

## الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور ناهمگنی دایره‌ای زیرسطحی در برابر امواج مهاجم SH

در این مقاله، الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور ناهمگنی دایره‌ای زیرسطحی در برابر امواج مهاجم SH ارائه شده است. روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای مدل‌سازی این عارضه مورد استفاده قرار گرفته است. براساس روش مزبور، تنها لازم است وجه میانی ناهمگنی با فضای پیرامون، گسسته‌سازی شود. عدم گسسته‌سازی سطح صاف زمین و دوری از مرزهای حصارى دوردست در مدل، وجه تمایز مطالعه حاضر، با تحقیقات پیشین اجزای مرزی محسوب می‌شود. پس از عددی‌سازی این روش در یک الگوریتم رایانه‌ای، نتایج حاصل با برخی پاسخ‌های موجود در ادبیات فنی، صحت‌سنجی شده است. در نهایت، با در نظر گرفتن برخی پارامترهای کلیدی از قبیل زاویه موج مهاجم، عمق ناهمگنی، موقعیت افقی و نسبت امپدانس، به تحلیل حساسیت و حصول حداکثر بزرگ‌نمایی سطح زمین اقدام گردیده است. نتایج نشان می‌دهد پاسخ لرزه‌ای سطح زمین متأثر از کلیه پارامترهای مزبور می‌باشد. از نتایج این تحقیق می‌توان پیرامون موضوع ساخت محیط‌های امن، پدافند غیرعامل و همچنین در تکمیل و تدقیق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود بهره جست.

**واژگان کلیدی:** روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، حوزه زمان، ناهمگنی دایره‌ای، موج SH، پاسخ سطح زمین.

مه‌دی پن‌جی\*

استادیار، دانشکده فنی  
مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی  
واحد زنجان.  
پست الکترونیک:  
m.panji@iauz.ac.ir

فرشید یاسمی

دانشجوی کارشناسی ارشد  
ژئوتکنیک، دانشکده فنی  
مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی  
واحد زنجان.  
پست الکترونیک:  
farshid.yasemi@iauz.ac.ir

### ۱- مقدمه

ناهمگنی‌ها با توجه به برخورداری از مصالح متفاوت و امپدانس آن با محیط پیرامون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. از سوی دیگر، اهمیت اینگونه عوارض، پیرامون موضوع پدافند غیرعامل و ایزولاسیون لرزه‌ای سطح زمین از دیدگاه عملکرد سازه‌ای و اجرایی، بیشتر جلوه می‌کند. بنابراین، مدل‌سازی این ناهمگنی‌ها با استفاده از ابزار مناسب می‌تواند در شناسایی هرچه بهتر رفتار لرزه‌ای آن مؤثر باشد.

در ابتدا و پیش از ظهور دانش نرم‌افزاری، محققان با استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر فرآیندهای ریاضی به بررسی و مدل‌سازی ناهمگنی‌های زیرزمینی می‌پرداختند [۱]. براساس نوع هندسه ناهمگنی و شرایط مرزی حاکم بر مسأله، عموماً روش‌های مختلف تحلیلی

موضوع اهمیت حضور توپوگرافی و تأثیر شرایط هندسی ساختگاه در پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، شاید نزدیک به نیم قرن است که مورد توجه علاقه‌مندان و پژوهشگران این عرصه قرار گرفته است. گرچه عوارض توپوگرافی سطحی از قبیل دره و تپه می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه داشته باشد، ولیکن نبایستی اهمیت وجود توپوگرافی‌های زیرسطحی (همچون لایه‌بندی خاک، حفرات توخالی و ناهمگنی‌ها) را در این میان نادیده گرفت. از میان عوارض توپوگرافی زیرسطحی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۱۵، بازنگری ۱۳۹۶/۰۸/۰۱، پذیرش ۱۳۹۶/۰۸/۰۶.

(DOI): 10.22091/cer.2017.2258.1092 شناسه دیجیتال

چندگانه، در یک فضای سه‌بعدی، بررسی تفرق امواج الاستیک در حضور ناهمگنی به شکل دلخواه انجام شد [۸]. کنان و لوین<sup>۶</sup> و لی<sup>۷</sup> و همکاران، از جمله محققانی بودند که با استفاده از روش معادله انتگرال حجمی به تحلیل دینامیکی عوارض ناهمگنی ناهمسان چندلایه پرداختند [۹ و ۱۰].

اگرچه روش‌های عددی مزبور در برخی مطالعات به چشم می‌خورد، با این وجود، قابلیت و مزایای روش اجزای محدود (FEM<sup>۸</sup>) و اجزای مرزی (BEM<sup>۹</sup>)، اکثر محققان را همسو با این روش‌ها ساخته است. در مدل اجزای محدود برای مسایل ناهمگنی، لازم است کل محیط ناهمگنی و فضای پیرامون آن گسسته‌سازی شده و شرایط مرزی در مرزهای دور دست به صورت تقریبی، اقلان شود. همچنین پژوهشگران، توانستند با توسعه روش اجزای محدود به بررسی و تحلیل استاتیکی عوارض ناهمگنی زیرزمینی بپردازند [۱۱ و ۱۲]. پاروانوا<sup>۱۰</sup> و همکاران به کمک اجزای محدود دینامیکی، ناهمگنی‌ها در ابعاد نانو را مورد بررسی قرار دادند [۱۳].

از یک‌سو، مزایای انحصاری روش اجزای مرزی در تحلیل مسایل نامحدود و نیمه‌محدود و از سوی دیگر اقلان خودکار شرایط تشعشع امواج در بی‌کران محققان را علاقه‌مند به استفاده از این روش می‌نماید [۱۴]. چنانچه در تعیین فرمول‌بندی روش اجزای مرزی هیچ‌گونه شرایط مرزی لحاظ نشده باشد، اجزای مرزی محیط کامل، قابل حصول است [۱۵]. در استفاده از روش مزبور برای مدل‌سازی سازه‌های زیرزمینی و از آن جمله ناهمگنی‌های زیرسطحی، لازم است کلیه مرزهای مدل اعم از سطح صاف زمین و مرزهای حصار دور دست مش‌بندی شوند. محققان مختلف از این روش برای تحلیل عوارض زیرسطحی و ناهمگنی‌ها به صورت استاتیکی [۱۶ و ۱۷] و

مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیمونز<sup>۱</sup> توانست یک ناهمگنی نازک و نامحدود را توسط روش بسط مجانب همخوان تحت امواج هارمونیک برون صفحه‌ی SH<sup>۲</sup> بررسی نماید [۲]. محققین توانستند با استفاده از تئوری پراکنش چندگانه، به بررسی انتشار و میرایی امواج الاستیک در یک محیط دو فازه ناهمگن بپردازند [۳]. تفرق امواج ناشی از ناهمگنی استوانه‌ای سخت با استفاده از ترکیب معادله انتگرال منفرد و بسط تابع موج توسط پژوهشگران مورد کنکاش قرار گرفت [۴]. یک ناهمگنی مسطح مستقر در محیط نیم‌صفحه الاستیک، تحت بار هارمونیک سطحی توسط دیوم و اردوگان<sup>۳</sup> به کمک معادلات انتگرال مطالعه شده است [۵]. باناس<sup>۴</sup> و همکاران نیز توانستند پراکنش موج ناشی از ناهمگنی کروی در یک محیط بسته را با استفاده از بسط بردار ویژه ناویه بررسی نمایند [۶]. با توجه به دقت بالای پاسخ‌های تحلیلی، از نتایج این مطالعات غالباً در صحت‌سنجی دیگر روش‌های محاسباتی بهره‌برده می‌شود. اما عدم انعطاف‌پذیری و محدودیت کاربرد فرآیندهای ریاضیاتی برای هندسه‌های مختلف ناهمگنی به شکل دلخواه، موجب شده است محققان به سمت روش‌های عددی و تقریبی روی آورند.

هرچند در روش‌های عددی به کمک فرآیندهای گسسته‌سازی، تقریب در نتایج، قابل چشم‌پوشی نیست؛ با این حال، در استفاده از این روش‌ها مسایل واقعی با هندسه‌های پیچیده قابلیت مدل‌سازی خواهند داشت. در ادبیات فنی برای مدل‌سازی عوارض زیرسطحی از قبیل ناهمگنی‌ها روش‌های مختلف عددی ارائه شده است. مانوگیان و لی<sup>۵</sup> توانستند ناهمگنی زیرسطحی به شکل دلخواه را با استفاده از روش باقیمانده‌های وزن‌دار مدل‌سازی نمایند [۷]. در استفاده از روش چندقطبی

<sup>6</sup>- Kanaun and Levin,

<sup>7</sup>- Lee

<sup>8</sup>- Finite Element Method

<sup>9</sup>- Boundary Element Method

<sup>10</sup>- Parvanova

<sup>1</sup>- Simons

<sup>2</sup>- Shear Horizontal Wave

<sup>3</sup>- Doyum and Erdogan

<sup>4</sup>- Bagnas

<sup>5</sup>- Manoogian and Lee

در این مقاله، مؤلفان برآن شدند تا با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه زمان به ارائه الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین شامل ناهمگنی دایره‌ای تحت امواج مهاجم SH بپردازند. ضمن ارائه فرمول‌بندی روش مزبور برای مدل‌سازی ناهمگنی و ارائه یک مثال صحت‌سنجی، با منظور داشتن پارامترهایی چون عمق ناهمگنی، زاویه موج مهاجم، موقعیت افقی و نسبت امپدانس، به حساسیت‌سنجی پاسخ سطح زمین پرداخته شده است. در نهایت، با تعیین حداکثر بزرگ‌نمایی و ارائه برخی گراف‌ها و جداول، رفتار لرزه‌ای سطح زمین در حضور ناهمگنی دایره‌ای از جنبه کاربردی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. از نتایج تحقیق حاضر، می‌توان در تکمیل و تدقیق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، پیرامون موضوع ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای سطح زمین بهره جست.

## ۲- روش تحقیق

معادله دیفرانسیل اسکالر موج و شرایط مرزی حاکم بر محیط نیم‌صفحه الاستیک خطی همگن و همسان به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۷]:

$$\frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} + b(x, y, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\mu \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{y=0} = 0 \quad (2)$$

با اعمال انتگرال باقی‌مانده‌های وزن‌دار به معادله (۱) و دوبار انتگرال‌گیری جزیه‌جزء از آن و با صرف‌نظر از شرایط اولیه و نیروهای حجمی، برای معادله انتگرال مرزی<sup>۱۱</sup> اصلاح شده در حوزه‌ی زمان، می‌توان رابطه (۳) را نوشت [۳۸-۴۰].

