

تأثیر بافت ارتوتروپ ناهمگنی مدفون بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین

سعید مجتبی‌زاده حسنلوئی^۱، مهدی پنجمی^{۲*}، محسن کمالیان^۳

۱- گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

۳- پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- mojtabazadeh@iauz.ac.ir

۲- m.panji@iauz.ac.ir

۳- kamalian@iiees.ac.ir

چکیده:

در این مقاله به تعیین پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حضور ناهمگنی مدور مدفون ارتوتروپ در برابر امواج مهاجم قائم SH پرداخته شده است. در تعریف مدل مسأله، از روش اجزای مرزی نیم‌فضا در حوزه‌ی زمان بهره گرفته شده است که مش‌بندی با تمرکز بر وجه میانی توسعه می‌یابد. میرایی تشعشعی و مصالح به طور کامل در فرمول‌بندی روش پیشنهاد شده، به ترتیب به کمک رویکردهای تحلیلی و غیرمستقیم نهادینه شده است. ابتدا روش مزبور به اختصار معرفی شده و صحت نتایج حاصل با تحلیل چند مثال کاربردی اعتبارسنجی شده است. سپس در قالب یک مطالعه‌ی عددی، تأثیر برخی پارامترهای اساسی از قبیل نسبت‌شکل ناهمگنی و محتوای فرکانسی با تکیه‌ی ویژه بر عامل ایزوتروپی و تأثیر بافت ارتوتروپی مصالح، حساسیت‌سنجی شده است. در نهایت، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و پیرامون ناهمگنی مدفون به صور مختلف و در حوزه‌ی زمان و فرکانس نمایش داده شده است. نتایج حاصل نشان داد، بافت ارتوتروپی ناهمگنی مدفون در سوگیری امواج منتشر شده و متعاقباً برآورد آنگوهای بزرگنمایی بسیار مؤثر است.

واژگان کلیدی:

روش اجزای مرزی، نیم‌فضا، حوزه‌ی زمان، ارتوتروپی مصالح، ناهمگنی مدفون، موج SH .

* مهدی پنجمی، استادیار گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

ایمیل: m.panji@iauz.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

The Orthotropy Effect of Underground Inclusion on the Seismic Response of Ground Surface

Saeed Mojtabazadeh-Hasanlouei ^۱, Mehdi Panji ^{*۲}, Mohsen Kamalian ^۳

^۱- Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, **Islamic Azad University**, Zanjan, Iran.

^۲- Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, **Islamic Azad University**, Zanjan, Iran.

^۳- Geotechnical Engineering Research Center, **International Institute of Earthquake Engineering and Seismology**, Tehran, Iran.

Abstract:

This paper presents a formulation of the attenuated orthotropic time-domain half-space boundary element method for analyzing the orthotropic effect of underground inclusions subjected to transient *SH*-waves. The stress-free boundary condition at the ground surface is satisfied using wave source image theory. To account for material damping, the Barkan approach is employed to attenuate the half-space by introducing a constant logarithmic reduction into the modified boundary integral equation. This method is easily implemented in a time-domain computer code for analyzing seismic homogeneous orthotropic mediums. To model underground inclusions, a sub-structuring approach is introduced to ensure continuity conditions at interfaces based on node position and normal direction. Several practical examples involving *SH*-waves are solved and compared with existing literature to validate surface response, particularly focusing on isotropic convergence. Favorable agreement is found between responses, confirming the capability of the proposed method for simple modeling of orthotropic subsurface features. Finally, in the form of an advanced numerical study, the surface motions of orthotropic models including an underground inclusion embedded in a linear elastic half-space were successfully obtained under transient *SH*-wave propagation. Utilizing the time-domain boundary element approach, a simple model was developed only by discretizing the boundaries/interfaces. To illustrate responses in time/frequency-domain, a comprehensive sensitivity analysis is performed considering parameters such as frequency, shape ratio, and isotropy factor, visualized through snapshots, seismograms, and amplification patterns. Results demonstrate that orthotropic anisotropy significantly influences seismic patterns of ground surfaces, highlighting the impact of mentioned parameter variations.

Keywords: Computational seismology, Earthquake ground motions, Seismic anisotropy, Underground Orthotropic Inclusion, Wave scattering and diffraction.

