

وارون سازی تغییرات دامنه در برابر دور افت بر اساس رابطه اسمیت و گیدلو

ناصر کشاورز فرج خواه^۱، احسان صالحی^۲، اصغر نادری^{۳*}، احمد رضا جوانبختی^۴

^۱ عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت، ضلع غربی ورزشگاه آزادی

^۲ پژوهنده، پژوهشگاه صنعت نفت، ضلع غربی ورزشگاه آزادی

^۳ پژوهنده پژوهشگاه صنعت نفت، ضلع غربی ورزشگاه آزادی

^۴ کارشناس ارشد، مدیریت اکتشاف نفت ایران

چکیده

وارون سازی تغییرات دامنه در مقابل دورافت یکی از روش های مطالعه خصوصیات مخزن با استفاده از ابزار لرزه ای می باشد. مطالعه تغییرات دامنه در مقابل دورافت در اکتشاف و ارزیابی کمی و کیفی منابع هیدرات گازی نیز مورد استفاده قرار می گیرد. حضور هیدرات گازی و گاز آزاد در داخل رسوبات باعث تغییر خصوصیات کنشسان رسوب شده و اثر آن را می توان در پاسخ لرزه ای بدست آمده از این منابع مورد بررسی قرار داد. در این مقاله وارون سازی بر اساس رابطه خطی اسمیت و گیدلو بر روی بازتابنده شبیه ساز بستر صورت پذیرفته و به منظور بررسی صحت تخمین صورت پذیرفته، مقادیر آن با مقادیر واقعی مقایسه شده است. همچنین اثر تغییر میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد بر روی ضرایب رابطه اسمیت و گیدلو مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از مناسب بودن تخمین میزان سری بازتابی سرعت موج تراکمی نسبت به سرعت موج برشی می باشد.

کلمات کلیدی

وارون سازی تغییرات دامنه در مقابل دورافت، هیدرات گازی، اسمیت و گیدلو، اشباع هیدرات گازی

نکات برجسته پژوهش

- اولین بار در کشور بر روی هیدرات گازی انجام شده است.
- برنامه نویسی برای محاسبات و روتین نبودن آنها.
- عدم استفاده از داده های چاهی و جامع و کامل بودن نسبت به کارهای روتین.

۱- مقدمه

رابطه اسمیت و گیدلو [۱] به عنوان یک چینش جدیدی از رابطه آکی و ریچاردز [۲] در نظر گرفته شده است که در آن سری بازتابی چگالی بر اساس رابطه گاردنر با سری بازتابی سرعت موج تراکمی جایگزین شده است ((1 و (2)).

$$\rho = a\alpha^{1/4}$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{4} \frac{\Delta\alpha}{\alpha},$$

(1)

$$R(\theta) = \left(\frac{5}{8} - \frac{1}{2} \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2(\theta) + \frac{1}{2} \tan^2(\theta)\right) \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \left(-4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2(\theta)\right) \frac{\Delta\beta}{\beta},$$

(2)

بعد از محاسبه سری بازتابی موج تراکمی و برشی امکان محاسبه نشانگر شبه نسبت پواسون بر اساس رابطه زیر وجود دارد.

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - \frac{\Delta\beta}{\beta}$$

(3)

که α سرعت موج تراکمی، β سرعت موج برشی، σ نسبت پواسون، $g(t)$ ضریبی بر اساس نسبت سرعت دو موج پیکره‌ای می‌باشد. نشانگر فاکتور سیال در مواردی که رابطه سرعت موج برشی و تراکمی از رابطه کاستاگنا و همکاران [۳] تبعیت نکند (مانند محدوده حاوی گاز و یا لایه‌های حاوی سنگ‌های تبخیری و کربناته) مقدار زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. رابطه کاستاگنا و همکاران برای تخمین سرعت موج برشی از موج تراکمی و یا بالعکس برای سنگ‌های گِل گونه ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد و به صورت زیر می‌باشد:

$$V_p = 1.16V_s + 1360.$$

(4)

