

تحلیل اندرکنش دینامیکی سرریز و پی سد بارزو شیروان با استفاده از روش المان مرزی

بابک امیدوار^{۱*}، محمد رحیمیان^۲ و علیرضا صناعی‌ها^۳

^۱ دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۳ دانشجوی دکتری سازه، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

چکیده

بزرگنمایی حاصل از توپوگرافی و محیط اطراف سازه، در خرابی‌های مشاهده شده در اثر زلزله نقش زیادی داشته است. در این مقاله به بررسی اندرکنش دینامیکی سرریز نیلوفری با پی در فضای فرکانسی پرداخته شده است. با توجه به محل قرارگیری سازه امکان وقوع زلزله در زمانی که اطراف سرریز آب نیست، وجود دارد. بنابراین در نظر گرفتن سرریز در حالتی که تنها تحت تأثیر پی قرار دارد موضوع مهمی می‌باشد و بایستی به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. روش به کار رفته در تحقیق حاضر، روش المان مرزی می‌باشد. ابتدا هر یک از محیط‌ها به صورت مجزا مدل گردیده و سپس مدلی که شامل هر دو محیط می‌باشد، ارائه شده است. نتایج برای هر یک از مدل‌ها به طور مجزا ارائه شده و اثر محیط اطراف سرریز بر روی پاسخ دینامیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی کلیه پارامترهای مؤثر نظیر شکل ناهمواری، خواص مکانیکی مصالح (جرم حجمی، ضریب پواسن، مدول برشی)، فرکانس تحریک، نوع موج برخوردی، آزمایش و زاویه برخورد آن در تحلیل دینامیکی سازه در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در نظر گرفتن اندرکنش سازه با محیط اطراف آن، اثر قابل توجهی بر روی تحلیل دینامیکی سازه می‌گذارد.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، روش المان مرزی، حوزه فرکانسی، سرریز نیلوفری.

۱- مقدمه

اندرکنش خاک و سازه در بیشتر حالات به صورت تحلیل خطی در نظر گرفته شده است. بر اساس این فرض سیستم خاک-سازه می‌تواند در فضای فرکانسی با استفاده از روش زیر سازه^۱ تحلیل شود. در واقع ابتدا خصوصیات دینامیکی پی مطالعه شده، سپس پی به سازه اصلی وصل می‌شود.

Wong و Luco [۹] ماتریس نرمی دینامیکی پی بدون جرم صلب سطحی را که بر روی یک محیط نیمه بی‌نهایت الاستیک قرار گرفته بود، به وسیله تقسیم کردن سطح مشترک خاک و پی به تعدادی المان بررسی نمودند. همچنین فرض گردید بردارهای تنش به صورت یکنواخت در هر المان تقسیم می‌شوند و رابطه بین بردارهای تنش بر روی یک المان و تغییر مکان‌ها بر روی سطح خاک به وسیله انتگرال‌گیری از حل لمب^۲ بدست می‌آید. در واقع این روش یک روش المان مرزی با استفاده از حل اساسی در محیط نیمه بی‌نهایت می‌باشد. با این حال انتگرال‌گیری از این حل اساسی تنها برای پی‌های سطحی قابل استفاده بود.

همچنان که در مراجع [۸-۱] اشاره شده است، بزرگنمایی حاصل از توپوگرافی و جنس خاک اطراف سازه، در خرابی‌های مشاهده شده در اثر زلزله نقش زیادی داشته است. در واقع حرکت امواج در یک محیط علاوه بر خواص مکانیکی آن، تا حد زیادی به شرایط مرزی موجود بستگی دارد. در راستای کاهش خطرات ناشی از زلزله، بررسی اثر محیط اطراف سازه بر روی پاسخ دینامیکی آن الزامی به نظر می‌رسد. هنگامی که زلزله‌ای اتفاق می‌افتد محیط‌های کنار هم تشکیل سیستمی را می‌دهند، به گونه‌ای که برای تحلیل، نباید آن‌ها را به طور جدا از هم در نظر گرفت. همچنین ممکن است تغییرات خصوصیات خاک یا شکل مخزن اثر مهمی بر پاسخ لرزه‌ای سازه داشته باشد. سازه‌های با شکل دلخواه و با شرایط مرزی وابسته به زمان، نیازمند تحلیل به وسیله روش‌های عددی می‌باشند. بررسی نحوه مدل‌سازی اندرکنش دینامیکی سازه‌ها با محیط اطرافشان از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران برای در نظر گرفتن اثر محیط اطراف سازه بر روی رفتار دینامیکی آن‌ها بکار گرفته شده است که در میان آن‌ها، روش‌های اجزاء محدود و المان‌های مرزی فراگیرتر هستند.

1- Substructure technique

2- Lamb's solution

فرمول‌بندی‌ها و نرم‌افزار تهیه شده، مثال‌هایی بررسی گردیده است. در نهایت مثال موردی استفاده شده در این تحقیق که سرریز نیلوفری مربوط به سد بارزو شیروان می‌باشد، ارائه شده است. سد بارزو شیروان در ۴۰ کیلومتری شمال شیروان در استان خراسان واقع گردیده است. هدف از احداث این سد، تأمین سالانه ۴/۱۳ میلیون متر مکعب آب آشامیدنی شهر شیروان و همچنین تأمین بخشی از نیاز آبی اراضی دشت شیروان (۳۱ میلیون متر مکعب) می‌باشد. نوع سد بارزو شیروان، بتنی دو قوسی بوده که ارتفاع سد و طول تاج آن به ترتیب برابر با ۸۳ متر و ۳۲۵ متر می‌باشد. حجم بدنه سد ۲۳۰۰۰۰ متر مکعب و حجم مخزن ۹۲ میلیون مترمکعب می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمامی مثال‌های ارائه گردیده در این مقاله، محیط سازه و پی به صورت همگن، خطی و الاستیک فرض شده‌اند. فرض رفتار الاستیک و خطی برای پی بر این اساس می‌باشد که جنس مصالح بستر سرریز نیلوفری از سنگ آهک بوده که نمودار تنش کرنش آن به صورت خطی می‌باشد [۲۱].

۲- فرمول‌بندی روش المان مرزی در فضای فرکانسی

در این قسمت خلاصه‌ای از فرمول‌بندی روش المان مرزی در فضای فرکانسی ارائه می‌شود. روش المان مرزی استفاده شده در این تحقیق با استفاده از حل اساسی استوکس در محیط بی‌نهایت الاستودینامیک با فرض خطی و همگن بودن محیط بدست آمده است. در حل مسائل الاستودینامیک معادله حاکم بر محیط معادله ناویر است [۲۰]

$$(\lambda + \mu)u_{i,ij} + \mu u_{j,ii} + \rho b_j = \rho \ddot{u}_j \quad (1)$$

معادله فوق، معادله حاکم بر رفتار یک جسم الاستیک ایزوتروپ با حجم V و سطح Γ می‌باشد. در این معادله λ و μ ضرایب لامه، u تغییرمکان، b نیرو در واحد حجم و ρ چگالی مصالح می‌باشد. با تعریف سرعت انتشار موج فشاری (طولی) به شکل $C_1^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$ و موج برشی به شکل $C_2^2 = \mu / \rho$ معادله (۱) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$(C_1^2 - C_2^2)u_{i,ij} + C_2^2 u_{j,ii} + b_j = \ddot{u}_j \quad (2)$$

حال حجم V را که در قسمت قبل فرض شد، با سطح Γ در نظر بگیرید. با استفاده از قضیه تقابل بتنی، معادله حاکم بر حجم مساله (V) را می‌توان به معادله حاکم بر مرز محیط (Γ) تبدیل

تحلیل پاسخ سازه‌ها به موج برخوردی به آن‌ها برای حفره‌ها و موانع در تحقیقات زیادی بررسی شده است. بیشتر حل‌های دقیق انجام گرفته در این مورد مربوط به مدل‌های دو بعدی خارج صفحه می‌شود [۱۰ و ۱۱].