در روش‌های تحلیلی، با در نظرگیری معادله‌ی حاکم بر سیستم و لحاظ نمودن شرایط مرزی و پیوستگی که البته به صورت ویژه به نوع عوارض وابسته است، پاسخ ریاضیات به عنوان خروجی و برحسب حد مجموع حاصل می‌گردد. از جمله مطالعات مهم تحلیلی اخیر پیرامون پراکنش امواج در محیط ارتوتروپ می‌توان به پژوهش [۹] اشاره کرد که یک راه‌حل جدید مبتنی بر تعمیم قانون هوک و اصل برهم نهی برای محیط با خواص ارتوتروپ ارائه نمود. [۱۰] پراکنش امواج رایلی در یک نیم‌فضای الاستیک ارتوتروپ در تماس با لایه‌ی مشابه را به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. [۱۱] توانستند پراکنش امواج SH در یک لایه‌ی ارتوتروپ ساندویچی واقع در میان دو لایه‌ی متمایز ماسه‌ای خشک مستقر در یک نیم‌فضا را تحلیل نمایند. [۱۲] پراکنش امواج LA در یک لایه‌ی ماسه‌ای واقع در یک نیم‌فضای پیش‌تحکیم یافته‌ی ارتوتروپ را به صورت تحلیلی با استفاده از روش تفکیک متغیر بررسی نمودند. از جمله روش‌های نیمه‌تحلیلی نام‌آشنا می‌توان به روش عدد موج آکی-لارنر^۵، روش ماتریس T ^۶ یا میدان صفر^۷ و روش بوچان-کمپیلو^۸ اشاره نمود [۱۳-۱۵]. در روش‌های مزبور پاسخ مسأله به صورت مجموعه‌ای از موج ورودی و معادلات انتگرال کوپل با اقناع شرایط پیوستگی حاکم بدست می‌آید. از جمله تحقیقات صورت گرفته به کمک رویکردهای مذکور می‌توان به مطالعه‌ی [۱۶] اشاره داشت که پاسخ گذرای یک ترک درونی در لایه‌ی ناهمگن ارتوتروپ را محاسبه نمود. پراکنش امواج در نیم‌صفحه‌ی ارتوتروپ غیرهمگن توسط [۱۷] مطالعه شد. در مطالعه‌ی [۱۸] نیز یک نیم‌فضای غیرایزوتروپ تحت تأثیر ناهمگنی مصالح مورد بررسی قرار گرفت.

امروزه، پیشرفت قطعات الکترونیکی و افزایش قدرت رایانه‌ها زمینه‌ساز رشد قابل توجه روش‌های عددی برای تحلیل مسائل گوناگون مهندسی شده است. در این روش‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری

محققان متعدد از دیرباز به بررسی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی موجود در طبیعت و تأثیر بافت تشکیل‌دهنده‌ی مصالح آن در تغییر الگوی پاسخ پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد، الگوی تقویت امواج می‌تواند تا حد زیادی به وضعیت زمین‌شناسی منطقه و شرایط ناهمسانی و غیر ایزوتروپی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آن وابسته باشد. تاکنون مطالعات قابل توجه جهت بررسی اثر ساختگاه در حالت همسان خطی صورت گرفته است که از آن جمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات [۱-۵] اشاره نمود. طیف غالب از پژوهش‌های پیشین به مدل‌سازی محیط‌های ایزوتروپ همسان محدود شده است. اما رفتارسنجی واقعی پهنه‌بندی سطوح موجود در طبیعت بیان می‌دارد که به دلایل مختلف چون اثر ناشی رسوب‌گذاری، هوازدگی، لایه‌بندی، ناهمگنی زیرسطحی، تورق و غیره، عوارض توپوگرافی رفتار غیر ایزوتروپ از خود نشان می‌دهند [۶-۷].

براین‌اساس، بشر همواره در تلاش بوده است تا با بهره‌گیری از رویکردهای مختلف، درک وسیع و جامع از رفتار واقعی عوارض زمین کسب نموده و آن را در راستای گسترش آئین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌ای موجود در حوزه‌های مختلف مهندسی به کار ببندد [۸]. اگرچه مطالعات موجود در ادبیات موضوع توانسته‌اند دیدگاه مناسب از رفتار لرزه‌ای زمین ارائه نمایند، اما همچنان تفاوت قابل ملاحظه میان رفتار حقیقی ناهمسانی سطحی/ زیرسطحی در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای در مقایسه با پاسخ‌های حاصل از مدل‌های عددی وجود دارد. به منظور ارائه‌ی یک طرح قابل قبول و به دور از هرگونه تقریب ناشی از مدلسازی، شناخت و شبیه‌سازی مطلوب مسأله‌ی پراکنش موج با در نظرگرفتن ناهمسانگردی محیط بسیار حائز اهمیت است. بدین ترتیب رویکردهای مدلسازی و تحلیل دو/سه‌بعدی مسائل انتشار امواج به‌طور کاربردی در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی به روش‌های تحلیلی^۱، نیمه‌تحلیلی^۲ و عددی^۳ تفکیک نمود [۱].

^۲ Semi-Analytical Methods

^۳ Numerical Methods

^۴ Love-Waves

^۵ Aki-Larner Discrete Wavenumber Method

^۶ T-Matrix Method

^۷ Null-Field Method

^۸ Bouchon-Campillo Method

^۱ Analytical Methods

پراکنش موج SH در حضور ناهمگنی چندگانه‌ی ارتوتروپ بهره گرفته‌اند.

