

بررسی سه بعدی اثر لایه‌بندی دره‌های رسوبی روی بزرگنمایی امواج زلزله

محمد رحیمیانⁱ؛ بابک امیدوارⁱⁱ؛ اسد... نورزادⁱⁱⁱ؛ تکتم محمدنژاد^{iv}

چکیده

اندر کنش سه بعدی امواج مسطح هارمونیک SH، SV و P با دره‌های رسوبی با استفاده از روش المان مرزی¹ در فضای فرکانسی بررسی شده است. در این مقاله نشان داده شده است که به منظور رسیدن به پاسخ‌های واقعی، مسأله می‌بایست در حالت سه بعدی مدلسازی و بررسی شود. همچنین برای پیش‌بینی دقیق حرکات زمین در ناهمگونی‌های توپوگرافی، کلیه پارامترهای مؤثر نظیر شکل لایه‌ها، خصوصیات مادی و هندسی آنها، فرکانس تحریک، نوع موج ورودی و آزیموت و زاویه برخورد آن، اثرات انعکاس و انکسار امواج بایستی توأمأ در نظر گرفته شود. صحت و کارایی فرمول‌بندی‌های ارائه شده برای محاسبه بزرگنمایی دامنه حرکات زمین با حل و بررسی مثال‌هایی اثبات می‌شود.

کلمات کلیدی

روش المان مرزی، انتشار امواج، دره‌های رسوبی، خصوصیات ساختگاه²

Three-Dimensional Study of Alluvial Valleys Effects on Amplification of Seismic Waves

M. Rahimian; B. Omidvar; A. Noorzad; T. Mohammadnejad

ABSTRACT

In this paper, three-dimensional scattering of plane harmonic SH, SV and P waves by alluvial valleys is investigated by using a boundary element method in frequency domain. It is shown that in order to achieve real responses, problem must be analyzed and modeled three-dimensionally. Also, for exact evaluation of surface ground motions in alluvial valleys all key parameters such as layering shape, material and geometrical characteristics, wave type, angle and azimuth of incidence, reflection and refraction effects must be taken in to account altogether.

The accuracy and efficiency of the proposed formulations for the computation of surface displacement field amplification are demonstrated by solving a number of problems.

KEYWORDS

Boundary Element Method, Wave Propagation, Alluvial Valleys, Site Effects.

۱- مقدمه

محققان را به سوی مطالعه و بررسی اثر خصوصیات

ساختگاه روی پاسخ دینامیکی محل کشاننده است. لکن به دلیل پیچیدگی‌های موجود، مطالعات کمی به محیط‌های سه بعدی

در سال‌های اخیر، اهمیت خصوصیات ساختگاه روی بزرگنمایی محلی حرکات زمین به خوبی معلوم شده و این امر

ⁱ دانشجویار دانشکده فنی، دانشگاه تهران: rahimian@ut.ac.ir

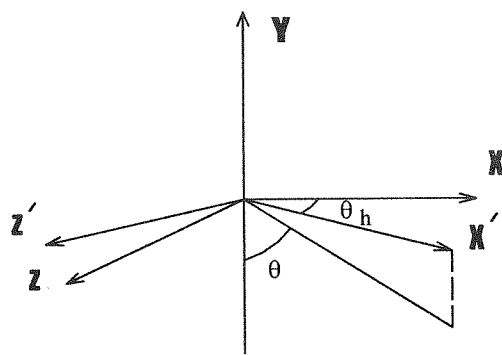
ⁱⁱ استادیار دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران: bomidvar@ut.ac.ir

ⁱⁱⁱ استادیار دانشکده فنی، دانشگاه تهران: noorzad@ut.ac.ir

^{iv} کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده فنی، دانشگاه تهران: toktammd@yahoo.com



مرزی مسأله برحسب مقادیر مرزی فرمول‌بندی می‌شود. مزیت اصلی روش به کار گرفته شده در این مقاله به خصوص در مقایسه با روش‌های اجزای محدود^۱ و تفاوت‌های محدود این است که المان‌بندی فقط در مرز حوزه صورت می‌گیرد و بدین ترتیب حجم مدل و تعداد متغیرهای مجهول به شدت کاهش می‌یابد. همچنین در این روش شرط تشعشع در بی‌نهایت به طور کامل ارضا می‌شود. فرمول‌بندی به کار گرفته شده در حوزه فرکانس این مزیت را بر حوزه زمان دارد که پارامترهای وابسته به فرکانس، نظیر فرکانس غالب و نحوه رفتار حوزه در برابر آن سریع‌تر قابل دستیابی است. از طرفی، از آنجایی که در حوزه زمان تقریب هم در زمان و هم در مکان وارد می‌شود، المان‌بندی حوزه برای رسیدن به دقت یکسان باید ریزتر باشد، حال آنکه در حوزه فرکانس در شرایط یکسان می‌توان از شبکه المان‌های با طول بزرگ‌تر استفاده کرد. همچنین زمان اجرای برنامه در حوزه فرکانس بسیار کمتر است. از طرفی، با توجه به اینکه تحریک، موج هارمونیک با فرکانس ω است، پاسخ نیز در دامنه فرکانس ارائه می‌شود و دیگر به استفاده از تبدیل معکوس فوریه^۲ نیازی نیست.



شکل (۱): موقعیت صفحه انتشار موج $x' - y' (y' = y)$ نسبت به دستگاه مختصات مرجع $x - y - z$

۲- انتشار امواج مسطح هارمونیک در محیط نیم بی‌نهایت

دستگاه مختصات مرجع x, y, z را در نظر می‌گیریم. در حالت کلی که نرمال بر جبهه موج؛ یعنی راستای انتشار موج در صفحه $(y = y')$ واقع است (شکل ۱) که صفحه $x' - z'$ نسبت به صفحه اصلی $x - z$ تشکیل زاویه θ_h می‌دهد (θ_h آزیموت یا زاویه برخورد موج در صفحه افق است)، با استفاده از ماتریس تبدیل زیر جابه‌جایی‌ها را در دستگاه مختصات کلی خواهیم داشت:

لایه‌ای اختصاص داده شده است. روش‌های استفاده شده بیشتر روش بسط توابع موج^۳، روش تفاوت‌های محدود^۴ و روش المان مرزی غیرمستقیم^۵ بوده است. سانچز-سسما [۱] به روش بسط چند نقطه‌ای توابع موج، پدیده تفرق را از دره‌های آبرفتی متقارن محوری تحت اثر امواج قائم P بررسی کرد. لی [۲] این روش را برای حل تفرق امواج از یک دره رسوبی نیم کره تحت اثر امواج P و S به کار برد. سانچز-سسما و همکارانش [۳] با استفاده از این روش پاسخ یک نهشته آبرفتی با تقارن محوری تحت برخورد امواج SH را بررسی کردند. آنها همچنین [۴] نتایج بررسی پلاریزاسیون امواج از یک نهشته استوانه‌ای شکل را ارائه دادند. ویدال و فرانکل [۵] روش تفاوت‌های محدود را برای مطالعه دره سنتاکلارا واقع در سان جوز کالیفرنیا به کار گرفتند. فرانکل [۶] همین روش را برای مطالعه دره سان برناردینو به کار برد. او در طی این مطالعه نشان داد که رکوردهای مصنوعی به دست آمده از مدلسازی سه بعدی با مدل‌های یک بعدی و دو بعدی بسیار متفاوت است. اجن و یوموجیدا [۷] روش تفاوت‌های محدود را برای بررسی حوضچه لس‌آنجلس به کار گرفتند. گریوس [۸] همین روش را برای مطالعه گسل مارینا در سان فرانسیسکو به کار برد. نتایج نشان می‌دهد که بازتاب لرزه‌ای در منطقه مارینا، شدیداً تحت تأثیر هندسه و ساختار دره‌ای؛ که منطقه را در برگرفته است، قرار دارد و بزرگنمایی‌های قابل توجه به دلیل اثرات تمرکز است. ترکیب روش المان مرزی و اجزای محدود [۹]، [۱۰] نیز برای مطالعه رفتار نهشته‌های آبرفتی در دره‌های استوانه‌ای شکل تحت اثر امواج جمی به کار گرفته شده است. لوزان و سانچز-سسما [۱۱]، [۱۲] روش المان مرزی غیرمستقیم را برای مطالعه دره‌ها و توپوگرافی‌های با شکل غیرمنظم به کار بردند. رینوسو [۱۳]، [۱۴] با استفاده از روش المان مرزی پاسخ توپوگرافی‌های سطحی و یک دره رسوبی نیم کره تحت اثر امواج P و S را بررسی کرد. سانچز-سسما و همکارانش [۱۵]، [۱۶] این روش را برای مطالعه تفرق دو بعدی امواج از نهشته‌های آبرفتی به کار بردند. از مطالعات صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که اثرات تفرق سه بعدی امواج از سطح روی بزرگنمایی‌های مشاهده شده در اثر زلزله قابل توجه است.