در معادله (۳)،  $u^*$  و  $q^*$  به ترتیب، حل‌های اساسی نیم‌صفحه تغییرمکان و تنش،  $u$  و  $q$  تغییرمکان و تنش مرزی،  $x$  و  $\xi$  به ترتیب نقطه گیرنده و منبع موج،  $c(\xi)$

دینامیکی در فضای فرکانس [۱۸-۲۳] استفاده نمودند. در نظر گرفتن شرایط مرزی تنش آزاد بر روی سطح زمین در فرمول‌بندی و تعیین روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، هرچند حجم روابط را دوچندان می‌کند، اما عدم گسسته‌سازی سطح صاف زمین، نه‌تنها مدل را ساده می‌نماید، بلکه دقت پاسخ‌ها را نیز افزایش می‌دهد. روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، در تحلیل الاستواستاتیک ناهمگنی‌ها و عوارض زیرسطحی توسعه داده شده است [۲۴ و ۲۵]. در فضای فرکانس نیز این روش برای مدل‌سازی و تحلیل لرزه‌ای ناهمگنی‌ها به کار گرفته شده است [۲۶]. همچنین در حوزه زمان، روش اجزای مرزی برای تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی سطحی و زیرسطحی در محیط کامل [۲۷ و ۲۸] و نیم‌صفحه [۲۹-۳۳] توسعه داده شده است؛ اما به‌ندرت برای مدل‌سازی ناهمگنی‌ها در محیط کامل و تحلیل لرزه‌ای آن استفاده می‌شود [۳۴-۳۶].

همان‌طور که ادبیات فنی نشان می‌دهد، هنوز الگوی مناسب لرزه‌ای برای پاسخ سطح زمین در حضور ناهمگنی‌های دایره‌ای زیرسطحی ارائه نشده است. بنابراین

در روابط (۱) و (۲)،  $u(x, y, t)$  و  $b(x, y, t)$  به ترتیب تغییرمکان و نیروهای حجمی خارج از صفحه در مختصات  $(x, y)$  و زمان حاضر  $t$ ،  $\mu$  مدول برشی و  $n$  بردار نرمال عمود بر سطح زمین است. برای تعیین حل‌های اساسی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان، لازم است معادلات فوق به‌طور هم‌زمان حل شوند. این حل‌ها به‌همراه فرآیند گام‌به‌گام حصول آن در مرجع [۲۹] ارائه شده است.

## ۲-۱- معادلات انتگرال مرزی (BIE)

<sup>11</sup>- Boundary Integral Equation

زاویه شکست مرزی،  $u^{ff}$  حرکت آزاد سطح زمین و  $\Gamma$  مرز جسم مورد نظر می‌باشد.

$$c(\xi).u(\xi, t) = \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t [u^*(x, t, \xi, \tau).q(x, \tau) - q^*(x, t, \xi, \tau).u(x, \tau)] d\tau \right\} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi, t) \quad (3)$$

با در نظر گرفتن تغییرات خطی زمان در حداصل هر گام و گسسته‌سازی این محور با  $N$  گام زمانی، برای معادله انتگرال فوق پس از انتگرال‌گیری زمانی، خواهیم داشت:

$$c(\xi)u^N(\xi) = \sum_{n=1}^N \int_{\Gamma} \left( \begin{aligned} & [U_1^{N-n+1}(x, \xi) + U_2^{N-n}(x, \xi)] q^n(x) - \\ & [Q_1^{N-n+1}(x, \xi) + Q_2^{N-n}(x, \xi)] u^n(x) \end{aligned} \right) d\Gamma(x) + u^{ff.N}(\xi) \quad (4)$$

در رابطه (۶)،  $\{X^N\}$  و  $\{Y^N\}$  به ترتیب، نشان‌دهنده بردارهای حاوی مقادیر مجهول و معلوم مرزی و  $\{R^N\}$  اثر تاریخچه‌ی دینامیکی در گره‌ی حاضر زمانی  $N$  می‌باشد.

### ۳- مدل‌سازی ناهمگنی

براساس روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه زمان، عارضه ناهمگنی زیرسطحی به دو ناحیه مطابق شکل ۱ تقسیم می‌شود. در این شکل، ناحیه شماره (۱) یک محیط نیم‌صفحه حفره‌دار و ناحیه شماره (۲) یک محیط بسته توپر را نشان می‌دهد.

#### ۳-۱- بخش (۱): محیط نیم‌صفحه حفره‌دار

این ناحیه یک محیط نیمه نامحدود حفره‌دار می‌باشد که تحت امواج لرزه‌ای قرار گرفته است. چنانچه کلیه گره‌های وجه مشترک حفره با محیط با زیرنویس (۱۲) مشخص شود برای معادله انتگرال مرزی گسسته شده درگام زمانی  $N=n$  می‌توان نوشت:

$$H_{12}^1 u_{12}^N = G_{12}^1 q_{12}^N + R_{12}^N + u_{12}^{ff.N} \quad (8)$$

به طوری که در آن:

$$R_{12}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{12}^{N-n+1} q_{12}^n - H_{12}^{N-n+1} u_{12}^n) \quad (9)$$

به طوری که  $U_1^{N-n+1} + U_2^{N-n}$  و  $Q_1^{N-n+1} + Q_2^{N-n}$  به ترتیب فرم فشرده‌شده‌ی هسته اسکالر نیم‌صفحه برای مؤلفه‌های تغییرمکان و تنش می‌باشند [۲۹]. همچنین در رابطه (۴)،  $u^N$  و  $u^{ff.N}$  به ترتیب تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین در گام زمانی  $N$ ،  $u^n$ ، به ترتیب بردارهای تغییرمکان و تنش گره‌های مرزی می‌باشند.

#### ۲-۲- گسسته‌سازی معادلات انتگرال مرزی

پس از گسسته‌سازی مرز هندسی جسم با المان سه گره‌ای درجه دو و انتگرال‌گیری عددی از معادله (۴) برای کلیه المان‌های مرزی، شکل ماتریسی زیر قابل استخراج است:

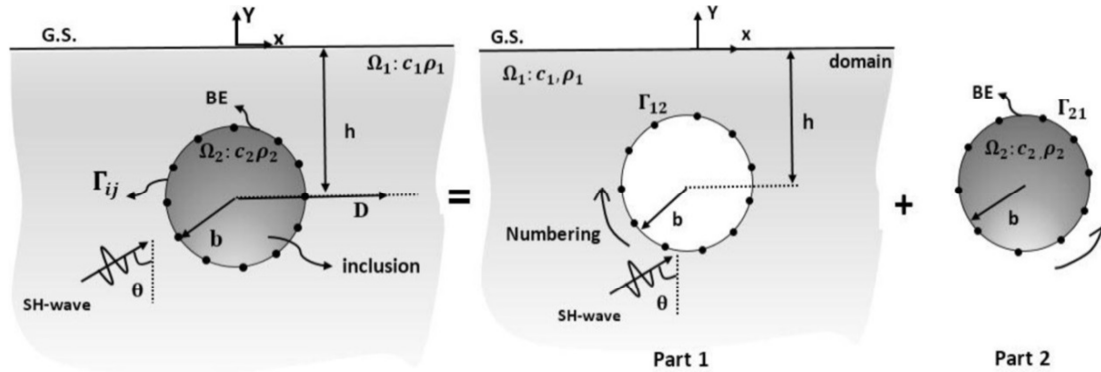
$$\sum_{n=1}^N H^{N-n+1} \{u^n\} = \sum_{n=1}^N G^{N-n+1} \{q^n\} + \{u^{ff.N}\} \quad (5)$$

در این رابطه،  $H^{N-n+1}$  و  $G^{N-n+1}$  ماتریس‌های مدل می‌باشند که عناصر آن از انتگرال‌گیری مکانی هسته‌های نیم‌صفحه حاصل شده‌اند. برای تعیین شکل قابل حل معادله (۵)، پس از اعمال شرایط مرزی حاکم بر مرز هندسی، می‌توان نوشت:

$$[A_1^1] \{X^N\} = [B_1^1] \{Y^N\} + \{R^N\} + \{u^{ff.N}\} \quad (6)$$

به طوری که:

$$\{R^N\} = \sum_{n=1}^{N-1} (G^{N-n+1} \{q^n\} - H^{N-n+1} \{u^n\}) \quad (7)$$



شکل ۱- مدل سازی ناهمگنی دایره‌ای با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان

$$u_{12}^N = u_{21}^N \quad (12)$$

$$\mu_1 q_{12}^N = -\mu_2 q_{21}^N \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $\mu_1$  و  $\mu_2$  به ترتیب مدول برشی محیط مشترک و (۲) می‌باشد. پس از اقصاء شرایط پیوستگی در وجه مشترک دو محیط برای شکل ماتریسی معادلات انتگرال سرهم شده می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} H_{12}^1 & \frac{-1}{\mu_1} G_{12}^1 \\ H_{21}^1 & \frac{-1}{\mu_2} G_{21}^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{12}^N \\ q_{12}^N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{12}^N \\ R_{21}^N \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_{12}^{ff.N} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

از حل معادله (۱۴)، کلیه مقادیر مجهول یعنی تغییرمکان‌ها و تنش‌ها در وجه میانی ناهمگنی با محیط پیرامون به دست می‌آید. در ادامه نیز برای تعیین تغییرمکان در سطح زمین می‌توان با استفاده از معادلات مربوط به محیط (۱) با فرض  $c(\xi) = 1$  استفاده نمود.

#### ۴- صحت سنجی

پس از عددی سازی فرمول بندی مشروح در توسعه نرم افزار DASBEM [۲۹] و جهت انجام صحت سنجی، یک ناهمگنی دایره‌ای در یک عمق مفروض در برابر امواج مهاجم SH تحلیل شده است. چنانچه در شکل (۱) مشاهده می‌شود در مدل سازی توسط اجزای مرزی نیم‌صفحه، تنها مرز پیرامون ناهمگنی گسسته سازی شده است. این مثال ذکر شده، با استفاده از روش اجزای مرزی

در رابطه (۸)،  $u_{12}^N$  و  $q_{12}^N$  به ترتیب تغییرمکان و تنش وجه مشترک ( $\Gamma_{12}$ ) برای ناحیه شماره (۱)،  $R_{12}^N$  تاریخچه دینامیکی پیشین در گام زمانی  $N$  و  $u_{12}^{ff.N}$  تغییرمکان میدان آزاد برای وجه مشترک می‌باشد.