روش‌های مرزی از جمله ایده‌آل‌ترین روش‌ها جهت تحلیل مسائل انتشار و پراکنش امواج در حضور عوارض توپوگرافی ناهمسان می‌باشد. اگرچه این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی چون فرمول‌بندی پیچیده و عدم توسعه‌ی مکفی برای محیط‌های غیرخطی و چندفازه می‌باشند، اما سهولت در مدل‌سازی، دقت بالا، کاهش قابل توجه در حجم محاسبات و مدت زمان تحلیل از جمله مزایای بارز آن‌ها به شمار می‌آید [۲۹]. با توجه به اینکه در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی، نحوه‌ی انتشار امواج لرزه‌ای در سطح زمین و بزرگنمایی ناشی از آن حائز اهمیت است، محیط مسئله به صورت یک نیم‌فضا بوده و مطلوب آن است که از اجزای مرزی نیم‌فضا در این نوع از مسائل بهره‌گرفته شود. در مدل‌سازی با استفاده از اجزای مرزی نیم‌فضا، امکان تمرکز مش‌ها صرفاً بر روی مرز ناهموار فراهم شده و شرایط مرزی سطح آزاد زمین با اقلان دقیق در معادلات اعمال می‌گردد [۱]. هرچند شرایط مرزی مذکور منجر به افزایش پیچیدگی معادلات خواهد شد، اما عدم نیاز به مش‌بندی سطح زمین و سهولت در مدل‌سازی را به ارمغان می‌آورد. در این رابطه می‌توان به تحقیقات [۳۵-۳۰] در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی منفرد، مرکب سطحی و زیرسطحی ایزوتروپ در برابر امواج مهاجم SH اشاره نمود. اما توسعه‌ی روش اجزای مرزی برای محیط‌های ارتوتروپ در مقایسه با حالت ایزوتروپ بسیار اندک بوده است. در نخستین مطالعات، [۳۶] و [۳۷] به توسعه‌ی توابع گرین و پراکنش امواج لرزه‌ای در یک نیم‌فضای چندلایه‌ی ارتوتروپ پرداختند. چندی بعد، پاسخ گذرای نیم‌صفحه‌ی الاستیک ارتوتروپ در حضور حفره با مقطع دلخواه توسط [۳۸] مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از رویکرد اجزای مرزی غیرمستقیم نیم‌فضا در حوزه‌ی فرکانس، بزرگنمایی امواج SH در حضور یک دره‌ی آبرفتی ارتوتروپ توسط [۳۹] بررسی شد. در ادامه، [۴۰] از روش مزبور برای پراکنش امواج الاستیک درون صفحه و تغییرمکان حاصل در حضور یک دره‌ی آبرفتی ارتوتروپ با مقطع دلخواه استفاده نمودند. در مطالعه‌ی [۴۱] به کمک روش اجزای مرزی مستقیم نیم‌فضا، مسائل الاستودینامیک در محیط ناهمسان دوبعدی تحلیل شد.

بالا، امکان مدل‌سازی و تحلیل مسائل پیچیده و دشوار انتشار موج به سهولت فراهم شده است [۱]. براساس ادبیات فنی، روش‌های عددی را می‌توان در سه دسته‌ی اصلی شامل روش‌های حجمی^۱، مرزی^۲ و تلفیقی^۳ تقسیم‌بندی نمود [۱۹]. از جمله نام‌آشنا‌ترین روش‌های حجمی می‌توان به روش اجزای محدود (FEM)^۴ و تفاضل محدود (FDM)^۵ اشاره نمود. در هنگام استفاده از روش‌های حجمی، لازم است کل دامنه‌ی مورد نظر گسسته‌سازی شده و مرزهای جاذب انرژی امواج در پیرامون مدل در نظر گرفته شوند. بدین ترتیب، مسائل با محیط‌های بی‌نهایت و نیمه‌بی‌نهایت قابلیت تحلیل می‌یابند. اما از سوی دیگر، اعمال شرایط مرزی مزبور موجب پیچیدگی به مراتب بیشتر مسئله شده و زمان تحلیل به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در کاربرد روش‌های حجمی برای تحلیل محیط ارتوتروپ می‌توان تحقیقات [۲۰] را نام برد که توانستند فرمولاسیون الاستوپلاستیک محیط‌های ارتوتروپ با کرنش محدود را تعیین نمایند. [۲۱] از یک رویکرد حجمی در تحلیل صفحات ارتوتروپ بهره گرفتند. با استفاده از روش المان محدود، [۲۲] به تحلیل ارتعاش و پایداری صفحات ضخیم ارتوتروپ پرداخت. [۲۳] یک رویکرد جدید برای تحلیل عددی محیط‌های ارتوتروپ بر مبنای روش اجزای محدود پیشنهاد نمودند. در مطالعه‌ی [۲۴] پاسخ تحلیلی و المان محدود مسائل تماس صفحه‌ای در محیط‌های ارتوتروپ مدرج ارائه شد. [۲۵] با بهره‌گیری از روش تفاضل محدود، به بررسی مسئله‌ی انتشار و پراکنش امواج SH در پوسته‌ی ارتوتروپ چندلایه در معرض تنش اولیه پرداختند. اخیراً، [۲۶] از روش اجزای محدود برای تحلیل یک لایه‌ی ارتوتروپ همگن تحت اثر بارگذاری استوانه‌ای بهره گرفتند. لازم به ذکر است، برخی محققان همچون [۲۷-۲۸] از رویکردی موسوم به روش معادله‌ی انتگرال حجمی موازی^۶ برای تحلیل