فرمول‌بندی مستقیم روش المان مرزی به راحتی برای مسائل اندرکنش قابل کاربرد می‌باشد. فرمول‌بندی فضای فرکانسی برای اولین بار برای محاسبه و بدست آوردن ماتریس سختی پی مستطیلی قرار گرفته یا مدفون در داخل یک محیط نیمه بی‌نهایت ویسکو-الاستیک توسط Dominguez و محققان دیگر بررسی گردیده است [۱۲-۱۴]. همچنین برای خاک غیرهمگن هم توسط Abascal و محققان دیگر به کار گرفته شده است [۱۵]. Apsel با استفاده از روش المان مرزی غیرمستقیم در ترکیب با توابع گرین نیمه واضح^۱ ماتریس سختی پی‌های دایروی مدفون در خاک چند لایه را محاسبه نمود [۱۶]. همچنین محاسبه سختی دینامیکی پی دایروی سطحی یا مدفون در خاک چند لایه با استفاده از روش المان مرزی مستقیم توسط Lera - Gomez و همکاران [۱۷]، Alarcon و همکاران [۱۸] و Dominguez و Emperador [۱۹] انجام گرفته است.

در روش المان مرزی معادلات دیفرانسیلی حاکم به معادلات انتگرالی تبدیل شده که روی مرز اعمال می‌شوند. سپس مرز به قطعات مرزی (المان‌های مرزی) تقسیم‌بندی می‌شود و انتگرال‌گیری عددی روی المان‌های مرزی انجام می‌گیرد. همانند روش‌های عددی دیگر، با ارضای شرایط مرزی، یک سیستم معادلات خطی جبری حاصل می‌شود که از حل آن جواب یکتای مسئله بدست می‌آید [۲۰].

مزیت اصلی استفاده از روش المان مرزی در مسائل اندرکنش

بر پایه دو موضوع می‌باشد:

- ۱- تنها مرز مدل نیاز به المان‌بندی دارد.
- ۲- محیط بی‌نهایت بطور طبیعی در تحلیل در نظر گرفته می‌شود.

این دو مزیت، روش المان مرزی را به روشی قوی و مناسب برای تحلیل دینامیکی سازه‌هایی که در تماس یا مدفون در خاک یا محیط‌های دیگر همچون آب هستند، تبدیل می‌نماید. به منظور تحلیل اندرکنش دینامیکی سازه‌ها با استفاده از روش المان مرزی، نویسندگان مقاله حاضر برنامه‌ای در محیط برنامه Fortran تهیه نموده‌اند. در این تحقیق ابتدا فرمول‌بندی حاکم بر مسئله ارائه شده و سپس به منظور بررسی صحت

¹ Semi-explicit

با استفاده از توابع شکلی درجه دو، u_s و t_s روی هر المان برحسب مقادیر گره‌ای آن المان در ۳ جهت دستگاه مختصات به صورت زیر تقریب زده می‌شوند [۲۰]:

$$u_s = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_3^1 \\ \vdots \\ u_1^M \\ u_2^M \\ u_3^M \end{Bmatrix} = \Phi u_s^j$$

$$t_s = \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \varphi_1 & 0 & 0 & \varphi_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_1^1 \\ t_2^1 \\ t_3^1 \\ \vdots \\ t_1^M \\ t_2^M \\ t_3^M \end{Bmatrix} = \Phi t_s^j \quad (\delta)$$

که در این رابطه M تعداد گره‌های المان z می‌باشد. به این ترتیب انتگرال‌های معادله (۴) روی المان z به صورت زیر محاسبه خواهند شد [۲۰]:

$$\int_{\Gamma_j} u_s^* t^* d\Gamma = \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi t^* d\Gamma \right\} u_s^j$$

$$\int_{\Gamma_j} t_s^* u^* d\Gamma = \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi u^* d\Gamma \right\} t_s^j \quad (\epsilon)$$

در رابطه فوق انتگرال‌های داخل آکولاد به روش عددی گوس محاسبه می‌شوند. در نهایت معادله انتگرال مرزی تغییر مکانی (۴) با استفاده از تقریب‌های فوق به صورت زیر در می‌آید [۲۰]:

$$c^i u_s^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi t^* d\Gamma \right\} u_s^j = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} \Phi u^* d\Gamma \right\} t_s^j \quad (\gamma)$$

نمود. معادله (۳) نشان دهنده معادله حاکم بر مرز مسائل فیزیکی می‌باشد [۲۰].

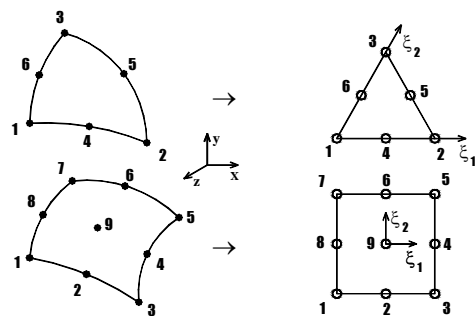
$$c^i u_s^i + \int_{\Gamma} u_s^* t^* d\Gamma = \int_{\Gamma} t_s^* u^* d\Gamma \quad (\zeta)$$

در این رابطه Γ مرز مسئله، u^* و t^* به ترتیب پاسخ‌های اساسی جابه‌جایی و بردار تنش و u_s و t_s به ترتیب بردار جابه‌جایی و بردار تنش مرزی برای هر نقطه روی مرز حوزه می‌باشند.

در روش المان مرزی ابتدا مرز Γ به NE المان مرزی تقسیم می‌شود. هر المان مرزی از n گره تشکیل شده است و تعداد کل گره‌ها N می‌باشد. با استفاده از روش هم‌گذاری^۱ نقاط، معادله انتگرال مرزی نشان داده شده در رابطه (۳) برای نقطه i ام به صورت زیر در می‌آید [۲۰]:

$$c^i u_s^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} u_s^* t^* d\Gamma \right\} = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{\Gamma_j} t_s^* u^* d\Gamma \right\} \quad (\eta)$$

که در این رابطه Γ_j سطح المان z ام، u^* و t^* به ترتیب ماتریس پاسخ‌های اساسی جابه‌جایی و بردار تنش و u_s و t_s به ترتیب بردار جابه‌جایی و بردار تنش مرزی برای هر نقطه روی مرز حوزه می‌باشند. برای هر مؤلفه k ، مقادیر u_k و t_k در هر نقطه از المان مرزی برحسب مقادیر گره‌ای u_k^j و t_k^j تعیین می‌شود. بدین منظور از توابع شکلی Φ که برحسب مختصات طبیعی ξ_1 و ξ_2 می‌باشد ($-1 \leq \xi_k \leq 1$)، استفاده می‌گردد. این توابع در مرجع [۲۰] ارائه شده است. شکل (۱) تبدیل سیستم مختصات کلی $x-y-z$ به مختصات طبیعی $\xi_1 - \xi_2$ را نشان می‌دهد.



شکل ۱- المان‌های مرزی درجه دو مثلثی و چهار ضلعی و تبدیل از سیستم مختصات کلی $x-y-z$ به مختصات طبیعی

$$\xi_1 - \xi_2$$

بینهایت u_h و میدان جابه‌جایی مربوط به محیط بسته u_v می‌باشد. شرط مرزی تنش صفر بر روی سطح آزاد زمین اعمال می‌شود:

$$\begin{aligned} t_h &= 0 & \Gamma_a & \text{بر روی} \\ t_v &= 0 & \Gamma_c & \text{بر روی} \end{aligned} \quad (12)$$

در محیط نیمه بی‌نهایت Ω_h ، میدان جابه‌جایی کل u_h و بردار تنش کل t_h با استفاده از اصل جمع آثار قوا از مجموع میدان آزاد و میدان تفرق یافته حاصل می‌شوند [۲۲]:

$$\begin{aligned} u_h &= u_s + u_0 \\ t_h &= t_s + t_0 \end{aligned} \quad (13)$$

با توجه به این‌که بردار تنش کل روی مرز Γ_a صفر می‌باشد، برای بردار تنش مربوط به امواج تفرق یافته رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$t_s = -t_0 \quad \Gamma_a \quad \text{بر روی} \quad (14)$$

