

مدل‌سازی کاهش نوفه‌ی لوله‌ای در برداشت درون‌چاهی توسط سد موجی

احمد امینی^{*}، غلامرضا رستگارموجد، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب

چکیده

مهم‌ترین هدف این مطالعه، بررسی سازوکار استفاده از سدها برای کمینه کردن نوفه‌ی لرزه‌ای امواج لوله‌ای در عملیات VSP با ویراتور است. در این مقاله کاهش ارتعاشات سطحی موج ریلی تولیدکننده‌ی امواج لوله‌ای در برداشت درون‌چاهی، بررسی و اثر متغیرهای مختلف سد به کمک مدل المان محدود (FE) مدل‌سازی می‌شود. این مدل شامل لایه‌ی خاکی روی سنگ بستر است. مهم‌ترین متغیرها برای محیط جامد، عمق سد موجی و ضریب کشسانی هستند. برای محیط سیال به عنوان محیط طبیعی فیلترکننده‌ی امواج، فرمول‌بندی المان محدود جفت‌شده‌ی سیال و خاک به کار گرفته می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۱۲/۲۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۳/۲۲

واژگان کلیدی:

کاهش نوفه‌ی امواج لوله‌ای، سد موجی، مدل‌سازی روش المان محدود، برهم‌کنش سیال-ساختگاه (fluid-structure)، انتشار موج

مقدمه

تضاد امیدانسی درون چاه می‌تواند در شرایط مناسب، موج لوله‌ای تولید کند.

از آنجا که منبع اصلی امواج لوله‌ای، امواج زمین‌غلت است که در عرض مسیر چشمه تا سرچاه منتشر شده و حرکت قائم‌ستون گل در چاه را تولید می‌کند، فرآیندهای میدانی دفاعی باید روی کاهش امواج زمین‌غلت در سر چاه یا بر جلوگیری از انتقال انرژی این امواج به ستون گل تمرکز کنند. چندین روش برای کاهش انرژی امواج زمین‌غلت رسیده به سر چاه استفاده شده‌اند [۱]: (۱) افزایش فاصله بین چشمه‌ی انرژی تا سر چاه (۲) قراردادن سدی فیزیکی بین چشمه و سر چاه که امواج سطحی سیرکننده به چاه را مسدود کند (۳) تولید آرایه‌ی چشمه و گیرنده که طول موج حاکم امواج زمین‌غلت را تضعیف نماید (۴) پایین آوردن ارتفاع ستون گل حفاری نسبت به سطح زمین و ممانعت از انتقال انرژی موج ریلی به داخل ستون گل (۵) نصب تجهیزاتی به همراه ابزارهای درون‌چاهی که مانع از عبور موج ریلی به داخل چاه شوند.

۱- مطالعات پیشین

اولین بار وودز در سال ۱۹۶۸ [۲] کاهش ارتعاشات زمین را مطالعه کرد. تا کنون کارهای زیادی در خصوص تأثیر سدهای موجی جهت کاهش ارتعاشات زمین انجام شده که شامل آزمایش‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی به کمک روش‌های المان مرزی^۱ (BE) و المان محدود^۲ (FE) و ترکیب این دو (FE-BE) بوده‌اند. پرسون و همکاران (۲۰۱۶) [۳] مطالعه‌ای برای کاهش ارتعاشات لرزه‌ای تأسیسات سینکروترون انجام دادند. مطالعه‌ی حاضر حاصل تعمیم روش ذکر شده توسط ایشان روی برداشت میدانی داده‌ی نیم‌رخ لرزه‌ای قائم است.

یکی از اهداف نیم‌رخ لرزه‌ای قائم، شناسایی بازتابنده‌های لرزه‌ای اولیه و شبیه‌سازی امواج بازتابشی‌شان با داده‌های تولیدشده توسط چشمه‌ی لرزه‌ای است. این هدف به‌طور کامل قابل‌دستیابی نیست؛ زیرا امواج لوله‌ای پایین‌رونده‌ی قوی، تعداد زیادی از رویدادهای بالارونده را می‌پوشانند. به‌ویژه اینکه در مقاطع برداشت سرعت‌های تبدیلی موج S توسط گیرنده‌های X و Y در بسیاری موارد به دلیل همزمانی اولین رسیده‌های موج S تبدیلی و نوفه‌ی لوله‌ای، اولین رسیده‌های موج برشی قابل‌ردگیری نیست و روش‌های فیلتری موجود برای کاهش این نوفه‌ها باعث صدمه زدن به دامنه، فاز و فرکانس موج برشی می‌شوند و در نتیجه گاهی اوقات تعیین سرعت موج برشی از اولین رسیده‌های این امواج غیرممکن است.

نوفه‌ی لرزه‌ای تصادفی می‌تواند با تکرار شوت لرزه‌ای و برنبارش چندین پاسخ ژئوفونی به یک ثبت واحد، کاهش یابد. اما نوفه‌ی موج لوله‌ای همدوس این‌گونه نیست. در حقیقت این موج با تکرار برداشت در هر عمق معمولاً تقویت می‌گردد؛ زیرا مشخصه‌ی شکل موجی‌اش برای تمامی ثبت‌هایی که برنبارش می‌گردند سازگار است [۱].