^۱ Volumetric Methods

^۲ Boundary Methods

^۳ Hybrid Methods

^۴ Finite Element Method

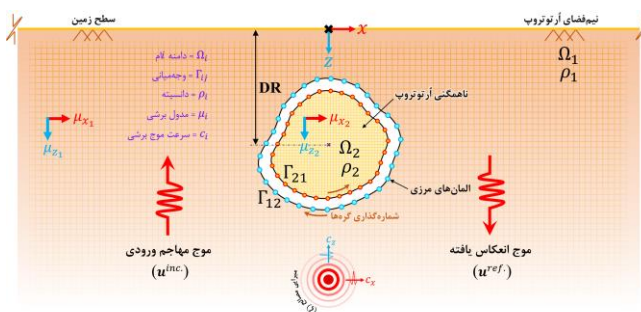
^۵ Finite Difference Method

^۶ Parallel Volume Integral Equation Method (PVIEM)

فاکتور ρ بیانگر چگالی محیط بوده و ثوابت الاستیک ماتریس استحکام^۱ برای محیط ارتوتروپ که مبین مدول برشی محیط در امتداد مختصات x و z می‌باشد، به ترتیب با c_{44} و c_{66} نشان داده شده است. با حل سینگیولار (منفرد) معادله‌ی (۱) و بدون در نظرگیری شرایط مرزی، توابع گرین فضای کامل ارتوتروپ حاصل خواهد شد. با این وجود، شرایط مرزی ترکشن آزاد^۲ بر روی سطح زمین در حالت ارتوتروپ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$c_{44} \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

از حل همزمان معادلات (۱) و (۲)، توابع گرین نیم‌فضای ارتوتروپ در حوزه‌ی زمان حاصل خواهد شد [۴۴].



شکل (۱) - ناهمگنی زیرزمینی ارتوتروپ با مقطع دلخواه مستقر در یک نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ در برابر امواج مهاجم قائم SH .

۲-۱- میرایی مصالح^۳

رفتار واقعی خاک/سنگ تشکیل‌دهنده‌ی محیط نیمه‌نامحدود پیرامون عوارض توپوگرافی، به محیطی نزدیک است که علاوه بر میرایی تشعشعی^۴، میرایی مصالح را نیز شامل می‌شود. لذا، در نظرگیری میرایی مصالح در محاسبات حوزه‌ی زمان به ویژه در محیط ارتوتروپ، می‌تواند همگرایی سریع‌تر پاسخ و سهولت در تعیین نتایج حوزه‌ی فرکانس را به ارمغان آورد. این فاکتور در اجزای مرزی حوزه‌ی زمان نیز توسط مؤلفان مختلف از جمله [۴۶]

[۴۲] با استفاده از یک تابع گرین تقریبی نیم‌فضا، به تحلیل مسائل ناهمسان به کمک روش اجزای مرزی پرداخت. [۴۳] پراکنش امواج SH در یک نیم‌فضای ارتوتروپ در حضور حفرات زیرسطحی را با استفاده از روش معادله‌ی انتگرال مرزی مورد مطالعه قرار دادند. اخیراً فرمولاسیون و الگوریتم کامل روش اجزای مرزی نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ در حوزه‌ی زمان و کاربرد آن در پراکنش امواج لرزه‌ای در حضور انواع عوارض توپوگرافی توسط [۴۴] ارائه شده است.

ادبیات فنی نشان داد، تأثیر بافت ارتوتروپی ناهمگنی نرم زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در برابر امواج مهاجم SH هنوز مورد مطالعه قرار نگرفته و از چالش‌های موجود در پیشینه‌ی تحقیق می‌باشد. بنابراین، در این پژوهش به کمک روش اجزای مرزی نیم‌فضا در حوزه‌ی زمان به تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور عارضه‌ی مزبور پرداخته شده است. در این میان، ضمن توسعه‌ی فرمول‌بندی روش و تحلیل چند مثال اعتبارسنجی، حساسیت بزرگنمایی لرزه‌ای سطح در مقابل برخی پارامترهای اساسی مدل از قبیل نسبت‌شکل، عامل ایزوتروپی و محتوای فرکانسی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. تهیه‌ی مدل ساده‌ی ناهمگنی ارتوتروپ زیرزمینی به کمک روش پیشنهاد شده و ارائه‌ی برخی نتایج جدید مهندسی پیرامون تکمیل و تدقیق آئین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، بر لزوم انجام تحقیق و نوآوری پژوهش حاضر صحه می‌گذارد.