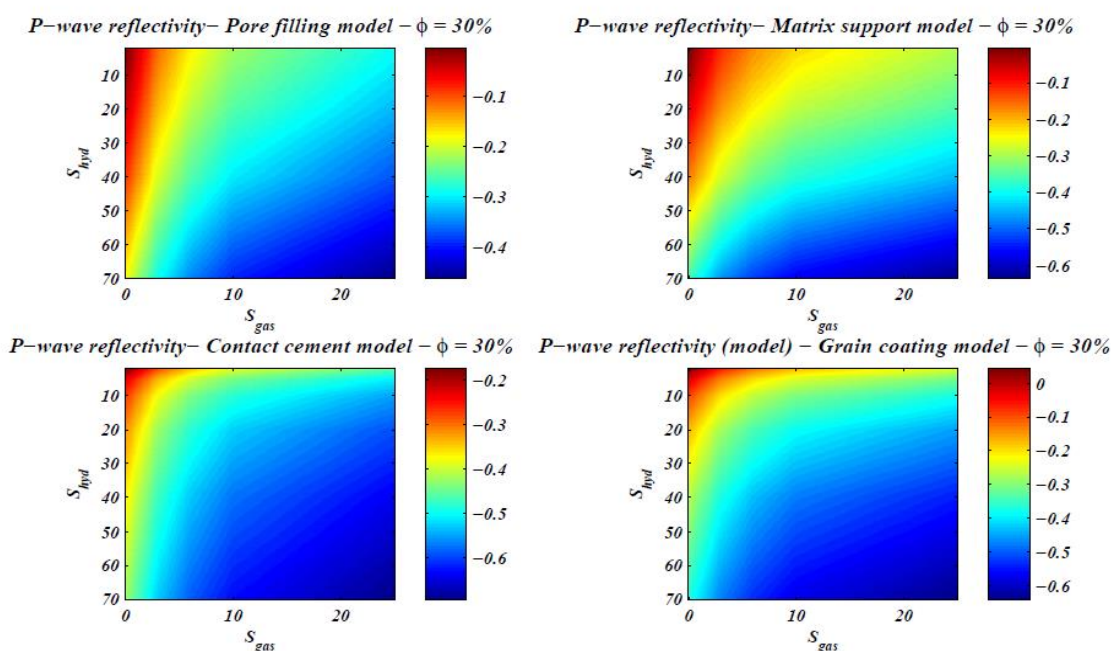
با استفاده از وارون سازی اطلاعات تغییر دامنه نسبت به دورافت با این اسمیت و گیدلو می‌توان نشانگر سری بازتابی موج تراکمی و موج برشی را بدست آورد. این رابطه با تقریب رابطه بین سرعت موج تراکمی و چگالی زده شده (رابطه گاردنر) و برای تعیین سری بازتابی سرعت موج تراکمی و موج برشی نیاز به تعیین نسبت دو موج پیکره‌ای وجود دارد.

۲- وارون سازی بر اساس رابطه اسمیت و گیدلو

وارون سازی بر اساس رابطه ۲، سری بازتابی سرعت موج تراکمی و برشی را نتیجه خواهد داد. نشانگر سری بازتابی سرعت موج تراکمی بیانگر میزان تغییر سرعت موج تراکمی در مرز مشترک دو لایه است. در محیط‌های رسوبی میزان تغییرات چگالی نسبت به تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای بسیار کمتر است. این موضوع سبب می‌شود تا سرعت انتشار امواج لرزه‌ای بیش از چگالی، مقاومت لرزه‌ای را تحت تاثیر قرار دهد. به این منظور، مدلسازی براساس چهار مدل توزیع هیدرات توسط اکر [۴] و

