

تصحیح مدل گرینبرگ - کاستاگنا به منظور تخمین سرعت موج برشی در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران

آتنا پیرایه‌گر^۱، شادی لسان‌پزشکی^۲، حسین معماریان^{۳*}

۱- کارشناس ارشد اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، E-mail: a.pirayehgar@mines.ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۳- استاد دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی

(دریافت ۳ تیر ۱۳۸۸، پذیرش ۲۲ آذر ۱۳۸۸)

چکیده

سرعت موج برشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در پیش‌بینی رفتار مخزن است. سرعت موج برشی در تعیین نوع لیتولوژی سازند، سیال درون سازند (اکتشاف مخازن گازی)، تخلخل و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند کاربرد دارد. تعیین سرعت موج برشی به وسیله نمودارگیرهای چاه‌پیمایی هزینه بالایی دارد و به همین دلیل در اغلب چاه‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود. در چند دهه گذشته، روابط تجربی متعددی برای تخمین سرعت موج برشی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ در لیتولوژی‌های مختلف ارائه شده است. مهم‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها، مدل کاستاگنا-گرینبرگ است. رابطه کاستاگنا-گرینبرگ برای تخمین سرعت موج برشی از سرعت موج فشاری در سنگ‌های چندکانه‌ای و اشباع کامل از آب، ارائه شد و در غیر این صورت باید توسط روابط گاسمن تصحیح شوند. مطالعه حاضر در یک چاه از مخزن آسماری در یک میدان نفتی در جنوب غربی ایران انجام شده است. این چاه دارای چاه نمودار زمان گذر موج برشی در زون مخزنی است. داده‌های مورد مطالعه لزوماً تحت شرایط اشباع کامل از آب نبوده و دارای اشباع شدگی‌های متفاوت از نفت هستند. بنابراین، در ابتدا محاسبات مربوط به حذف اثر سیال و جایگزین نمودن آب به عنوان سیال متعارف بر روی داده‌ها انجام شد. به این ترتیب، سرعت موج فشاری در شرایط اشباع کامل از آب به دست آمد. از آنجایی که روابط کاستاگنا-گرینبرگ تجربی بوده و برای تمام مخازن قابل تعمیم نیستند، برای میدان مورد مطالعه تصحیح شدند. این تصحیحات در دو فاز متفاوت بر اساس لیتولوژی و درجه اشباع نفت انجام شد. در نهایت از ضرایب کاستاگنا برای آهک و شیل، از ضرایب تصحیح اول برای دولومیت و از ضرایب تصحیح دوم برای ماسه‌سنگ استفاده شد. ضریب همبستگی بین مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی در مدل کاستاگنا-گرینبرگ به ترتیب قبل و بعد از تصحیح ۰/۸۴ و ۰/۹۴ به دست آمد. نتایج حاکی از موفقیت مدل تصحیح شده کاستاگنا-گرینبرگ در تخمین سرعت موج برشی است.

کلمات کلیدی

سرعت موج برشی، سرعت موج فشاری، روش کاستاگنا-گرینبرگ، حذف اثر سیال، مخزن آسماری

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

سرعت موج برشی به‌عنوان یکی از مهمترین پارامترها در صنعت نفت و گاز محسوب می‌شود که متأسفانه به دلیل هزینه بالا در اغلب چاه‌ها اندازه‌گیری نشده است. به همین دلیل، روش‌های متعددی برای برآورد این پارامتر از سایر داده‌های چاه‌نمودار که در اکثر چاه‌ها ثبت می‌شوند ارائه شده است. از آنجایی که سرعت موج برشی از پارامترهای مختلف سنگ (مثل سرعت موج فشاری، سیال منفذی، درصد رس و غیره) تاثیر می‌پذیرد، می‌تواند بیانگر خصوصیات فیزیکی سنگ باشد. از اینرو، سرعت موج برشی در تعیین نوع لیتولوژی سازند، سیال درون سازند (اکتشاف مخازن گازی)، تخلخل و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازند نظیر ضریب پواسن، مدول برشی، مدول حجمی و غیره کاربرد دارد [۱].

در چند دهه گذشته، تخمین سرعت موج برشی بر اساس پارامترهای فیزیکی سنگ مورد توجه بوده است. دانشمندان بسیاری نظیر پیکت^۱ (۱۹۶۳)، میلهند^۲ (۱۹۸۰)، تامسون^۳ (۱۹۸۶)، هان^۴ (۱۹۸۶ و ۱۹۸۹)، کریف^۵ (۱۹۹۰)، کاستاگانا^۶ (۱۹۸۵ و ۱۹۹۳) و گرینبرگ^۷ (۱۹۹۳) در این زمینه فعالیت کرده‌اند [۲] تا [۱۰]. از این میان کاستاگانا و گرینبرگ یک رابطه تجربی براساس سرعت موج فشاری و لیتولوژی ارائه کردند. نکته مهم اینکه، در رابطه تجربی ارائه شده ضرایب کاستاگانا برای لیتولوژی خالص با اشباع‌شدگی کامل از آب می‌باشند و در غیر این صورت باید توسط روابط گاسمن تصحیح شوند [۱۰]. در این مقاله، یک میدان نفتی کربناته واقع در حوزه رسوبی زاگرس در جنوب غربی ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی، تنها یک چاه با داده Vs موجود است، بنابراین پیش‌بینی سرعت موج برشی از سایر چاه‌نمودارها ضروری است. ابتدا روابط حذف اثر سیال و جایگزین نمودن آب به‌عنوان سیال متعارف در کل ضخامت مورد مطالعه انجام شد. سپس، مدل کاستاگانا-گرینبرگ در لیتولوژی‌های مختلف برای تخمین سرعت موج برشی به‌کار رفت. در مرحله بعد، با توجه به داده‌های موجود روابط V_p-V_s در ماسه‌سنگ و دولومیت خالص در مخزن مورد مطالعه به‌دست آمد و جایگزین روابط کاستاگانا شد. به این ترتیب مدل گرینبرگ برای چاه مورد مطالعه تصحیح شد و نتایج دقیق‌تری به‌دست آمد.