جابه‌جایی‌ها و بردارهای تنش مربوط به محیط نیمه بینهایت ناشی از امواج تفرق یافته، با استفاده از روش المان مرزی از رابطه ماتریسی زیر حاصل می‌شوند [۲۲]:

$$H_h u_s - G_h t_s = 0 \quad (15)$$

H_h و G_h ماتریس‌های تأثیری هستند که به ترتیب از انتگرال‌گیری هسته‌های جابه‌جایی و بردار تنش روی مرز محیط نیمه بینهایت حاصل می‌شوند. با مراجعه به شکل (۲) رابطه (۱۵) به فرم واضح‌تر زیر در می‌آید [۲۲]:

$$H_h [u_s^a + u_s^d] - G_h [t_s^a + t_s^d] = 0 \quad (16)$$

با اعمال شرط مرزی تنش صفر بر روی مرز Γ_a رابطه (۱۶) به صورت زیر در می‌آید [۲۲]:

$$H_h [u_s^a + u_s^d] - G_h t_s^d = -G_h t_0^a \quad (17)$$

در رابطه ماتریسی فوق، جابه‌جایی‌ها و بردارهای تنش مربوط به فصل مشترک دو محیط یعنی u_s^d ، t_s^d و همچنین u_s^a مجهول می‌باشند. جابه‌جایی‌ها و بردارهای تنش کل مربوط به محیط

u_s^j و t_s^j در رابطه (۷) بردارهای تغییرمکان و تنش مرزی می‌باشند. به دلیل آن‌که فرمول‌بندی عددی بر حسب مختصات طبیعی ξ_1 و ξ_2 می‌باشد، تبدیل ديفرانسیل سطح در مختصات کارتزین یعنی $d\Gamma$ به سیستم مختصات طبیعی لازم می‌باشد [۲۰]:

$$d\Gamma = \left| \frac{\partial r}{\partial \xi_1} \times \frac{\partial r}{\partial \xi_2} \right| d\xi_1 d\xi_2 = |J| d\xi_1 d\xi_2 \quad (8)$$

در این رابطه J ، ژاکوبین تبدیل مختصات محلی به کلی و اندازه آن یعنی $|J|$ ، اندازه بردار نرمال بر سطح در نقطه مورد نظر می‌باشد. همچنین جزئیات محاسبه رابطه (۸) به تفصیل در مرجع [۲۰] ارائه گردیده است. در نهایت معادله انتگرال مرزی تغییرمکانی (۷) با استفاده از فرمول‌بندی‌های عددی فوق، به صورت زیر در می‌آید [۲۰]:

$$\begin{aligned} c^i u_s^i + \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Phi t^* |J| d\xi_1 d\xi_2 \right\} u_s^j \\ = \sum_{j=1}^{NE} \left\{ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Phi u^* |J| d\xi_1 d\xi_2 \right\} t_s^j \end{aligned} \quad (9)$$

با فرض هر گره به عنوان گره روی هم‌گذاری^۱ (نقطه اعمال بار) و انتگرال‌گیری عددی روی المان‌های مرزی، معادلات انتگرال مرزی به سیستم معادلات جبری خطی تبدیل می‌شوند [۲۰]:

$$Hu_s = Gt_s \quad (10)$$

ماتریس‌های تأثیر H و G شامل انتگرال‌هایی با هسته‌های t^* و u^* می‌باشند. به تعداد نقاط روی هم‌گذاری (گره‌های مرزی) معادله خواهیم داشت. با مرتب‌سازی معادله ماتریسی فوق یعنی قرار دادن تمامی مقادیر معلوم در سمت راست و بردن مجهولات گرهی به سمت چپ، دستگاه معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$A X = B \quad (11)$$

۳- فرمول‌بندی اندرکنش دو محیط در روش المان مرزی

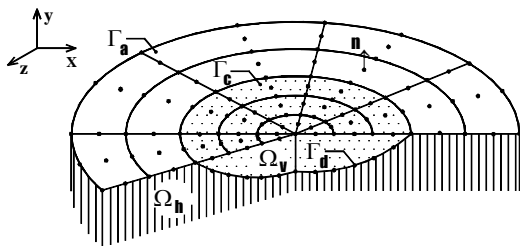
محیط نیمه بینهایت Ω_h و ناحیه بسته Ω_v را در نظر بگیرید (شکل (۲)). میدان جابه‌جایی مربوط به محیط نیمه

1- Collocation point
2- Influence matrices

با جایگذاری مقادیر تفرق یافته برحسب مقادیر کل در رابطه (۲۳)، دستگاه معادلات با مجهولات جابه‌جایی و بردار تنش کل حاصل می‌شود [۲۲]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_h & \mathbf{H}_h & 0 & -\mathbf{G}_h \\ 0 & \mathbf{H}_v & \mathbf{H}_v & \mathbf{G}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_h^a \\ \mathbf{u}_h^d \\ \mathbf{u}_v^c \\ \mathbf{t}_h^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_h (\mathbf{u}_o^a + \mathbf{u}_o^d) - \mathbf{G}_h (\mathbf{t}_o^a + \mathbf{t}_o^d) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

هرچند که در روابط فوق فرمول‌بندی مربوط به محیط‌های دو لایه ارائه شد ولی این روابط کلی بوده و برای محیط‌های چند لایه نیز قابل اعمال است.



شکل ۲- محیط نیمه بی‌نهایت سه‌بعدی Ω_h و ناحیه بسته Ω_v

۴- نتایج

۴-۱- تأیید نتایج تحلیل الاستودینامیک سه بعدی محیط‌های محدود در فضای فرکانسی

به منظور تأیید نتایج تحلیل الاستودینامیک سه‌بعدی محیط‌های محدود در فضای فرکانسی، از مثال تیر طره استفاده شده است. در این مثال تیر طره‌ای به طول ۲۰ متر و سطح مقطع 4×4 متر مربع که در معرض حرکت واحد تکیه‌گاهی در راستای قائم می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه مسئله و نحوه المان‌بندی این تیر در شکل (۳) نشان داده شده است. مشخصات مصالح به کار رفته به شرح ذیل می‌باشد:

جرم مخصوص 7800 kg/m^3 ، نسبت پواسون 0.3، مدول برشی $8 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ و نسبت میرایی 0.05. تغییر مکان‌های نقطه میانی در مقطع انتهایی کنسول بر حسب فرکانس‌های بی بعد شده نسبت به فرکانس طبیعی ($\omega_1 = 52.66 \text{ S}^{-1}$) در شکل (۴) رسم گردیده است. در این مثال نتایج بدست آمده در تحقیق موجود با نتایج مرجع [۲۰] مقایسه شده است.

بسته Ω_v ، با استفاده از روش المان مرزی از معادله ماتریسی زیر حاصل می‌شوند [۲۲]:

$$H_v u_v - G_v t_v = 0 \quad (18)$$

با مراجعه به شکل (۲) این معادله به فرم واضح‌تر زیر در می‌آید [۲۲]:

$$H_v [u_v^c + u_v^d] - G_v [t_v^c + t_v^d] = 0 \quad (19)$$

با توجه به این که تنش کل $t_v^c = 0$ می‌باشد رابطه فوق را می‌توان به شکل زیر نوشت [۲۲]:

$$H_v [u_v^c + u_v^d] - G_v t_v^d = 0 \quad (20)$$

حال دو معادله (۱۷) مربوط به محیط Ω_h و (۲۰) مربوط به محیط Ω_v می‌بایست سرهم شوند. معادلات سازگاری و تعادل بر روی مرز مشترک Γ_d به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_v^d &= \mathbf{u}_h^d \\ \mathbf{t}_v^d &= -\mathbf{t}_h^d \end{aligned} \quad (21)$$

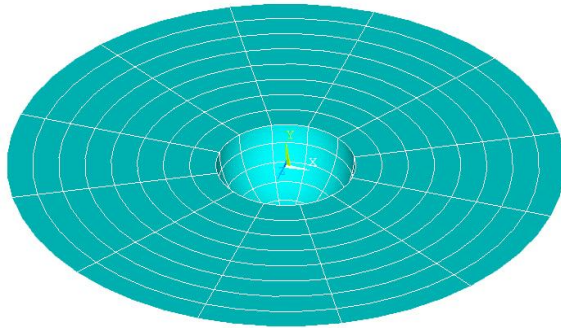
جابه‌جایی و بردار تنش کل بر روی مرز Γ_d از روابط جابه‌جایی و بردار تنش کل بدست می‌آیند. با اعمال این روابط در معادله (۵-۹) برای محیط Ω_v خواهیم داشت [۲۲]:

$$\mathbf{H}_v \mathbf{u}_v^c + \mathbf{H}_v [\mathbf{u}_s^d + \mathbf{u}_o^d] - \mathbf{G}_v [-\mathbf{t}_s^d - \mathbf{t}_o^d] = 0 \quad (22)$$

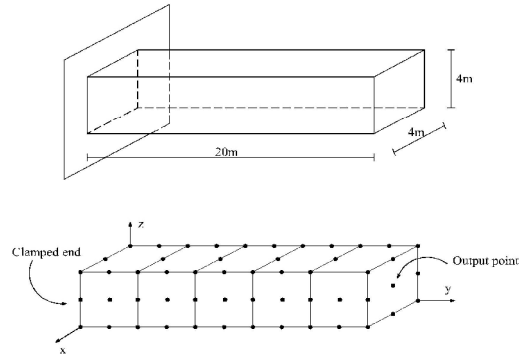
دستگاه معادلات حاصل از روابط (۱۷) و (۲۲) به صورت زیر می‌باشد [۲۲]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_h & \mathbf{H}_h & 0 & -\mathbf{G}_h \\ 0 & \mathbf{H}_v & \mathbf{H}_v & \mathbf{G}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s^a \\ \mathbf{u}_s^d \\ \mathbf{u}_v^c \\ \mathbf{t}_s^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{G}_v \mathbf{t}_o^a \\ -\mathbf{H}_v \mathbf{u}_o^d - \mathbf{G}_v \mathbf{t}_o^d \end{bmatrix} \quad (23)$$

جابه‌جایی کل u_v روی سطح آزاد محیط Ω_v مستقیماً از دستگاه معادلات فوق حاصل می‌شود، درحالی‌که جابه‌جایی‌ها و بردارهای تنش کل مربوط به محیط نیم بینهایت Ω_h با استفاده از اصل جمع آثار قوا از معادلات (۱۳) بدست می‌آیند.