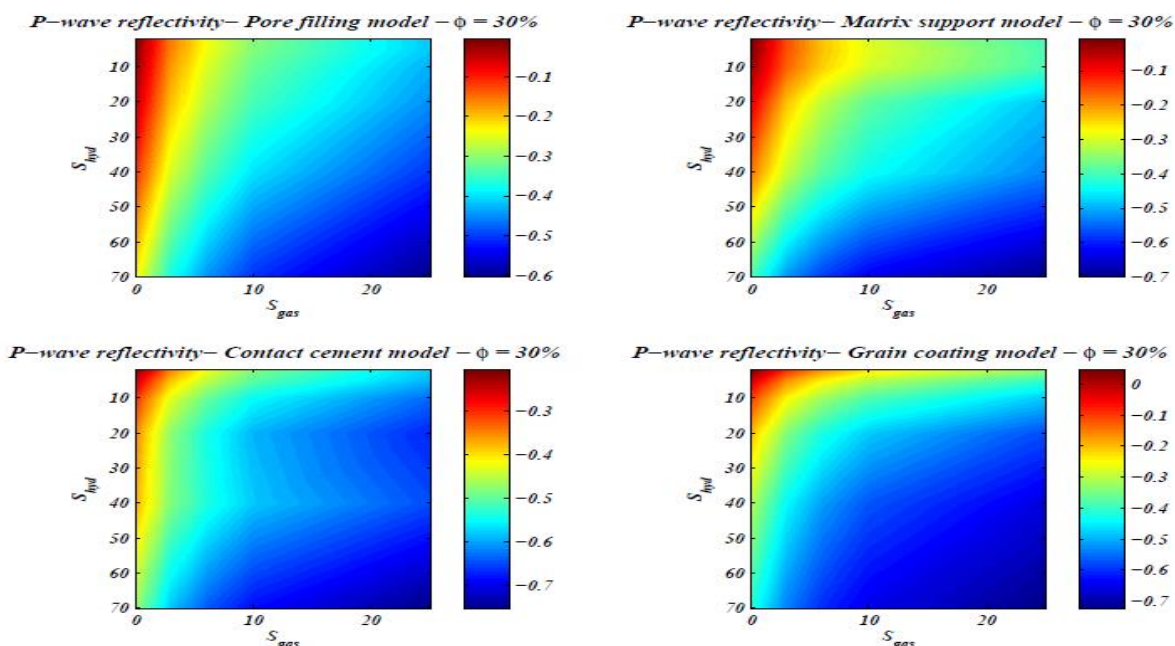
بر اساس روابط فیزیک سنگی مربوط به هر مدل ارائه شده توسط دورکین و نور [۵]، نور و همکاران [۶]، میندیلین [۷] است. مقدار تخلخل رسوبات ۳۰ درصد و ۶ مقدار مختلف اشباع هیدرات گازی و ۵ مقدار مختلف اشباع گاز در نظر گرفته شده است. نشانگرهای پیش برانبارشی، مبتنی بر رابطه ۲ که شامل نشانگر عرض از مبدأ، گرادیان و انحناء (در تقریب ۲ و ۳ جمله ای) هستند برای ۱۲۰ مدل و برای بازتابنده شبیه ساز بستر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مورد نشانگرهای پیش از برانبارش مقادیر حاصل از وارون سازی با مقادیر حقیقی در بازتابنده BSR برای این مدل‌های فیزیک سنگی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

شکل 1 مقادیر واقعی این نشانگر را در مقادیر مختلف اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد در تخلخل ۳۰ درصد بصورت دو بعدی نشان می‌دهند. این شکل نشان می‌دهد که روند تغییر نمودارها به ازای تغییرات اشباع هیدرات و گاز آزاد برای چهار مدل توزیع مختلف تقریباً مشابه هستند که برای دو مدل اول و دوم و دو مدل سوم و چهارم این شباهت بیشتر می‌شود. روند این نمودارها به این صورت است که افزایش میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد به علت افزایش اختلاف سرعت موج تراکمی سبب افزایش اندازه ضریب بازتاب این موج شده است.



شکل 1. نمودار دو بعدی مقادیر واقعی نشانگر سری بازتابی سرعت موج تراکمی مدل‌های ساخته شده برای میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد مختلف و در تخلخل ۳۰ درصد.

نتایج حاصل از وارون سازی AVO برای تعیین نشانگر سری بازتابی سرعت موج تراکمی برای تخلخل ۳۰ درصد در شکل 2 بصورت دو بعدی نشان داده شده است. برای تخمین سری بازتابی سرعت موج تراکمی با استفاده از وارون سازی احتیاج به اطلاعات نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی است و خطای تخمین این نسبت نتیجه وارون سازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در شکل مشاهده می‌شود که در درصدهای بالای هیدرات گازی و گاز آزاد مقادیر تخمین زده شده اندکی بیشتر از مقادیر واقعی است و این مساله به واسطه خطای نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی واقعی است.



شکل 2. نمودار دو بعدی مقادیر وارون سازی شده نشانگر سری بازتابی سرعت موج تراکمی مدل‌های ساخته شده بر اساس تحلیل AVO برای میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد مختلف و در تخلخل ۳۰ درصد.