۲- امواج صوتی و روش‌های برآورد آنها

حرکت موج در زمین به دو صورت امواج فشاری (طولی) و امواج برشی (عرضی) است. در امواج طولی دامنه نوسان بر امتداد نوسان منطبق است، در حالیکه در امواج عرضی دامنه نوسان عمود بر امتداد نوسان است. سرعت موج فشاری، سرعت حرکت موج در حالت انتشار طولی است و سرعت موج برشی، سرعت حرکت موج در حالت انتشار برشی است. سرعت امواج در شرایط مختلفی از سنگ‌شناسی، تخلخل، دما، فشار و شرایط منافذ مثل شکل و نوع سیال موجود در منافذ، متفاوت است و این تفاوت اساس انجام روش‌های مختلف ژئوفیزیک و فیزیک سنگ است. عوامل گوناگونی بر سرعت‌های لرزه‌ای اثرگذار هستند که در جدول ۱ به آنها اشاره شده است [۱۱].

تغییرات سرعت نسبت به تغییرات تخلخل از جمله موارد مهمی است که باید به آن توجه کرد، زیرا این ارتباط در تعیین خصوصیات مخزن و برنامه‌ریزی‌های تولید پارامتر تعیین کننده‌ای است. به طور کلی سرعت موج لرزه‌ای ارتباط مستقیمی با میزان تراکم ماده دارد و هرچه این تراکم بیشتر باشد، سرعت موج در آن بیشتر است. با افزایش میزان تخلخل از سرعت امواج فشاری و برشی کاسته می‌شود، در حالیکه نسبت سرعت موج طولی به سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. این پدیده هم در سنگ‌های خشک و هم در سنگ‌های اشباع صادق است. تحقیقات نشان داده است که با تغییر تخلخل موج برشی بیشتر از موج فشاری تاثیر می‌پذیرد. همچنین ترتیب افزایش سرعت موج در سنگ‌های شاخص به ترتیب از ماسه‌سنگ، دولومیت و در نهایت سنگ‌آهک افزایش می‌یابد. هنگامی که امواج برشی با امواج فشاری همراه گردند، اطلاعات مفیدی از سرشت‌نمایی مخازن هیدروکربوری نظیر لیتولوژی، نوع سیال منفذی و تفسیر ژئوفیزیکی به دست می‌دهند که در تصمیم‌گیری‌های بعدی اهمیت بسزایی دارد [۱۲].

جدول ۱: پارامترهای کنترل‌کننده سرعت‌های لرزه‌ای [۱۲].

سنگ	سیال	محیط
شکل منفذ	درجه اشباع	فشار مخزن
تخلخل	نسبت گاز به نفت	هندسه لایه
شکستگی	نوع سیال	تاریخچه تولید
همسانگردی	فاز سیال	مخزن
درصد شیل	ویسکوزیته	فرایندها
چگالی حجمی	دما	دما
بافت		تاریخچه تنش

۳- تخمین سرعت موج برشی به کمک رابطه کاستاگنا- گرینبرگ

در سال ۱۹۸۵ یک سری روابط تجربی برای تخمین سرعت موج برشی از سرعت موج فشاری در لیتولوژی‌های تک‌کانه‌ای^۸ خالص و اشباع کامل از آب، توسط کاستاگنا ارائه شد که ضرایب رگرسیون آن برای چهار لیتولوژی خاص در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: ضرایب رگرسیون (a_{ij}) برای لیتولوژی خالص ارائه شده توسط کاستاگنا [۱۴].

لیتولوژی	a_{i2}	a_{i1}	a_{i0}	R^2
ماسه سنگ	۰	۰/۸۰۴۱۶	-۰/۸۵۵۸۸	۰/۹۸۳۵۲
آهک	-۰/۰۵۵۰۸	۰/۰۱۶۷۷	-۱/۰۳۰۴۹	۰/۹۹۰۹۶
دولومیت	۰	۰/۵۸۳۲۱	-۰/۰۷۷۷۵	۰/۸۷۴۴۴
شیل	۰	۰/۷۶۹۶۹	-۰/۸۶۷۳۵	۰/۹۷۹۳۹

در این راستا، کاستاگنا و گرینبرگ در سال ۱۹۹۳ رابطه تجربی ۱ را بر اساس روابط بین V_p-V_s (جدول ۲) در سنگ‌های چندکانه‌ای^۹ و اشباع از آب شور ارائه کردند.

$$V_S = \frac{1}{2} \left\{ \left[\sum_{i=1}^L X_i \sum_{j=0}^{N_i} a_{ij} V^j P \right] + \left[\sum_{i=1}^L X_i \left(\sum_{j=0}^{N_i} a_{ij} V^{-j} P \right) \right] \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^L X_i = 1$$

که در آن:

L: تعداد لیتولوژی موجود در سازند،

X_i : درصد از لیتولوژی مورد نظر نسبت به کل حجم،

a_{ij} : ضریب رگرسیون،

N_i : درجه چند جمله رگرسیون برای لیتولوژی مورد نظر

V_S و V_P : به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی (Km/s).

در حقیقت، برتری روش دوم بر روش قبلی اعمال اثر هم‌زمان تمام لیتولوژی‌های موجود در عمق مورد مطالعه است. در این رابطه سرعت موج برشی با استفاده از یک میانگین ساده از متوسط حسابی^{۱۰} و همساز^{۱۱} سرعت‌های برشی در لیتولوژی‌های خالص به‌دست آمده است [۱۳].