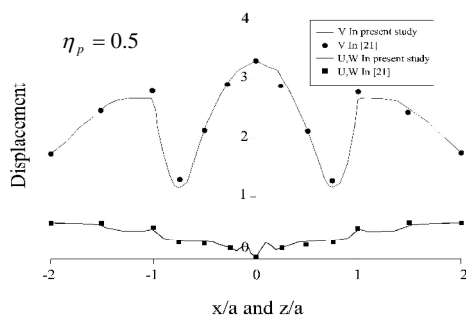
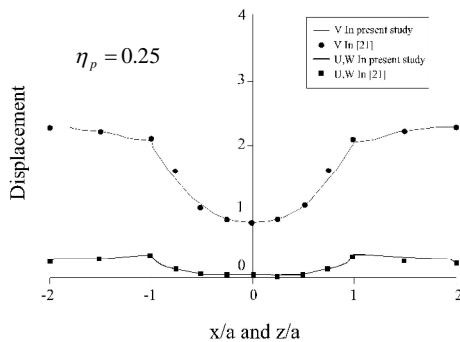


شکل ۵- المان بندی دره نیم کره



شکل ۳- شکل و نحوه المان بندی تیر طره با حرکت واحد

تکیه‌گاهی در راستای قائم

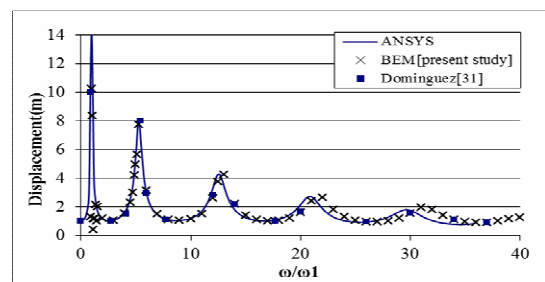


شکل ۶- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره

نیم‌کره برای برخورد قائم موج P در فرکانس‌های بی‌بعد

$$\eta_p = 0.5 \text{ و } \eta_p = 0.25$$

فرکانس بی‌بعد η_p برابر نسبت قطر دره به طول موج امواج طولی در محیط می‌باشد $(\eta_p = 2a/\lambda = \omega a/c_1\pi)$. فرکانس واقعی موج P برخوردی و شعاع دره نیم‌کره است. نتایج مطالعات حاضر با خطوط پیوسته و نتایج Reinoso با دواپر توپر نشان داده شده است. تمامی فواصل نسبت به شعاع دره بی‌بعد شده‌اند. همچنین میدان جابه‌جایی سطحی برحسب مؤلفه‌های کارترین u, v, w نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج تحقیق حاضر تطابق خوبی با نتایج Reinoso دارند.



شکل ۴- تغییر مکان‌های نقطه میانی در مقطع انتهایی کنسول

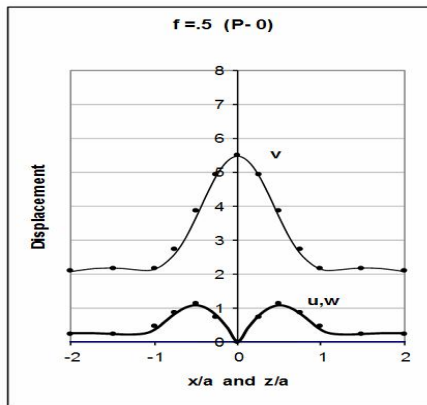
در معرض حرکت واحد تکیه‌گاهی

۴-۲- تأیید نتایج انتشار امواج مسطح هارمونیک در

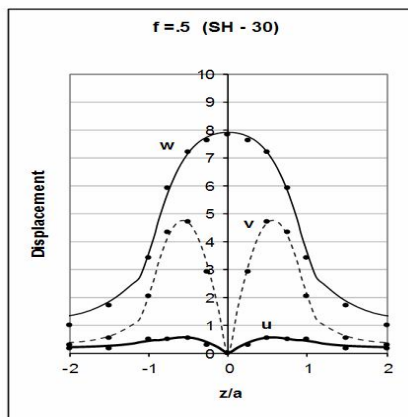
محیط بی‌نهایت یک لایه

به منظور تأیید نتایج انتشار امواج مسطح هارمونیک در محیط بی‌نهایت یک لایه، از مثال انتشار امواج در دره نیم‌کره استفاده گردیده است. در این مثال اثر توپوگرافی بر روی بزرگنمایی امواج زلزله بررسی می‌گردد. هندسه مسئله و نحوه المان‌بندی این دره در شکل (۵) نشان داده شده است. اولین تحقیقات در زمینه اثر دره‌های نیم‌کره روی دامنه حرکت امواج توسط Sanchez-Sesma [۲۳] برای برخورد قائم امواج P صورت گرفت. پس از او Eshraghi و Dravinski [۲۴] همین مسأله را به روش بسط توابع موج حل نمودند. پس از آن‌ها Reinoso [۲۲] این مسأله را به روش المان مرزی حل نمود.

مشخصات مکانیکی محیط به صورت $c_1 = \rho = 1$ ، $\mu = 0.33$ ، $c_2 = 0.577$ و $v = 0.25$ می‌باشد، که چگالی، مدول برشی و ضریب پواسن محیط می‌باشد. مقایسه نتایج Reinoso [۲۲] با نتایج حاصل از فرمول‌بندی‌های ارائه شده برای فرکانس‌های بی‌بعد $\eta_p = 0.25, 0.5$ در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۸- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی نیم‌کره برای برخورد قائم موج P و فرکانس بی‌بعد $\eta_p = 0.5$ نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۲۲] به ترتیب با خطوط ممتد و نقاط دایره شکل نشان داده شده است.



شکل ۹- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی نیم‌کره در راستای محور Z تحت اثر موج SH با زاویه برخورد 30° نسبت به محور قائم Y و آزیموت 0° (صفحه تابش XY) و فرکانس بی‌بعد $\eta_s = 0.5$ نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۲۲] به ترتیب با خطوط ممتد و نقاط دایره شکل نشان داده شده است.

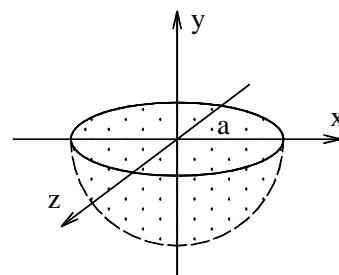
فرکانس بی‌بعد η_s برابر نسبت قطر دره رسوبی به طول موج امواج برشی در محیط نیمه بی‌نهایت می‌باشد. تمامی فواصل نسبت به شعاع دره رسوبی بی‌بعد شده‌اند. برای موج SH میدان جابه‌جایی در صفحه تابش تنها دارای یک مؤلفه خارج از صفحه‌ای می‌باشد.