۲- فرمول‌بندی

در شکل (۱) یک ناهمگنی زیرزمینی با هندسه‌ی دلخواه مستقر در یک نیم‌فضای الاستیک خطی همگن ارتوتروپ میرا در برابر امواج مهاجم قائم SH را نشان می‌دهد. معادله‌ی حرکت موج خارج از صفحه SH مطابق زیر تعریف می‌شود [۴۵]:

$$c_{66} \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial x^2} + c_{44} \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial z^2} + b(x,z,t) = \rho \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

به‌طوریکه، $u(x,z,t)$ و $b(x,z,t)$ به ترتیب تغییرمکان و نیروی حجمی خارج از صفحه در نقطه‌ی (x,z) و زمان حاضر t می‌باشد.

^۱ Rigidity Matrix

^۲ Traction-Free

^۳ Material Attenuation

^۴ Radiation Damping

شکل ۵ خطی زمان در هر گام با در نظرگیری المان درجه‌ی دوم ایزوپارامتریک سه‌گره‌ای^۶ برای گسسته‌سازی مرز عارضه [۴۹]، انتگرال‌های زمان معادله‌ی (۳) به صورت معادله‌ی (۴) تعیین می‌شود:

$$c(\xi)u^*(\xi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left[\int_{\Gamma} [U_1^{n+1}(x(\kappa), \xi) + U_2^{n+1}(x(\kappa), \xi)] N_n(\kappa) |J| d\kappa \right] q_n^* - \left[\int_{\Gamma} [Q_1^{n+1}(x(\kappa), \xi) + Q_2^{n+1}(x(\kappa), \xi)] N_n(\kappa) |J| d\kappa \right] u_n^* + u^{ff,N}(\xi), \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق، N شمارنده‌ی گام‌های زمانی و M تعداد کل المان‌های مرزی و Γ_m بیانگر بخشی از مرز است که المان 'm' بدان تعلق دارد. همچنین، N_α توابع شکل المان درجه‌ی دو با $\alpha = 1, 2, 3$ ، κ مبین سیستم مختصات محلی المان‌ها و $|J|$ دترمینان ژاکوبین برای تبدیل از سیستم مختصات کارترین به محلی می‌باشد.

۲-۳- حل پذیری

پس از گسسته‌سازی مرز هندسی عارضه مورد نظر، کلیه‌ی عناصر ماتریس حاصل از انتگرال‌گیری مکانی تعیین شده که فرم ماتریسی آن به صورت معادله‌ی (۵) خواهد بود [۴۴ و ۳۴]:

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

به‌طوریکه H^{N-n+1} و G^{N-n+1} به ترتیب مبین ماتریس‌های حاصل از انتگرال‌گیری مکانی هسته‌های دینامیکی اسکالر آرتوتروپ برای مؤلفه‌های ترکشن و تغییرمکان می‌باشند. $\{q^n\}$ و $\{u^n\}$ نیز بردارهای کمیت‌های گره‌ای مرزی در گام زمانی n را نشان می‌دهند. پس از اعمال شرایط مرزی بر مرزهای هندسی مدل، فرم قابل حل معادله‌ی (۵) مطابق معادله‌ی (۶) بدست می‌آید:

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

که در آن، $[A_1^1]$ و $[B_1^1]$ به ترتیب مبین ماتریس‌های متناظر با مقادیر مجهول و معلوم مرزی بوده و $\{X^N\}$ و $\{Y^N\}$ به ترتیب بردار

به کار گرفته شده است. در این تحقیق، از روش بارکان^۱ [۴۷] برای اعمال میرایی مصالح استفاده شده است. این روش مبتنی بر یک کاهش ثابت لگاریتمی دامنه‌ی پاسخ در هر گام زمانی می‌باشد که توسط [۴۸] در حوزه‌ی زمان مورد استفاده قرار گرفته است. براین‌اساس، معادله‌ی انتگرال مرزی به صورت معادله (۳) خواهد بود:

$$c(\xi)u(\xi, t) = \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t \left[\frac{u^*(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, \tau) \cdot e^{-2\kappa\xi(t-\tau)}}{q^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u(x, \tau) \cdot e^{-2\kappa\xi(t-\tau)}} \right] d\tau \right\} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi, t), \quad (3)$$

به‌طوریکه، Γ بیانگر مرز عارضه مورد نظر، $c(\xi)$ ضریب هندسه، u^{ff} تغییرمکان میدان آزاد و κ مبین ضریب کاهندگی یا میرایی مصالح محیط نیم‌فضا می‌باشد. u^* و q^* به ترتیب توابع گذرای گرین برای مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن در یک نیم‌فضای آرتوتروپ، u و q به ترتیب مقادیر تغییرمکان و ترکشن مرزی و ξ و x به ترتیب بردار موقعیت منبع موج و گیرنده می‌باشند. انتگرال‌های کانولوشن ریمان^۲ نیز به صورت $u^* \cdot q$ و $q^* \cdot u$ نشان داده شده‌اند. از حل گام‌به‌گام معادله‌ی انتگرال مرزی (۳) تغییرمکان و ترکشن برای کلیه‌ی گره‌های مرزی مسئله نتیجه می‌شود. همچنین، با اعمال تساوی $1/\nu = c(\xi)$ ، تغییرمکان برای کلیه‌ی نقاط درونی قابل محاسبه می‌باشد [۴۴].