در مطالعه حاضر، تحلیل حساسیت به صورت پارامتریک با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مؤثر نظیر شکل لایه‌بندی، ضخامت، جنس خاک و خصوصیات مادی و هندسی هر لایه، فرکانس تحریک، نوع موج ورودی و آزیموت و زاویه برخورد آن برای دره‌های رسوبی سه بعدی با استفاده از روش المان مرزی در فضای فرکانسی صورت گرفته است. در روش المان

$$\begin{aligned}\varphi_I &= A_o \exp\{-ik_1(x' \sin \theta_1 + y' \cos \theta_1)\} \\ \varphi_R &= A_1 \exp\{-ik_1(x' \sin \theta_1 - y' \cos \theta_1)\} \\ \psi_R &= B_1 \exp\{-ik_2(x' \sin \theta_2 - y' \cos \theta_2)\}\end{aligned}\quad (5)$$

که در آن θ_1 زاویه برخورد موج P و A_o دامنه موج برخوردی است. نسبت دامنه امواج انعکاسی به موج برخوردی P طبق روابط زیر است:

$$\begin{aligned}\frac{B_1}{A_o} &= \frac{-2k \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_2}{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 + k^2 \cos^2 2\theta_2} \\ \frac{A_1}{A_o} &= \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 - k^2 \cos^2 2\theta_2}{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 + k^2 \cos^2 2\theta_2}\end{aligned}\quad (6)$$

زاویه موج انعکاس یافته SV نسبت به محور y برابر $\theta_2 = \sin^{-1}(k^{-1} \sin \theta_1)$ و ثابت مصالح مساوی $k = c_1/c_2 = \{2(1-\nu)/(1-2\nu)\}^{1/2}$ است.

میدان جابه‌جایی ناشی از موج P برخوردی طبق رابطه زیر است:

$$\mathbf{u}_o = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{Bmatrix} = \mathbf{T} \begin{Bmatrix} \sin \theta_1 (-\varphi_I - \varphi_R) + \cos \theta_2 \psi_R \\ \cos \theta_1 (-\varphi_I + \varphi_R) + \sin \theta_2 \psi_R \\ 0 \end{Bmatrix} \times ik_1$$

۲-۳- موج SV برخوردی

از ترکیب ψ_I ناشی از موج SV برخوردی و φ_R و ψ_R ناشی از امواج SV و P انعکاسی (شکل ۲c)، میدان جابه‌جایی آزاد در هر نقطه از محیط نیم بی‌نهایت به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\varphi_R &= A_1 \exp\{-ik_1(x' \sin \theta_1 - y' \cos \theta_1)\} \\ \psi_R &= B_1 \exp\{-ik_2(x' \sin \theta_2 - y' \cos \theta_2)\} \\ \psi_I &= B_o \exp\{-ik_2(x' \sin \theta_2 + y' \cos \theta_2)\}\end{aligned}\quad (8)$$

در روابط فوق، θ_2 زاویه برخورد موج SV، B_o دامنه موج برخوردی، $k_1 = \omega/c_1$ عدد موج طولی و c_1 سرعت انتشار امواج طولی است. نسبت دامنه امواج انعکاسی به موج برخوردی SV طبق روابط زیر است:

$$\begin{aligned}\frac{B_1}{B_o} &= \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 - k^2 \cos^2 2\theta_2}{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 + k^2 \cos^2 2\theta_2} \\ \frac{A_1}{B_o} &= \frac{k \sin 4\theta_2}{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 + k^2 \cos^2 2\theta_2}\end{aligned}\quad (9)$$

زاویه موج انعکاس یافته P نسبت به محور y برابر $\theta_1 = \sin^{-1}(k \sin \theta_2)$ است.

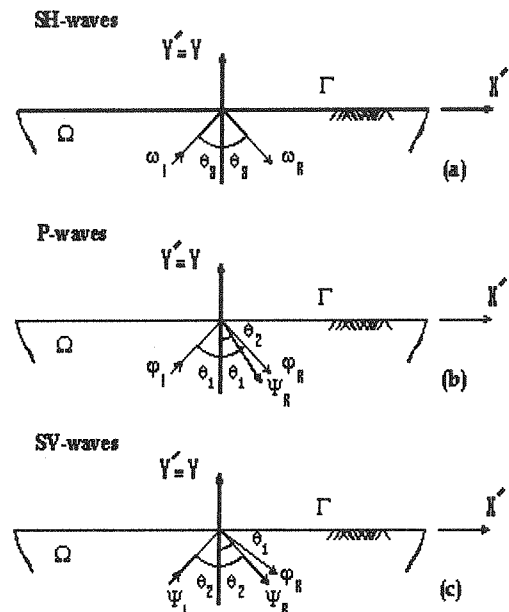
میدان جابه‌جایی ناشی از موج SV برخوردی به صورت زیر است:

$$(10)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_h & 0 & -\sin \theta_h \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_h & 0 & \cos \theta_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ \omega' \end{Bmatrix} = \mathbf{T} \begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ \omega' \end{Bmatrix}\quad (1)$$

همچنین روابط زیر نیز برقرار خواهند بود:

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \theta_h + z \sin \theta_h \\ y' &= y\end{aligned}\quad (2)$$



شکل (۲): امواج برخوردی و انعکاسی در محیط نیم‌بی‌نهایت

۲-۱- موج SH برخوردی

میدان تغییر مکان کلی در هر نقطه از محیط نیم بی‌نهایت از ترکیب ω_I ناشی از موج SH برخوردی و ω_R ناشی از موج SH انعکاسی به دست می‌آید (شکل ۲a):

$$\begin{aligned}\omega_I &= C_o \exp\{-ik_2(x' \sin \theta_3 + y' \cos \theta_3)\} \\ \omega_R &= C_o \exp\{-ik_2(x' \sin \theta_3 - y' \cos \theta_3)\}\end{aligned}\quad (3)$$

در روابط فوق θ_3 زاویه برخورد موج SH نسبت به محور y ، C_o دامنه موج برخوردی، $k_2 = \omega/c_2$ عدد موج برشی و c_2 سرعت انتشار امواج برشی است.

