکتونیکی مشابه است صورت گیرد. در اینجا فرمول‌های تجربی به‌دست آمده برای میدان سلمان به‌گونه صحیحی برای میدان گازی مورد مطالعه عمل کرد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، از بین روش‌های MRGC، AHC و SOM مناسب‌ترین روش جهت خوشه‌بندی ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های سازندی روش MRGC می‌باشد. در این روش خوشه‌ها دارای روند صعودی و نزولی هستند و مقادیر پارامترهای الاستیک در هر خوشه پراکندگی زیادی نشان نمی‌دهند.

در صورت فاصله زیاد چاه‌ها از یکدیگر نمی‌توان از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی برای مدل‌سازی استفاده کرد، زیرا دارای عدم قطعیت بسیار بالایی خواهد بود. در این حالت حتماً از داده‌های بین‌چاهی می‌بایست استفاده کرد. در این تحقیق با استفاده از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای مدل امپدانس صوتی ساخته شد و به‌عنوان پارامتر دوم کوکریجینگ به

مراجع

- [1]. Hussain M., El Hassan W. M. and Abdurraheem A., "Controls of grain-size distribution on geomechanical properties of reservoir rock-A case study: Cretaceous Khafji Member, Zuluf Field, Offshore Arabian Gulf," Marine and Petroleum Geology., Vol. 23, pp. 703-713, 2006.
- [2]. Zoback M. D., "Reservoir geomechanics," Cambridge University Press, pp. 110-200, 2007.
- [3]. Militzer, H. and Stoll R., "Einige Beitrageder geophysics zur primadatenerfassung im Bergbau: neue Bergbau-technik. Lipzig", Vol. 3, pp. 21-25, 1973.
- [4]. Aydin A., Basu A., "The Schmidt hammer in rock material characterization," Engineering Geology, Vol. 81:pp 1-14, 2005.
- [5]. Dusseault M. B., "Geomechanical challenges in petroleum reservoir exploitation," KSCE J. Civ. Eng. Vol. 15 (4), pp. 669-678, 2011.

- [6]. Castagna J. P., Batzle M. L. and Eastwood R. L., "Relationships between compressional wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks," J. Geophys. Res. Vol. 50, pp. 571-581, 1985.
- [7]. Method S. T., "Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock," Vol. 1, p. 14, 2000.
- [۸]. کدخدائی ع. گزارش تعیین سختی، "سرعت امواج اولتراسونیک و مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های سنگی یکی از چاه‌های نفتی جنوب ایران،" دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۲.
- [9]. Mavko G., Mukerji T. and Dorkin J., "Rock physics handbook," Cambridge, United Kingdom (GBR), Cambridge University Press, 1998.
- [10]. Brandestini A., "Proceq History," <http://www.proceq.com/en/company-partners/proceq-group/history.html?pq=2>, 30.2, 2015.
- [11]. Ye S. J., and P. Rabiller., "A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering," SPWLA 41st Annual Logging Symposium, 2000.
- [12]. Kohonen T., "Self-organizing maps," Third, extended edition, Springer, Vol. 501, 2001.
- [13]. Lukasova A., "Hierarchical agglomerative clustering procedure," Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 365-381, 1979.
- [14]. Schlumberger, Petrel Introduction course, "Schlumberger Information Solutions," 2006.
- [15]. Al-Ruwaili S., Chardac O., "3D model for rock strength and in-situ stresses in the Khuff formation of Ghawar field, methodologies and applications," SPE 81476, The Middle East Oil Show & conference, Bahrain, 2003.