۴- حذف اثر سیال و جایگزین نمودن سیال متعارف

همان‌طور که گفته شد، رابطه کاستاگنا- گرینبرگ برای سنگ‌های با اشباع‌شدگی کامل از آب می‌باشند. در غیر این صورت باید توسط روابط گاسمن تصحیح شوند. بهترین روش برای حذف تاثیر سیال از داده‌های مورد نظر، استفاده از یک سیال خاص در کل ضخامت مورد مطالعه است. این سیال خاص را که سیال متعارف^{۱۲} می‌نامند، به معنی وجود یک نوع سیال در کل ضخامت مورد مطالعه است که باعث تاثیر مشابه در کل ضخامت مورد بررسی، می‌شود. این در حالیست که در حالت عادی، بخشی از ضخامت تحت مطالعه مخزن از آب، بخشی از نفت و یا گاز اشباع شده است. در واقع، با جایگزین کردن یک نوع سیال نسبت به چند نوع سیال، شرایط مشابهی از نظر سیال موجود در منافذ برای کل ضخامت مورد نظر ایجاد می‌شود. به این ترتیب می‌توان گفت که تعامل بین سیال و سنگ در مدول موج طولی تاثیرگذار است و با شرایط یکسان تخلخل اگر نوع سیال نیز تغییر نکند، مدول موج طولی نیز تغییر نمی‌کند، اما اگر سیال تغییر کند مدول موج طولی نیز تغییر خواهد کرد. مدول موج طولی (M) برای امواج طولی به صورت ترکیبی خطی از مدول برشی و مدول ظاهری به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴].

$$M = K + \left(\frac{4}{3}\right)\mu \quad (2)$$

مقاومت یک ماده در مقابل تغییر حجم به صورت مدول ظاهری (K) یا مدول حجمی (B) تعریف می‌شود، در حالیکه مدول برشی (μ یا G) نمایش مقاومت یک ماده در مقابل تغییر شکل است.

برای حذف اثر سیال مراحل زیر انجام می‌شود:

گام اول: مدول ظاهری موثر ترکیبات سیال موجود در منافذ (\bar{K}_{fluid})، از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{\bar{K}_{fluid}} = \frac{S_{gas}}{K_{gas}} + \frac{S_{oil}}{K_{oil}} + \frac{S_{br}}{K_{br}} \quad (3)$$

که در آن؛ S_{gas} ، S_{oil} ، S_{br} به ترتیب نماد اشباع گاز، نفت و آب شور و K_{gas} ، K_{oil} ، K_{br} نماد مدول ظاهری گاز، نفت و آب شور می‌باشد.

گام دوم: مدول موج طولی (M_{log}) از چاه‌نمودارها، با استفاده از روابط ۴ محاسبه می‌شود:

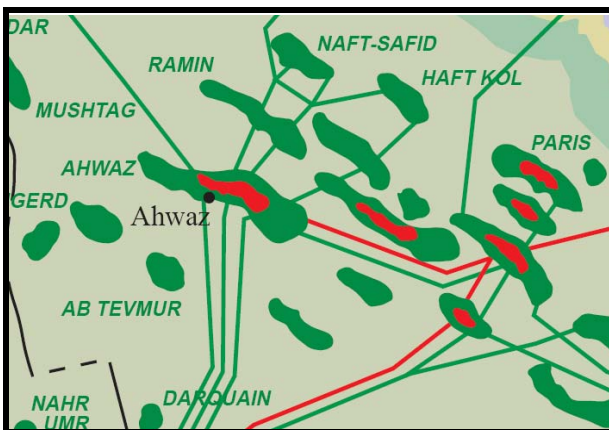
$$M_{log} = \rho_b V_p^2 \quad (4)$$

مدول موج برشی پس از اشباع کامل از آب و پیش از آن یکی است (رابطه ۹) [۱۴].

$$\mu_{dry} = \rho_b V_s^2 = \mu_{sat} \quad (9)$$

۵- زمین‌شناسی مخزن مورد مطالعه

میدان نفتی مورد نظر در ناحیه جنوبی دزفول به فاصله ۴۵ کیلومتری جنوب شرق شهر اهواز و ۲۰ کیلومتری جنوب شرق میدان آب تیمور واقع شده است. روند این ساختار همان روند زاگرس (شمال غرب- جنوب شرق) است، تبعیت می‌کند (شکل ۱). این میدان در دشتی مسطح قرار داشته و هیچ‌گونه رخنمون سطحی ندارد و از طریق اکتشافات زیرزمینی به کمک عملیات لرزه‌نگاری، وجود ساختمان نفتی در آن مشخص شده است. این میدان دارای سه مخزن نفتی (آسماری، بنگستان و خامی) می‌باشد که مطالعه حاضر بر روی مخزن آسماری آن انجام شده است. سازندهای مشاهده شده، به ترتیب از سطح زمین تا انتهای سازند آسماری، در جدول ۴ درج شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مورد مطالعه.

طاقدیس آسماری در این میدان در حدود ۲۳ کیلومتر طول و ۳ کیلومتر عرض دارد. این مخزن از جمله مخازن کربناته ترشیری ایران است که حداکثر ضخامت بخش نفت‌ده آن ۱۱۳ متر است. ضخامت آسماری در این میدان به‌طور قائم به ۸ بخش کاملاً مجزا تقسیم شده که هر بخش دارای لیتولوژی و اختصاصات پتروفیزیکی مربوط به خود است. در مخزن آسماری این میدان نفتی هر سه لیتولوژی عمده مخازن (ماسه‌سنگ، سنگ آهک و دولومیت) وجود دارد. بخش‌های ماسه‌سنگی به‌علت دارا بودن تخلخل و نفوذپذیری بیشتر و آب اشباع‌شدگی کمتر، قسمت اعظم نفت موجود در مخزن را در خود نگهداری می‌کنند. بررسی مقاطع نازک و نمودارهای چاه‌پیمایی حاکی از آن است که زون ۱ عمدتاً کربناته (آهک و دولومیت) و زون‌های ۲ و ۳

که در آن؛ ρ_b چگالی حجمی و V_p سرعت موج فشاری سنگ در عمق مورد مطالعه است.