میدان جابه‌جایی ناشی از موج SH برخوردی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\mathbf{u}_o = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{Bmatrix} = \mathbf{T} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_I + \omega_R \end{Bmatrix}\quad (4)$$

۲-۲- موج P برخوردی

از ترکیب φ_I ناشی از موج P برخوردی و φ_R و ψ_R ناشی از امواج P و SV انعکاسی (شکل ۲b)، حل کلی در هر نقطه از محیط نیم بی‌نهایت به دست می‌آید:

در این روابط n_i ها مولفه‌های بردار یکه نرمال بر مرز به سمت بیرون و u, v, ω و مؤلفه‌های جابه‌جایی حاصل از امواج برخوردی و انعکاسی از سطح آزاد هستند $u_0(u, v, \omega)$ که مقدار آن در هر نقطه از محیط با استفاده از روابط (۴) و (۷) و (۱۰) برای امواج هارمونیکی مختلف قابل محاسبه است.

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

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

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

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

H_h و G_h ماتریس‌های تأثیری هستند که به ترتیب از انتگرال‌گیری هسته‌های جابه‌جایی و بردار تنش روی مرز محیط نیم بی‌نهایت حاصل می‌شوند. با مراجعه به شکل (۳) رابطه (۱۵) به فرم واضح‌تر زیر در می‌آید:

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

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

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

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

جابه‌جایی‌ها و بردارهای تنش کل مربوط به محیط بسته Ω_v ، با استفاده از روش المان مرزی از معادله ماتریسی زیر حاصل می‌شود:

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

با مراجعه به شکل (۳) این معادله به فرم واضح‌تر زیر در می‌آید:

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

با توجه به اینکه تنش کل $t_v^c = 0$ است رابطه فوق به صورت زیر در می‌آید:

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

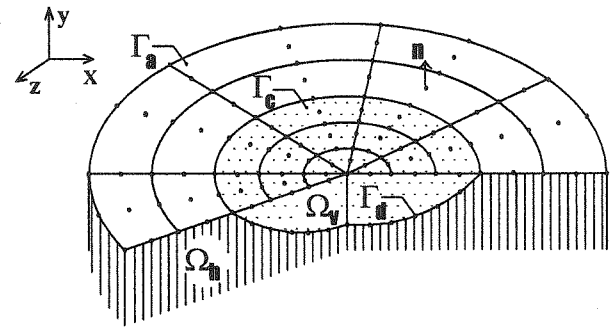
حال، دو معادله (۱۷) مربوط به محیط Ω_h و (۲۰) مربوط به محیط Ω_v می‌بایست سر هم شوند. معادلات سازگاری و تعادل بر روی مرز مشترک Γ_d به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} u_v^d &= u_h^d \\ t_v^d &= -t_h^d \end{aligned} \quad (21)$$

جابه‌جایی و بردار تنش کل بر روی مرز Γ_d از روابط

$$u_0 = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{Bmatrix} = \mathbf{T} \begin{Bmatrix} \cos \theta_2 (-\psi_I + \psi_R) - \sin \theta_1 \varphi_R \\ \sin \theta_2 (\psi_I + \psi_R) + \cos \theta_1 \varphi_R \\ 0 \end{Bmatrix} \times ik_2$$

روابط فوق برای زوایای برخورد کوچکتر از زاویه بحرانی ($\theta_{cr} = \sin^{-1}(1/k)$) است.



شکل (۳): محیط نیم بی‌نهایت سه بعدی Ω_h و ناحیه بسته Ω_v

۳- تفرق امواج از ناهمواری‌های سه بعدی

محیط نیم بی‌نهایت Ω_h و ناحیه بسته Ω_v را در نظر می‌گیریم (شکل ۳). میدان جابه‌جایی مربوط به محیط نیم بی‌نهایت u_h و میدان جابه‌جایی مربوط به محیط بسته u_v است. شرط مرزی تنش صفر بر روی سطح آزاد زمین اعمال می‌شود:

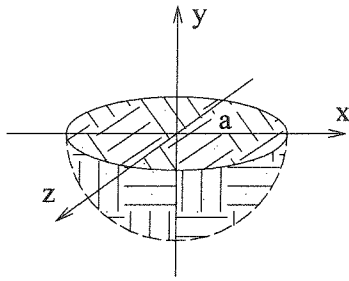
$$\begin{aligned} t_h &= 0 & \text{بر روی } \Gamma_a \\ t_v &= 0 & \text{بر روی } \Gamma_c \end{aligned} \quad (11)$$

در محیط نیم 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:

$$\begin{matrix} u_h & u_s & u_0 \\ t_h & t_s & t_0 \end{matrix} \quad (12)$$

بردار تنش حاصل از حرکت آزاد زمین در محیط نیم بی‌نهایت؛ یعنی t_0 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_0 = \begin{Bmatrix} [(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \omega}{\partial z}] n_x + \mu (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) n_y + \mu (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}) n_z \\ [(\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \omega}{\partial z}] n_y + \mu (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) n_x + \mu (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y}) n_z \\ [(\lambda + 2\mu) \frac{\partial \omega}{\partial z} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u}{\partial x}] n_z + \mu (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}) n_x + \mu (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y}) n_y \end{Bmatrix} \quad (13)$$



شکل (۴): دره رسوبی نیم کره به شعاع a

۴-۱- دره رسوبی نیم کره

نتایجی که سانچز- سسما [۱] و رینوسو [۱۴] برای اندرکنش سه بعدی دره رسوبی نیم کره (شکل ۴) تحت اثر برخورد قائم موج P، برای بررسی صحت روش ارائه کرده اند برای محیط های لایه ای در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج رینوسو [۱۴] با نتایج حاصل از فرمول بندی های ارائه شده برای فرکانس بی بعد $\eta_p = 0.5$ در شکل (۵) موجود است. فرکانس بی بعد η_p برابر نسبت قطر دره رسوبی به طول موج امواج طولی در محیط نیم بی نهایت است $(\eta_p = 2a/\lambda = \omega a/c_p\pi)$. فرکانس واقعی موج P برخوردی و شعاع دره رسوبی است. مشخصات مکانیکی محیط نیم بی نهایت به صورت $\mu_{hs} = \rho_{hs} = 1$ ، $\nu_{hs} = 0.25$ و مقادیر مربوط به دره رسوبی به صورت $\mu_v = 0.3$ ، $\rho_v = 0.6$ ، $\nu_v = 0.3$ می باشد، که چگالی، μ مدول برشی و ν ضریب پواسن محیط است. سرعت انتشار امواج برشی در محیط نیم بی نهایت برابر 1 و سرعت مربوط به امواج طولی برابر $\sqrt{3}$ است. نتایج مطالعات حاضر با خطوط پیوسته و نتایج رینوسو با دایر 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 نیم بی نهایت مشابه دره رسوبی فوق و مقادیر مربوط به دره رسوبی برابر $\mu_v = 0.2025$ ، $\rho_v = 1$ ، $\nu_v = 0.3$ است. مؤلفه های جابه جایی سطحی برای نقاط در راستای دو محور x و z برای دو فرکانس بی بعد 1، 0.5 $(\eta_s = \omega a/c_s\pi)$ در شکل (۶) موجود است. فرکانس بی بعد η_s برابر نسبت قطر دره رسوبی به طول موج امواج برشی در محیط نیم بی نهایت می باشد. نتایج سانچز- سسما [۲] با دایر توپر نشان داده شده است. تمامی فواصل نسبت به شعاع دره رسوبی بی بعد شده اند.