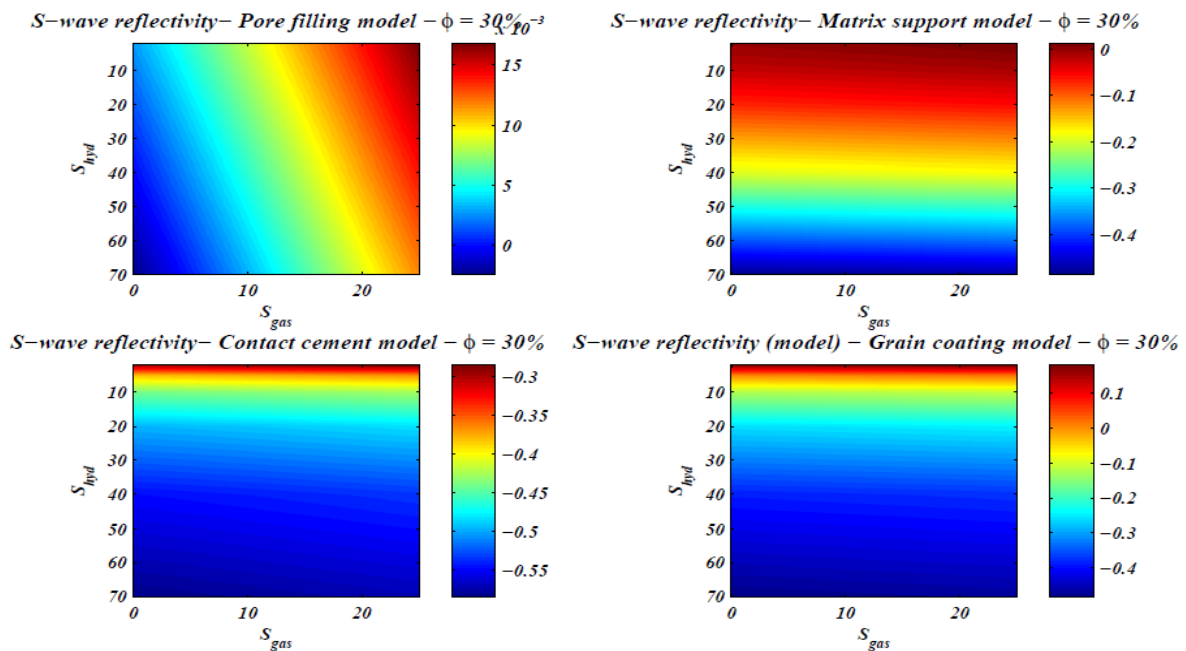
نشانگر سری بازتابی سرعت موج برشی بیانگر میزان تغییر سرعت این موج پیکره‌ای در مرز مشترک دو لایه است. در محیط‌های رسوبی میزان تغییرات چگالی نسبت به تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای بسیار کمتر است و این موضوع سبب می‌شود تا سرعت انتشار امواج لرزه‌ای بیش از چگالی، مقاومت لرزه‌ای را تحت تاثیر قرار دهد. شکل 3 مقادیر واقعی این نشانگر را در مقادیر مختلف اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد در تخلخل ۳۰ درصد بصورت دو بعدی نشان می‌دهد. در مورد مدل اول توزیع هیدرات گازی تغییر سرعت موج برشی تنها به واسطه تغییر چگالی حاصل می‌شود. در این حالت با کاهش میزان چگالی به واسطه حضور هیدرات گازی یا گاز آزاد، سرعت موج برشی اندکی افزایش می‌یابد. مدل‌های مختلف توزیع هیدرات گازی رفتارهای متفاوتی را در تغییر سری بازتابی سرعت موج برشی به ازای تغییر میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد نشان می‌دهند.

در مدل اول که هیدرات و گاز نقش پرکننده فضای منفذی را دارند، سرعت موج برشی وابستگی اندکی به درصد اشباع سیال منفذی دارد که این وابستگی تنها مربوط به تغییرات چگالی در اثر جایگزینی آب نمک با هیدرات گازی و گاز آزاد است. برای این مدل مقدار مقاومت برشی بسیار کوچک و نزدیک به صفر است (همانند سری بازتابی مقاومت لرزه‌ای موج برشی). در این مدل توزیع، زمانی که اشباع گاز کم است، حضور هیدرات گازی باعث تغییر چندانی در سری بازتابی سرعت موج برشی نشده است. اما در زمانی که میزان اشباع گاز آزاد بالاست، کاهش چگالی به وجود آمده موجب افزایش سرعت موج برشی و در نتیجه افزایش اندازه سری بازتابی سرعت موج برشی شده است.