گام سوم: مدول موج طولی مربوط به سنگ خشک (M_{dry}) نیز با استفاده از مدول موج طولی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_{dry} = M_{mineral} \frac{1 - (1 - \phi) M_{log} / M_{mineral} - \phi M_{log} / \bar{K}_{fluid}}{1 + \phi - \phi M_{mineral} / \bar{K}_{fluid} - M_{log} / K_{mineral}} \quad (5)$$

$$M_{mineral} = K_{mineral} + 4\mu_{mineral} / 3 \quad (6)$$

که در آن؛ ϕ تخلخل، $\mu_{mineral}$ مدول موج برشی و $K_{mineral}$ مدول ظاهری در فاز کانی است [۱۴]. تغییرات مدول‌های الاستیک در کانی‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است [۱۲].

جدول ۳. تغییرات مدول‌های الاستیک در کانی‌های مختلف [۱۲].

نوع سنگ	مدول برشی (GPa)	مدول ظاهری (GPa)	چگالی (g/cm^3)	موج برشی (m/s)	موج طولی (m/s)
کوارتز	۴۵	۳۶/۶	۲/۶۵	۴/۱۲	۴/۱۲
کلسیت	۳۲	۷۶/۸	۲/۷۱	۳/۴۴	۶/۶۴
دولومیت	۴۵	۴۹/۹	۲/۸۷	۳/۹۶	۳/۹۶
انیدریت	۲۹/۱	۵۶/۱	۲/۹۸	۳/۱۲	۵/۶۴
ایلپیت	۴۱/۱	۶۱/۵	۲/۷۹	۲/۷۹	۶/۴۶

گام چهارم: مدول موج طولی سنگ اشباع شده از سیال متعارف (M_{common}) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_{common} = M_{mineral} \frac{\phi M_{dry} - (1 + \phi) K_{ef} M_{dry} / M_{mineral} + K_{ef}}{(1 - \phi) K_{ef} + \phi M_{mineral} - K_{ef} M_{dry} / K_{mineral}} \quad (7)$$

که در آن؛ K_{ef} مدول ظاهری سیال متعارف است. از آنجایی که روابط کاستاگنا- گرینبرگ برای سنگ‌های اشباع کامل از آب شور تعریف شده است، سیال متعارف در رابطه بالا آب با مدول ظاهری ۲/۲۵ در نظر گرفته شد.

گام پنجم: برای به‌دست آوردن سرعت موج فشاری پس از حذف اثر سیال و جایگزین نمودن آب، باید از رابطه ۸ استفاده شود:

$$V_p' = \sqrt{\frac{M_{common}}{\rho_b}} \quad (8)$$

شایان ذکر است، از آنجایی که موج برشی تنها از جامدات عبور می‌کند، تغییرات سیال بر این پارامتر بی‌اثر بوده و در واقع

عمدتاً ماسه‌سنگی است. بخش‌های ۲ و ۳ مهم‌ترین قسمت مخزن آسماری هستند و قسمت عمده نفت از این بخش‌ها استخراج می‌شود [۱۵].

جدول ۴: توالی سازندهای مشاهده شده از سطح زمین تا انتهای سازند آسماری.

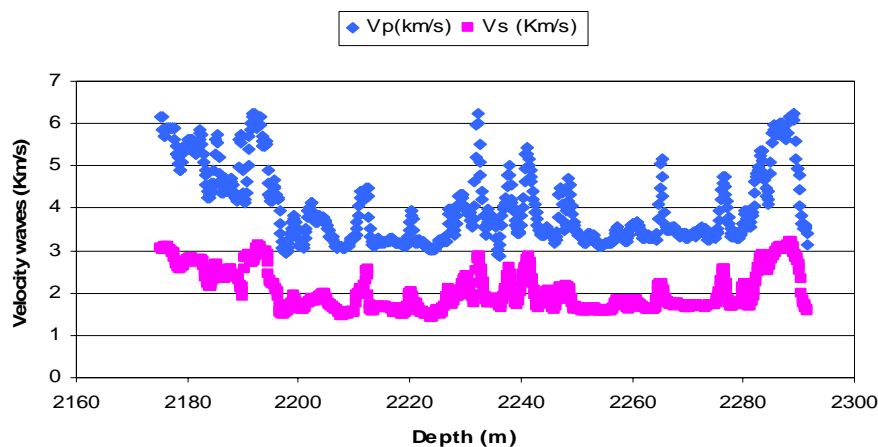
نام سازند	توضیحات
سازند آغاجاری	سازند آغاجاری شامل سیلت‌های خاکستری، مارن‌های سیلتی همراه با پوسته‌های چرت است.
سازند میشان	این سازند غالباً از مارن‌های خاکستری، مارن‌های ماسه‌سنگی قرمز تا قهوه‌ای و به ندرت از لایه‌های نازک کربناته ماسه‌سنگی تشکیل شده است.
سازند گچساران	سازند گچساران در اثر بالا آمدگی و محدود شدن یک حوضه رسوبی و به‌صورت لایه تبخیری ضخیم به‌وجود آمده است. این سازند شامل هفت بخش بوده که قسمت پایینی آن پوش سنگ آسماری را تشکیل می‌دهد. عضو پوش سنگ سازند گچساران غالباً انیدریت، مارن، شیل و لایه‌های نازکی از کربنات است.
سازند آسماری	ضخامت سازند آسماری در میدان مورد مطالعه بین ۴۵۰ تا ۵۱۵ متر متغیر است. از دید سنگ‌شناسی، سازند آسماری غالباً از ماسه‌سنگ و سنگ‌های کربناته تشکیل شده است.
سازند پابده	ضخامت سازند پابده در میدان مورد مطالعه حدود ۲۲۰ متر است. این سازند عمدتاً از مارن‌های سیلتی خاکستری تیره تا شیل‌های گلکونیتی و بیتومنی روشن تشکیل شده است.