موج لوله‌ای قوی‌ترین نوفه‌ی همدوس در عملیات نیم‌رخ لرزه‌ای قائم است. بنابراین شناسایی فرآیندهای میدانی برای حذف یا کاهش این نوع موج مهم است و برای این منظور باید سازوکارهایی که این امواج را تولید می‌کنند، درک شوند. در واقع هیچ روش میدانی دفاعی وجود ندارد که بتواند با اطمینان از انتشار امواج حجمی جهت تولید امواج لوله‌ای در تضادهای امیدانسی بزرگ جلوگیری کند روش‌های لوله‌جدار و سیمان کردن مورد استفاده برای تکمیل چاه‌های نفت و گاز همواره با تغییرات چشمگیری در امیدانس چاه در عمق‌های مختلف همراه است. در نتیجه، هر موج برخوردکننده به محل‌های با

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Amiri1.a@nioc.ir)

۲- مطالعه‌ی حاضر

مهم‌ترین هدف این مطالعه، بررسی سازوکار استفاده از سدها برای کمینه کردن ارتعاشات ویبراتوری در عملیات VSP است. این کار با ساخت مدل‌های FE زمین لایه‌بندی شده انجام و توسط اندازه‌گیری‌های میدانی، اعتبارسنجی شد. خصوصیات ارتعاش ویبراتور در مدل اعمال گردید. ایجاد یک سد موجی^۲، جبهه‌ی موج را دچار اختلال کرده و امواج را به داخل سنگ بستر بازتاب می‌کند. امواج در سنگ بستر، کمتر از خاک تضعیف می‌شوند؛ بنابراین کاهش ارتعاشات زمین در فواصل دور از این سد می‌تواند تحت تأثیر امواج انتشار یافته‌ی زیر سد در سنگ بستر قرار گیرد. به همین جهت کاهش حاصل در فواصل دور از این سد مطالعه گردید. با به‌کارگیری یک مدل FE جفت شده از سیال و خاک با در نظر گرفتن برهمکنش بین آنها، اثرات نفوذ سیال به سد موجی امتحان گردید. مطالعات پارامتری هندسی ماده‌ی پرکننده^۴ در سدی جامد نیز انجام شد.

۳- محاسبات عددی

در برداشت‌های درون‌چاهی که چشمه روی سطح زمین قرار دارد امواج ریلی و لاو سیرکننده در راستای سطح زمین، با امواج حجمی درون چاه خالی از سیال تداخل نمی‌کنند. اما هنگامی که چاه از سیال پر شده باشد دسترسی به داخل چاه فراهم می‌گردد که محیطی برای انتشار امواج سطحی ناخواسته است. امواج درون‌چاهی حاصل از تلاطم سیال به امواج لوله‌ای معروفند. طبق شکل ۱- ژئوفون‌های سطحی تحت تأثیر امواج لاو و ریلی قرار می‌گیرند اما ژئوفون‌های درون‌چاهی از امواج لوله‌ای اثر می‌پذیرند [۱].

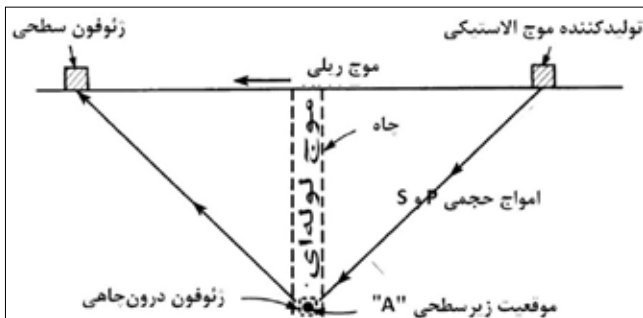
تحلیل مفصل داده‌های برداشت شده‌ی عملیات لرزه‌ای قائم نشان می‌دهد که چهار مد موج لوله‌ای تولید و تفسیر می‌گردند [۱]. مثلاً مدهای مختلف موج لوله‌ای مربوط به داده‌های خام نیم‌رخ لرزه‌ای قائم میدان چاه ۳۷۵ گچساران در شکل ۲- ارائه شده است.

ایجاد یک سد موجی در زمین بین چشمه‌ی لرزه‌ای و چاه، یک ناپیوستگی را برای انتشار امواج فراهم می‌کند. امواج برخورد کننده به این سد موجی، به پنج گروه مختلف تقسیم می‌گردند (شکل ۳-): امواج ریلی بازتابیده، امواج ریلی عبورکننده از سد، امواج حجمی پیشروی عبورکننده از سد و امواج انتشار یافته از طریق خاک و سنگ بستر زیر سد. ارتعاشات زمین بعد از سد، ناشی از موارد دوم، چهارم و پنجم هستند. در این بخش تئوری حاکم دینامیک ساختاری و برهمکنش سیال-ساختگاه^۵ (FSI) ارائه می‌گردد.

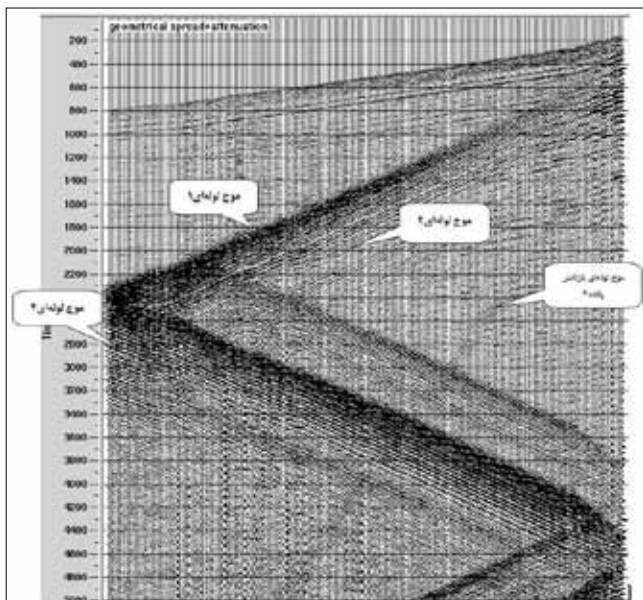
۳-۱- دینامیک ساختاری

معادله‌ی دیفرانسیلی جابجایی یک جامد سه‌بُعدی طبق رابطه‌ی ۱- است:

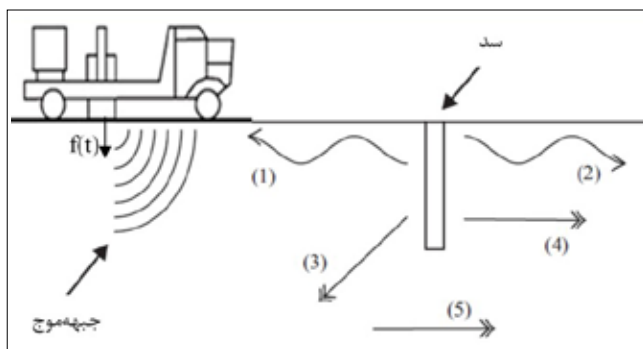
$$\nabla \tau \sigma_s + b_s = \rho_s \frac{(\partial^2 u)}{(\partial t^2)} \quad (1)$$



شکل ۱ | مدهای موج کشسان موجود در ثبت لرزه‌ای زیرسطحی [۱]



شکل ۲ | مدهای مختلف موج لوله‌ای روی داده‌های نیم‌رخ لرزه‌ای قائم چاه-۳۷۵ میدان گچساران. محور افقی و قائم به ترتیب بیانگر عمق و زمان هستند



شکل ۳ | امواج مختلف تولید شده بعد از برخورد جبهه‌ی موج ارتعاشی به سد

$$M_f \ddot{p} + K_f p = f_f \quad (8)$$

که در آن p بردار فشار گره‌ای است.

۳-۳- جفت کردن محیط‌ها

فرض می‌شود پیوستگی در جابجایی‌های سیال و ساختگاه در جهت عمود بر مرز مشترکشان S باشد. با معرفی یک بردار قائم n ، شرط مرزی جنبشی طبق رابطه‌ی ۹- خواهد بود:

$$u_{s,n}|_s = u_{s,n}|_s \quad (9)$$

و به دلیل پیوستگی فشار در S ، شرط مرزی برای جفت‌شدگی طبق رابطه‌ی ۱۰- خواهد بود:

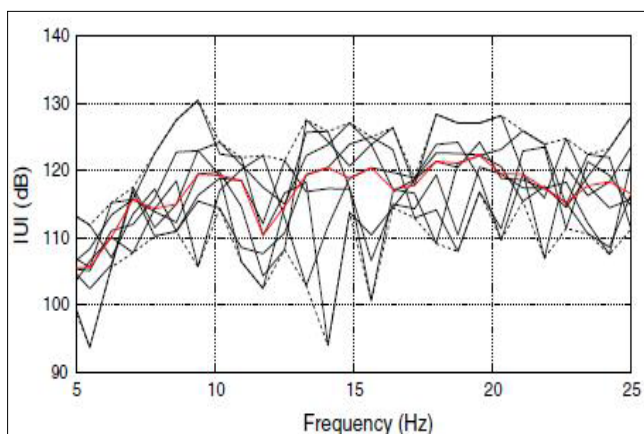
$$\sigma_{s,n}|_s = p \quad (10)$$

تنش‌ها در S در جهت قائم است. توسط معرفی یک ماتریس جفت n شدگی H ، سیستم معادلات کامل سیال-ساختگاه طبق رابطه‌ی ۱۱- است:

$$\begin{bmatrix} M_S & \mathbf{0} \\ \rho_0 H_{Sf}^T & M_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_S & -H_{Sf}^T \\ \mathbf{0} & K_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_S \\ f_f \end{bmatrix} \quad (11)$$

۴-۳- توصیف نویز زمین غلت و بیراتور

برای چنین ارتعاشاتی، کرنش‌ها معمولاً در سطحی هستند که فرض کشسانی خطی قابل قبول است. به کمک سیستمی از معادلات خطی، محتوای فرکانسی و بیراتور توسط مقیاس‌بندی^{۱۰} جابجایی‌های محاسبه شده با طیف فرکانسی حاصل در نظر گرفته شد. جهت محاسبه محتوای فرکانسی بار و بیراتور، مقدار میانگین (چندک^{۱۱} = ۵۰٪) داده‌های اندازه‌گیری شده برای هر فرکانس، محاسبه و برای مقیاس‌بندی تابع پاسخ فرکانسی^{۱۲} (FRF) به دست آمده از تحلیل FE استفاده گردید (شکل ۴-).



۴ | طیف دامنه‌ی جابجایی‌ها، f حاصل بر اساس اندازه‌گیری‌ها. منحنی‌های چندک ۹۵٪ و ۵٪ به ترتیب با خطچین‌ها نشان داده شده‌اند. مقدار میانی (چندک ۵۰٪) در تحلیل‌های عددی با خط‌تیره‌ی قرمز نشان داده شده است

که در آن σ_s تانسور تنش، b_s بردار نیروی حجمی، ρ_s چگالی جرمی، u بردار جابجایی، ∇ عملگر دیفرانسیلی و t زمان است. به کمک روش گالرکین^{۱۳}، فرمول‌بندی FE برای یک حوزه‌ی ساختاری طبق رابطه‌ی ۲- است:

$$M_S \ddot{u} + K_S u = f_S \quad (2)$$

که در آن M_S ماتریس جرم، K_S ماتریس سختی، f_S بردار نیروی اعمالی و u بردار جابجایی گره‌ای است. از آنجا که میرایی باید در مدل عددی وارد شود تا پاسخی واقعی به دست آید، یک مدل میرایی نرخ-مستقل^{۱۴} فرض گردید تا نسبت به سایر مدل‌های میرایی ساده‌ی موجود تطابق بهتری با رفتار واقعی خاک فراهم آورد. یک محدودیت مدل میرایی اینست که در حوزه‌ی زمانی نمی‌تواند استفاده شود. این میرایی توسط یک عامل کاهش معرفی شده توسط ماتریس میرایی ساختاری توصیف گردید [۴].