#### ۳-۲- بخش (۲): محیط توپر

این ناحیه یک محیط بسته توپر می‌باشد. چنانچه کلیه گره‌های متعلق به وجه مشترک برای این محیط با زیرنویس (۲۱) مشخص شود، در گام زمانی  $N=n$  معادله انتگرال مرزی گسسته شده خواهد شد:

$$H_{21}^1 u_{21}^N = G_{21}^1 q_{21}^N + R_{21}^N \quad (10)$$

به طوری که در آن:

$$R_{21}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{21}^{N-n+1} q_{21}^n - H_{21}^{N-n+1} u_{21}^n) \quad (11)$$

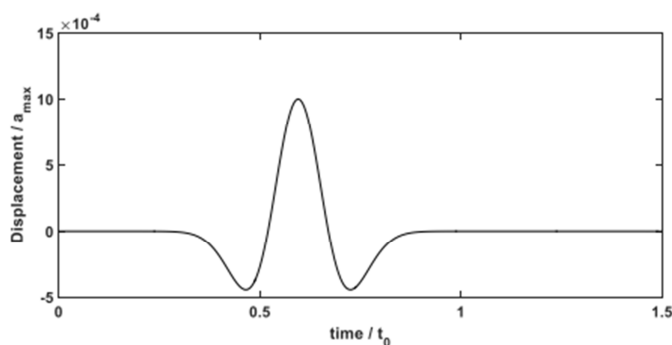
در این رابطه  $u_{21}^N$  و  $q_{21}^N$  به ترتیب تغییرمکان و تنش وجه مشترک ( $\Gamma_{21}$ ) برای ناحیه شماره (۲)،  $R_{21}^N$  تاریخچه دینامیکی پیشین در گام زمانی  $N$  برای وجه مشترک از ناحیه شماره (۲) می‌باشد.

#### ۳-۳- سرهم سازی

برای حل مساله و تعیین کلیه مجهولات، لازم است شرایط پیوستگی در وجه مشترک ناهمگنی با محیط پیرامون آن اعمال شود. شرایط تعادل تغییرمکان و سازگاری تنش در وجه مشترک به ترتیب مطابق روابط زیر ارائه می‌شود:

در اجزای مرزی نیم‌صفحه علاوه بر مؤلفه موج مستقیم ورودی، مؤلفه‌ی موج انعکاس یافته با فاز معکوس نیز در نظر گرفته می‌شود به طوری که برای تابع تغییر مکان می‌توان نوشت:

محیط کامل در حوزه‌ی فرکانس حل شده است [۲۰]. برای حل این مثال لازم است تابع بارگذاری تعریف شود. در این راستا از تابع موجک ریکر مطابق شکل ۲ استفاده شده است [۴۱].



شکل ۲- نمودار تابع موجک ریکر در حوزه زمان

$$u^{ff}(y, t) = a_{max} \left( \begin{array}{c} \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2} + \\ \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2} \end{array} \right) H \left( t - \frac{|y|}{c} \right) \quad (15)$$

۰/۰۰۱ متر منظور شده است. این مسأله با ۳۲۰ گام زمانی ۰/۰۲۵ ثانیه تحلیل شده است. با توجه به اینکه در حوزه فرکانس نتایج بر حسب فرکانس بی‌بعد قابل ارائه می‌باشد، بنابراین برای این پارامتر خواهیم داشت:

$$\eta = \frac{\omega b}{\pi c} \quad (18)$$

در این رابطه،  $\eta$  فرکانس بی‌بعد،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای موج مهاجم،  $b$  شعاع حفره و  $c$  سرعت موج برشی است. شکل ۳، تغییر مکان نرمالایز شده سطح زمین ( $u/$ ) را در حضور یک ناهمگنی دایره‌ای در عمق  $2b$  در مقایسه با نتایج عددی دراوینسکی و یو<sup>۱۲</sup> [۲۰] نشان می‌دهد. موج مهاجم SH به صورت قائم و افقی در برابر ناهمگنی قرار داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود همخوانی مناسب بین نتایج به چشم می‌خورد.

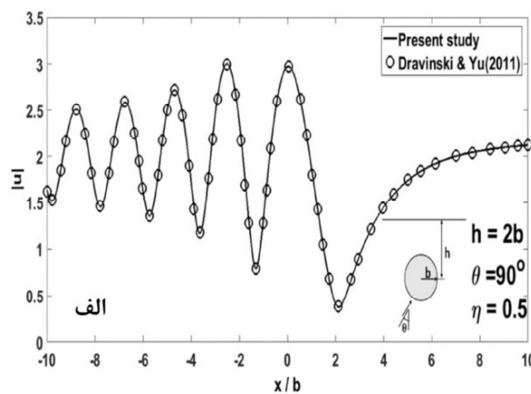
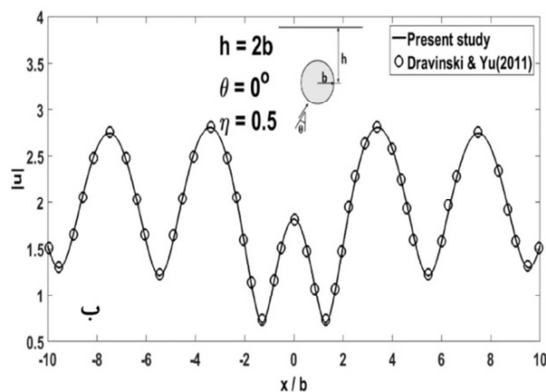
در معادله (۱۵)، دامنه حداکثر تاریخچه زمانی،  $f_p$  فرکانس غالب موج ورودی،  $H$  تابع هویساید،  $\alpha^{inc}$  و  $\alpha^{ref}$  به ترتیب اختلاف موج مهاجم و انعکاس یافته مطابق رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) می‌باشند:

$$\alpha^{inc} = c(t - t_0) + |y| \quad (16)$$

$$\alpha^{ref} = c(t - t_0) - |y| \quad (17)$$

به طوری که  $t_0$  زمان متناظر با دامنه حداکثر تاریخچه زمانی موج براساس شکل ۲ می‌باشد. با توجه به مقادیر مفروض در شکل ۱ برای ناهمگنی دایره‌ای مورد بررسی، فاصله گره‌های پیرامون آن ۲۰ متر و فواصل مقادیر درونی بر روی سطح زمین در محدوده مورد نظر ( $-10b \leq x \leq 10b$ )، ۱۰ متری در نظر گرفته شده است. مقدار فرکانس غالب، پارامتر شیفت زمان ( $t_0$ ) و حداکثر دامنه موجک ریکر به ترتیب ۳ هرتز، ۳/۱ ثانیه و

12- Dravinski and Yu



شکل ۳- دامنه تغییرمکان نرمالایز شده سطح زمین در حضور یک ناهمگنی دایره‌ای مستقر در عمق  $2b$  ( $c_1/c_2 = 2$ ،  $\rho_1/\rho_2 = \frac{3}{2}$ )

و  $(\mu_1/\mu_2 = 6)$

با توجه به اینکه دامنه موج مهاجم، نصف حرکت آزاد سطح زمین است، همواره تغییرمکان نرمالایز شده دو برابر بزرگ‌نمایی به دست می‌آید. در این مطالعه، نسبت سرعت موج برشی و چگالی محیط به ناهمگنی به ترتیب برابر با  $\frac{3}{2}$  و  $c_1/c_2 = 2$  تعریف شده است.

#### ۵-۲- اثر نسبت عمق

پارامتر نسبت عمق (DR) در چهار مقدار  $1/5$ ،  $3$ ،  $6$  و  $8$  مطابق زیر مورد بررسی قرار گرفته است. که در هر عمق، زوایای مختلف موج مهاجم SH به ناهمگنی دایره‌ای تابانده شده است.

#### ۵-۲-۱- الگوی پاسخ در حوزه زمان

در شکل ۴، اثر نسبت عمق در الگوی کلی پاسخ تاریخیچه زمانی سطح زمین در دو زاویه صفر و  $90^\circ$  درجه نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در کمترین نسبت عمق، تفرق و آشفتگی امواج روی سطح زمین بیشتر از اعماق دیگر است. با افزایش عمق، ضمن کاهش تفرق امواج، سرعت در همگرایی پاسخ، قابل مشاهده می‌باشد.

تغییر زاویه موج بر روی فاصله زمانی امواج منعکس شده، تأثیرات مثبت داشته است؛ به نحوی که در زاویه تابش  $90^\circ$  درجه و در عمق بیشینه ناهمگنی، اختلاف فاز زمانی در حدود  $7$  ثانیه، قابل ملاحظه می‌باشد.

#### ۵- نتایج و بحث

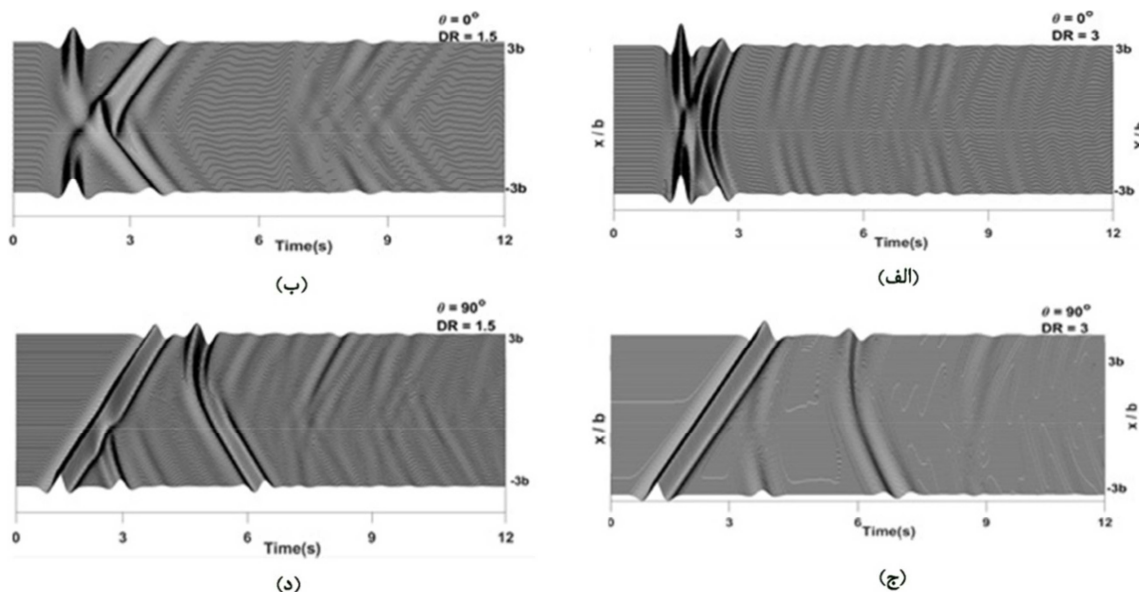
در این قسمت با در نظر گرفتن برخی از پارامترهای کلیدی از قبیل زاویه موج مهاجم، عمق مدفون ناهمگنی، موقعیت افقی و فرکانس بی‌بعد پاسخ، رفتار لرزه‌ای سطح زمین و الگوی بزرگ‌نمایی آن مورد حساسیت‌سنجی قرار گرفته است.