این روابط در معادله (۲۰) برای محیط Ω_v خواهیم داشت:

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

دستگاه معادلات حاصل از روابط (۱۷) و (۲۲) به صورت زیر است:

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

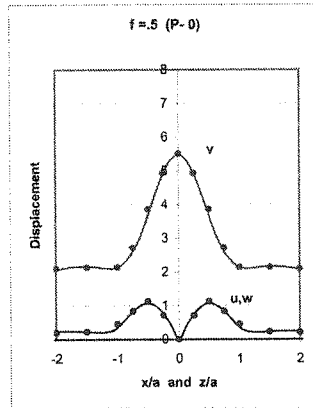
جابه جایی کل \mathbf{u}_v روی سطح آزاد محیط Ω_v مستقیماً از دستگاه معادلات فوق حاصل می شود، در حالی که جابه جایی ها و بردارهای تنش کل مربوط به محیط نیم بی نهایت Ω_h با استفاده از اصل جمع آثار قوا از معادلات (۱۲) به دست می آیند. با جایگزینی مقادیر تفرقی یافته برحسب مقادیر کل در رابطه (۲۳)، دستگاه معادلات با مجهولات جابه جایی و بردار تنش کل حاصل می شود:

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

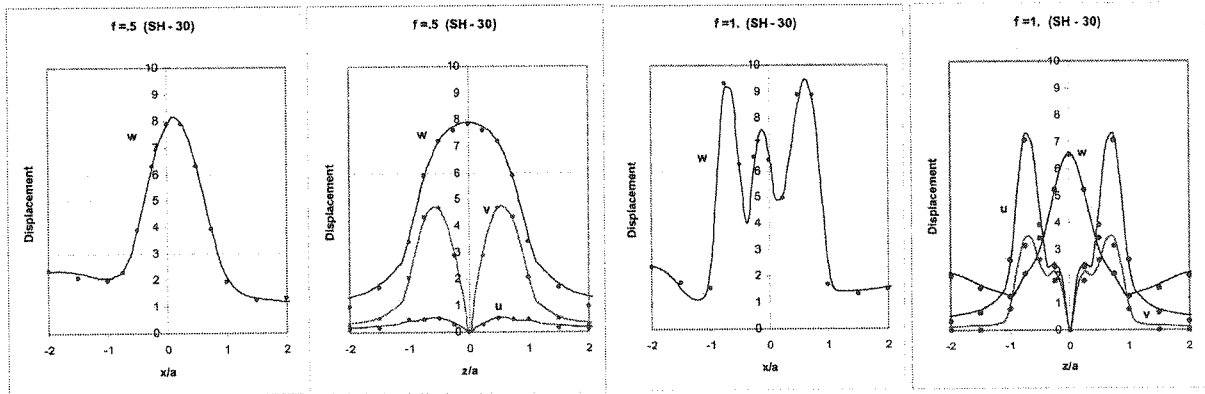
هر چند که در روابط فوق، فرمول بندی مربوط به محیط های دو لایه ارائه شد؛ ولی این روابط کلی بوده و برای محیط های چند لایه نیز قابل اعمال است.

۴-۲ ارزیابی روش با نتایج موجود در ادبیات

به منظور کنترل صحت فرمول بندی های ارائه شده و نرم افزار نوشته شده برای محاسبه بزرگنمایی دامنه حرکات زمین، مثال هایی بررسی می شود. نرم افزار تهیه شده به زبان فرترن براساس روش المان مرزی در فضای فرکانسی است. فرمول بندی روش المان مرزی به کار گرفته شده برای مسائل الاستودینامیک هارمونیک نسبت به زمان، همچنین چگونگی برآورد انتگرال های منفرد به تفصیل در [۱۷] ارائه شده است.



شکل (۵): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی نیم‌کره برای برخورد قائم موج P و فرکانس بی بعد $\eta_p = 5$



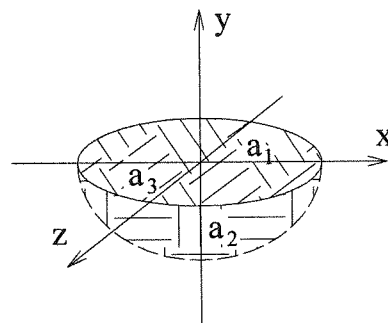
شکل (۶): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی نیم‌کره تحت اثر موج SH با زاویه برخورد 30° نسبت به محور قائم Y و آزیموت 0° (صفحه تابش xy) و دو فرکانس بی بعد $\eta_s = 1, 5$

۵-۱- دره رسوبی بیضی شکل

به منظور بررسی اثر شکل دره‌های رسوبی بر روی تفرق امواج، دو دره رسوبی بیضی مطالعه شدند. معادله بیضی به صورت $x^2/a_1^2 + y^2/a_2^2 + z^2/a_3^2 = 1$ ، $y < 0$ است که a_1, a_2, a_3 به ترتیب محورهای اصلی بیضی در راستای مختصات کارتزین x, y, z هستند (شکل ۷). در واقع a_1, a_2, a_3 به ترتیب نصف اقطار بیضی در راستای محورهای x, z و a_2 عمق دره رسوبی می‌باشد. نتایج برای دو دره رسوبی بیضی به صورت $a_1 \neq a_2 = a_3$ موجود است. تمامی فواصل نسبت به نصف قطر بیضی در راستای محور z ؛ یعنی a_3 بی بعد شده‌اند. علاوه بر فرکانس واقعی ω ، فرکانس بی بعد η_s به عنوان نسبت قطر دره رسوبی در صفحه تابش موج به طول موج برشی برخوردی در محیط نیم بی‌نهایت تعریف می‌شود. دره رسوبی اول به ابعاد $a_1 = 2, a_2 = a_3 = 1$ و دره رسوبی دوم به ابعاد $a_1 = 5, a_2 = a_3 = 1$ است. مشخصات مکانیکی محیط نیم بی‌نهایت به صورت $\rho_{hs}, \mu_{hs}, \nu_{hs} = 0.25$ و مقادیر مربوط به دره رسوبی

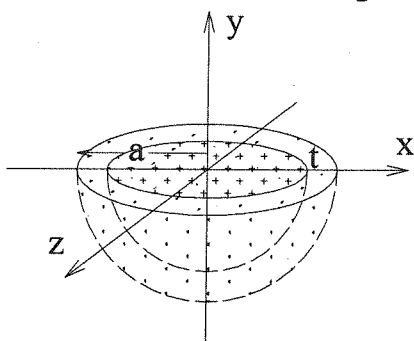
۵- تحلیل چند دره رسوبی

به منظور ارزیابی صحت فرمول‌بندی‌های ارائه شده و نرم‌افزار نوشته شده برای محاسبه بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی، نتایج به دست آمده با نتایج موجود در ادبیات مقایسه شد. همان طور که مشاهده شد مقایسه نتایج بسیار رضایت‌بخش است. در ادامه تعدادی مساله بررسی می‌شود.