۲-۲- برهمکنش سیال-ساختگاه

برای بررسی سد موجی حاوی سیال، مدل FSI را در نظر می‌گیریم. دو معادله‌ی حاکم می‌توانند برای توصیف میدان فشار سیال همگن کشسان به کار روند که فرض می‌گردد غیرلزج^{۱۵}، غیرچرخشی^{۱۶} ($\nabla \cdot u = 0$)، تراکم‌پذیر و همچنین تغییرات فشار روی آن کم باشد. در معادله‌ی حرکت از کشیدگی حجمی صرف‌نظر می‌گردد و طبق رابطه‌ی ۳- نوشته می‌شود:

$$\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) + \nabla p = 0 \quad (3)$$

که در آن ρ_0 چگالی ایستایی، u بردار جابجایی سیال، t زمان، ∇ عملگر گرادبان و p فشار سیال کشسان است [۵۶]. معادله‌ی ساختاری برای سیال باروتروپیک با چگالی ثابت طبق رابطه‌ی ۴- نوشته می‌شود:

$$p = -c^2 \rho_0 \nabla \cdot u \quad (4)$$

که در آن c سرعت موج کشسان در سیال است. به کمک روابط ۳ و ۴ معادله‌ی موج برای سیال کشسان، فشار به کار رفته به صورت تغییرپذیر میدانی طبق معادله‌ی هلمهولتز است:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 p = 0 \quad (5)$$

اگر فشار را به صورت تابع هارمونیک مختلط نشان دهیم:

$$p = \hat{p} e^{i\omega t} \quad (6)$$

معادله‌ی موج در حوزه‌ی فرکانسی به شکل رابطه‌ی ۷- تبدیل می‌شود:

$$\nabla^2 \hat{p} + \omega^2 / c^2 \hat{p} = 0 \quad (7)$$

به کمک روش گالرکین، فرمول‌بندی FE برای محیط سیال کشسانی طبق رابطه‌ی ۸- است:

۳-۵- ارزیابی

مقدار RMS به عنوان اندازه‌ای از بزرگی ارتعاش برای ارزیابی و اهداف مقایسه‌ای استفاده شد. مقدار RMS جابجایی‌ها از تحلیل‌های حالت پایا توسط رابطه‌ی ۱۲- تعیین می‌شود:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m U(f)_i^2} \quad (12)$$

که U_{RMS} مقدار RMS جابجایی‌ها، $U(f)_i$ بزرگی جابجایی‌ها در هر فرکانس و n تعداد فرکانس‌ها در هر بازه (فاصله) است.

جهت کاوش اثرات ایجاد سد در فواصل طولانی با چشمه‌ی ارتعاشی، از مقدار عمل (action) استفاده شد که طبق رابطه‌ی ۱۳- تعریف می‌شود:

$$Action = \int_{\omega} E(\omega) d\omega \quad (13)$$

انرژی کل E توسط مقدار میانگین چرخشی انرژی جنبشی و انرژی کرنشی با تحلیل FE طبق رابطه‌ی ۱۴- محاسبه می‌شود:

$$E = \underbrace{\int_V \frac{1}{2} \rho v \cdot v dV}_{E_{kinetic}} + \underbrace{\int_V \frac{1}{2} \sigma : \epsilon dV}_{E_{strain}} \quad (14)$$

۴- مطالعه‌ی متغیری سدها

جهت عینیت دادن به تأثیر بزرگ سدهای موجی بر انتشار جبهه‌ی موج، در شکل-۵ بزرگی‌های مختلط قائم جابجایی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها با و بدون وجود سد موجی، برای یک بار هارمونیک در ۱۵ هرتز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد برای حالت با وجود سد موجی، جبهه‌ی موجی که به سمت سنگ بستر منتشر شده از میان سنگ بستر به سمت جلو حرکت می‌کند و با لایه‌های خاک برهم‌کنش دارد. همچنین در شکل مشخص است که تراز ارتعاشی در سطح زمین به سمت راست سد موجی در مقایسه با حالت بدون سد موجی کاهش یافته است.

۴-۱- سد موجی خالی

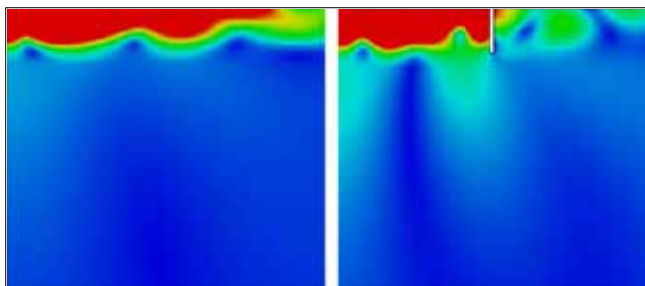
مطالعه‌ی متغیری سدهای موجی برای موقعیت‌ها، پهناها و عمق‌های مختلف انجام شد. به عنوان یک حالت پایه، سد موجی در فاصله‌ی X برابر با ۵۰ متر از مرکز چشمه قرار داده شد. هر متغیر از حالت پایه تغییر داده شد؛ در حالی که دیگر متغیرها ثابت نگه داشته شدند.

در شکل-۶ الف کاهش در سطح ارتعاشی به صورت تابعی از عمق سد موجی نشان داده شده است. عمق d بین ۰-۱۶ متر تغییر داده شد. با افزایش عمق، این کاهش بیشتر می‌شود و گواهی بر آنست که برای اینکه سطح ارتعاشی در محل چاه به طور قابل توجهی کاهش یابد لازم است سد موجی عمیق‌تر از ۴ متر باشد.