#### ۵-۱- متدولوژی

برای مطالعه پارامتریک، مطابق هندسه مفروض در شکل ۱، ناهمگنی با شعاع  $b$ ، برابر  $500$  متر در عمق مدفون  $H$  مدل‌سازی شده است. در این راستا پارامتر نسبت عمق  $^{13}$  ( $DR = h/b$ ) و نسبت موقعیت افقی  $^{14}$  ( $LR = D/b$ ) تعریف شده است. مقادیر  $1/5$ ،  $3$ ،  $6$  و  $8$  برای نسبت عمق و موقعیت افقی و مقادیر صفر،  $30^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$  درجه برای زاویه موج مهاجم در نظر گرفته شده است. برای افزایش دقت پاسخ‌های منتج، فاصله گره‌ها  $20$  متر و  $1000$  گام زمانی  $0.12/0$  ثانیه در تحلیل، فرض شده است. نتایج برحسب دو پارامتر بزرگ‌نمایی (نسبت دامنه فوریه پاسخ سطح زمین به حرکت آزاد سطح زمین) و تغییرمکان نرمالایز شده سطح زمین (نسبت دامنه فوریه پاسخ به دامنه فوریه موج مهاجم) ارائه شده است. شایان ذکر است

<sup>13</sup>- Depth Ratio

<sup>14</sup>- Horizontal Location Ratio

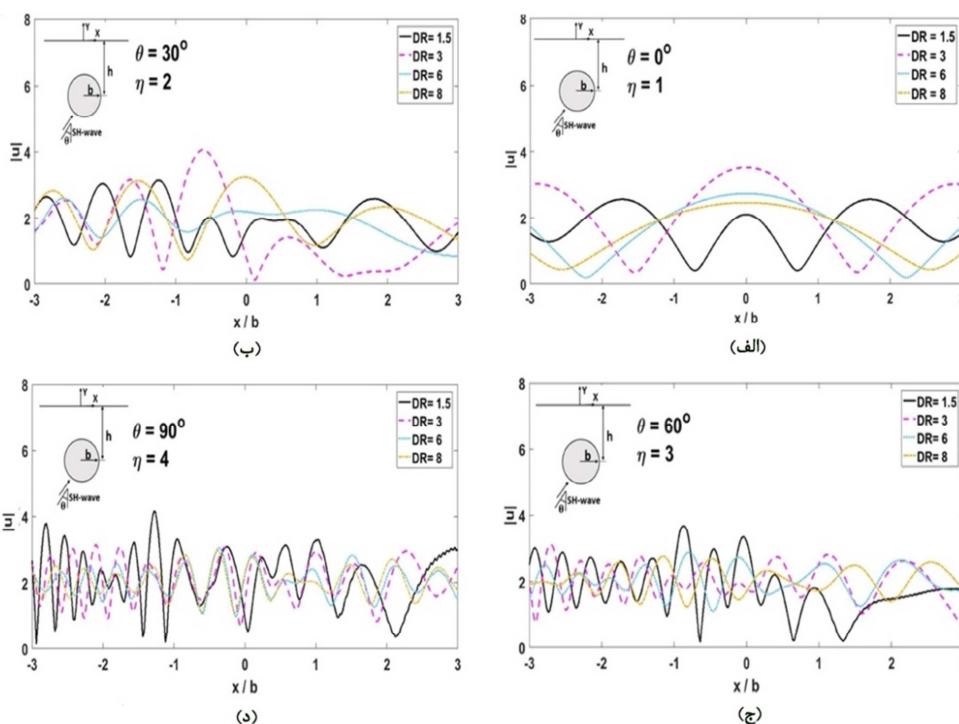


شکل ۴- پاسخ تاریخیچه زمانی حاصل از تفرق امواج ناشی از یک ناهمگنی دایره‌ای در نسبت عمق‌های مختلف تحت موج مهاجم SH با زوایه‌های صفر و ۹۰ درجه، (الف) موج قائم، زاویه صفر درجه و DR=3، (ب) موج قائم، زاویه صفر درجه و DR=1.5، (ج) موج افقی، زاویه ۹۰ درجه و DR=3، (د) موج افقی، زاویه ۹۰ درجه و DR=1.5

مزبور، پیرامون مقدار ۲ به وقوع می‌پیوندد. این مقدار، همان دامنه پاسخ سطح آزاد زمین می‌باشد. همچنین افزایش فرکانس نیز بر روی مقدار نوسان پاسخ، تأثیر مثبت دارد.

۵-۲-۲- الگوی پاسخ در حوزه فرکانس

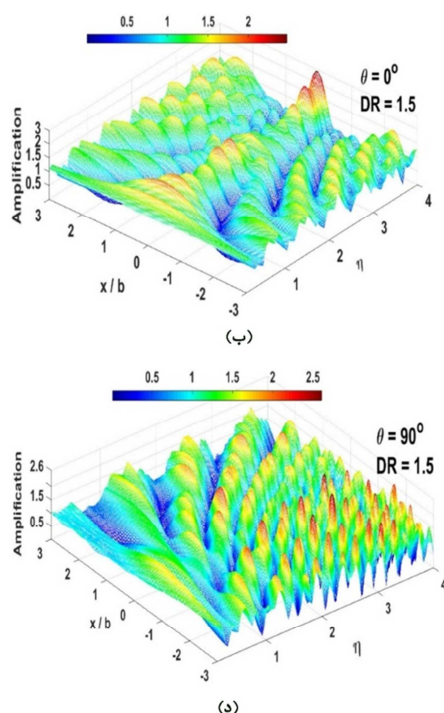
در شکل ۵، تغییرمکان نرمالایز سطح زمین در زوایا و فرکانس‌های مختلف برای مشاهده تأثیر نسبت عمق، به تصویر کشیده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش عمق، دامنه نوسان پاسخ، کاهش می‌یابد. نوسان



شکل ۵- تاثیر نسبت عمق بر روی پاسخ سطح زمین تحت زوایای مختلف موج مهاجم، (الف) زاویه صفر درجه، (ب) زاویه ۳۰ درجه، (ج) زاویه ۶۰ درجه و (د) زاویه ۹۰ درجه



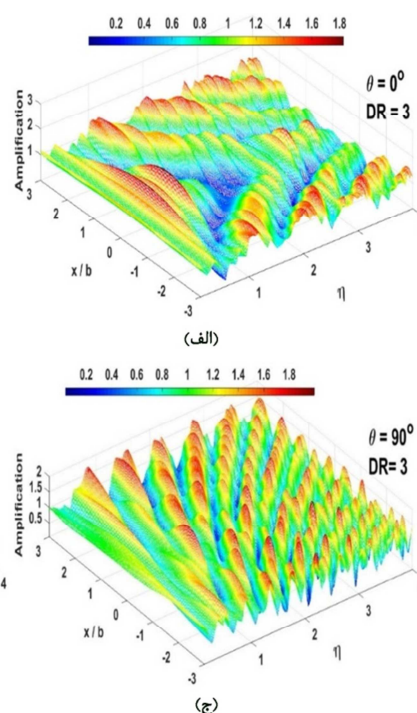
نوسان ریز بر روی الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین می‌شود. بخش‌های (ج) و (د) شکل ۶ نیز، الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین را در حضور ناهمگنی دایره‌ای مستقر در عمق‌های مختلف در برابر هجوم موج افقی SH نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود در این حالت در فرکانس‌های کمتر از واحد، هنوز نوسان پاسخ آغاز نشده و افزایش فرکانس موجب پدیدار شدن نوسان تشدید پاسخ می‌شود. ازدیاد نوسان در وجوه نزدیک به جبهه موج بیشتر به چشم می‌خورد. افزایش نسبت عمق نیز بر آرام شدن پاسخ سطح، تأثیر مثبت داشته است، به طوری که در نسبت عمق بیشینه، بزرگ‌نمایی سطح، تقریباً با یک رفتار یکسان نوسان می‌کند.



شکل ۶- الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین ( $-3b \leq x \leq 3b$ ) در حضور یک ناهمگنی دایره‌ای بر حسب فرکانس بی‌بعد در نسبت عمق‌های مختلف، (الف) موج قائم، زاویه صفر درجه و  $DR=3$ ، (ب) موج قائم، زاویه صفر درجه و  $DR=1.5$ ، (ج) موج افقی، زاویه  $90^\circ$  درجه و  $DR=3$  و (د) موج افقی، زاویه  $90^\circ$  درجه و  $DR=1.5$

$8/33$  که متناظر با طول موج  $0/25$  تا  $8/33$  برابر عرض ناهمگنی هستند، این محدوده برای پیوند بی‌بعد در نظر گرفته شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در حالت موج

در شکل ۶، اثر نسبت عمق در الگوی کلی بزرگ‌نمایی سطح زمین (نسبت دامنه پاسخ سطح زمین به دامنه پاسخ سطح زمین بدون عارضه) در زوایای صفر و  $90^\circ$  درجه نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ بخش (الف) و (ب)، برای موج قائم دیده می‌شود، با افزایش عمق از میزان بزرگ‌نمایی کاسته شده و حداکثر بزرگ‌نمایی در مرکز ناهمگنی بر روی سطح زمین و در کمترین نسبت عمق قابل مشاهده می‌باشد. با حرکت از مرکز ناهمگنی در امتدادهای چپ و راست، از مقدار بزرگ‌نمایی در این حالت، کاسته شده است. افزایش فرکانس، همواره بر روی تعداد نوسان پاسخ، تأثیر مثبت دارد. آنچه مسلم است افزایش عمق ناهمگنی، نه تنها اندازه بزرگ‌نمایی را کاهش داده؛ بلکه سبب شکل‌گیری

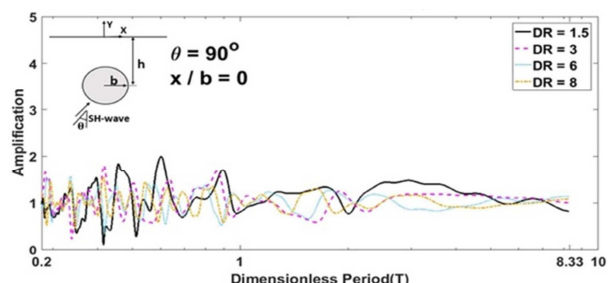


شکل ۷، بزرگ‌نمایی نقطه مرکزی سطح زمین را بر حسب پیوند بی‌بعد ( $T = 1/\eta$ ) در نسبت عمق و زوایای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به تمایل دانش مهندسی به مشاهده پاسخ در محدوده پیوندیک  $0/25$  تا

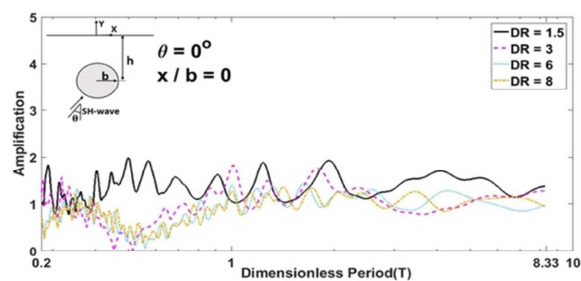
موج‌های بزرگتر از عرض عارضه، بزرگ‌نمایی با نوسان کم به وقوع پیوسته و به سمت بزرگ‌نمایی زمین بدون عارضه (مقدار یک) همگرا می‌شود.