۳-۴- تأیید نتایج اندرکنش محیط محدود و محیط نیمه بینهایت در تفرق امواج

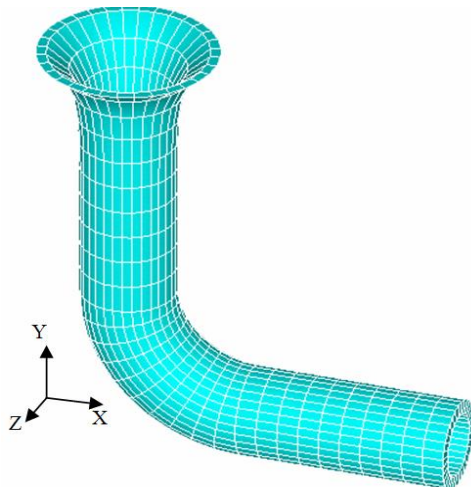
به منظور تأیید نتایج اندرکنش محیط محدود و محیط نیمه بینهایت در تفرق امواج، از مثال انتشار امواج در دره رسوبی نیم کره با یک لایه رسوبی استفاده گردیده است. در این مثال اثر لایه‌بندی خاک و ضخامت و جنس خاک هر لایه بر روی تشدید امواج زلزله، مورد بررسی قرار می‌گیرند. هندسه این مثال در شکل (۷) نشان داده شده است. شعاع داخلی این دره رسوبی $a = 1$ می‌باشد.

نتایج بدست آمده توسط Reinoso [۲۲] برای اندرکنش سه بعدی دره رسوبی نیم‌کره تحت اثر برخورد قائم موج P برای بررسی صحت روش ارائه شده برای محیط‌های لایه‌ای در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج Reinoso [۲۲] با نتایج حاصل از فرمول‌بندی‌های ارائه شده برای فرکانس بی‌بعد $\eta_p = 0.5$ در شکل (۸) موجود است. فرکانس بی‌بعد η_p برابر نسبت قطر دره رسوبی به طول موج امواج طولی در محیط نیم بی‌نهایت می‌باشد $(\eta_p = 2a/\lambda = \omega a/c_1\pi)$. فرکانس واقعی موج P برخوردی و a شعاع دره رسوبی می‌باشد. مشخصات مکانیکی محیط نیمه بی‌نهایت به صورت $\mu_{hs} = \rho_{hs} = 1$ ، $\nu_{hs} = 0.25$ و مقادیر مربوط به دره رسوبی به صورت $\mu_v = 0.3$ ، $\rho_v = 0.6$ ، $\nu_v = 0.3$ می‌باشد. سرعت انتشار امواج برشی در محیط نیمه بینهایت برابر 1 و سرعت مربوط به امواج طولی برابر $\sqrt{3}$ می‌باشد. نتایج مطالعات حاضر با خطوط پیوسته و نتایج Reinoso با دایره توپر نشان داده شده است.

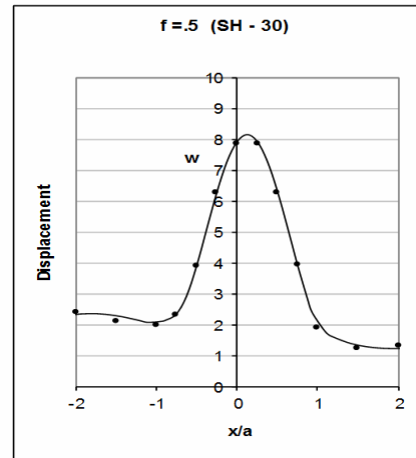
همچنین این دره تحت اثر موج SH با زاویه برخورد 30° نسبت به محور قائم قرار گرفت. خصوصیات مصالح محیط نیمه بی‌نهایت مشابه دره رسوبی فوق و مقادیر مربوط به دره رسوبی برابر $\mu_v = 0.2025$ ، $\rho_v = 1$ ، $\nu_v = 0.3$ می‌باشد. مؤلفه‌های جابه‌جایی سطحی برای نقاط در راستای دو محور X و Z برای فرکانس بی‌بعد $\eta_s = 0.5$ $(\eta_s = \omega a/c_2\pi)$ در شکل‌های (۹) و (۱۰) موجود است.



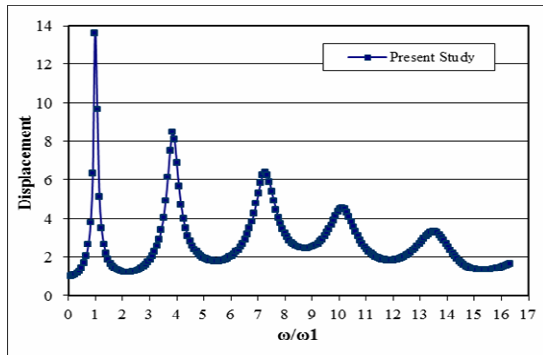
شکل ۷- دره رسوبی نیم‌کره به شعاع a



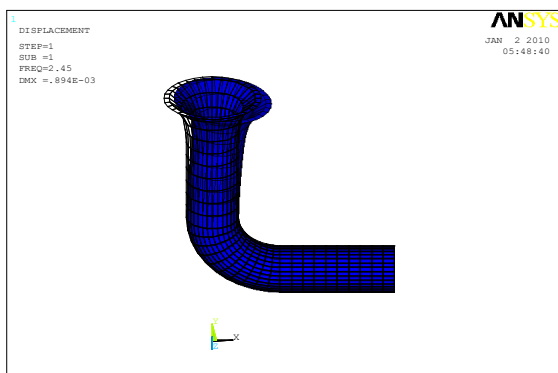
شکل ۱۱- هندسه و نحوه المان بندی سرریز نیلوفری در معرض حرکت واحد تکیه گاهی



شکل ۱۰- بزرگنمایی مؤلفه های میدان جابه جایی سطحی دره رسوبی نیم کره در راستای محور x تحت اثر موج SH با زاویه برخورد 30° نسبت به محور قائم y و آزیموت 0° (صفحه تابش xy) و فرکانس بی بعد $\eta_S = 0.5$ نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۲۲] به ترتیب با خطوط ممتد و نقاط دایره شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تغییر مکان نقطه بالای سرریز در معرض حرکت واحد تکیه گاهی در مقابل فرکانس های بی بعد شده



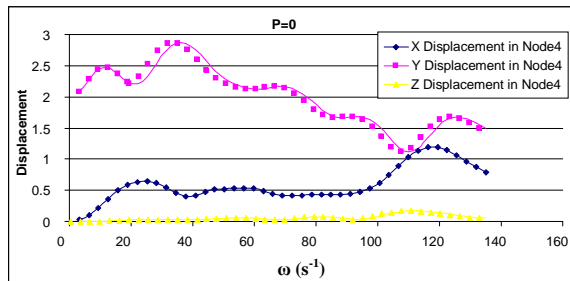
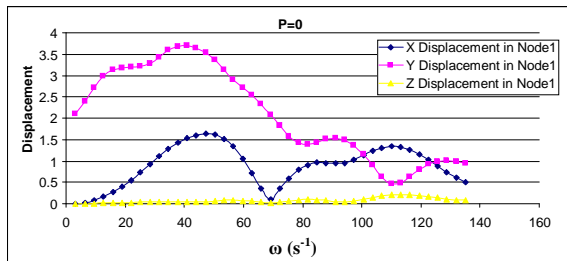
شکل ۱۳- نمای از تغییر شکل مد اول سرریز مد شده در نرم افزار ANSYS

۵- نتایج عددی تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری سد بارزو شیروان

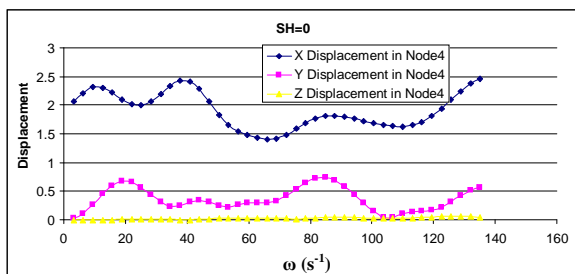
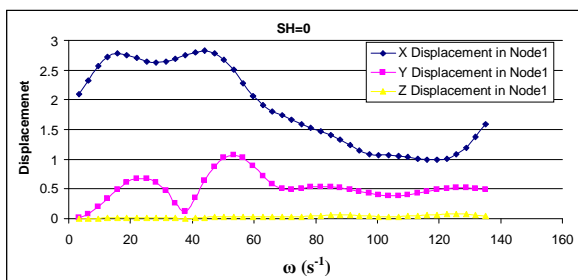
۵-۱- تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری بدون در نظر گرفتن محیط اطراف

در این مثال تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری بدون در نظر گرفتن محیط اطراف آن در فضای فرکانسی مورد بررسی قرار می گیرد. هندسه مسئله و نحوه المان بندی این سرریز در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مشخصات مصالح به کار رفته به شرح مقابل می باشد: 2400 kg/m^3 ، $7.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ، نسبت میرایی ۰.۰۵، مدول برشی 0.2 ، به منظور بررسی محیط اطراف سرریز نیلوفری بر پاسخ دینامیکی آن، قسمتی از سرریز که در داخل خاک قرار دارد در دو راستا (y,z) کاملاً مقید می شود و در راستای سوم (x) تغییر مکان واحد اعمال می گردد. تغییر مکان بالاترین نقطه سرریز در راستایی که تغییر مکان واحد اعمال گردیده است (x)، در فرکانس های مختلف بررسی می گردد. تغییر مکان ها برحسب فرکانس بی بعد شده نسبت به فرکانس طبیعی چرخشی $(\omega_1 = 15.386 \text{ s}^{-1})$ در شکل (۱۲) رسم گردیده است. همچنین لازم به ذکر است که فرکانس طبیعی اول سازه مطابق شکل (۱۳) از نرم افزار ANSYS بدست آمده است.