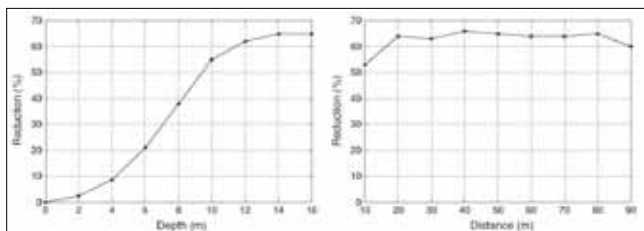
بزرگ‌ترین تغییر برای افزایش از ۱۰-۶ متری در عمق حاصل شد. بین ۱۰-۶ متر این کاهش در سطح ارتعاشی از ۲۱ به ۵۵٪ افزایش می‌یابد. برای سد موجی عمیق‌تر از ۱۰ متر، امواج منتشر شده در سنگ بستر حاکم هستند. کاهش ۶۵٪ می‌تواند برای عمق ۱۶ متری به دست آید.

پهنای W سد موجی بین ۴-۲۵ متر تغییر داده و نتیجه گرفته شد که پهنا تنها اثر بسیار کمی بر کاهش سطح ارتعاشی دارد.

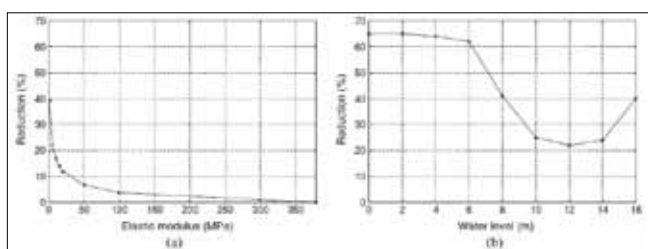
سد، امواج فرودی را بازتاب می‌دهد اما در اختلال جبهه‌ی موج سهیم است که این باعث شکست موج و پراش امواج انتشار یافته می‌گردد. تغییرات در سرعت و جهت جبهه‌ی موج ناشی از بازتابش، شکست و پراش به تداخلات امواج در فواصل مشخص از سد منجر می‌شوند. بنابراین می‌توان مؤثرترین موقعیت جهت کاهش ارتعاشات را برای سد تعیین کرد. بررسی تأثیر موقعیت سد موجی در فاصله‌ی ۹۰-۱۰ متر از



شکل ۵ | نتایج شبیه‌سازی بزرگی (دامنه) مختلط جابجایی‌های قائم در ۱۵ هرتز (الف) بدون وجود سد موجی و (ب) برای سد موجی با هندسه‌ی $x=40m$, $w=1m$, $d=16m$. رنگ‌ها در دو ترسیم، مقادیر مشابهی در محدوده از دامنه‌های ارتعاشی صفر (رنگ آبی) تا بیشینه (۰/۴، nm) رنگ قرمز) را نشان می‌دهند



شکل ۶ | کاهش میانگین در تراز ارتعاشی (جابجایی) (الف) بر حسب عمق سد موجی (ب) بر حسب موقعیت سد موجی



شکل ۷ | کاهش میانگین در تراز ارتعاشی (جابجایی) (الف) بر حسب ضریب کشسان ماده‌ی پرکننده‌ی جامد (ب) بر حسب سطح سیال آب در سد موجی

مؤثرترین موقعیت‌های سد موجی در عمل ۸۰-۲۰ متر از چشمه بود.

۲-۴- سد موجی محتوی ماده‌ی پرکننده‌ی جامد

در عمل، استفاده از سدهای موجی حاوی سیال به دلیل نفوذ سیال و ملاحظات ایمنی که باید در نظر گرفته شوند، مشکل است. در نتیجه سدها با ماده‌ای پرکننده از گونه‌های مختلف جامد به کار می‌روند و نیاز به محافظت جانبی در دیواره‌ها ندارند. مطالعه‌ی متغیری ویژگی‌های ماده‌ی پرکننده انجام شد. چهار متغیر شامل ضریب کشسانی، عامل افت، چگالی جرمی و نسبت پواسون تغییر داده شدند. سد موجی در ۵۰ متری هدف قرار داشت.

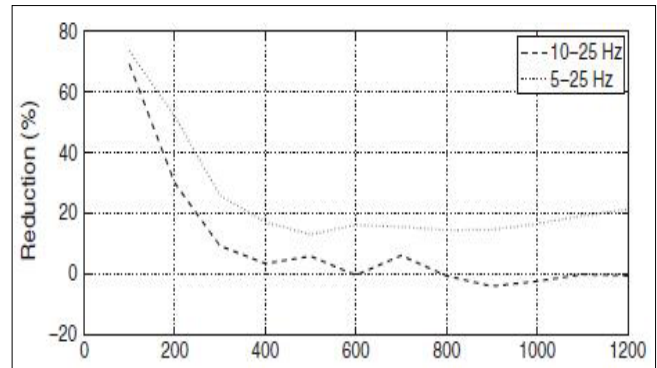
ضریب کشسان بین ۱ و ۵۰۰۰۰ MPa تغییر یافت (شکل-۷). همان‌طور که در شکل-۷ مشاهده می‌گردد در ضریب کشسانی بیش از یک حد معین (تقریباً ۳۵ MPa)، این ضریب اثر مشخصی روی اثربخشی این سد برای کاهش درجه‌ی ارتعاش دارد. کاهش از ۳۹ تا ۱۰٪ تغییر مقدار ضریب کشسانی از ۱ تا ۳۵ MPa به دست آمد. با نزدیک شدن ضریب کشسانی به صفر، کاهش در سطح ارتعاشی به همان سطح برای سد موجی نزدیک می‌شود. اگرچه ممکن است به دلیل چگالی جرمی سد، در سطح یکسانی نباشد. برای محدوده‌ی فرکانسی در نظر گرفته شده (۲۵-۵ هرتز) با ضریب کشسانی ماده‌ی سد مثلاً ۲۰ تا ۵۰ GPa کاهش به دست آمده‌ی سد قابل چشم‌پوشی است. برای آن ضرایب کشسانی، کاهش حدود ۳ درصدی برای ارزیابی نقطه‌ی واقع شده در ۱۰۰ متری هدف و در اینجا وابستگی قوی فرکانسی دیده شد. در نتیجه برای فرکانس‌های بالاتر، کاهش حاصل می‌تواند متفاوت باشد.