قائم و در طول موج‌های کمتر از عرض عارضه، کمترین نسبت عمق با حداکثر پاسخ، همراه می‌باشد.

این موضوع در امواج مایل به چشم نمی‌خورد. با افزایش پریود بی‌بعد و یا به عبارت دیگر، در طول



(ب)



(الف)

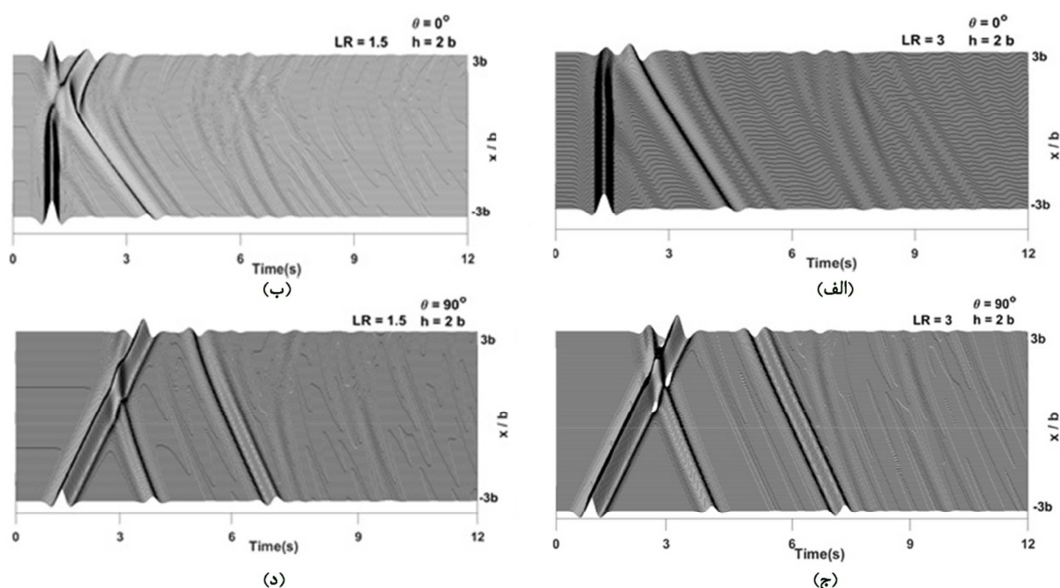
شکل ۷- اثر نسبت عمق بر روی بزرگ‌نمایی یک نقطه از سطح زمین برحسب پریود بی‌بعد در زوایای مختلف موج مهاجم SH، (الف) موج قائم و (ب) موج افقی

در شکل ۸، الگوی کلی پاسخ تاریخچه زمانی سطح زمین در نسبت‌های افقی مختلف در زوایای صفر و ۹۰ درجه نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با جابه‌جایی ناهمگنی در امتداد افق از میزان تفرق امواج کاسته می‌شود. آنچه مسلم است با افزایش این نسبت امواج انعکاس شده ثانویه نیز بر روی سطح زمین قابل مشاهده می‌باشد.

### ۵-۳- متدولوژی

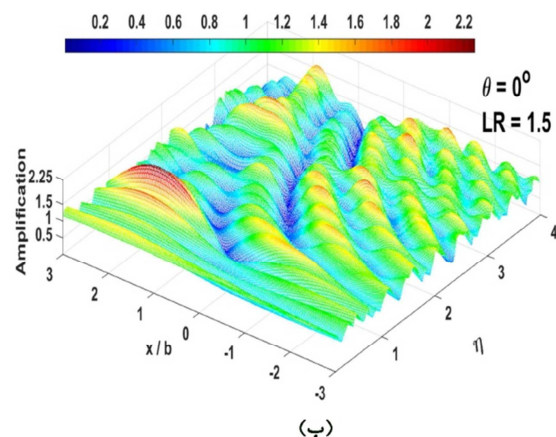
با حرکت ناهمگنی دایره‌ای در راستای افقی و در یک عمق ثابت ( $DR=2$ )، به بررسی پارامتر نسبت موقعیت افقی ( $LR$ ) پرداخته شده است. این پارامتر در چهار مقدار  $1/5$ ،  $3$ ،  $6$  و  $8$  در زوایای مختلف موج مهاجم SH مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۵-۳-۱- پاسخ درحوزه زمان

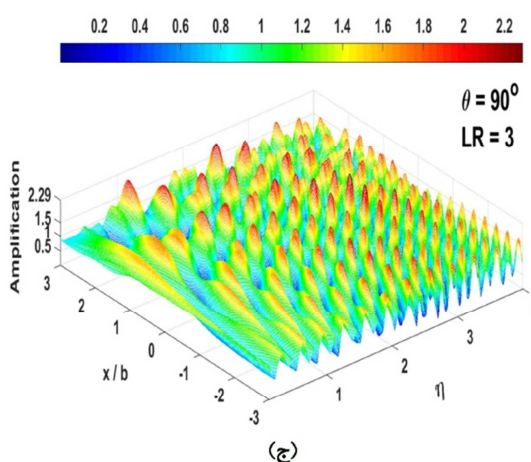
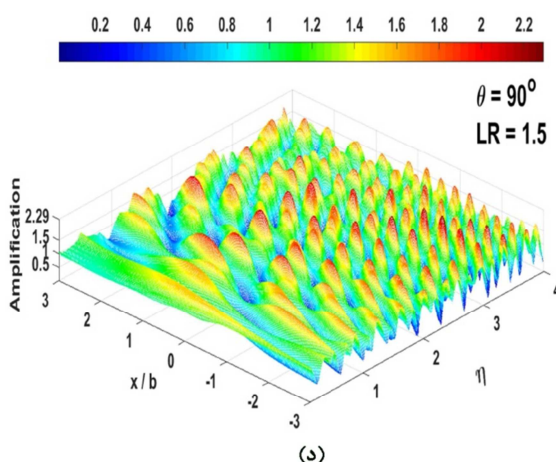
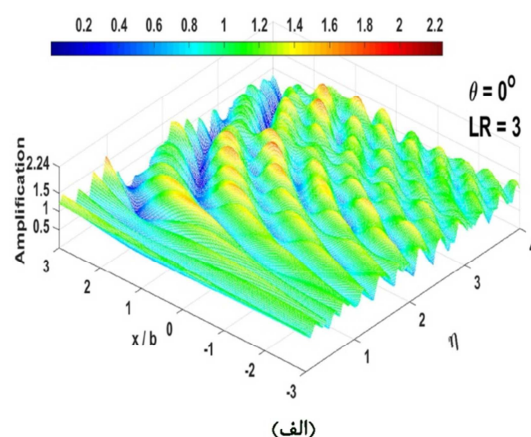


شکل ۱۰- پاسخ تاریخچه زمانی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی دایره‌ای برای نسبت‌های افقی مختلف تحت هجوم موج مهاجم SH با زوایای صفر و ۹۰ درجه، (الف) موج قائم، زاویه صفر درجه و  $LR=3$ ، (ب) موج قائم، زاویه صفر درجه و  $LR=1.5$ ، (ج) موج افقی، زاویه ۹۰ درجه و  $LR=3$  و (د) موج افقی، زاویه ۹۰ درجه و  $LR=1.5$

واحد و بدون نوسان است و با افزایش آن تعداد نوسان به صورت تجمعی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه حرکت ناهمگنی در امتداد افقی در جهت مثبت محور  $x$ ها صورت پذیرفته است، بنابراین کلیه نقاط سطح زمین در محدوده مورد مطالعه ( $-3b \leq x \leq 3b$ ) همسو با جبهه موج می‌باشد که سبب تشدید نوسان نیز خواهد شد.



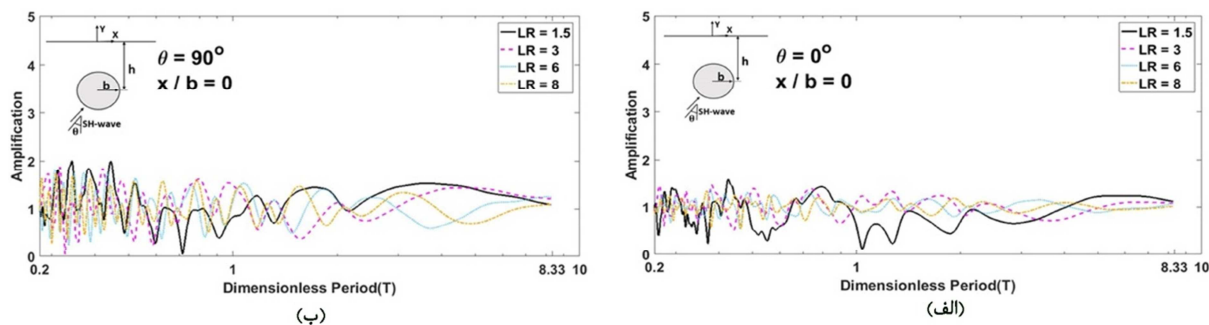
۵-۳-۲- پاسخ درحوزه فرکانس در شکل ۱۱، تأثیر نسبت موقعیت افقی بر الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین برای زوایای صفر و ۹۰ درجه نشان داده شده است. با افزایش این نسبت، تعداد نوسانات افزایش یافته است، به طوری که این موضوع در موج مهاجم افقی بیشتر به چشم می‌خورد. چنانچه مشاهده می‌شود در فرکانس‌های کم، تقریباً مقدار بزرگنمایی،



شکل ۱۱- تأثیر نسبت افقی ناهمگنی دایره‌ای بر الگوی بزرگنمایی سطح زمین تحت هجوم موج مهاجم SH با زوایای صفر و ۹۰ درجه، (الف) موج قائم، زاویه صفر درجه و  $LR=3$ ، (ب) موج قائم، زاویه صفر درجه و  $LR=1.5$ ، (ج) موج افقی، زاویه ۹۰ درجه و  $LR=3$  و (د) موج افقی، زاویه ۹۰ درجه و  $LR=1.5$

طول موج از مقدار مزبور، کاهش نوسان و همگرایی در بزرگنمایی، قابل مشاهده است. لازم به ذکر است با دور شدن از عارضه نوسان پاسخ با دامنه کم در محدوده، بزرگنمایی واحد، شکل می‌گیرد.