شکل (۷): دره رسوبی بیضی

تمامی این دره‌های رسوبی یکسان در نظر گرفته شده است: $\mu_{hs} = 1/3$ ، $\rho_{hs} = 1$ و $v_{hs} = 0.25$. این دره‌های رسوبی تحت برخورد قائم امواج P، SH و SV با آزمون 0° قرار داده می‌شوند. مؤلفه‌های جابه‌جایی سطحی برای نقاط در راستای دو محور X و Z برای فرکانس بی بعد $\eta_p = 0.25$ (نسبت به a) و سه ضخامت $t = 1.2, 0.8, 0.4$ به ترتیب با نقطه‌چین، خط‌چین و خط پیوسته ترسیم شده است (اشکال ۱۱ و ۱۲). در حالت اول مشخصات مکانیکی مربوط به لایه رسوبی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که سرعت موج برشی در آن نسبت به محیط نیم بی‌نهایت بیشتر باشد ($\mu_v = \rho_v = 1$ و $v_v = 1/3$); سرعت موج برشی در محیط نیم بی‌نهایت 577 و مقدار آن در لایه رسوبی 1 می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه رسوبی بزرگنمایی‌ها کاهش می‌یابد. در حالت دوم، برعکس حالت قبل خصوصیات مصالح مربوط به لایه رسوبی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که سرعت موج برشی در آن نسبت به محیط نیم بی‌نهایت کمتر باشد ($\mu_v = 0.2025$ ، $\rho_v = 1$ و $v_v = 0.3$); سرعت موج برشی در لایه رسوبی برابر 45 است. برعکس حالت قبل، افزایش ضخامت لایه رسوبی باعث افزایش بزرگنمایی‌ها می‌شود. در واقع، با افزایش ضخامت لایه رسوبی، در صورتی که خاک این لایه نسبت به محیط نیم بی‌نهایت نرم‌تر باشد؛ یعنی سرعت موج برشی در آن کمتر باشد، بزرگنمایی‌ها هم افزایش می‌یابد و بالعکس، در صورتی که لایه رسوبی نسبت به محیط نیم بی‌نهایت از خاک سخت‌تری تشکیل یافته باشد، بزرگنمایی‌ها کاهش می‌یابد. در این رابطه هر چه تفاوت جنس لایه رسوبی و محیط نیم بی‌نهایت بیشتر باشد، تأثیر جنس خاک بر روی تشدید امواج زلزله نمایان‌تر می‌شود.

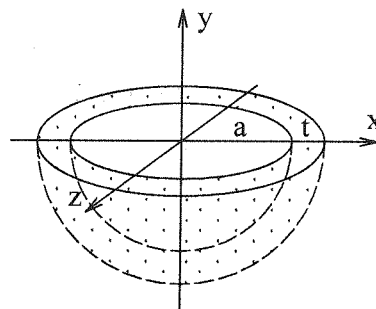


شکل (۱۳): دره رسوبی نیم‌کره با دو لایه رسوبی

۵-۳- دره رسوبی نیم‌کره با دو لایه رسوبی

مجدداً به منظور بررسی اثر لایه‌بندی سطحی، ضخامت و مشخصات ژئوتکنیکی آن بر روی پاسخ دینامیکی ساختگاه، دره‌های رسوبی دو لایه بررسی می‌شود. شعاع خارجی این دره‌های رسوبی $a = 1$ و ضخامت لایه رسوبی اول آنها t است

به صورت 2025، $\mu_v = 1$ ، $\rho_v = 1$ ، $v_v = 0.3$ است. به منظور مقایسه منطقی، خصوصیات مصالح محیط، فرکانس واقعی موج برخوردی و عمق و بعد محوری که در صفحه تابش موج قرار می‌گیرد برای هر دو این دره‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. هر دو این دره‌های رسوبی تحت اثر موج SH با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم Y قرار داده می‌شوند. صفحه تابش موج برخوردی صفحه YZ (زاویه برخورد 90° در صفحه افق) است. نتایج برای فرکانس بی بعد $\eta_s = 0.5$ (نسبت به محور a_3) برای دره رسوبی اول در شکل (۸) و برای دره رسوبی دوم در شکل (۹) موجود است. نمودارهای سمت چپ میدان جابه‌جایی سطحی در راستای محور X و نمودارهای سمت راست مقادیر در راستای محور Z را نشان می‌دهند. همان طور که انتظار می‌رود، میدان جابه‌جایی سطحی برای نقاط در راستای محور Z تنها یک مؤلفه در راستای محور X دارد؛ یعنی حرکت در صفحه موج SH برخوردی تنها در راستای عمود بر صفحه تابش موج صورت می‌گیرد و بدین ترتیب، یک حرکت خارج از صفحه‌ای را تشکیل می‌دهد. حال آنکه میدان جابه‌جایی برای نقاط در راستای عمود بر صفحه تابش موج (راستای محور X) به جز در حالت زاویه برخورد 0° نسبت به محور قائم؛ که تنها دو مؤلفه داخل صفحه‌ای حرکت دارد، دارای هر سه مؤلفه جابه‌جایی است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که برای دره رسوبی باریک‌تر در جهت خارج از صفحه‌ای میزان تشدید برای تمام مؤلفه‌های جابه‌جایی نسبت به دره رسوبی دیگر به طور قابل توجه کاهش یافته است.



شکل (۱۰): دره رسوبی نیم‌کره با یک لایه رسوبی

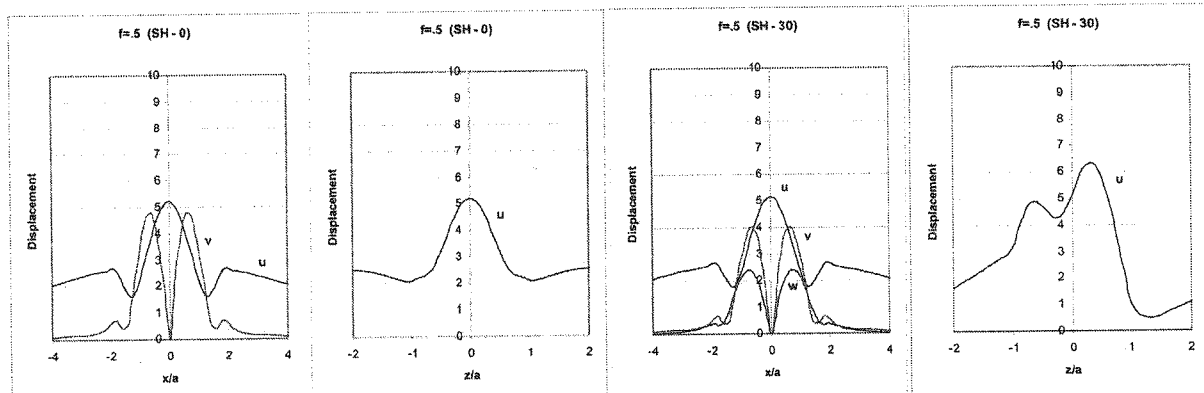
۵-۲- دره رسوبی نیم‌کره با یک لایه رسوبی

به منظور بررسی اثر لایه‌بندی، ضخامت و جنس خاک هر لایه بر روی پتانسیل تشدید آن منطقه، دره‌های رسوبی نیم کره با یک لایه رسوبی بررسی می‌شود. شعاع داخلی این دره‌های رسوبی $a = 1$ و ضخامت لایه رسوبی آنها t است (شکل ۱۰). بدین ترتیب، شعاع داخلی برای تمامی این دره‌های رسوبی ثابت است؛ ولی شعاع خارجی آنها با یکدیگر متفاوت و برابر $1+t$ می‌باشد. همچنین مشخصات مکانیکی محیط نیم بی‌نهایت برای