مدل تهیه شده تحت برخورد امواج P، SH و SV با زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مؤلفه‌های جابه‌جایی سطحی برای دو نقطه (یکی در مرز مشترک سطح آزاد پی و سطح سازه و دیگری در فاصله دورتر بر روی سطح آزاد، همچنان که در شکل (۱۴) نشان داده شده است)، در شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.



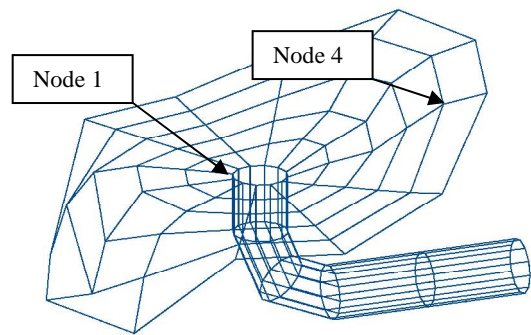
شکل ۱۶- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی خاک اطراف سرریز در اثر برخورد موج P با زاویه صفر



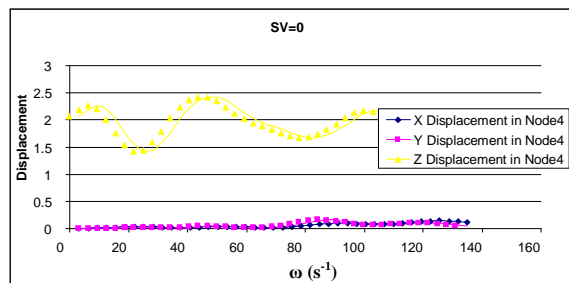
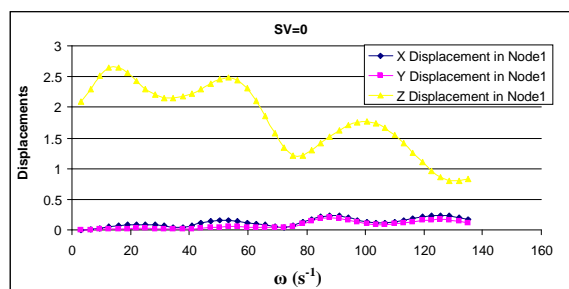
شکل ۱۷- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی خاک اطراف سرریز در اثر برخورد موج SH با زاویه صفر

۵-۲- انتشار امواج مسطح هارمونیک در خاک اطراف سرریز

در این مثال با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده مسئله انتشار امواج مسطح هارمونیک در خاک اطراف سرریز مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه مسئله و نحوه المان‌بندی خاک اطراف سرریز در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همچنین مشخصات مصالح به کار رفته برای خاک اطراف سرریز به شرح مقابل می‌باشد: سنگ آهک دارای لایه‌های شیلت با جرم مخصوص 2600 kg/m^3 ، نسبت پواسون 0.3 ، مدول برشی $9 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ و نسبت میرایی 0.05 .

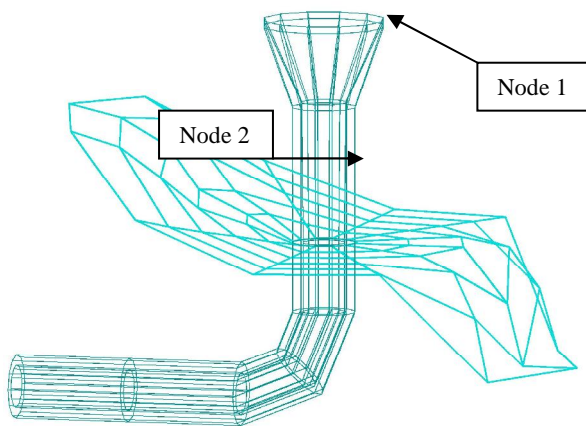


شکل ۱۴- هندسه و نحوه المان‌بندی خاک اطراف سرریز



شکل ۱۵- بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی خاک اطراف سرریز در اثر برخورد موج SV با زاویه صفر

شکل نامنظم آن است که باعث ایجاد چنین شکل‌هایی می‌گردد. همچنین به دلیل وقوع پدیده میرایی تشعشی در فرکانس‌های بالاتر دامنه تغییر مکان‌ها بسیار کم می‌گردد. شکل‌های (۲۲)، (۲۳) و (۲۴) نشان‌دهنده مؤلفه‌های جابه‌جایی تحت اثر برخورد موج P و شکل‌های (۲۵)، (۲۶) و (۲۷) نشان‌دهنده مؤلفه‌های جابه‌جایی تحت اثر برخورد موج SH با زاویه صفر درجه می‌باشند. همچنان که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد بیشترین تغییر مکان سازه در حالت برخورد موج P در جهت Y دستگاه مختصات و بیشترین تغییر مکان سازه در حالت برخورد موج SH در جهت X دستگاه مختصات می‌باشد.



شکل ۱۸- نمایی از سرریز نیلوفری و پی اطراف آن

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش المان‌های مرزی در فضای فرکانسی به بررسی پاسخ دینامیکی سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-پی به صورت سه بعدی پرداخته شد. مثال موردی استفاده شده در این مقاله، سرریز نیلوفری مربوط به سد بارزو شیروان می‌باشد. با توجه به محل قرارگیری سازه امکان وقوع زلزله در زمانی که اطراف سرریز آب نیست، وجود دارد. بنابراین در نظر گرفتن سرریز در حالتی که تنها تحت تأثیر پی قرار دارد موضوع مهمی می‌باشد و بایستی به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. به منظور بررسی صحت فرمول‌بندی ارائه شده، مثال‌هایی ارائه گردید. سپس به منظور بررسی سازه مذکور در ابتدا فرکانس طبیعی این سازه به دست آمد و پاسخ این سازه در اثر حرکت تکیه‌گاه صلب مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه پاسخ دینامیکی سازه با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و پی بررسی گردید.

۵-۳- تحلیل دینامیکی سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

در این مثال به بررسی تحلیل دینامیکی مدل سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، در فضای فرکانسی پرداخته شده است. طبق نقشه‌های موجود تاج سرریز در رقوم ۱۸۸ متر بوده و دارای قطر دهانه ۲۳ متر می‌باشد و پروفیل قیف سرریز تا تراز ۱۷۱/۵ متر ادامه دارد و پس از آن قطر داخلی سرریز ثابت و برابر ۸ متر می‌گردد و به همین شکل تا رقوم ۱۵۱/۸ متر ادامه داشته و سپس با یک قوس دایروی به شعاع ۱۶ متر به تونل انحراف متصل می‌شود. هندسه و نحوه المان‌بندی این مثال در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همچنین مشخصات مصالح به کار رفته به شرح زیر می‌باشد:

سرریز نیلوفری: بتن با جرم مخصوص 2400 kg/m^3 ، نسبت پواسون ۰.۲، مدول برشی $7.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ و نسبت میرایی ۰.۰۵.

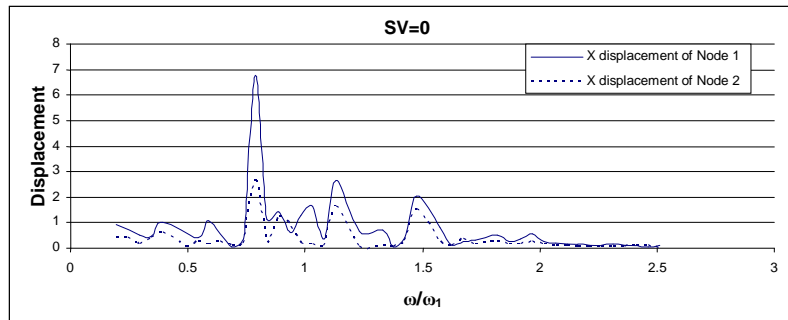
پی: سنگ آهک دارای لایه‌های شیلت با جرم مخصوص 2600 kg/m^3 ، نسبت پواسون ۰.۳، مدول برشی $9 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ و نسبت میرایی ۰.۰۵.