شکل ۱۲، اثر نسبت موقعیت افقی الگوی بزرگنمایی یک نقطه از سطح زمین ( $x=0$ ) را برحسب پیروی بی‌بعد نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود در طول موج‌های کمتر از عرض عارضه، همواره تعداد نوسان پاسخ، زیاد می‌باشد. در کلیه نسبت موقعیت‌ها با افزایش

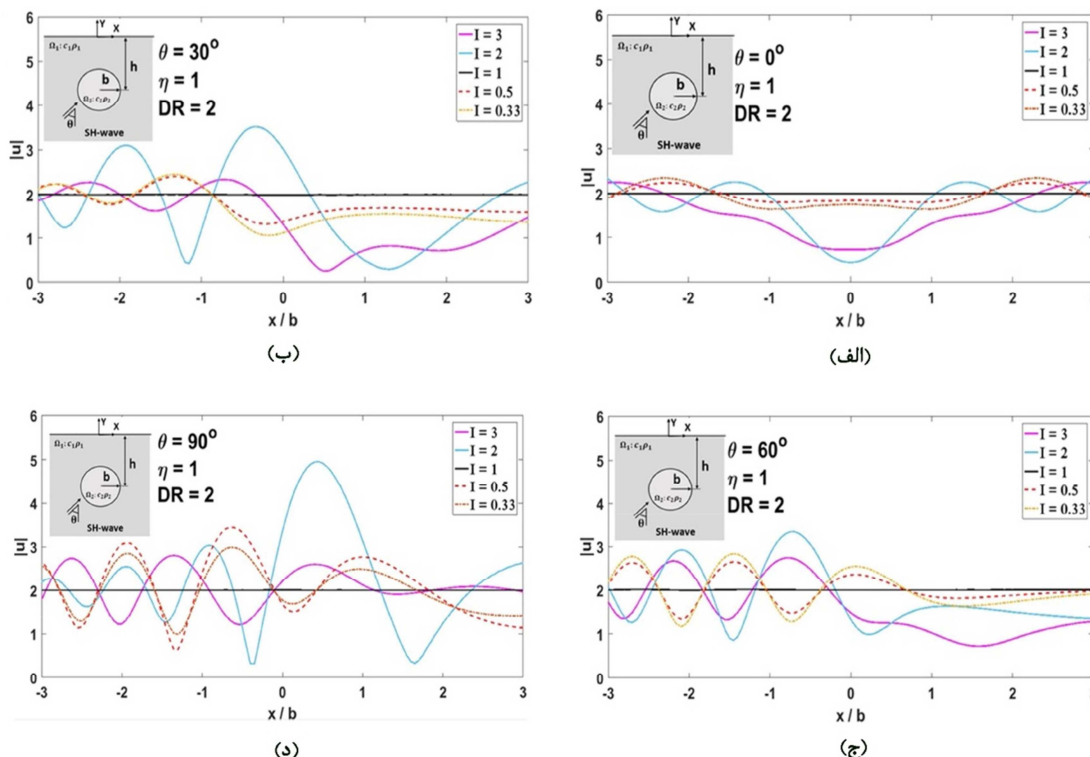


شکل ۱۲- تاثیر نسبت موقعیت افقی بر روی بزرگ‌نمایی نقطه مرکزی از سطح زمین برحسب پریود بی‌بعد، (الف) موج قائم و (ب) موج افقی

۵-۴- نسبت امیدانس

است. نسبت امیدانس ۳، ۱ و ۰/۳۳، به ترتیب مبین ناهمگنی نرم، همگن و سخت می‌باشد. آنچه مسلم است با نرم شدن ناهمگنی، پاسخ سطح همواره افزایش می‌یابد. چنانچه مشاهده می‌شود در حالت همگن، تغییر مکان نرمالایز شده مقدار ۲ را نشان می‌دهد که این موضوع دور از انتظار نیست.

در این بخش به بررسی پارامتر نسبت امیدانس معرف نسبت مشخصات مصالح محیط به ناهمگنی پرداخته شده است ( $I = c_1 \rho_1 / c_2 \rho_2$ ). شکل ۱۳، تأثیر پارامتر مزبور را بر روی پاسخ سطح زمین در زوایای مختلف هجوم موج مهاجم در فرکانس بی‌بعد واحد، نشان می‌دهد. در این شکل، نسبت عمق برابر ۲ فرض شده

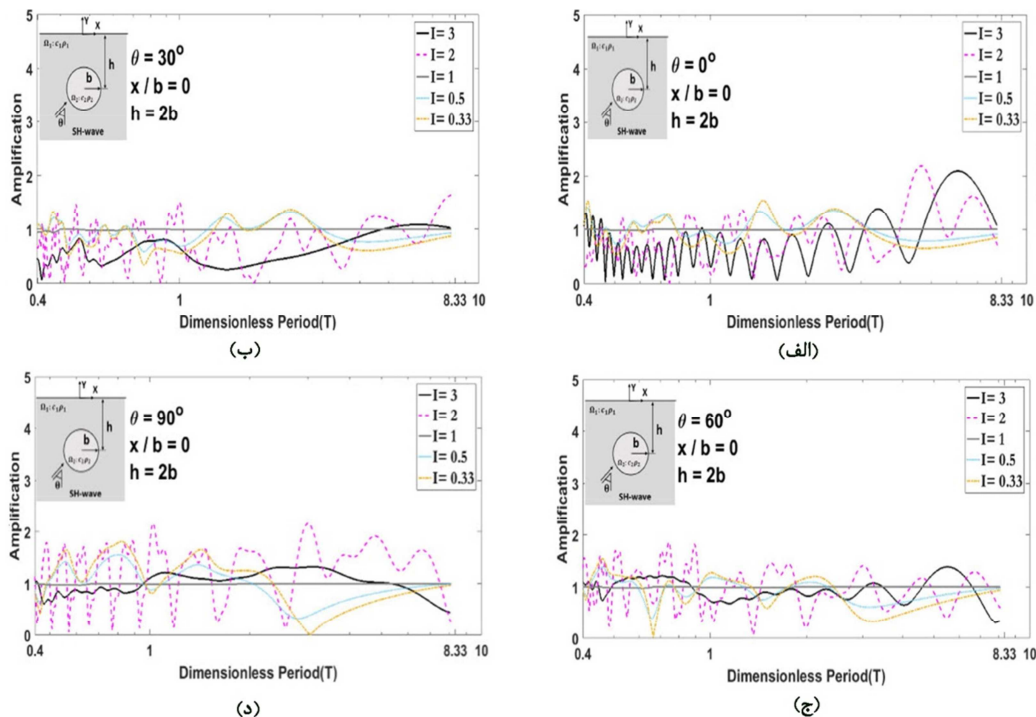


شکل ۱۳- تغییر مکان نرمالایز شده سطح زمین در حضور یک ناهمگنی دایره‌ای در نسبت امیدانس‌های مختلف، (الف) زاویه صفر درجه، (ب) زاویه ۳۰ درجه، (ج) زاویه ۶۰ درجه و (د) زاویه ۹۰ درجه

حداکثر بزرگ‌نمایی در نسبت امیدانس ۳ (ناهمگنی نرم) حاصل شده است.

شکل ۱۴، اثر نسبت امیدانس بر روی حداکثر بزرگ‌نمایی را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود



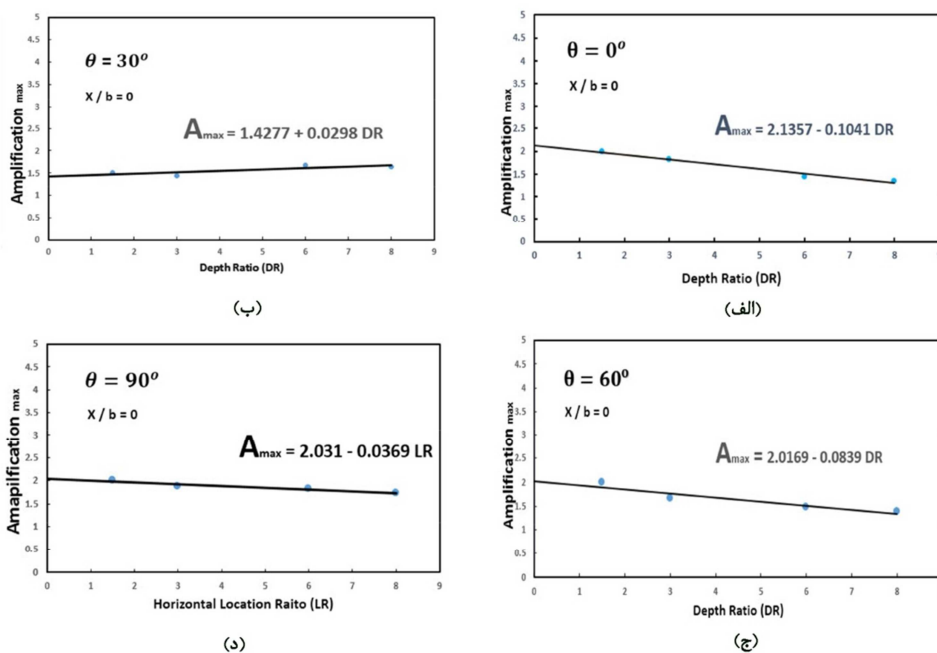


شکل ۱۴- تأثیر نسبت امپدانس بر روی بزرگ‌نمایی نقطه مرکزی از سطح زمین بر حسب پریود بی‌بعد، (الف) زاویه صفر درجه، (ب) زاویه ۳۰ درجه، (ج) زاویه ۶۰ درجه و (د) زاویه ۹۰ درجه

شکل‌های مزبور به صورت جدول ۱، در پیوندهای بی‌بعد نظیر، آورده شده است.