۲-۲- عددی سازی

تعیین مقادیر مرزی تغییرمکان و ترکشن معادله‌ی (۳)، مستلزم حل انتگرال‌های زمانی^۳ و مکانی^۴ موجود می‌باشد. پیش از حل معادله‌ی فوق برای تعیین متغیرهای میدانی، لازم است به ترتیب محور زمان و مرز هندسی عارضه گسسته‌سازی شود. برای حل انتگرال‌های زمان و مکان به ترتیب از یک فرآیند تحلیلی و عددی بهره گرفته شده است. بدین ترتیب، با گسسته‌سازی محور زمان از $t=0$ تا $t=N$ گام مساوی با حد فاصل Δt و بهره‌گیری از توابع

^۱ Barkan Method

^۲ Riemann Convolution Integrals

^۳ Temporal Integrals

^۴ Spatial Integrals

^۵ Shape Functions

^۶ Three-Node Isoparametric Quadratic Elements

مقادیر مجهول و معلوم مرزی را نشان می‌دهند. $\{R^N\}$ نیز دربرگیرنده‌ی اثر تاریخچه‌ی دینامیکی گذشته در گام زمانی N بوده و مطابق رابطه‌ی (۷) تعریف می‌شود:

$$\{R^N\} = \sum_{n=1}^{N-1} (G^{N-n+1} \{q^n\} - H^{N-n+1} \{u^n\}), \quad (۷)$$

از حل معادله‌ی (۶) در هر گام زمانی، کلیه‌ی مقادیر مجهول مرزی اعم از مؤلفه‌های تغییر مکان و ترکشن برای هر گره‌ی مرزی مورد نظر بدست می‌آید. از بازنویسی رابطه‌ی (۵) برای هر نقطه‌ی درونی دلخواه، تغییر مکان‌های مجهول در هر نقطه‌ی درونی دلخواه نیز به سادگی قابل تعیین است.

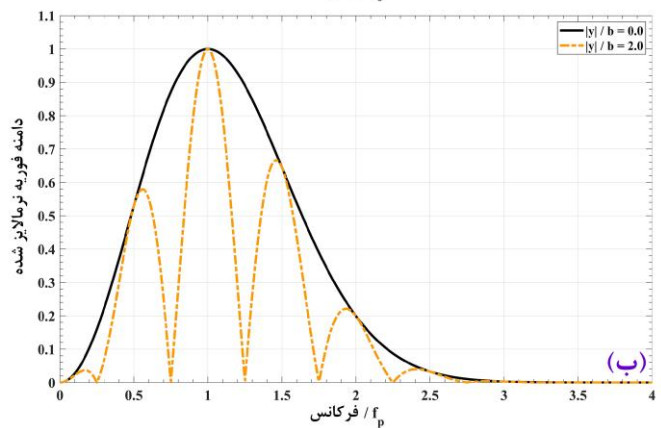
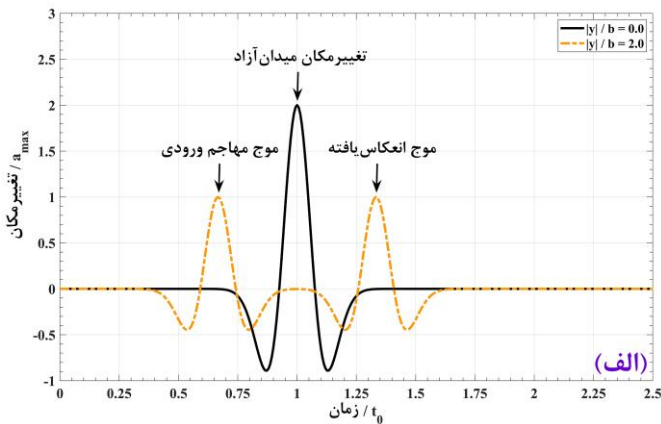
۲-۴- موج مهاجم

مطابق رابطه‌ی (۳)، برای تحلیل لرزه‌ای مسائل انتشار موج با استفاده از روش پیشنهاد شده، لازم است تغییر مکان میدان آزاد (u^{ff}) به عنوان ورودی مسأله تعریف شود. در این خصوص، از موجک ریکر^۱ [۵۰] به عنوان موج محرک ورودی استفاده شده است که تابع آن مطابق رابطه‌ی (۸) می‌باشد:

$$u^{ff}(x, z, t) = a_{max} \cdot \left(\left[1 - 2 \left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2 \right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2} H \left(t - \frac{r^{inc}}{c} \right) + \left[1 - 2 \left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2 \right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2} H \left(t - \frac{r^{ref}}{c} \right) \right), \quad (۸)$$

به‌طوریکه $u^{ff}(x, y, t)$ تغییر مکان میدان آزاد سطح زمین در مختصات (x, y) و زمان t می‌باشد. a_{max} دامنه‌ی حداکثر موج محرک ورودی، α^{inc} و α^{ref} به ترتیب فاز امواج مستقیم و انعکاسی را در موقعیت‌های r^{inc} و r^{ref} نشان می‌دهد. θ زاویه‌ی موج مهاجم نسبت به امتداد قائم بوده و C نیز مبین سرعت موج برشی محیط می‌باشد. شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی موجک ریکر در یک نقطه از سطح صاف زمین در فضای زمان و فرکانس می‌باشد.