در سایر مدل‌های توزیع هیدرات گازی، حضور این کریستال‌ها باعث تغییر مدول برشی رسوب شده و افزایش میزان سرعت موج برشی بسیار بیشتر از افزایش سرعت به واسطه حضور گاز است (چرا که میزان تغییرات چگالی به علت حضور گاز بسیار کمتر از تغییرات مدول برشی ناشی از اشباع هیدرات است). برای این مدل‌ها مقادیر سری بازتابی مقاومت برشی غالباً منفی است. تنها استثناء مربوط اشباع دو درصد هیدرات در مدل چهارم است که در آن اشباع اندک هیدرات باعث شده تا افزایش مدول برشی

کوچک باشد و بنابراین سرعت موج برشی کمتری نسبت به لایه زیرین داشته باشد که موجب مثبت شدن سری بازتابی سرعت موج برشی می‌شود.

در مدل اول توزیع هیدرات افزایش تخلخل موجب افزایش سری بازتابی سرعت موج برشی شده است و در سایر مدل‌ها وابستگی به تغییرات تخلخل ناچیز است.



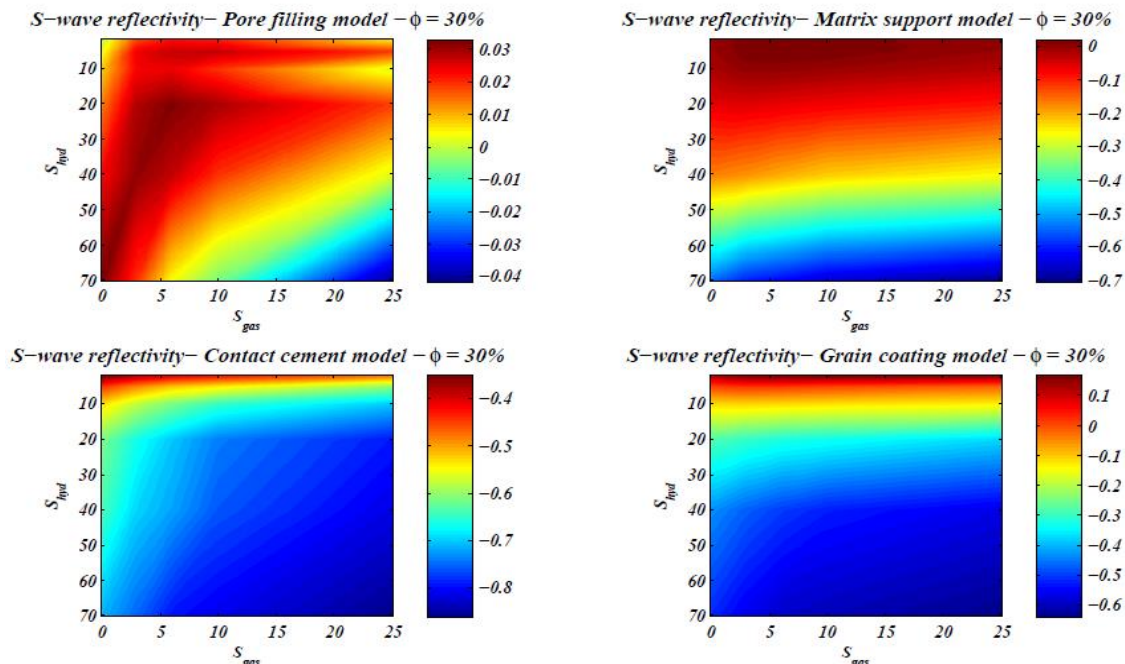
شکل 3. نمودار دو بعدی مقادیر واقعی نشانگر سری بازتابی سرعت موج برشی مدل‌های ساخته شده برای میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد مختلف و در تخلخل ۳۰ درصد.

نتایج وارون سازی این نشانگر برای تخلخل ۳۰ درصد به صورت دو بعدی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج زیر از بررسی این شکل و مقایسه آن با مقادیر واقعی بدست آمده است:

در مواردی که کریستالهای هیدرات گازی به صورت مدل اول در رسوب توزیع شده باشد و تماسی با دانه‌های رسوب نداشته باشد، عدم تغییر سرعت موج برشی با تغییر سیال منفذی سبب شده تا اختلاف سرعت موج برشی در دو طرف بازتابنده BSR کوچک باشد بگونه‌ای که اندازه آن تحت تاثیر نوفه جزئی موجود در اطلاعات لرزه‌ای قرار بگیرد. به واسطه این امر در مدل اول توزیع هیدرات گازی مقادیر تخمین زده شده نشانگر با خطا همراه بوده و نمی‌تواند اطلاعات قابل اطمینانی را ارائه دهد.