Three-Dimensional Modeling of Geomechanical Units Using Seismic Data in One of the Southern Iran Gas Fields

Pooria Adabnezhad¹, Ali Kadkhodai², Gholamhossein Norouzi³ and Amirshahriar Rostami⁴

1. Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2. School of geology, Faculty of sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3. Pars oil and Gas Company, Tehran, Iran

adabnezhad69@ut.ac.ir

Received: November/08/2016

Accepted: October/09/2017

Abstract

The current study employs an efficient approach in construction of 3D reservoir geomechanical models based on the concept of GMUs. Rock strength estimation using indirect methods plays an important role in reservoir characterization. Indirect methods are more cost-effective and efficient than direct methods. The elastic-dynamic moduli can be used to obtain rock strength data. In this study, the amount of data was reduced through using multiresolution graph-based clustering and geomechanical units (GMUs) were established based on MRGC-derived clusters. Construction of a 3D geomechanical model using these GMU's is a reliable approximation of reservoir characteristics from the rock strength point of view. The elastic-dynamic moduli such as Young's modulus, bulk modulus, shear modulus, Poisson's ratio and UCS of the formation were calculated using compressive and shear wave velocities which are provided by DSI logging tools in eight wells. In some of the wells, shear wave velocities are predicted through multivariable regressions. Results show that the correlation coefficient between measured and estimated shear velocity is approximately 90 percent. Afterward, the calculated dynamic moduli were calibrated to static values using empirical equations extracted from a neighboring field. All calculated static moduli were clustered by using multiresolution graph-based clustering (MRGC) method for all eight wells. Finally, a 3D geomechanical model of the reservoir was generated based on these geomechanical units and the reservoir acoustic impedance model as a secondary parameter of co-kriging. The reservoir acoustic impedance model was built by using a genetic algorithm and model based inversion. After establishing the GMUs by MRGC, the GMUs evaluated through correlating with the caliper, gamma ray and NPHI logs. There is a good correlation between the clusters and the log-derived properties in all wells. GMUs can be compared with lithology logs and core data as an alternative verification method. Results of this study show that the mechanical properties of GMUs are strongly affected by the clay content and porosity of rocks. Also, the 3D geomechanical model has been generated from GMUs, and the reservoir acoustic impedance model shows a good degree of correlation confirming further confidence on the results of this study.

Keywords: Geomechanical Units, Multi-Resolution Graph-Based Clustering, Elastic Modulus, Static Data, Acoustic Impedance, Genetic Algorithm

Introduction

Despite a growing propensity to use 3D geomechanical models in petroleum engineering practices, there needs further understanding of the underlying concepts and data handling procedures. This study employs an efficient approach to construct a 3D reservoir geomechanical models based on the concept of Geomechanical Units (GMUs).

Rock strength estimation using indirect methods plays an important role in reservoir characterization. Indirect methods are more affordable and efficient than direct methods. Elastic-dynamic moduli can be used to obtain rock strength data. Mechanical properties of rocks are used for hydraulic fracture design, for seismic modelling and interpretation, and for stress calculations in geological studies.

In this study, we have reduced the amount of these data using multiresolution graph-based clustering and through the establishment of geomechanical units (GMUs) with these clusters. Construction of a 3D geomechanical model using these GMUs is a reliable approximation of reservoir characteristics from the rock strength point of view.

Methodology

Compressive and shear wave velocities are provided by DSI logging tools in eight wells. Shear wave velocity (V_s) associated with compressional wave velocity (V_p) can provide accurate data for the geophysical study of a reservoir. In five wells that the shear wave velocities were not present, the results from sonic measurement of compressional and shear wave velocities in neighboring Salman field were used to establish

an empirical equation for estimating shear wave velocities. This equation made a correlation coefficient of about 0.9 between estimated shear wave velocities and present V_s in three wells.

Appropriate equations were used for calculating elastic-dynamic moduli such as Young's modulus, bulk modulus, shear modulus, and Poisson's ratio. Because of carbonate lithology of the Kangan and Dalan formations, Militzer equation was used for calculating the dynamic UCS.

The elastic moduli calculated from the elastic wave velocities and density are the dynamic moduli. In contrast, the elastic moduli calculated from deformational experiments are the static moduli. Static values differ from dynamic values because wave propagation is a phenomenon of small strain with a large strain rate: rocks appear stiffer in response to an elastic wave, compared to a rock mechanics laboratory (triaxial) test, where larger strains are applied at lower strain rate. The weaker the rock, the larger the difference between elastic properties derived from acoustic measurements (dynamic) and those derived from triaxial measurements (static). This accounts for the marked difference between dynamic and static Young's moduli [2]. However, the difference between dynamic and static Poisson's ratio is very small and is generally not considered. By using static and dynamic data provided by sonic measurements and Schmidt hammer in Kangan and Dalan formations of Salman field, empirical correlations were developed for converting calculated dynamic data to static data. Afterward, multiresolution graph-based clustering (MRGC), ascendant hierarchical clustering (AHC), and self-organizing map (SOM) were used to cluster the static data.