^۱ Ricker Wavelet



شکل (۲) - نمودار موجک ریکر برای یک نقطه از سطح صاف زمین در حوزه‌ی (الف) زمان و (ب) فرکانس.

۲-۵- ناهمگنی آرتوتروپ

برای تحلیل لرزه‌ای ناهمگنی آرتوتروپ با استفاده از روش پیشنهاد شده، لازم است برخی تمهیدات ویژه در فرمول‌بندی لحاظ گردد. بنابراین، می‌بایست به کمک فرآیند زیرسازسازی، مسأله به چند ناحیه‌ی همگن تقسیم شده و شرایط پیوستگی در وجه میانی اقناع شود. اگرچه به دلیل ماهیت متفاوت مدول برشی در رفتار آرتوتروپ و وابستگی آن به محل استقرار گره‌های وجه میانی، لازم است برخی تغییرات در فرمول‌بندی در نظر گرفته شود، اما در نهایت مسأله در حالت معادلات کوپل در هر گام زمانی تحلیل می‌شود. بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۵) برای محیط نیم فضای آرتوتروپ پیرامون عارضه می‌توان نوشت:

$$\mu^{(1)} \cdot q_{12}^N = -\mu^{(2)} \cdot q_{21}^N, \quad (14)$$

در رابطه‌ی فوق، $\mu^{(1)}$ و $\mu^{(2)}$ به ترتیب معرّف مدول‌های برشی معادل^۱ برای محیط نیم‌فضا و عارضه می‌باشد. با توجه به ماهیت ارتوتروپی مصالح، بردار ترکشن در وجه میانی Γ_{ij} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_{ij} = c_{66} \frac{\partial u}{\partial x} n_x + c_{44} \frac{\partial u}{\partial z} n_z, \quad i = \overline{1,2}; \quad j = \overline{1,2}; \quad i \neq j \quad (15)$$

که q_{ij} بردار ترکشن در وجه میانی عارضه و n_x و n_z به ترتیب مؤلفه‌های بردار نرمال وجه میانی می‌باشند. از رابطه‌ی (۱۵) می‌توان دریافت، در هر گره از وجه میانی، نه تنها بردار ترکشن، بلکه مدول برشی معادل نیز بسته به موقعیت استقرار گره، سهمی از مدول‌های برشی در امتدادهای مختلف را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین برای مدول برشی معادل در هر گره‌ی وجه میانی می‌توان نوشت:

$$\mu^{(j)} = c_{66} \cdot n_x + c_{44} \cdot n_z, \quad (16)$$

در این رابطه، $\mu^{(j)}$ معرّف مدول برشی معادل محیط j ام می‌باشد. همچنین، برای n_x و n_z نیز می‌توان به ترتیب نوشت:

$$n_x = \frac{dx_2(\kappa) / d\kappa}{|J|}, \quad (17)$$

و

$$n_z = \frac{-dx_1(\kappa) / d\kappa}{|J|}, \quad (18)$$

در رابطه‌ی فوق، $|J|$ برابر است با:

$$|J| = \sqrt{\left(\frac{dx_i(\kappa)}{d(\kappa)}\right)^2}, \quad i = 1,2 \quad (19)$$

که در آن،

$$x_i(\kappa) = N_\alpha(\kappa) \cdot x_{i\alpha}, \quad i = 1,2; \quad \alpha = 1,2,3 \quad (20)$$

$$H_{12}^1 u_{12}^N = G_{12}^1 q_{12}^N + R_{12}^N + u_{12}^{ff.N}, \quad (9)$$

در این معادله، زیرنویس 12 معرّف گره‌های وجه میانی محیط نیم‌فضا در تماس با ناهمگنی زیرزمینی می‌باشد. همچنین، u_{12}^N و q_{12}^N به ترتیب تغییرمکان و ترکشن وجه میانی Γ_{12} می‌باشد. $u_{12}^{ff.N}$ بیانگر حرکت میدان آزاد گره‌های وجه میانی بوده و R_{12}^N اثر تاریخچه‌ی دینامیکی گام‌های زمانی گذشته را در گام زمانی N مطابق زیر نشان می‌دهد:

$$R_{12}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{12}^{N-n+1} q_{12}^n - H_{12}^{N-n+1} u_{12}^n), \quad (10)$$

به‌طور مشابه با برقراری روابط (۹) و (۱۰) برای محیط عارضه می‌توان نوشت:

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

که در آن،

$$R_{21}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{21}^{N-n+1} q_{21}^n - H_{21}^{N-n+1} u_{21}^n), \quad (12)$$

به‌طوریکه زیرنویس 21 معرّف گره‌های وجه میانی عارضه‌ی متصل شده به نیم‌فضا، u_{21}^N و q_{21}^N به ترتیب مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن وجه میانی Γ_{21} و R_{21}^N نیز تاریخچه‌ی دینامیکی گذشته در گام زمانی N برای گره‌های محیط عارضه را نشان می‌دهد.