۶- تخمین سرعت موج برشی در مخزن مورد مطالعه

در یک چاه از مخزن مورد نظر به وسیله ابزار نمودارگیری DSI چاه‌نمودار زمان‌گذر موج برشی تهیه شده است و در دیگر چاه‌ها فقط زمان‌گذر موج فشاری موجود است. حدود ۱۲۰ متر (از عمق ۲۱۷۵ تا ۲۲۹۵ متری) از چاه مورد مطالعه با فاصله نمونه‌برداری ۱۵Cm، دارای چاه نمودار زمان‌گذر موج برشی است (۷۶۰ داده). داده‌های این چاه متعلق به زون‌های ۱، ۲ و ۳ سازند آسماری بوده و عمدتاً دربرگیرنده زون مخزنی و حاوی نفت می‌باشد. شکل ۲ نشان‌دهنده یک رابطه خوب بین V_p و V_s در ضخامت مورد نظر در چاه مورد مطالعه است.

۶-۱- حذف اثر سیال و جایگزین کردن سیال متعارف در چاه مورد مطالعه

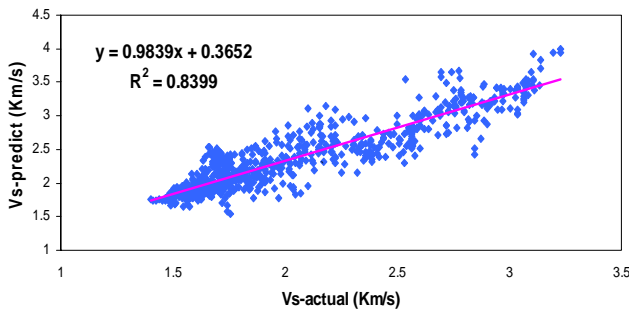
داده‌های مورد مطالعه لزوماً تحت شرایط اشباع کامل از آب نبوده و دارای اشباع شدگی‌های متفاوت از نفت هستند. از طرف دیگر، تخمین سرعت موج برشی به کمک رابطه کاستاگنا- گرینبرگ منوط به داشتن سنگ‌هایی با اشباع کامل از آب شور است. بنابراین، در ابتدا محاسبات مربوط به حذف اثر سیال و جایگزین نمودن آب به‌عنوان سیال متعارف بر روی داده‌ها انجام می‌شود. با استفاده از روابط ۳ تا ۸، سرعت موج فشاری در شرایط اشباع کامل از آب به‌دست می‌آید. شکل ۳ تفاضل مقادیر سرعت موج فشاری اولیه و پس از حذف اثر سیال را برحسب درجه اشباع آب نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، یک روند نزولی قابل مشاهده است. به عبارت بهتر، در نقاطی که اشباع‌شدگی نفت بیشتر است این اختلاف افزایش می‌یابد و برعکس.



شکل ۲: یک همبستگی خوب بین V_p و V_s در چاه مورد مطالعه.

۶-۲- تخمین سرعت موج برشی به روش کاستاگنا-گرینبرگ در چاه مورد مطالعه

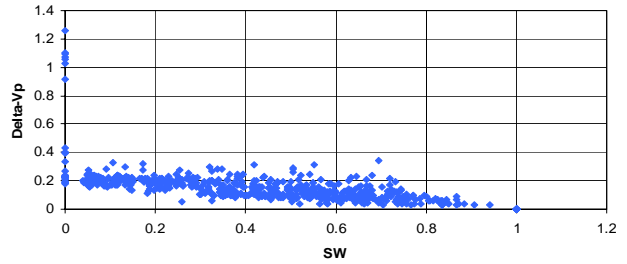
رابطه تجربی کاستاگنا-گرینبرگ برای تخمین سرعت موج برشی از روی داده‌های چاه‌نمودار در حالت اشباع از سیال متعارف (آب) برای چاه مورد نظر به کار رفت. با اعمال ضرایب رگرسیون کاستاگنا (جدول ۲) در رابطه ۱، سرعت موج برشی تخمین زده شد. ضریب همبستگی برای مقادیر تخمین‌زده شده با مقادیر واقعی ۰/۸۴ به دست آمد که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در مقابل موج برشی تخمین زده شده توسط مدل گرینبرگ.

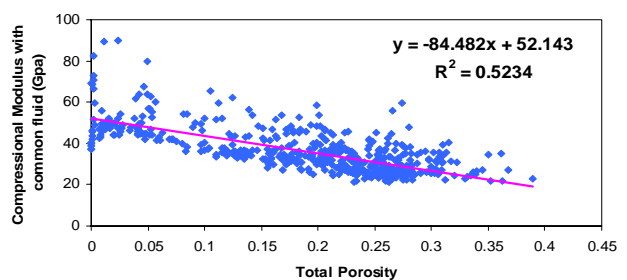
۶-۳- تصحیح مدل کاستاگنا-گرینبرگ در چاه مورد مطالعه