MRGC method was a good procedure for this purpose as it made a descending average of geomechanical parameters from GMU number one to GMU number five. In addition, it made a thinner range of geomechanical parameters in each GMU. This property will enable the user to determine the value of geomechanical parameters more accurate [3]. Multi-resolution graph-based clustering is a multidimensional dot-pattern-recognition method based on non-parametric K-nearest-neighbor and graph data representation. The underlying structure of the data is analyzed and natural data groups are formed which may have different densities, sizes, shapes and relative separations. MRGC automatically determines the optimal number of clusters, and yet allows the geologist to control the level of detail actually needed for example to define an Electrofacies [4].

After establishing the Geomechanical units, the correctness of them must be evaluated. Caliper, Gamma ray, and NPHI logs were used for this purpose. Caliper log shows an increase in well diameter in GMU number five that has the minimum value of geomechanical parameters. NPHI log shows the maximum porosity for GMU number five, and gamma ray log shows the maximum volume of shale in this geomechanical unit. There is a good correlation between the clusters and the logs in all wells.

After this step, a genetic inversion was generated for 3D post-stack seismic data of the field of study. For this inversion, the values of acoustic impedance were calculated by multiplying density and compressional wave velocities in seven wells. The relation between the wavelet at the location of wells and this Acoustic impedance was made by genetic algorithm and expanded in

the 3D seismic model. In other words, seismic data and well log analysis are combined to determine acoustic impedance. The vertical resolution of acoustic impedance model is far less than that of well logs, so some up-scaling issues addressed. This Acoustic impedance model was used as a secondary parameter of co-kriging to model the GMUs in the field of study «Figure 1».

Results and Discussion

Results of this study show that mechanical properties of GMUs are strongly affected by the clay content and porosity of rocks. Between the methods that have been used for clustering, the MRGC method made the best clusters. Also, the GMUs in 3D geomechanical model at the location of well number six which had not been used for modeling and GMUs in this well show a good degree of correlation of 77 percent, which provides further confidence for the results of this study.

The 3D geomechanical model of the field of study shows the least values of mechanical properties in K4 member of Dalan formation partially.

Conclusions

According to obtained results, modeling of geomechanical units in the field of study is a suitable method for estimating formation rock elastic parameters in the hole reservoir parts of K1 to K4.

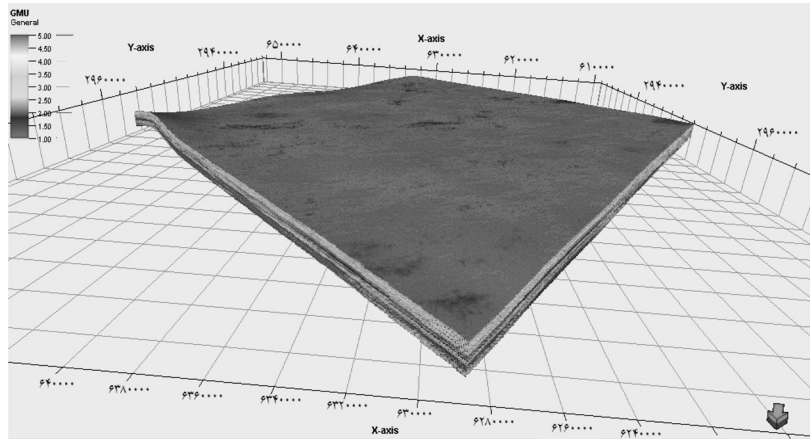


Figure 1: Final geomechanical model

References

- [1]. Mavko G., Mukerjii T. and Dorkin J., "Rock physics handbook," Cambridge, United Kingdom (GBR), Cambridge University Press, 1998.
- [2]. Ye S. J., and P. Rabiller., "A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering," SPWLA 41st Annual Logging Symposium, 2000.