#### ۵-۵- حداکثر بزرگ‌نمایی

حداکثر بزرگ‌نمایی در نقطه مرکزی واقع بر سطح زمین تعیین شده و با برازش خطی بر حسب نسبت عمق برای زوایای مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



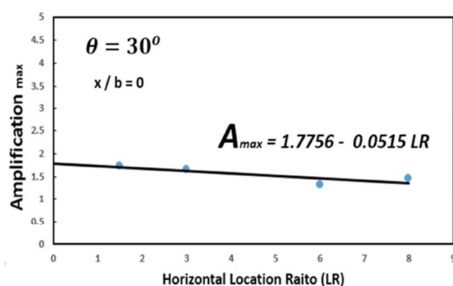
شکل ۱۵- برازش خطی از حداکثر بزرگ‌نمایی بر حسب نسبت عمق برای زوایای مختلف موج مهاجم SH، (الف) زاویه صفر درجه، (ب) زاویه ۳۰ درجه، (ج) زاویه ۶۰ درجه و (د) زاویه ۹۰ درجه

جدول ۱- حداکثر بزرگ‌نمایی و پریود مشخصه در زوایا و نسبت عمق‌های مختلف

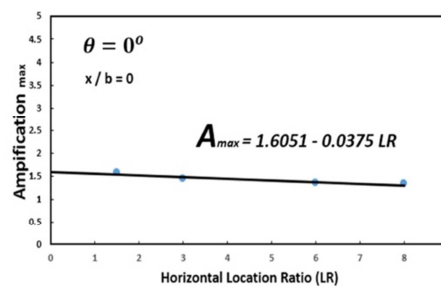
مشخصات نقاط نسبت عمق	صفر		۳۰		۶۰		۹۰	
	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر
۱/۵	۰/۴۹۹	۰/۹۹۲	۳/۹۷	۱/۵۰۴	۰/۴۴۳	۱/۹۸۲	۰/۶۰۱	۱/۹۹۹
۳	۱/۰۱۲	۱/۸۲۷	۳/۳۶۷	۱/۴۴۷	۰/۵۰۳	۱/۶۵۹	۰/۴۱۶	۱/۷۹۸
۶	۱/۶۳۸	۱/۴۳۹	۰/۴۵۱	۱/۶۷۹	۰/۴۴۹	۱/۴۸۴	۰/۳۳۵	۱/۵۵۸
۸	۱/۴۲۴	۱/۳۵۲	۰/۴۹۸	۱/۶۳۲	۰/۳۰۳	۱/۳۹۱	۰/۴۱۵	۱/۵۴۸

موضوع از شیب نمودارهای مربوطه مشخص است. همچنین حداکثر بزرگ‌نمایی در عمق کمینه و نسبت موقعیت صفر تحت هجوم امواج مهاجم افقی به وقوع می‌پیوندد.

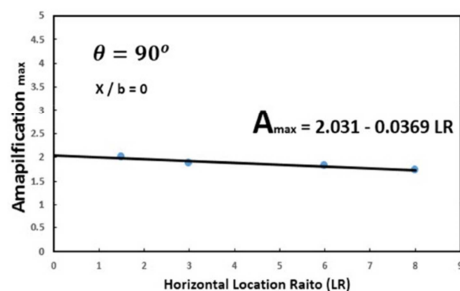
به‌طور مشابه، شکل ۱۶ و جدول ۲، حداکثر بزرگ‌نمایی حاصل برحسب نسبت موقعیت افقی را در زوایای مختلف موج مهاجم نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود تأثیر نسبت عمق در کاهش بزرگ‌نمایی در مقایسه با موقعیت افقی ناهمگنی پررنگ‌تر می‌باشد. این



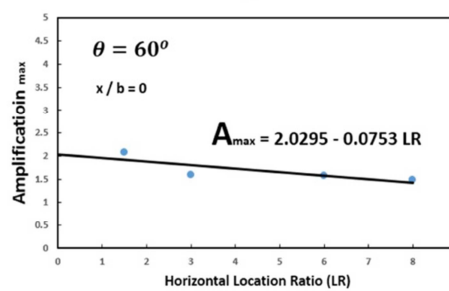
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

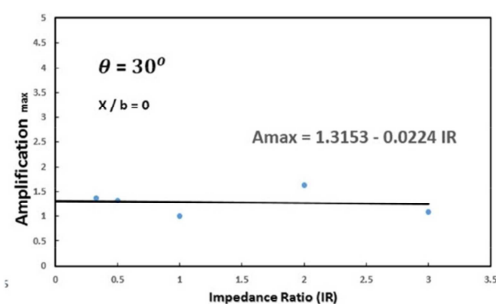
شکل ۱۶- برآزش خطی از حداکثر بزرگ‌نمایی برحسب نسبت موقعیت افقی برای زوایای مختلف موج مهاجم SH، (الف) زاویه صفر درجه، (ب) زاویه ۳۰ درجه، (ج) زاویه ۶۰ درجه و (د) زاویه ۹۰ درجه

جدول ۲- حداکثر بزرگ‌نمایی و پریود مشخصه در زوایا و نسبت موقعیت‌های افقی مختلف

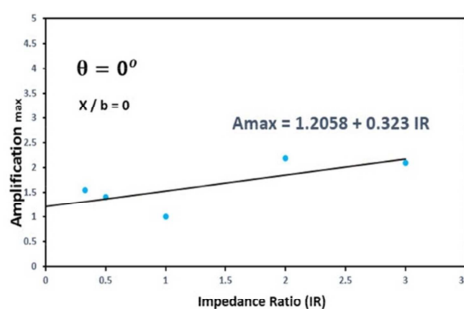
مشخصات نقاط نسبت موقعیت افقی	صفر		۳۰		۶۰		۹۰	
	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر
۱/۵	۰/۴۲۴	۱/۵۸۵	۱/۰۴۳	۱/۷۲۱	۰/۳۸۰	۲/۰۷۸	۰/۳۴۲	۲/۰۰۶
۳	۰/۳۸۰	۱/۴۵۷	۰/۲۷۵	۱/۶۵	۰/۶۴۳	۱/۵۹۶	۰/۳۱۶	۱/۸۷۵
۶	۰/۳۷۷	۱/۳۵۲	۱/۵۲۹	۱/۳۲	۰/۴۴۵	۱/۵۷۲	۰/۳۰۶	۱/۸۲۴
۸	۰/۳۶۸	۱/۳۳۳	۱/۴۰۴	۱/۴۵۸	۰/۳۰۲	۱/۴۷۹	۰/۳۰۹	۱/۷۳۶

مختلف موج مهاجم به تصویر می‌کشد.

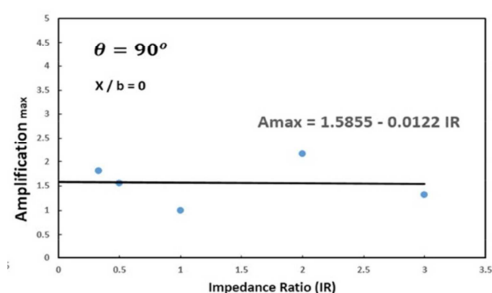
شایان ذکر است، شکل ۱۷ و جدول ۳، حداکثر بزرگ‌نمایی حاصل برحسب نسبت امپدانس را در زوایای



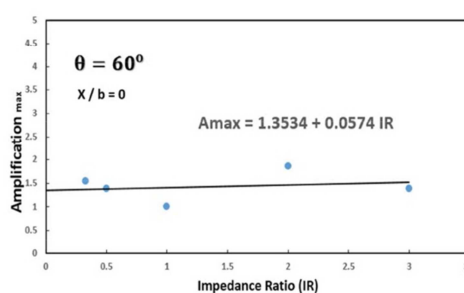
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۷- برازش خطی از حداکثر بزرگ‌نمایی برحسب نسبت امپدانس برای زوایای مختلف موج مهاجم SH، (الف) زاویه صفر درجه، (ب) زاویه ۳۰ درجه، (ج) زاویه ۶۰ درجه و (د) زاویه ۹۰ درجه

جدول ۳- حداکثر بزرگ‌نمایی و پریود مشخصه در زوایا و نسبت امپدانس‌های مختلف

مشخصات نقاط نسبت امپدانس	صفر		۳۰		۶۰		۹۰	
	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگ‌نمایی حداکثر
۳	۶/۰۸۹	۲/۰۹۴	۶/۲۵۸	۱/۰۸۷	۵/۴۹۵	۱/۳۸۵	۳/۲۱۸	۱/۳۲۲
۲	۴/۶۵۵	۲/۱۸۹	۸/۰۸۴	۱/۶۴۴	۰/۷۴۳	۱/۸۵۸	۱/۰۲۴	۲/۱۵۶
۱	-	۱	-	۱	-	۱	-	۱
۰/۵	۰/۴۱۰۷	۱/۴۰۶	۲/۳۴۵	۱/۳۲۴	۰/۴۶۰	۱/۳۷۹	۰/۸۰۶۳	۱/۵۵۶
۰/۳۳	۱/۴۷	۱/۵۴۶	۲/۳۴۵	۱/۳۶۹	۰/۴۶۰۶	۱/۵۳۷	۰/۸۱۹۲	۱/۸۱

مزبور از دیگر روش‌های عددی مرزی متمایز شده است. چنانچه از صحت‌سنجی نتایج حاصل در مقایسه با برخی پاسخ‌های موجود در ادبیات فنی مشاهده شد؛ روش پیشنهاد شده از قابلیت مناسب در مدل‌سازی و تحلیل لرزهای ناهمگنی‌ها برخوردار می‌باشد. با منظور داشتن برخی پارامترهای کلیدی در مدل از قبیل عمق استقرار ناهمگنی، موقعیت افقی، زاویه موج و نسبت امپدانس، یک

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله الگوی بزرگ‌نمایی پاسخ سطح زمین در حضور ناهمگنی دایره‌ای زیرسطحی در برابر امواج مهاجم مایل SH ارائه شد. در این راستا از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه زمان برای مدل‌سازی، بهره گرفته شد. به لحاظ عدم گسسته‌سازی سطح صاف زمین و تمرکز مش‌بندی بر روی وجه میانی ناهمگنی، روش

۳- زاویه موج درالگوی بزرگ‌نمایی چنان مؤثر است که با افزایش آن نوسان در وجوه نزدیک به جبهه موج با تشدید بیشتر، به وقوع می‌پیوندد.

۴- نسبت امپدانس مصالح ناهمگنی نسبت به محیط پیرامون در شکل‌گیری الگوی متفاوت پاسخ بسیار مؤثر می‌باشد، به طوری که با نرم شدن آن، بزرگ‌نمایی سطح زمین افزایش می‌یابد.