مدل تهیه گردیده تحت برخورد امواج P، SH و SV با زوایای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. مؤلفه‌های جابه‌جایی سطحی برای دو نقطه (یکی در بالای سرریز و دیگری در مرز مشترک سطح آزاد پی و سطح سازه) در شکل‌های (۱۹) تا (۲۷) نشان داده شده است [۲۵]. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها فرکانس‌های موج تابیده شده با فرکانس طبیعی اول سازه ($f_n=2.54 \text{ hz}$) نرمالیزه شده است.

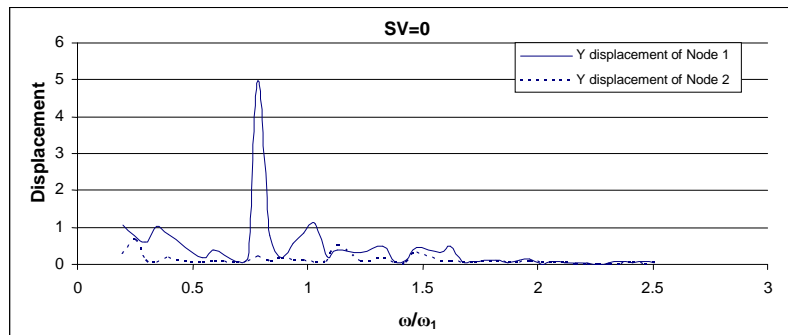
شکل‌های (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) نشان‌دهنده مؤلفه‌های جابه‌جایی تحت اثر برخورد موج SV با زاویه صفر درجه می‌باشد. همچنان که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، بیشترین تغییر مکان در سازه در جهت Z دستگاه مختصات می‌باشد. دلیل این موضوع نحوه برخورد موج SV می‌باشد که بیشترین نوسان در سازه در جهت عمود بر مسیر انتشار موج ایجاد می‌گردد که در این حالت محور Z عمود بر راستای انتشار موج SV می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که در فرکانسی کمتر از فرکانس اول طبیعی سازه، بیشترین تغییر مکان در سازه ایجاد می‌شود که دلیل آن کاهش سختی سیستم نسبت به حالتی است که برای سرریز تکیه‌گاه صلب در نظر گرفته شده است. در این شکل‌ها قله‌هایی به صورت موضعی و بین فرکانس‌های اصلی سازه مشاهده می‌گردد که دلیل آن وجود فونداسیون اطراف سازه و

۳- انعطاف‌پذیری بستر باعث کاهش سختی سیستم و در نتیجه کاهش در فرکانس‌های مدهای ارتعاشی سیستم می‌گردد.
 ۴- در اثر برخورد امواج S به سازه، مد ارتعاشی اول سازه غالب می‌شود.
 ۵- اثرات ناشی از توپوگرافی سطحی، پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را دستخوش تغییرات قرار داده است، به گونه‌ای که باعث ایجاد تحریک‌های موضعی در پاسخ لرزه‌ای سازه می‌گردد.

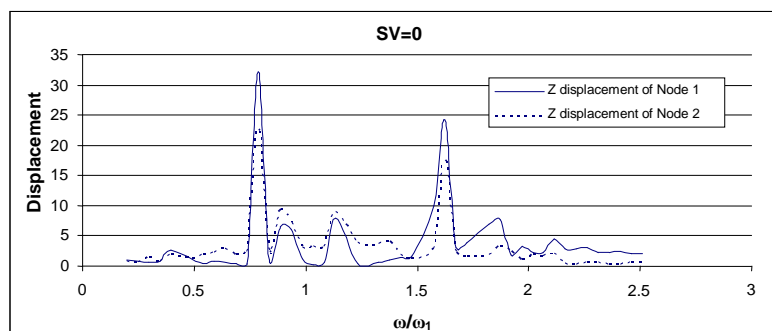
اثرات ناشی از توپوگرافی و نامنظمی زمین و تفرق امواج در روند حل این مسأله در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از بررسی اندرکنش سازه-پی را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود:
 ۱- به دلیل وقوع پدیده میرایی تشعشعی و تغییرات در مشخصه‌های دینامیکی سیستم در فرکانس‌های بالا، پاسخ‌ها در حالت وجود بستر نیمه نامحدود همگن در مقایسه با حالت بستر صلب عموماً کاهش می‌یابند.



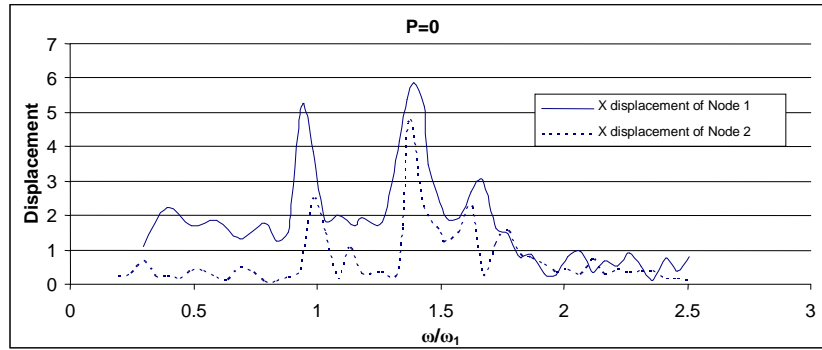
شکل ۱۹- بزرگنمایی مؤلفه X میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج SV با زاویه صفر و آزیموت صفر درجه



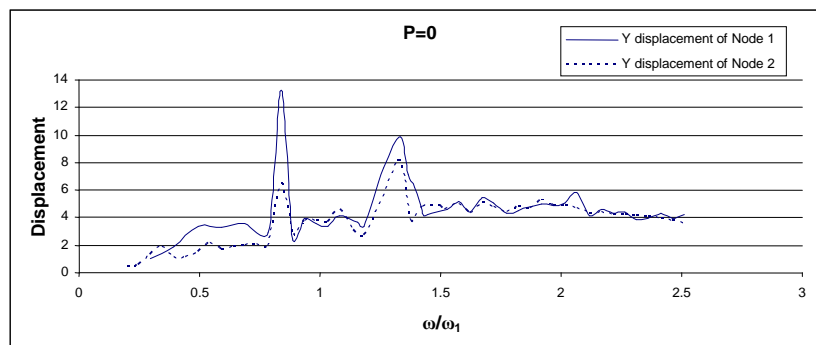
شکل ۲۰- بزرگنمایی مؤلفه Y میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج SV با زاویه صفر و آزیموت صفر درجه



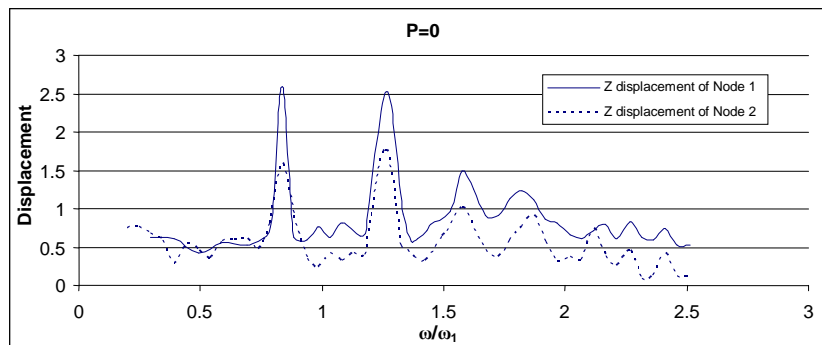
شکل ۲۱- بزرگنمایی مؤلفه Z میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج SV با زاویه صفر و آزیموت صفر درجه