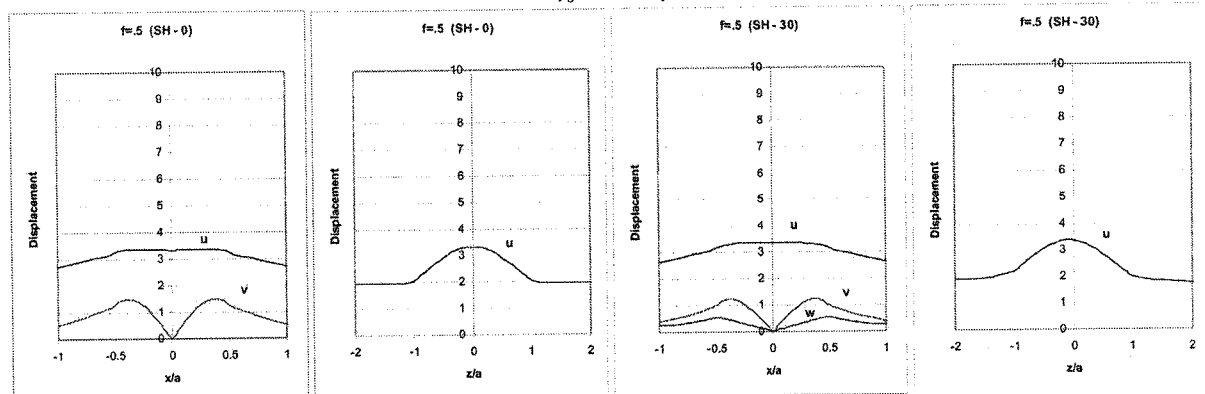
ضخامت لایه رسوبی اول بزرگنمایی‌های بزرگتری مشاهده می‌شود. در واقع، مقایسه و بررسی این نمودارها آشکار می‌کند که هرچه ضخامت لایه رسوبی اول بیشتر می‌شود، در صورتی که این لایه از خاک نرم‌تری نسبت به لایه رسوبی دوم تشکیل یافته باشد؛ یعنی سرعت موج برشی در آن کمتر باشد، بزرگنمایی‌ها هم بیشتر می‌شود و بالعکس، در صورتی که خاک این لایه نسبت به لایه رسوبی دوم سخت‌تر باشد، بزرگنمایی‌ها کمتر می‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سرعت برشی بیشتر به معنای سخت‌تر بودن لایه و قابل اطمینان‌تر بودن آن است.

در صورتی که این دره‌های رسوبی تحت برخورد قائم موج SV در صفحه تابش yz (آزیموت 90°) قرار داده شوند، نتایجی که برای نقاط در راستای دو محور X و Z به دست می‌آید به ترتیب مشابه نتایجی است که در حالت برخورد قائم موج SH برای نقاط در راستای دو محور X و Z به دست آمد.

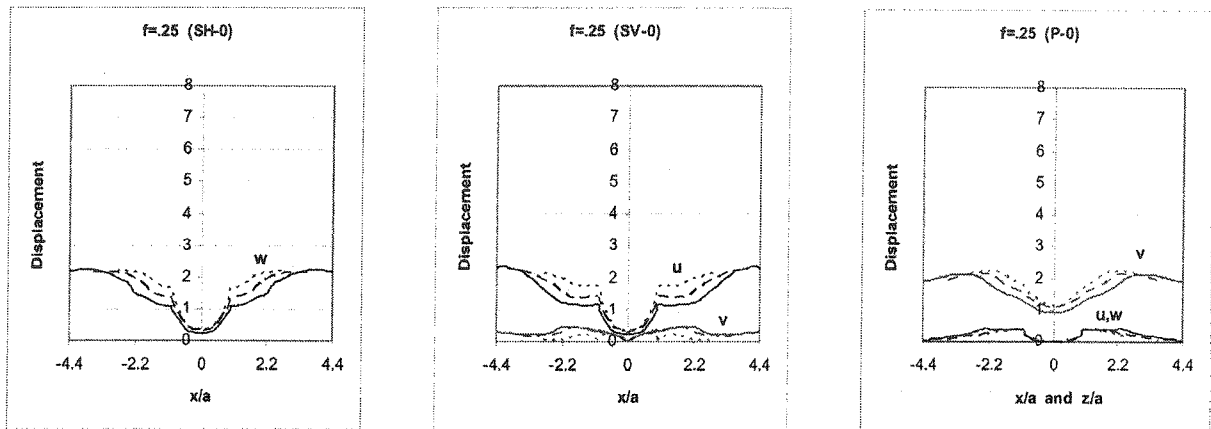
(شکل ۱۲). مشخصات مکانیکی محیط نیم بی‌نهایت برای تمامی این دره‌های رسوبی یکسان می‌باشد: $\mu_{hs} = \rho_{hs} = 1$ و $v_{hs} = .25$. پاسخ این دره‌های رسوبی تحت اثر امواج P و SH با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم y و آزیموت 0° برای فرکانس بی‌بعد $\eta_s = .5$ (نسبت به a) و سه ضخامت $t = 0, 2, 4$ در اشکال (۱۴) تا (۱۷) موجود است. نتایج برای $t = 0$ با خط پیوسته، برای $t = 2$ با خط چین و برای $t = 4$ با نقطه‌چین ترسیم شده است. در حالت اول، مشخصات مکانیکی لایه رسوبی اول $\mu_{v1} = \nu_{v1} = .3$ و $\rho_{v1} = .6$ و مقادیر مربوط به لایه رسوبی دوم $\mu_{v2} = .2025$ ، $\rho_{v2} = 1$ ، $\nu_{v2} = .3$ در نظر گرفته شد که سرعت موج برشی در لایه رسوبی اول (707). بزرگتر از مقدار آن در لایه رسوبی دوم (45) می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه رسوبی اول بزرگنمایی‌ها کاهش می‌یابد. در حالت دوم، جنس خاک لایه رسوبی اول با لایه رسوبی دوم عوض می‌شود. برعکس حالت قبل، با افزایش



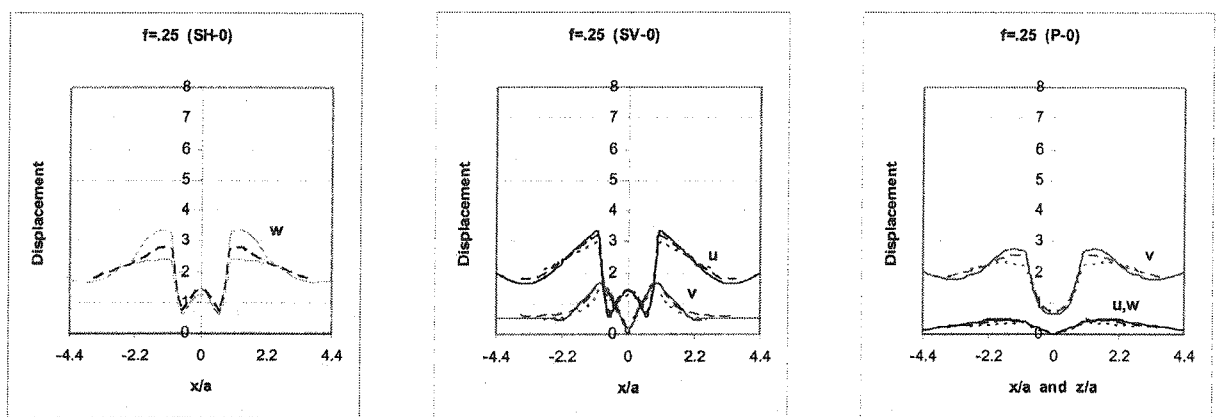
شکل (۸): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی بیضوی به ابعاد $a_1 = 2, a_2 = a_3 = 1$ تحت اثر موج SH با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم y و آزیموت 90° (صفحه تابش yz) و فرکانس بی بعد $\eta_s = .5$