این نکته حائز اهمیت است که روابط کاستاگنا-گرینبرگ، روابط تجربی هستند و از حجم وسیعی از داده‌های در دسترس این محققان استنتاج شده‌اند؛ بنابراین، قابل تعمیم برای تمام نقاط جهان نمی‌باشند. البته، در صورت کمبود داده می‌توان آنها را در منطقه مورد مطالعه به کار برد ولی بهتر است در صورت امکان این روابط با توجه به ویژگی‌های میدان مورد مطالعه تصحیح شوند. بنابراین، مدل کاستاگنا-گرینبرگ با استفاده از ضرایب رگرسیون‌های به دست آمده در لیتولوژی‌های مختلف تصحیح شد. این ضرایب پس از انجام دو تصحیح متفاوت به دست آمدند. تصحیح اول بر اساس لیتولوژی صورت گرفت. به این ترتیب که ابتدا داده‌ها بر اساس لیتولوژی خالص به صورت نزولی طبقه‌بندی شدند. تعداد داده‌های کمی از کلسیت و شیل با درصد خلوص بیشتر از ۹۰٪ از حجم کل وجود دارد (کمتر از ۳۰ داده)، بنابراین از ضریب رگرسیون کاستاگنا (جدول ۳) برای آنها استفاده شده است. از طرف دیگر، تعداد داده‌های ماسه‌سنگ و دولومیت خالص (بیشتر از ۹۰٪ حجم کل)، کافی است (بیش از ۱۰٪ تعداد کل داده‌ها) و می‌توان از ضرایب رگرسیون آنها در رابطه گرینبرگ استفاده کرد. شکل ۶ و ۷ رابطه بین V_p-V_s را در قسمت‌هایی از چاه که دارای ماسه‌سنگ و دولومیت خالص است، نشان می‌دهد.



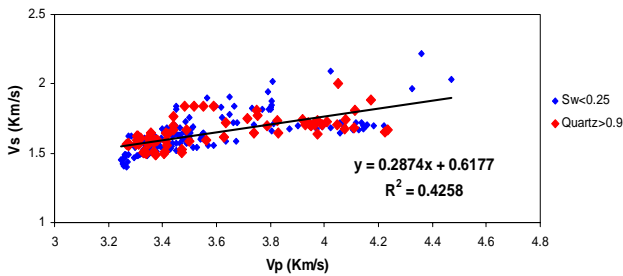
شکل ۳: تفاضل مقادیر سرعت موج فشاری اولیه و پس از حذف اثر سیال بر حسب درجه اشباع آب

تغییرات مدول موج طولی نسبت به تخلخل پس از حذف اثر سیال در ماسه‌سنگ به‌عنوان لیتولوژی غالب، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات موج طولی رابطه مستقیم و خطی با تخلخل ندارد. به عبارت دیگر، با یکسان کردن نوع سیال، مدول موج طولی مستقیماً به تخلخل وابسته نیست. علل بسیاری را می‌توان برای این مسئله ذکر نمود که از آن میان دو دلیل از اهمیت بیشتری برخوردارند. اول اینکه، طبق جدول ۱ عوامل متعددی بر امواج لرزه‌ای اثرگذار هستند، بنابراین تنها با حذف اثر سیال، اثر سایر پارامترها باقی است. دوم اینکه، در حالت واقعی معادلات فوق در ماسه‌سنگ‌های تمیز، که مقدار و فشار سیال در آنها بالاست، به خوبی جواب می‌دهند؛ در حالیکه ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه، کاملاً سخت و سنگ نشده‌اند. از طرف دیگر، رابطه سیال و سنگ بسیار پیچیده است، بنابراین برای استفاده از تئوری‌های مختلف نیاز به فرضیاتی است که بتوانند این پیچیدگی را ساده کنند. در نتیجه تعدادی فرضیات کاربردی برای استفاده از معادله گاسمن فراهم آمده است که بیشتر به اسکلت و استخوانبندی سنگ می‌پردازد. واضح است که در صورت صادق نبودن این فرضیات برای ضخامت مورد مطالعه، نتایج مطلوبی حاصل نخواهد شد. شایان ذکر است همبستگی بین مدول موج طولی و تخلخل افزایش چشمگیری یافته است که این خود دلیلی بر درستی عملیات انجام شده است ولی به دلایل ذکر شده نمی‌توان این رابطه را به صورت خطی یا سهمی مشاهده نمود.



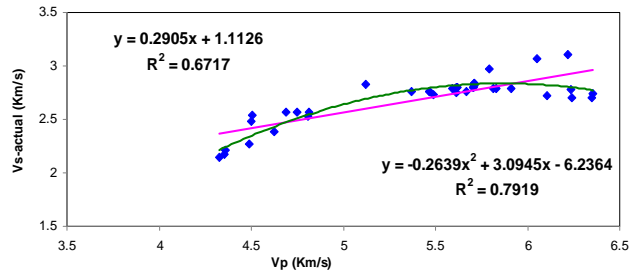
شکل ۴: تغییرات مدول موج طولی نسبت به تخلخل در حالت اشباع از سیال متعارف

از آنجایی که در چاه مورد نظر، ماسه‌سنگ لیتولوژی غالب است، پیدا کردن ضریب رگرسیون آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. به دلیل اینکه سیال نقش کنترل‌کننده‌ای بر سرعت امواج لرزه‌ای دارد، طبقه‌بندی داده‌ها بر اساس درجه اشباع نفت صورت گرفت. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد، بیشتر ذخیره نفتی در مخزن آسماری در زون ۲ و ۳ با لیتولوژی ماسه‌سنگی قرار دارد. بنابراین در بخش‌هایی از چاه مورد مطالعه که درجه اشباع نفت بیشتر است، خلوص ماسه‌سنگ نیز بیشتر خواهد بود، در نتیجه می‌توان از رابطه حاصل برای تخمین سرعت موج برشی به جای ضرایب کاستاگنا استفاده کرد. شکل ۹ نشان‌دهنده سرعت موج فشاری در مقابل سرعت موج برشی در بخش‌هایی از چاه است که درجه اشباع نفت آن بیش از ۰.۷۵٪ است. نقاط قرمز رنگ ماسه‌سنگ‌های با خلوص بیش از ۰.۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش اعظمی از داده‌های با اشباع‌شدگی بالای نفت، در ماسه‌سنگ خالص قرار دارد و این امر دقیقاً طبق انتظار است. طبق این شکل، V_p-V_s همبستگی کمی دارند که علت آن قابل درک است. تداخل زیاد این زون و اشباع‌شدگی بالای نفت موجب بروز رفتار متفاوتی از امواج فشاری و برشی شده‌اند. همچنین عدم تراکم ماسه‌سنگ و حضور شیل نیز نقش مهمی در این راستا ایفا می‌کند.