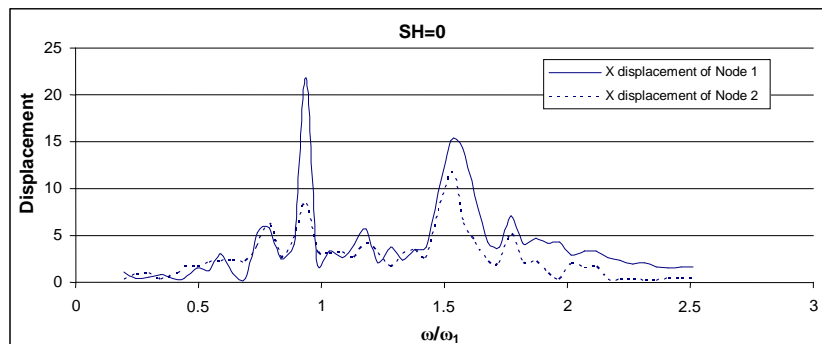
شکل ۲۲- بزرگنمایی مؤلفه X میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج P با زاویه و آزمون صفر درجه



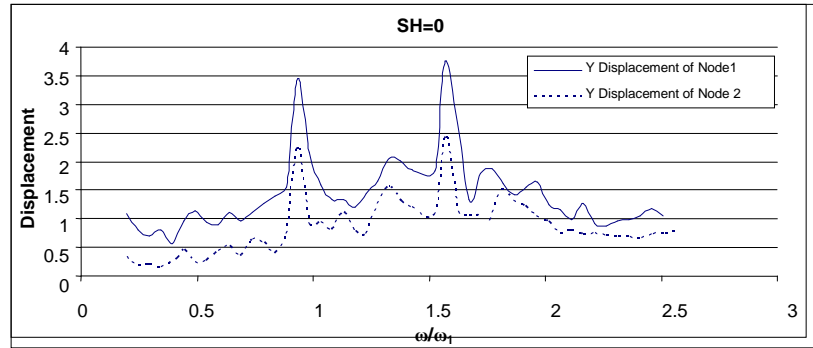
شکل ۲۳- بزرگنمایی مؤلفه Y میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج P با زاویه و آزمون صفر درجه



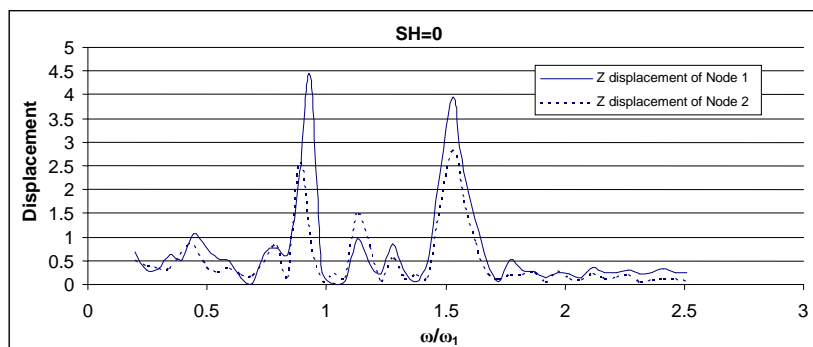
شکل ۲۴- بزرگنمایی مؤلفه Z میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج P با زاویه و آزمون صفر درجه



شکل ۲۵- بزرگنمایی مؤلفه X میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج SH با زاویه و آزمون صفر درجه



شکل ۲۶- بزرگنمایی مؤلفه Y میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج SH با زاویه و آزمون صفر درجه



شکل ۲۷- بزرگنمایی مؤلفه Z میدان جابه‌جایی سطحی سربز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش آن با پی در دو گره ۱ و ۲ تحت برخورد موج SH با زاویه و آزمون صفر درجه

- ۷- مراجع
- 1985: Chile and Mexico", Proceedings of the International Symposium of Engineering Geology Problems in Seismic Areas, Bari, Italy, 1986.
- [6] Finn, W. D. L., Ventura, C. E., Schuster, N. D. "Ground Motions During the 1994 Northridge Earthquake", Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22 (2), 300-315.
- [7] Hiroshi, K., "The Cause of the Damage Belt in Kobe: the Basin-Edge Effect Constructive Interference of the Direct S-Wave with the Basin-Induced Diffracted/Rayleigh Waves", Seismological Research Letters, 1996, 67(5), 25-30.
- [8] Athanasopoulos, G. A., Pelkis, P. C., Leonidou, E. A. "Effect of Surface Topography on Seismic Ground Response in the Egeon (Greece) 15 June 1995 earthquake", International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18, 135-149.
- [9] Wong, H. L. Luco, J. E. "Dynamic Response of Rigid Foundations of Arbitrary Shape",
- [1] Angat, A., "Le tremblement de terre de provence (11 Juin 1909), annales du bureau central meteorologique de France", Memories, 1909. pp. 37-93.
- [2] Brambati, A., Faccioli, E., Carulli, E. B., Culchi, F., Onofri, R., Stefanni, S., Ulcigrai, F., "Studio de microzonizzazione sismica dell'area di tarcento (Friuli)", Edito da regiona autonoma Friuli venesia giulia, 1980.
- [3] Siro, L., "Southern Italy November 23 1980 Earthquake", Proceeding of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens, Greece, 1982, pp. 20-25.
- [4] Singh, S. K., Lermo, J., Dominguez, J., Ordaz, M., Espinosa, J. M., Mena, E., Quaas, R., "The Mexico Earthquake of September 19, 1985, A study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site", Earthquake Spectra, 1988, 4, 653-673.
- [5] Celebi, M., Hanks, T. "Unique Site Response Condition of Two Major Earthquakes of

- "Boundary Element Approach to the Dynamic Stiffness Functions of Circular Foundations", International Journal Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1989, 13, pp. 645-664.
- [19] Emperador, J. M. Dominguez, J., "Dynamic Response of Axisymmetric Embedded Foundations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18, pp. 1105-1117.
- [20] Dominguez, J., "Boundary Elements in Dynamics", Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., 1993.
- [21] Song, L. Lajtai, E. Z., "Modeling the Stress-Strain Diagram for Brittle Rock Loaded in Compression", Mechanics of Materials, 1998, 30, (3), pp. 243-251.
- [22] Reinoso, E., "Scattering of Seismic Waves: Applications to the Mexico City Valley", WIT Press, London, 2002.
- [23] Sanchez-Sesma, F. J., "Diffraction of Elastic Waves by Three-Dimensional Surface Irregularities", Bulletin of the seismological society of America, 1983, 73, 1621-1636.
- [24] Eshraghi, H., Dravinski, M. "Scattering of Plane Harmonic SH, SV, P and Rayleigh Waves by Non-Axisymmetric Three-Dimensional Canyons: A Wave Function Expansion approach", International Journal Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18, 983-998.
- [۲۵] صناعی‌ها، ع.، "محاسبه فشار هیدرودینامیکی وارد بر سرریز نیلوفری با در نظر گرفتن اندرکنش سرریز با مخزن و پی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی، دانشگاه تهران. ۱۳۸۸.
- Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1976, 4, 579-587.
- [10] Wong, H. L. Trifunac, M. D., "Scattering of Plane SH Waves by a Semi-Elliptical Canyon", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1974, 3, 157-169, 1974.
- [11] Sanchez-Sesma, F. J. Rosenblueth, E., "Ground Motion at Canyons of Arbitrary Shape under Incident SH Waves", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, 7, 441-450.
- [12] Dominguez, J., "Dynamic Stiffness of Rectangular Foundations", Research Report R78-20, Dept. Civil Engrg., Massachusetts Inst. of Tech. Cambridge, Mass, 1978.
- [13] Ottenstreuer, M. Schmid, G., "Boundary Elements Applied to Soil-Foundation Interaction", 3rd International Seminar on Recent Advances in Boundary Element Methods, Irvine, Calif., Springer-Verlag, 1981, pp. 293-309.
- [14] Ottenstreuer, M., "Frequency Dependent Dynamic Response of Footings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference, Southampton, England, Springer-Verlag, 1982, pp. 799-809.
- [15] Abascal, R. Dominguez, J., "Vibrations of Footings on Zoned Viscoelastic Soil", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1986, 112, pp. 433-447.
- [16] Apsel, R. J. Luco, J. E., "On Green's Functions for a Layered Half- Space: Part II", Bulletin of the seismological society of America, 1983, 73, 931-951.
- [17] Gomez-Lera, M. S., Dominguez, J. Alarcon, E., "On the Use of 3-D Fundamental Solutions for Axisymmetric Steady-State Dynamic Problems", 7th International Conferences on BEM in Engineering, Ed. C.A. Brebbia, Springer-Verlag, 1985.
- [18] Alarcon, E., Cano, J. J. Dominguez, J.,