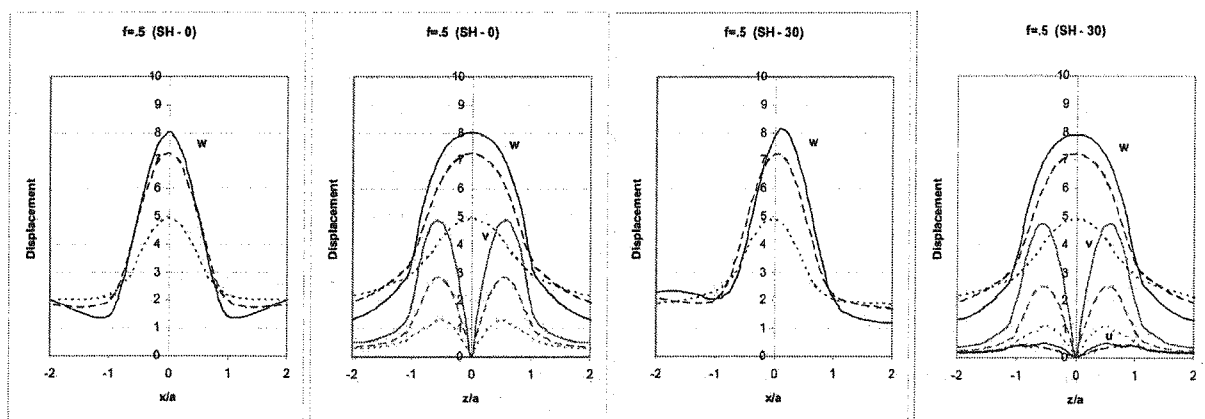
شکل (۹): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی بیضوی به ابعاد $a_1 = .5, a_2 = a_3 = 1$ تحت اثر موج SH با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم y و آزیموت 90° (صفحه تابش yz) و فرکانس بی بعد $\eta_s = .5$



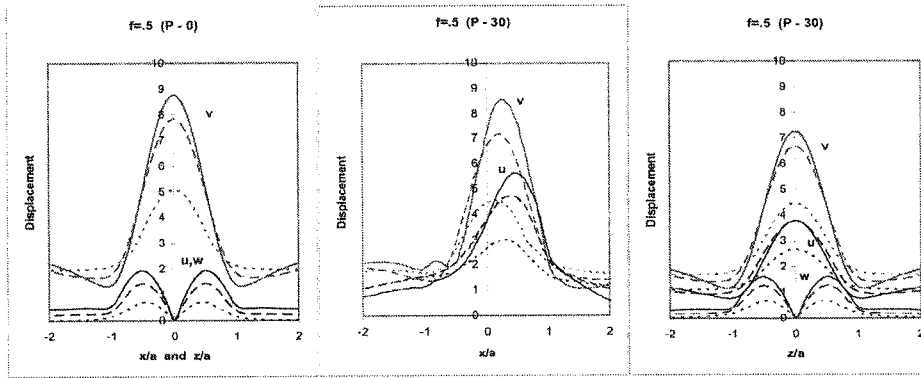
شکل (۱۱): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی یک لایه تحت برخورد قائم امواج SH، SV، P و فرکانس بی بعد $\eta_p = .25$ برای سه ضخامت $t = .4, .8, 1.2$ ، نتایج برای $t = .4$ با نقطه چین، برای $t = .8$ با خط چین و برای $t = 1.2$ با خط پیوسته ترسیم شده است. $(\nu_v = 1/3, \mu_v = \rho_v = 1)$



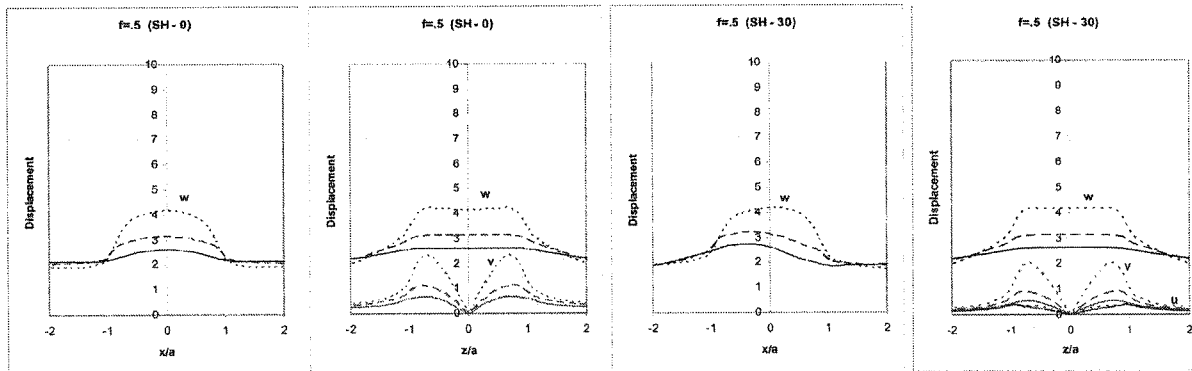
شکل (۱۲): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی یک لایه تحت برخورد قائم امواج SH، SV، P و فرکانس بی بعد $\eta_p = .25$ برای سه ضخامت $t = .4, .8, 1.2$ ، نتایج برای $t = .4$ با نقطه چین، برای $t = .8$ با خط چین و برای $t = 1.2$ با خط پیوسته ترسیم شده است. $(\nu_v = .3, \rho_v = 1, \mu_v = .2025)$



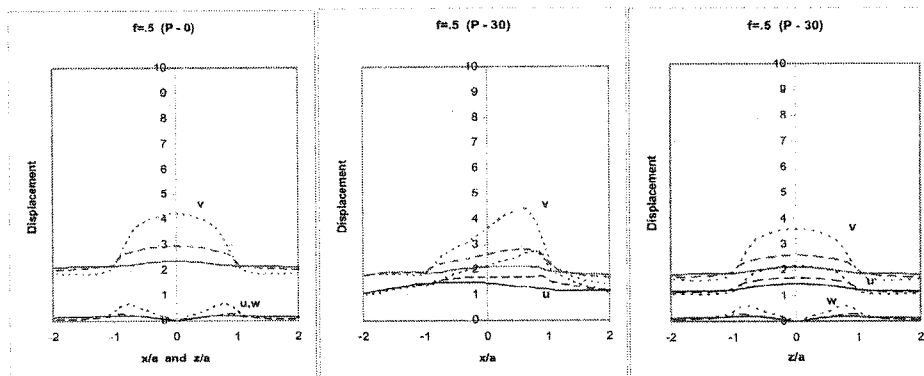
شکل (۱۴): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی دو لایه تحت اثر امواج SH با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم y و آزیموت 0° (صفحه تابش xy) و فرکانس بی بعد $\eta_s = .5$ ، $\mu_{v_1} = \nu_{v_1} = .3$ ، $\rho_{v_1} = .6$ و $\nu_{v_2} = .3$ ، $\rho_{v_2} = 1.0$ ، $\mu_{v_2} = .2025$ ، نتایج برای سه ضخامت $t = 0, .2, .4$ به ترتیب با خط پیوسته، خط چین و نقطه چین ترسیم شده است.



شکل (۱۵): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی دو لایه تحت اثر امواج P با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم y و آزیموت 0° (صفحه تابش xy) و فرکانس بی بعد $\eta_s = 0.5$ ($\mu_{v_1} = \nu_{v_1} = 0.3$, $\rho_{v_1} = 0.6$, $\nu_{v_2} = 0.3$, $\mu_{v_2} = 0.2025$). نتایج برای سه ضخامت $t = 0, 2, 4$ به ترتیب با خط پیوسته، خط چین و نقطه چین ترسیم شده است.