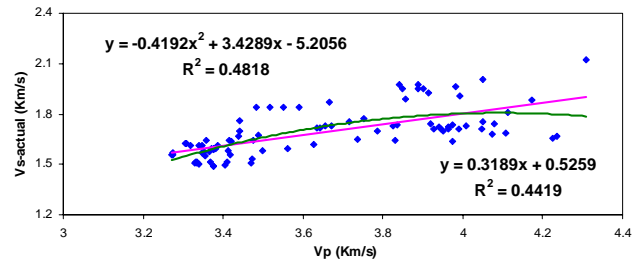


شکل ۹: سرعت موج فشاری در مقابل سرعت موج برشی برای ماسه‌سنگ خالص در درجه اشباع بیشتر از ۰.۷۵٪ نفت.

در نهایت، با قرار دادن ضرایب کاستاگنا برای سنگ‌آهک و انیدریت و همچنین ضرایب به دست آمده از تصحیحات اول و دوم به ترتیب برای دولومیت و ماسه‌سنگ، مدل گرینبرگ برای داده‌های چاه مورد نظر اصلاح شد (جدول ۵). سرعت موج برشی تخمین زده شده بر اساس مدل تصحیح شده گرینبرگ همبستگی ۰.۹۴ را با مقادیر چاه‌نمودار نشان دادند (شکل ۱۰).

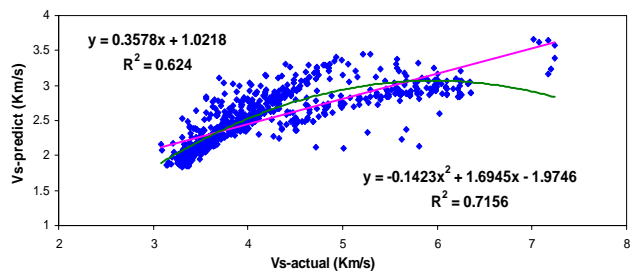


شکل ۶: سرعت موج فشاری در مقابل سرعت موج برشی برای دولومیت خالص.



شکل ۷: سرعت موج فشاری در مقابل سرعت موج برشی برای ماسه‌سنگ خالص.

همان‌طور که دیده می‌شود، در V_p-V_s در دولومیت دارای ضریب همبستگی نسبتاً بالایی است و از ضرایب رگرسیون آن به جای ضریب رگرسیون کاستاگنا استفاده شد. در مقابل، این رقم در ماسه‌سنگ کاهش می‌یابد ولی نکته اصلی هنگامی مشخص می‌شود که از ضرایب رگرسیون ماسه‌سنگ برای اصلاح مدل کاستاگنا- گرینبرگ استفاده شد. در این صورت، ضریب همبستگی برای سرعت موج برشی تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده ۰.۶۲ به دست می‌آید (شکل ۸) که نه تنها رقم پایینی است بلکه از همبستگی حاصل از مدل کاستاگنا- گرینبرگ (۰.۸۴) هم کمتر است. یعنی انتظار ما برای اصلاح مدل و افزایش ضریب همبستگی تخمین برآورده نشده است که نشانه عدم اعتبار این ضرایب برای تخمین سرعت موج برشی است. این پاسخ ناشی از تراکم و سنگ‌شدگی پایین ماسه‌سنگ منطقه مورد مطالعه است، به همین دلیل مطابق انتظار (مشابه ماسه‌سنگ متراکم) رفتار نمی‌کند.



شکل ۸: سرعت موج برشی تخمین زده شده در مقابل مقادیر چاه‌نمودار با استفاده از ضرایب رگرسیون ماسه‌سنگ.

گرینبرگ تجربی هستند و قابل تعمیم برای تمام میدان‌های جهان نمی‌باشند، برای میدان مورد مطالعه تصحیح شده‌اند. ضرایب رگرسیون جدید پس از انجام دو تصحیح متفاوت بر اساس لیتولوژی و درجه اشباع نفت به دست آمد. تعداد داده‌های کمی از کلسیت و شیل با درصد خلوص بیشتر از ۹۰٪ از حجم کل وجود دارد، بنابراین از ضریب رگرسیون کاستاگنا برای آنها استفاده شده است. ولی، تعداد داده‌های ماسه‌سنگ و دولومیت خالص کافی است و تصحیحات بر روی آنها انجام شد. نکته دیگر اینکه، پس از انجام تصحیحات اول و اعمال ضرایب حاصل در مدل، ضریب همبستگی سرعت موج برشی تخمینی و واقعی کاهش می‌یابد. این پاسخ خلاف انتظار، به دلیل مترکم نبودن ماسه‌سنگ در مخزن مورد نظر است. بنابراین، انجام تصحیحات دوم گریزناپذیر است. در نهایت از ضرایب کاستاگنا برای آهک و شیل، از ضرایب تصحیح اول برای دولومیت و از ضرایب تصحیح دوم برای ماسه‌سنگ استفاده شد. ضریب همبستگی بین مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی در مدل کاستاگنا-گرینبرگ به ترتیب قبل و بعد از تصحیح ۰/۸۴ و ۰/۹۴ است. نتایج حاکی از موفقیت مدل تصحیح شده کاستاگنا-گرینبرگ در تخمین سرعت موج برشی است.