در سایر مدل‌های توزیع هیدرات گازی، ضریب بازتاب تخمینی روندی مشابه با مقدار واقعی داشته اما اندازه آن بیشتر از مقدار حقیقی است. به عبارتی مقادیر تخمین زده شده تنها بطور نسبی صحیح هستند. خطای نسبی موجود مرتبط با خطا در مقدار در نظر گرفته شده برای نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی موجود در ضریب سری بازتابی سرعت موج برشی در رابطه ۲ می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه برای انجام وارون سازی در این مقاله از روند عمومی تغییر نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی استفاده شده است با زیاد شدن مقادیر اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد و

فاصله گرفتن نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی از روند عمومی اختلاف میان مقادیر حاصل از وارون سازی و مقادیر واقعی بیشتر می گردد.



شکل ۴. نمودار دو بعدی مقادیر وارون سازی شده نشانگر سری بازتابی سرعت موج برشی مدل های ساخته شده بر اساس تحلیل AVO برای میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد مختلف و در تخلخل ۳۰ درصد.

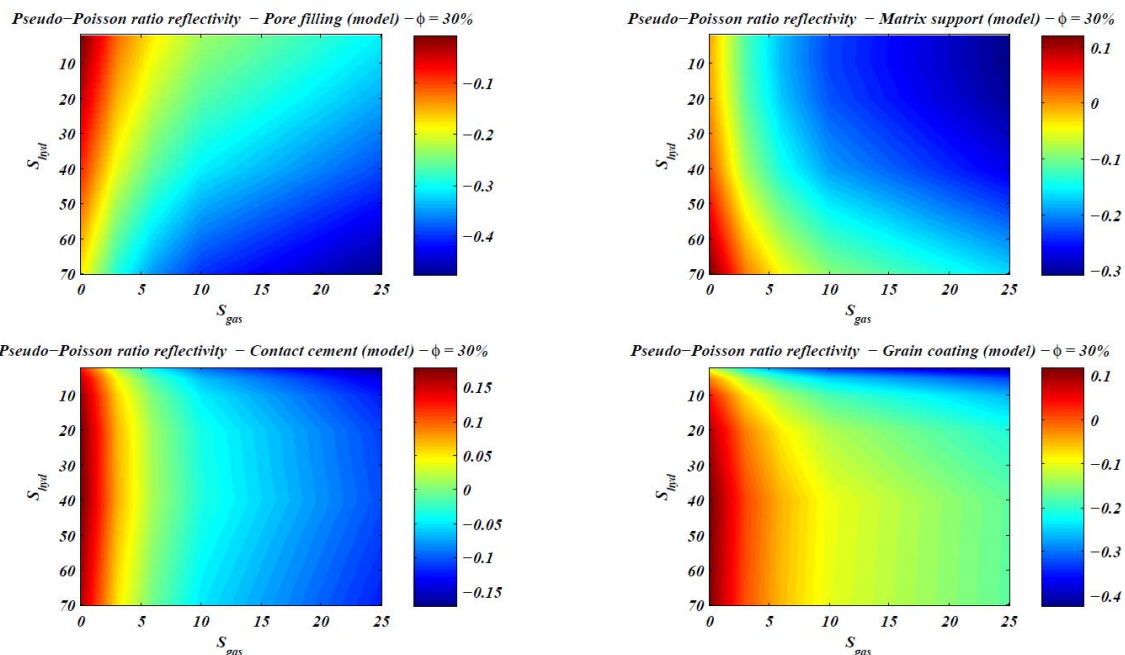
نشانگر سری بازتابی شبه نسبت پواسون بر اساس سری بازتابی سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی بدست آمده از وارون سازی تقریب خطی اسمیت و گیدلو [۱] قابل حصول می باشد. این نشانگر مربوط به اختلاف سری بازتابی سرعت موج تراکمی و سری بازتابی سرعت موج برشی بوده و معادل مشتق لگاریتم طبیعی نسبت سرعت موج برشی به موج تراکمی است. لازم به ذکر است که میزان نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی رابطه مستقیم با میزان نسبت پواسون دارد. بنابراین سری بازتابی نسبت دو موج پیکره ای می تواند به عنوان نشانگری از سری بازتابی نسبت پواسون مورد استفاده قرار بگیرد که به آن شبه نسب پواسون می گویند. مقادیر واقعی این نشانگر که از تفاضل سری بازتابی سرعت دو موج پیکره ای بدست آمده به صورت دو بعدی برای تخلخل سی درصد در شکل ۵ نشان داده شده است. به طور کلی نتایج زیر از بررسی این نشانگر حاصل می شود:

مدل های مختلف توزیع هیدرات گازی رفتار متفاوتی را در مقابل تغییرات درصد اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد نشان داده اند. با توجه به تاثیر متفاوت نوع توزیع هیدرات بر سرعت دو موج برشی و تراکمی، نشانگر سری بازتابی شبه نسبت پواسون با بکارگیری همزمان سرعت این دو موج می تواند در شناسایی نوع توزیع هیدرات موثر باشد.