عامل اتلاف^{۱۳} بین ۰/۰۱ و ۲، چگالی جرمی بین ۱۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون بین ۰/۰۱ و ۰/۴۸ تغییر یافت. از آنجا که سد موجی باریک است تغییر این متغیرهای ماده‌ی پرکننده فقط اثر کمی بر کاهش ارتعاش دارد.

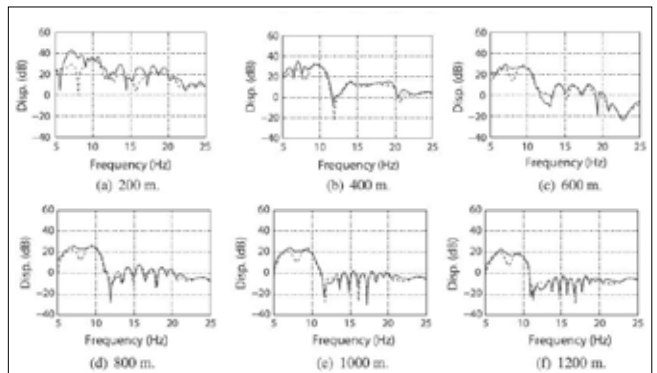
۳-۴- سد موجی محتوی سیال

برای تحقیق اثرات افزودن آب به داخل سد موجی، مطالعه‌ی متغیری با در نظر گرفتن برهم‌کنش سیال-ساختگاه (FSI) در تحلیل FE به‌گونه‌ای انجام شد که سطح سیال در سد موجی قابل تغییر بود. عمق و پهنا‌ی سد موجی به ترتیب ۱۶ و ۱ متر و در فاصله‌ی ۵۰ متری از چشمه‌ی ویبراتوری و سطح آب در سد موجی ۱۶-۰ متر قابل تغییر بود (صفر متناظر با سد موجی به عمق ۱۶ متر بدون هیچ سیالی است). در حالی که متغیرهای دیگر ثابت نگه داشته شدند. تغییر سطح سیال با دیواره‌ی سد موجی بر متغیرهای خاک در مجاورت سد موجی اثر

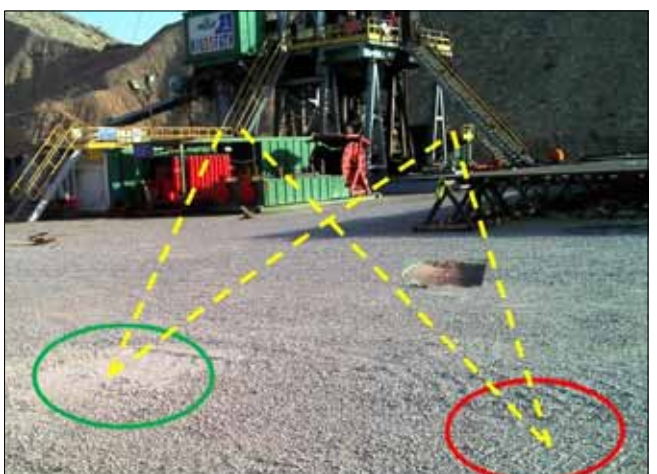
ویبراتور مطالعه گردید. در شکل-۶-ب کاهش حاصل در سطح ارتعاشی برای موقعیت‌های مختلف سد موجی نشان داده شده است. نتیجه اینکه



شکل ۸ | کاهش میانگین در سطح ارتعاش (جابجایی‌ها) توسط سد موجی با متغیرهای پایه بر حسب موقعیت این ارزیابی



شکل ۹ | بزرگی مختلط جابجایی‌های قائم، ارزیابی شده روی سطح زمین در فواصل مختلف از چشمه‌ی ارتعاشی (خط‌تیره: بدون سد موجی و خط‌چین: با سد موجی)



شکل ۱۰ | موقعیت سد موجی حفر شده جهت انجام آزمایش و موقعیت ویبراتور برای انجام آزمایش در دو حالت مختلف. موقعیت بیضی قرمز و سبز به ترتیب حالت‌های قرار گرفته در امتداد مسیر و بیرون از خط اتصال‌دهنده‌ی سد موجی به چاه هستند

حدود ۷۰۰-۸۰۰ متری مشابه و متفاوت با چشمه‌ی ارتعاشی است.

۵- کاربرد عملی

به‌عنوان نمونه‌ای از کاربرد عملی این روش در عملیات لرزه‌ای قائم، چاه-۲۱۰ آغاجاری مطالعه شد. شکل-۱۰ موقعیت سد موجی حفر شده و محل‌های قرارگیری وایراتور (در راستای سد موجی-چاه و غیر این راستا) نزدیک چاه-۲۱۰ میدان آغاجاری را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش، وایراتور ابتدا در محل نشان داده شده با بیضی سبز، شروع به انجام سوئیپ کرد، سپس به محل نشان داده شده با بیضی قرمز (بدون تغییر محل گیرنده‌ها) انتقال یافت. بعد از آن گیرنده‌های درون چاه به موقعیت عمقی بعدی فرستاده شدند و پس از تثبیت موقعیت، به ترتیب وایراتور شروع به انجام سوئیپ در موقعیت‌های بیضی قرمز و سبز کرد و همین کار برای عمق سوم نیز تکرار شد. نتیجه‌ی حاصل در شکل-۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که نوفه‌ها تا حد بسیار چشمگیری کاهش یافته‌اند. شکل-۱۲ نیز داده‌های حاصل بعد از قرارگیری وایراتور در مقابل سد موجی در طول کل چاه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