۵- بزرگ‌نمایی سطح زمین در نسبت عمق حداقل و موقعیت افقی صفر در برابر هجوم امواج افقی SH دارای مقداری حداکثر می‌باشد.

تحلیل پارامتریک جامع انجام پذیرفت که نتایج حاصل از آن به صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

۱- از نگاشت‌های سه‌بعدی در حوزه زمان، مشاهده شد افزایش نسبت عمق و موقعیت افقی استقرار ناهمگنی بر روی الگوی تفرق پاسخ و کاهش آن مؤثر می‌باشد.

۲- با توجه به الگوی سه‌بعدی بزرگ‌نمایی، افزایش فرکانس نه تنها سبب ازدیاد نوسان می‌شود، بلکه بر روی افزایش دامنه‌ی پاسخ نیز تأثیرگذار است.

## مراجع

- [۱] پنجی، م.، کمالیان، م.، عسگری مارنانی، ج.، جعفرکاظم، م.ک. (۱۳۹۱). "مروری بر ادبیات فنی تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج مهاجم SH"، پژوهش‌نامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، دوره ۱۵، شماره ۴، ش.ص. ۲۱-۳۵.
- [2] Simons, D. A. (1980). "Scattering of SH waves by thin, semi-infinite inclusions", *International Journal of Solids and Structures*, 16(2), 177-192..
- [3] Varadan, V. K., & Varadan, V. V. (1979). "Frequency dependence of elastic (SH-) wave velocity and attenuation in anisotropic two phase media", *Wave Motion*, 1(1), 53-63.
- [4] Wang, Y. S., & Wang, D. (1996). "Scattering of elastic waves by a rigid cylindrical inclusion partially debonded from its surrounding matrix—I. SH case", *International journal of solids and structures*, 33(19), 2789-2815.
- [5] Doyum, A. B., & Erdogan, F. (1991). "An elastic half-space containing a flat inclusion under a harmonic surface load", *Journal of sound and vibration*, 147(1), 13-37.
- [6] Baganas, K., Charalambopoulos, A., & Manolis, G. D. (2005). "Detection of spherical inclusions in a bounded, elastic cylindrical domain", *Wave motion*, 41(1), 13-28.
- [7] Manoogian, M. E., & Lee, V. W. (1996). "Diffraction of SH-waves by subsurface inclusions of arbitrary shape", *Journal of Engineering Mechanics*, 122(2), 123-129.
- [8] Imhof, M. G. (2004). "Computing the elastic scattering from inclusions using the multiple multipoles method in three dimensions", *Geophysical Journal International*, 156(2), 287-296.
- [9] Kanaun, S., & Levin, V. (2013). "Scattering of elastic waves on a heterogeneous inclusion of arbitrary shape: An efficient numerical method for 3D-problems", *Wave Motion*, 50(4), 687-707.
- [10] Lee, J., Lee, H., & Jeong, H. (2016). "Numerical analysis of SH wave field calculations for various types of a multilayered anisotropic inclusion", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 64, 38-67.
- [11] Nakasone, Y., Nishiyama, H., & Nojiri, T. (2000). "Numerical equivalent inclusion method: a new computational method for analyzing stress fields in and around inclusions of various shapes", *Materials Science and Engineering: A*, 285(1), 229-238.
- [12] Chen, M. C., & Ping, X. C. (2009). "A novel hybrid finite element analysis of inplane singular elastic field around inclusion corners in elastic media", *International Journal of Solids and Structures*, 46(13), 2527-2538.
- [13] Parvanova, S. L., Vasilev, G. P., Dineva, P. S., & Manolis, G. D. (2016). "Dynamic analysis of nano-heterogeneities in a finite-sized solid by boundary and finite element methods", *International Journal of Solids and Structures*, 80, 1-18.
- [14] Beskos, D. E. (1997). "Boundary element methods in dynamic analysis: Part II (1986–1996)", *Appl. Mech. Rev.*, 50(3), 149-197.
- [15] Dominguez, J., & Meise, T. (1991). "On the use of the BEM for wave propagation in infinite domains", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 8(3), 132-138.



- [16] Panji, M., Asgari Marnani, J., & Tavousi Tafreshi, S. (2012). "Evaluation of effective parameters on the underground tunnel stability using BEM", *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 29-37.
- [17] Panji, M., Koohsari, H., Adampira, M., Alielahi, H., & Marnani, J. A. (2016). "Stability analysis of shallow tunnels subjected to eccentric loads by a boundary element method", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(4), 480-488.
- [18] Hadley, P.K., Askar, A., & Calmak, A.S. (1989), "Scattering of waves by inclusions in a nonhomogeneous elastic half space solved by boundary element methods", *Technical Report NCEER-89-0027*.
- [19] Rus, G., & Gallego, R. (2005). "Boundary integral equation for inclusion and cavity shape sensitivity in harmonic elastodynamics", *Engineering analysis with boundary elements*, 29(1), 77-91.
- [20] Dravinski, M., & Yu, M. C. (2011). "Scattering of plane harmonic SH waves by multiple inclusions", *Geophysical Journal International*, 186(3), 1331-1346.
- [21] Dravinski, M., & Sheikhhassani, R. (2013). "Scattering of a plane harmonic SH wave by a rough multilayered inclusion of arbitrary shape", *Wave Motion*, 50(4), 836-851.
- [22] Parvanova, S. L., Dineva, P. S., Manolis, G. D., & Kochev, P. N. (2014). "Dynamic response of a solid with multiple inclusions under anti-plane strain conditions by the BEM", *Computers & Structures*, 139, 65-83.
- [23] Sheikhhassani, R., & Dravinski, M. (2016). "Dynamic stress concentration for multiple multilayered inclusions embedded in an elastic half-space subjected to SH-waves", *Wave Motion*, 62, 20-40.
- [24] Dong, C. Y., Lo, S. H., & Cheung, Y. K. (2004). "Numerical solution for elastic half-plane inclusion problems by different integral equation approaches", *Engineering analysis with boundary elements*, 28(2), 123-130.
- [25] Panji, M., & Ansari, B. (2017). "Modeling pressure pipe embedded in two-layer soil by a half-plane BEM", *Computers and Geotechnics*, 81, 360-367.
- [26] Ba, Z., & Yin, X. (2016). "Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using a multidomain IBEM: incident plane SH waves", *Geophysical Journal International*, 205(3), 1382-1405.
- [27] Kamalian, M., Jafari, M. K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., & Gatmiri, B. (2006). "Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(8), 753-765.
- [28] Kamalian, M., Jafari, M. K., Sohrabi-Bidar, A., & Razmkhah, A. (2008). "Seismic response of 2-D semi-sine shaped hills to vertically propagating incident waves: amplification patterns and engineering applications", *Earthquake Spectra*, 24(2), 405-430.
- [29] Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J. A., & Jafari, M. K. (2013). "Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM", *Geophysical Journal International*, 194(3), 1849-1865.
- [۳۰] پنجی، م.، کمالیان، م.، عسگری مارنانی، ج.، جعفری، م.ک.، (۱۳۹۲). "الگوی بزرگنمایی دره‌های نیم‌سینوس در برابر امواج مهاجم قائم SH"، *روش‌های عددی در مهندسی*، ۱۳۹۲، دوره ۳۲، شماره ۲، ش.ص. ۷۸-۱۱۱.
- [31] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., & Jafari, M. K. (2014). "Analysing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM", *Geophysical Journal International*, 197(1), 591-607.
- [32] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., & Jafari, M. K. (2014). "Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM", *International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering*, 12(2), 193-206.
- [۳۳] پنجی، م.، فخرآور، ا.ع.، (۱۳۹۶). "الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل زیرزمینی نعل‌اسبی تحت امواج مهاجم SH"، *پژوهش‌نامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله*، دوره ۴، شماره ۲، ش.ص. ۴۶-۶۶.
- [34] Feng, Y. D., Wang, Y. S., & Zhang, Z. M. (2003). "Transient scattering of SH waves from an inclusion with a unilateral frictional interface—a 2D time domain boundary element analysis", *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 19(1), 25-36.
- [35] Huang, Y., Crouch, S. L., & Mogilevskaya, S. G. (2005). "A time domain direct boundary integral method for a viscoelastic plane with circular holes and elastic inclusions", *Engineering analysis with boundary elements*, 29(7), 725-737.
- [36] Mykhas'kiv, V. (2005). "Transient response of a plane rigid inclusion to an incident wave in an elastic solid", *Wave motion*, 41(2), 133-144.
- [37] Eringen, A. C. (1975). *Elastodynamics. vol. 2, linear theory*. Academic Press.
- [38] Brebbia, C.A., Dominguez, J., (1989). *Boundary elements an introductory course*. Southampton. Boston: Computational Mechanics Publications

- [39] Dominguez, J., (1993). *Boundary elements in dynamics*. Southampton, Boston: Computational Mechanics Publications.
- [40] Reinoso, E., Wrobel, L. C., & Power, H. (1993). "Preliminary results of the modelling of the Mexico City valley with a two-dimensional boundary element method for the scattering of SH waves", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12(8), 457-468.
- [41] Ricker, N. (1953). "The form and laws of propagation of seismic wavelets", *Geophysics*, 18(1), 10-40.



**M. Panji\***

Assistant Professor,  
Department of Civil  
Engineering, Islamic Azad  
University of Zanjan.

**e-mail:** m.panji@iauz.ac.ir

**F. Yasemi**

M.Sc. Student, Department of  
Civil Engineering, Islamic  
Azad University of Zanjan.

**e-mail:** farshid.yasemi@iauz.ac.ir

**Amplification Pattern of the Ground Surface Including Underground Circular Inclusion Subjected to Incident SH-Waves**

*In this paper, amplification pattern of the ground surface was presented in the presence of an underground circular inclusion by a half-plane time-domain boundary element method (BEM). Based on the mentioned method, it was required that only the interface was discretized to create the inclusion model. Avoiding from discretizing the smooth ground surface as well as enclosing boundaries were the distinguished advantages of the present study compared with traditional BEM studies. After implementing the method in a general computer algorithm, the results were verified compared to existing literature responses. Finally, with considering some intended parameters including incident wave angle, inclusion depth, horizontal location and impedance ratio, a sensitivity analysis was carried out to obtain the maximum amplification of the surface. The results showed that seismic ground response was affected by all these parameters. The results can be used for creating safe domains, passive defense topic and also validating seismic codes.*

**Keywords:** Half-plane BEM, Time Domain, Circular Inclusion, SH-wave, Surface Response.

---

\* Corresponding author