در شکل مربوط به مدل اول توزیع هیدرات، حضور گاز در زیر زون هیدرات گازی تاثیری چندانی بر سرعت موج برشی نداشته است و سرعت موج تراکمی کاهش پیدا کرده است. در این صورت نسبت سرعت موج تراکمی به موج برشی و به تبع آن نسبت پواسون لایه حاوی گاز کاهش پیدا کرده است. اما در لایه حاوی هیدرات گازی و به شرط مدل اول توزیع هیدرات گازی سرعت موج تراکمی افزایش یافته و سرعت موج برشی تغییر چندانی نمی کند. در این صورت نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی افزایش پیدا کرده و شاهد افزایش نسبت پواسون خواهیم بود. برای این مدل توزیع مقادیر نشانگر

سری بازتابی شبه نسبت پواسون برای بازتابنده شبیه ساز بستر همواره منفی است و با افزایش درصد اشباع گاز آزاد و هیدرات، اندازه آن افزایش مییابد.

در سایر مدل‌های توزیع هیدرات گازی، افزایش میزان اشباع هیدرات موجب کاهش نسبت پواسون و نزدیک شدن آن به مقادیر لایه حاوی گاز آزاد می‌گردد. همانطور در شکل‌ها و برای این مدل توزیع مشاهده می‌شود نشانگر سری بازتابی شبه نسبت پواسون در بعضی از موارد مثبت شده و اثر کاهش نسبت پواسون به واسطه حضور هیدرات گازی به اثر گاز آزاد غالب شده است. به طور کلی افزایش میزان گاز آزاد روند تغییر سری بازتابی شبه نسبت پواسون را به سمت مقادیر منفی و افزایش میزان هیدرات گازی که به صورت سه مدل مذکور توزیع شده باشند میزان نشانگر را به سمت مقادیر مثبت سوق می‌دهد.

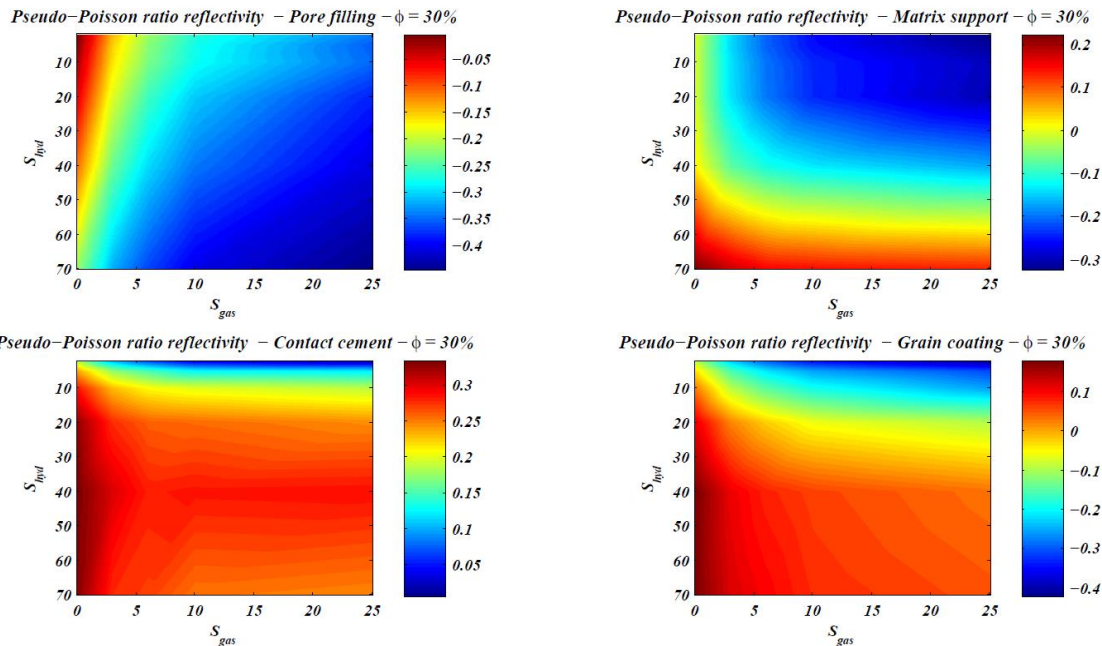


شکل ۵. نمودار دو بعدی مقادیر واقعی نشانگر سری بازتابی شبه نسبت پواسون مدل‌های ساخته شده برای میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد مختلف و در تخلخل ۳۰ درصد.