کاهش امواج نویزی ریلی از طریق استفاده از سدهای موجی در یک مطالعه‌ی متغیری عددی با به‌کارگیری یک مدل FE بررسی گردید. اثرات متغیرهای هندسی سد موجی، متغیرهای ماده‌ی پرکننده‌ی جامد و سیال موجود در سد موجی و نیز این اثر بر کاهش حاصل در فواصل طولانی دور از سد امتحان شدند. نتایج حاصل از بررسی سدهای موج با لحاظ کردن محتوای فرکانسی اندازه‌گیری شده‌ی ارتعاش وایراتور، با نتایج کلی حاصل از مطالعات پیشین در این زمینه همراستا هستند؛ عمق سد موجی یکی از متغیرهایی است که بیشترین تأثیر را بر اثربخشی دارد. هنگامی که فاصله تا چشمه‌ی ارتعاشی قابل‌ملاحظه باشد می‌توان از پهنا صرف‌نظر کرد. یافته‌ها در مورد متغیرهای ماده‌ی پرکننده با نتایج کلی تطابق دارد؛ اثربخشی سدها به متغیرهای ماده‌ی پرکننده بستگی دارد. استفاده از یک ماده‌ی پرکننده نرم‌تر، اثربخشی سد را افزایش می‌دهد. عمق سد مؤثرتر از افزایش در پهناست. از آنجا که سدهای بررسی شده در اینجا باریک هستند، چگالی جرمی، نسبت پواسون و عامل افت ماده‌ی پرکننده در محدوده‌ی مقادیر کاربردی آنها به‌طور قابل‌توجهی بر اثربخشی سد تأثیر می‌گذارد.

با نفوذ آب به داخل و نیز زهکشی آب در آن، سد موجی می‌تواند به‌شدت بر کاهش سطح ارتعاشی مؤثر باشد. وقتی مقدار زیادی آب نفوذ کرده باشد اثربخشی سد موجی کاهش می‌یابد. زیرا آب امواج P

می‌گذارد. به‌دلیل هدایت هیدرولیکی بسیار کم تپه‌های رسی فرض شد که تغییرات در سطح سیال، پدیده‌ای محلی است و بر طول‌موج‌های نسبتاً بلند در خاک در محدوده‌ی فرکانسی مطلوب اثر نمی‌گذارد. همان‌طور که از شکل-۷-ب مشخص است سطح سیال در سد موجی به وضوح می‌تواند موجب کاهش سطح ارتعاشی شود. کاهش بین ۶۵٪ و ۲۱٪ برای سطوح سیالی مختلف به‌دست آورده شد. این کاهش ناشی از سد موجی خالی از سیال، تنها به مقدار اندک تا سطح ۶ متری سیال انجام شده و سپس به سرعت تا سطح ۱۰ متری کاهش می‌یابد که این سطوح سیالی بالاتر، سبب عبور بیشتر امواج P از میان سد موجی می‌شود (امواج S نمی‌توانند در سیال منتشر گردند). سپس در بین سطوح سیالی ۱۴-۱۰ متری به حداقل ممکن می‌رسد. در سطح سیالی بالاتر (۱۶-۱۴ متر) مقدار این کاهش بیشتر می‌شود.

۴-۴ اثرات فواصل طولانی از چشمه

همان‌طور که اشاره شد حضور یک سد موجی در زمین، امواج برخوردی را به طرف سنگ بستر هدایت می‌کند (پراش)، سپس به‌سمت جلو از میان سنگ بستر انتشار می‌یابد و خاک دورتر از سد را تحریک می‌کند. فواصل لحاظ شده در مطالعات متغیری پیشین منجر به کاهش سطح ارتعاشی در موقعیت هدف می‌گردد. در این بخش دلایل کاهش ایجاد یک سد موج یا حتی رویداد تقویت‌شدگی در فواصل دور از چشمه‌ی ارتعاشی بررسی می‌شوند.

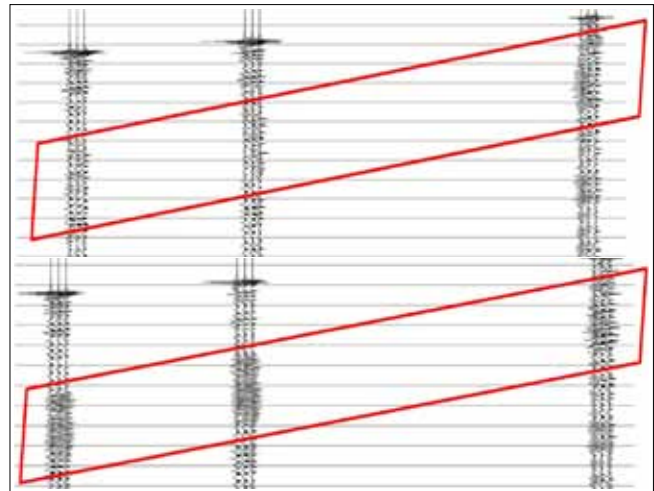
فواصل در نظر گرفته شده از مطالعات متغیری پیشین منجر به کاهش سطح ارتعاشی در موقعیت هدف می‌شود. طول مدل FE مورد استفاده در بخش قبلی به ۱۵۰۰ متر گسترش یافت تا سطح ارتعاشی در فواصل بسیار طولانی از سد ارزیابی گردد. در شکل-۸ کاهش میانگین در سطح ارتعاشی بر حسب موقعیت این ارزیابی در برای دو محدوده‌ی فرکانسی مختلف نشان داده شده است. کاهش حاصل در فواصل حدود ۵۰۰ متر و دورتر از چشمه‌ی ارتعاشی ثابت است. با اعمال محدوده‌ی فرکانسی مطلوب (۲۵-۵ هرتز)، کاهش در تمامی فواصل در نظر گرفته شده (۱۲۰۰-۱۰۰ متر با گام‌های ۱۰۰ متری) مشاهده می‌گردد. اما اگر فرکانس‌ها بین ۲۵-۱۰ هرتز در نظر گرفته شوند تقویت‌شدگی در فواصل ۶۰۰ و ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متری از چشمه‌ی ارتعاشی اتفاق می‌افتند. شکل-۹ (الف-ج) شامل ارزیابی پاسخ فرکانسی جابجایی در سطح زمین در فواصل ۱۲۰۰-۲۰۰ متر از چشمه‌ی ارتعاشی در حالت‌های با و بدون وجود سد موجی است. با مقایسه‌ی پاسخ‌ها روی سطح زمین در فواصل مختلف مشخص می‌گردد که این پاسخ در فواصل