۸- تقدیر و تشکر

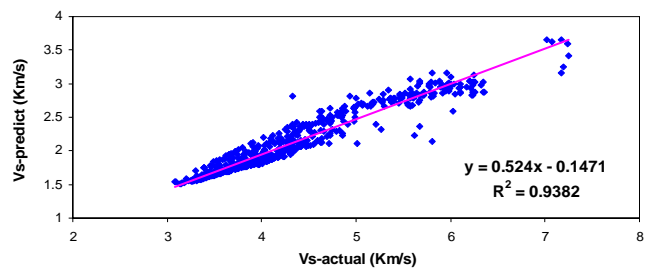
از امور پژوهش و توسعه شرکت مهندسی و توسعه نفت (متن) تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- [1] Eskandari, H., Rezaee, M.R., Mohammadnia, M., 2004, "Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from well log data for a carbonate reservoir", south-west Iran. CSEG RECORDER, pp. 42-48.
- [2] Pickett, G.R., 1963, "Acoustic character logs and their application in formation evaluation" J. Pet. Technol. 15, 650-667.
- [3] Milholand, P., Manghni, M.H., Schlanger, S.O., Sutton, G.H., 1980, "Geoacoustic modeling of deep-sea carbonate sediments", J. Acoust. Soc. Am., 68: PP. 1351-1360.
- [4] Thomsen, L., "Weak elastic anisotropy", 1986, Geophys, 51: P. 1654-1966.
- [5] Han, D. and Nur, A., and Morgan, D., 1986, "Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones", Geophysics, 51, 2093-2107.

جدول ۵: ضرایب رگرسیون (a_{ij}) برای لیتولوژی خالص ارائه شده بعد از اعمال تصحیحات.

لیتولوژی	a_{i2}	a_{i1}	a_{i0}	R^2
ماسه سنگ	۰	۰/۲۸۷۴	۰/۶۱۷۷	۰/۴۲۵۸
آهک	-۰/۰۵۵۰۸	۰/۰۱۶۷۷	-۱/۰۳۰۴۹	۰/۹۹۰۹۶
دولومیت	-۰/۲۶۳۹	۳/۰۹۴۵	-۶/۲۳۶۴	۰/۷۹۱۹
شیل	۰	۰/۷۶۹۶۹	-۰/۸۶۷۳۵	۰/۹۷۹۳۹



شکل ۱۰: سرعت موج برشی تخمین زده شده در مقابل مقادیر چاه نمودار پس از تصحیح مدل گرینبرگ.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

رابطه کاستاگنا-گرینبرگ برای تخمین سرعت موج برشی از سرعت موج فشاری در سنگ‌های چندکانه‌ای و اشباع کامل از آب، ارائه شد و در غیر این صورت باید توسط روابط گاسمن تصحیح شوند. مطالعه حاضر در یک چاه از مخزن آسماری در یک میدان نفتی در جنوب غربی ایران انجام شده است. این چاه دارای چاه نمودار زمان گذر موج برشی در زون مخزنی است. داده‌های مورد مطالعه لزوماً تحت شرایط اشباع کامل از آب نبوده و دارای اشباع‌شدگی‌های متفاوت از نفت هستند. بنابراین، در ابتدا محاسبات مربوط به حذف اثر سیال و جایگزین نمودن آب به‌عنوان سیال متعارف بر روی داده‌ها انجام می‌شود. به این ترتیب، سرعت موج فشاری در شرایط اشباع کامل از آب به دست می‌آید.

نکته مهم اینکه، با یکسان کردن نوع سیال، مدول موج طولی مستقیماً به تخلخل وابسته نیست که علت آن را بیش از همه می‌توان به ماهیت ماسه‌سنگ منطقه وابسته دانست. در حالت واقعی این عملیات در ماسه‌سنگ‌های تمیز به خوبی جواب می‌دهند، در حالیکه ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه، سخت نشده یا کم سفت شده هستند. همچنین با حذف اثر سیال تنها اثر یک پارامتر حذف شده است ولی تاثیر سایر پارامترها همچنان باقی است، بنابراین نمی‌توان این رابطه را به صورت خطی یا سهمی مشاهده نمود. از آنجایی که روابط کاستاگنا-

- and applications" Geophys. Prospect. 40, 195–209.
- [11] Rezaee M.R., Kadkhodaie A., Barabadi A., 2007, "Prediction of shear wave velocity from petrophysical data utilizing intelligent systems: An example from a sandstone reservoir of Carnarvon Basin, Australia", Journal of Petroleum Science and Engineering, 55, p. 201–212.
- [12] Takahashi, I., 2005, "Rock physics as a quantitative tool for seismic reservoir characterization", INPEX Corporation, pp. 1-175.
- [13] Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 2003, "The rock physics handbook".
- [14] Dvorkin, J.P., 2003, "Velocity and Porosity Empirical and Theoretical Models".
- [15] عزیزاده پیرزمان، سعید، ۱۳۸۵، "ارزیابی اختصاصات مخزنی و لیتولوژی سازند آسماری"، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [6] Han, D., 1989, "Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity and clay content in sandstone", Geophysics 54, 82–89.
- [7] Krief, M., Garat, J., Stellingwerf, J., Venter, J., 1990, "A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full wave from sonic)", Log Anal. 31, 35–369.
- [8] Castagna, J.P., Batzle, M.L., Eastwood, R.L., 1985, "Relationship between compressional and shear wave velocities in silicate rocks", Geophysics 50, 571–581.
- [9] Castagna, J.P., Batzle, M.L., Kan, T.K., 1993, "Rock physics—the link between rock properties and AVO response", In: Castagna, J.P., Backus, M.M. (Eds.), Offset-Dependent Reflectivity—Theory and Practice of AVO Analysis. Soc. Expl. Geophysics, pp. 124–157.
- [10] Greenberg, M.L., Castagna, J.P., 1992, "Shear wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification

پی‌نوشت

- ¹ Pickett
- ² Milholand
- ³ Thomsen
- ⁴ Han
- ⁵ Krief
- ⁶ Castagna
- ⁷ Greenberg
- ⁸ monomineral
- ⁹ multimineral
- ¹⁰ arithmetic
- ¹¹ harmonic
- ¹² Common fluid