نتایج وارونسازی جهت بدست آوردن نشانگر شبه نسبت پواسون برای تخلخل سی درصد به صورت دو بعدی در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج به شرح زیر از بررسی نتایج حاصل از وارون سازی و مقایسه آن با مقادیر واقعی بدست آمده است:

شباهت میان روند کلی حاصل از وارون سازی و مقدار واقعی سری بازتابی شبه نسبت پواسون بازتابنده شبیه ساز بستر در مدل‌های اول و دوم توزیع هیدرات گازی بیشتر از مدل‌های سوم و چهارم توزیع می‌باشد.

به طور کلی مقادیر حاصل از وارون سازی با مقادیر واقعی قابل مقایسه است. از جمله دلایل وجود اختلاف، می‌توان به روند در نظر گرفته شده برای نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی اشاره کرد که برای انجام وارون سازی با استفاده از رابطه اسمیت و گیدلو [۱] مورد نیاز می‌باشد. تخمین سری بازتابی سرعت موج برشی با خطا همراه بوده و خطای موجود در تخمین آن در اینجا نیز بر روی سری بازتابی شبه نسبت پواسون تاثیر گذاشته است.



شکل ۶. نمودار دو بعدی مقادیر وارون سازی شده نشانگر سری بازتابی شبه نسبت پواسون مدل‌های ساخته شده بر اساس تحلیل AVO برای میزان اشباع هیدرات گازی و گاز آزاد مختلف و در تخلخل ۳۰ درصد.

۳- نتیجه گیری

حضور هیدرات گازی در داخل رسوب باعث تغییر خصوصیات کشسان رسوب میزبان شده و این تغییر وابستگی زیادی به مدل توزیع هیدرات گازی دارد. برای مقادیر مختلف اشباع هیدرات گازی، رفتار نشانگرهای بدست آمده از رابطه اسمیت و گیدلو در مدل‌های اول و دوم و در مدل‌های سوم و چهارم قابل مقایسه با یکدیگر خواهند بود. با توجه به این مساله و در مطالعات مستقیم و وارون انجام شده بر اساس روابط فیزیک سنگ باید به نوع توزیع هیدرات گازی اهمیت ویژه‌ای داده شود. چرا که در نظر گرفتن نوع توزیع مختلف منجر به کسب نتایج متفاوتی برای مدل‌های توزیع مختلف خواهد شد. برای انجام مطالعات تغییر دامنه در مقابل دورافت برای انجام وارون سازی بر اساس رابطه اسمیت و گیدلو، نیاز به تعیین نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی است. با توجه به مطالعات انجام شده در این پروژه می‌توان به این مساله اشاره نمود که در نظر گرفتن روند عمومی که با استفاده از روابط فیزیک سنگ بدست آمده و در آن تخلخل رسوب تنها از آب اشباع شده است می‌تواند معقول‌ترین روند برای این نسبت باشد.

مراجع

- [1] Smith, G., and Gidlow, P. M., *Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas: Geophys. Prosp.*, 35, 993–1014, 1987
- [2] Aki, K., Richards, P.G., *Quantitative seismology: theory and methods: W. H. Freeman and Company*, 1980.
- [3] Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.L., *Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, Geophysics*, 50, 571–581, 1985.
- [4] Ecker, C., *Seismic characterization of methane hydrate structure: Ph.D. Thesis, Stanford University*, 1998.
- [5] Dvorkin, J., and Nur, A., *Elasticity of high porosity sandstones, Theory for two North Sea datasets: Geophysics*, 61, 1363–1370, 1996.

-
- [6] Nur, A., Mavko, G., Dvorkin, J., and Gal, D., *Critical porosity; the key to relating physical properties to porosity in rocks: 65th Ann. Internat. Meeting, SEG Expanded Abstracts*, 25, 878–882, 1995.
- [7] Mindlin R.D., *Compliance of elastic bodies in contact: J Appl. Mech.*, 16, 159–268, 1949.