را عبور می‌دهد. مثلاً یک سطح آبی ۱۲ متری در یک سد موجی ۱۶ متری، مقدار کاهش در سطح ارتعاشی را از ۶۵ به ۲۱٪ کاهش داد. امیدانس که متغیر کنترلی برای اثربخشی یک سد موجی است، به سرعت موج و چگالی جرمی بستگی دارد. چگالی جرمی ماده‌ی جامد اثر کمی دارد. بنابراین سرعت موج مهم‌ترین متغیر است. اما می‌تواند توسط ضریب کشسان و نسبت پواسون توصیف گردد و از آنجا که نسبت پواسون تأثیر چشمگیری بر این اثربخشی ندارد (درون مقادیر کاربردی)، ضریب کشسان تراکمی (یا برشی) می‌تواند برای تعیین اثربخشی یک ماده‌ی سدی جامد کافی باشد.

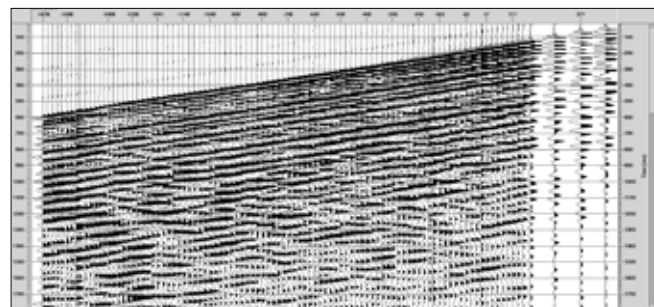
با ایجاد سد موجی در فواصل ۷۰۰-۵۰۰ متری و بیشتر از چشمه‌ی ارتعاشی، نوفه‌ی لرزه‌ای تقریباً ۱۵٪ برای محدوده‌ی فرکانسی مطلوب کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن محدوده‌ی فرکانسی مختلف، تقویت‌شدگی دامنه‌های سطح زمین می‌تواند برای فواصل حدود ۶۰۰ متر یا فراتر مشاهده گردد. همچنین در فواصل حدود ۷۰۰ متر و بیشتر، جابجایی‌های قائم سطح زمین از جابجایی‌های قائم سنگ بستر پیروی می‌کنند.

حذف امواج لوله‌ای در روش میدانی این مزیت را دارد که برخلاف روش حذف نوفه در مرحله‌ی پردازش داده‌ها، محتوای فرکانسی امواج بالا و پایین‌رونده بدون تغییر باقی می‌مانند. دلیل این امر آنست که ایجاد این‌گونه سدها، در مسیر امواج تراکمی (چشمه به گیرنده) نیست؛ بلکه در مسیر امواج سطحی است که منبع اصلی تولید امواج لوله‌ای هستند.

در نهایت با ایجاد سد، مهم‌ترین هدف این مطالعه یعنی کمینه کردن نوفه‌ی لوله‌ای در عملیات VSP با ویراتور محقق گردید. ■



شکل ۱۱ | تأثیر تضعیف امواج لوله‌ای توسط فیلتر طبیعی سد موجی حفرشده در چند عمق مختلف. داده‌های لرزه‌ای سمت راست و چپ بهتر تیب حالت‌های با و بدون وجود سد موجی را نشان می‌دهند. کادر متوازی‌الاضلاع در هر بخش بیانگر محدوده‌ی امواج لوله‌ای است



شکل ۱۲ | مجموعه‌ی داده‌های خام برداشت شده‌ی چاه-۲۱۰ آغاچاری. مشاهده می‌گردد که این فیلتر طبیعی نقش بسیار مهمی در کاهش امواج لوله‌ای دارد

پانویس‌ها

1. Boundari Element
2. Finite Element
3. wave barrier
4. Filling material
5. Fluid-Structure Interaction
6. Galerkin
7. rate-independent
8. inviscid
9. irrotational
10. scaling
11. quantile
12. Frequency Response Function
13. Loss

منابع

- [1] Hardage, B. A., 1983, Vertical seismic profiling: Geophysical Press.
- [2] Woods RD. Screening of surface waves in soil. J Soil Mech Found Eng (ASCE) 1968;94(4):951-79.
- [3] Persson P., et al., Numerical study of reduction in ground vibrations by using barriers, Engineering Structures 115 (2016) 18-27.
- [4] Craig Jr RR, Kurdila AJ. Fundamentals of structural dynamics. New Jersey: John Wiley & Sons; 2006.
- [5] Morand H, Ohayon R. Fluid-structure interaction. Chichester: Wiley; 1995.
- [6] Sandberg G, Ohayon R, editors. Computational aspects of structural acoustics and vibration. CISM courses and lectures, vol. 505. New York: Springer Wien; 2008.