شکل (۱۶): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی دو لایه تحت اثر امواج SH با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم y و آزیموت 0° (صفحه تابش xy) و فرکانس بی بعد $\eta_s = 0.5$ ($\mu_{v_1} = 0.2025$, $\rho_{v_1} = 1.0$, $\nu_{v_1} = 0.3$, $\mu_{v_2} = \nu_{v_2} = 0.3$, $\rho_{v_2} = 0.6$). نتایج برای سه ضخامت $t = 0, 2, 4$ به ترتیب با خط پیوسته، خط چین و نقطه چین ترسیم شده است.



شکل (۱۷): بزرگنمایی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سطحی دره رسوبی دو لایه تحت اثر امواج P با زوایای برخورد $0^\circ, 30^\circ$ نسبت به محور قائم y و آزیموت 0° (صفحه تابش xy) و فرکانس بی بعد $\eta_s = 0.5$ ($\mu_{v_1} = 0.2025$, $\rho_{v_1} = 1.0$, $\nu_{v_1} = 0.3$, $\mu_{v_2} = \nu_{v_2} = 0.3$, $\rho_{v_2} = 0.6$). نتایج برای سه ضخامت $t = 0, 2, 4$ به ترتیب با خط پیوسته، خط چین و نقطه چین ترسیم شده است.

۶- نتیجه گیری

الاستودینامیک برای تفرق سه بعدی امواج استفاده شد.

آنالیزهای لازم برای بررسی اثر خصوصیات ساختگاه بر روی دامنه حرکات زمین به وسیله نرم‌افزار نوشته شده به روش المان مرزی در فضای فرکانسی انجام شد. همچنین بررسی

پاسخ دره‌های رسوبی سه بعدی تحت اثر امواج مسطح هارمونیک SH، SV، P برای آزیموت و زوایای برخورد مختلف بررسی شد. بدین منظور از فرمول‌بندی‌های

برای تشدید دامنه حرکات زمین دارند، در حالی که خاک‌های سخت به هنگام زلزله مطمئن‌تر عمل می‌کنند. همچنین تغییر ضخامت لایه‌های رسوبی و تغییر سرعت موج در آنها به دلیل تغییر خصوصیات لایه‌ها باعث می‌شود که بازتاب به زاویه ورودی امواج وابسته شود. در این مطالعه، نتیجه‌گیری شد که به منظور بررسی دقیق اثر خصوصیات ساختگاه بر روی حرکات زمین و پیش‌بینی دقیق پاسخ دینامیکی آن می‌بایست از آنالیز سه بعدی استفاده شود، همچنین علاوه بر شکل دره‌های رسوبی، ضخامت و جنس خاک هر لایه، نوع موج ورودی و آزمون و زاویه برخورد آن نیز می‌بایست در نظر گرفته شوند.

مقایسه‌ای به منظور اثبات صحت فرمول‌بندی‌های ارائه شده و نرم‌افزار نوشته شده انجام گرفت. از بررسی پاسخ این دره‌های رسوبی، اهمیت تفرق سه بعدی امواج آشکار می‌شود. همچنین نمودارها نمایانگر ضریب تشدید (بزرگنمایی) به صورت تابعی از مختصات ناهمواری هستند. از جنبه عددی مساله، نتایج نشان می‌دهند که به منظور رسیدن به همگرایی قابل قبول هر چه فرکانس بی‌بعد موج برخوردی یا زاویه برخورد موج نسبت به محور قائم بزرگ‌تر باشد، آن قسمت از سطح آزاد محیط نیم بی‌نهایت؛ که می‌بایست مدل‌سازی شود، نیز بزرگ‌تر خواهد بود. یک جنبه کاربردی این بررسی این است که خاک‌های نرم؛ که سرعت موج برشی در آنها کمتر است، پتانسیل بیشتری

۷- مراجع

- Reinoso E., Wrobel L., Power H., "Three-dimensional scattering of seismic waves from topographical structures", Int. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 16 41-61 1997. [۱۲]
 Reinoso, E., "Scattering of seismic waves: applications to the Mexico City valley", WIT Press: London, 2002. [۱۳]
 Sanchez-Sesma F. J., Alvarez-Rubio S., Benito J. J., Alarcon E., "The direct boundary element method: 2D site effects assessment on laterally varying layered media (methodology)", Int. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24 167-180, 2004. [۱۴]
 Sanchez-Sesma F. J., Alvarez-Rubio S., Benito J. J., Alarcon E., "The use of direct boundary element method for gaining insight into complex seismic site response", Journal of Computers and Structures, 83 821-835, 2005. [۱۵]
 رحیمیان، محمد؛ امیدوار، بابک؛ نورزاد، اسد...: [۱۶]
 محمدنژاد، تکتک؛ "بررسی سه بعدی اثر خصوصیات ساختگاه روی بزرگنمایی امواج زلزله"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، ۱۳۸۳. [۱۷]

- Sanchez-Sesma F. J., "Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities", Bull. Seism. Soc. Am., 73 1621-1636 1983. [۱]
 Lee V. W., "Three-dimensional diffraction of plane P, SV and SH waves by a hemispherical alluvial valley", Int. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3, 133-144, 1984. [۲]
 Sanchez-Sesma F. J., Perez-Rocha L. E., Chavez-Perez S., "Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities: part II", Bull. Seism. Soc. Am., 79, 101-112, 1989. [۳]
 Sanchez-Sesma F. J., Perez-Rocha L. E., Reinoso E., "Ground motion in Mexico City during the April-25 1989, Guerrero earthquake", Tectonophysics, 218, 127-140, 1993. [۴]
 Frankel A., Vidale J., "A three-dimensional simulation of seismic waves in the Santa Clara valley, California, from a Loma Prieta aftershock", Bull. Seism. Soc. Am., 82 2045-2074 1992. [۵]
 Frankel A., "Three-dimensional simulations of ground motions in the San Bernardino valley, California, for hypothetical earthquakes on the San Andreas fault", Bull. Seism. Soc. Am., 83 1325-1341, 1993. [۶]
 Yomogida K., Etegen J. T., "3-D wave propagation in the Los Angeles basin for the Whittier-Narrows earthquakes", Bull. Seism. Soc. Am., 83 1325-1341, 1993. [۷]
 Graves R., "Modeling 3D site response effects in the Marina District basin, San Francisco, California", Bull. Seism. Soc. Am., 83 1042-1063, 1993. [۸]
 Liu S. W., Datta S. K., Bouden M., Shah A. H., "Scattering of obliquely seismic waves by a cylindrical valley in a layered half-space", Int. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 20 859-870, 1991. [۹]
 Adam M., Pflanz G., Schmid G., "Two- and three-dimensional modeling of half-space and train-track embankment under dynamic loading", Int. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 19 559-573, 2000. [۱۰]
 Sanchez-Sesma F. J., Luzon F., "Seismic response of 3D alluvial valleys for incident P, S and Rayleigh waves", Bull. Seism. Soc. Am., 85 269-284, 1995. [۱۱]
 Luzon F., Sanchez-Sesma F. J., "Seismic response of 3D topographies", Proc. 7th Int. Conf. Soil Dyn. And Earth. Eng., Greece, 1995. [۱۲]

۸- زیر نویس‌ها

- ^۱ Boundary Element Method
^۲ Site Effects
^۳ Wave Function Expansion Technique
^۴ Finite Difference
^۵ Indirect Boundary Element Method
^۶ Finite Element
^۷ Inverse Fourier Transform