۲-۶- سرهم‌سازی

با سرهم‌سازی معادلات (۹) تا (۱۲) به کمک شرایط پیوستگی تغییرمکان و ترکشن در وجوه میانی، فرآیند تحلیل در یک سیستم کوپل در هر گام زمانی انجام می‌شود. چنانچه محیط به صورت ایزوتروپ فرض شود، با توجه به خاصیت انحصاری مدول برشی، این شرایط به سادگی قابل اعمال می‌باشد. لکن در حالت ارتوتروپ، شرایط پیوستگی وجه میانی Γ_{ij} مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$u_{12}^N = u_{21}^N, \quad (13)$$

^۱ Equivalent Shear Modulus

به طوریکه، $|J|$ درمیان ژاکوبین بوده و $x_i(\kappa)$ مختصات هر مان درجه‌ی دوم در سیستم مختصات محلی را نشان می‌دهد. بنابراین با اقتناع شرایط پیوستگی (۱۳) و (۱۴)، فرم نهایی ماتریس گونه‌ی معادلات کوپل شده‌ی ارتوتروپ اصلاح شده برای تحلیل در هر گام زمانی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} H_{12}^1 & \frac{-1}{\mu^{(1)}} G_{12}^1 \\ H_{21}^1 & \frac{1}{\mu^{(2)}} G_{21}^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{12}^N \\ q_{12}^N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{12}^N \\ R_{21}^N \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_{12}^{ff-N} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

از حل معادله‌ی فوق، کلیه‌ی مقادیر مجهول وجوه میانی اعم از تغییرمکان و ترکشن بدست می‌آیند. همچنین با تساوی $c(\xi) = 1/0$ در معادله‌ی (۳)، تغییرمکان سطح زمین طی فرآیندی مشابه فوق، قابل محاسبه می‌باشد.

۳- روش شناسی

در این پژوهش، G.S. بیانگر سطح زمین^۱ بوده و x/b بیانگر محدوده‌ی سطح زمین است که نسبت به نصف عرض عارضه‌ی مورد نظر (b) بی‌بعد شده است. DR و SR به ترتیب معرف نسبت عمق^۲ و نسبت شکل^۳ عارضه می‌باشند. دامنه‌ی تغییرمکان نرمالایز شده^۴ (NDA) عبارت است از نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییرمکان سطح زمین حاصل از روش اجزای مرزی در یک فرکانس معین، بر دامنه‌ی فوریه‌ی امواج مهاجم در فرکانس مذکور. عامل ایزوتروپی^۵ (IF) نیز نسبت مؤلفه‌ی سرعت موج برشی افقی به قائم (c_x/c_z) می‌باشد که به صورت رابطه‌ی ($IF = \sqrt{\mu_x/\mu_z}$) در یک محیط ارتوتروپ لحاظ می‌شود. در این رابطه، μ_x و μ_z به ترتیب مدول برشی محیط در امتداد محور x و z هستند [۳۹]. در صورتی که محیط به صورت ایزوتروپ فرض شود (عامل ایزوتروپی برابر واحد)، μ_x در تساوی با μ_z خواهد بود. اما برای محیط‌های ارتوتروپ، نسبت‌های $\mu_x = \mu_z$ ، $\mu_x = 1/5 \mu_z$ ، $\mu_x = 1/5 \mu_z$ و $\mu_x = 1/5 \mu_z$

^۱ Ground Surface

^۲ Depth Ratio

^۳ Shape Ratio

^۴ Normalized Displacement Amplitude (NDA)

^۵ Isotropy Factor

$\mu_z = \mu_x$ در نظر گرفته شده و عوامل ایزوتروپی $1/414$ ، $1/225$ ، $1/16$ و $0/707$ به ترتیب شکل می‌گیرند. نسبت امیدانس^۶ بیانگر اختلاف سختی مصالح بوده و از طریق رابطه‌ی ($I = \rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$) محاسبه می‌شود که ρ_2 و c_2 مبین دانسیته و سرعت موج برشی عارضه و ρ_1 و c_1 معرف پارامترهای یاد شده برای دامنه می‌باشند. فرکانس بی‌بعد (η) به صورت رابطه‌ی ($\eta = \omega b / \pi c$) تعریف می‌گردد که ω بیانگر فرکانس زاویه‌ای موج، b نصف عرض عارضه و c معرف سرعت موج برشی معادل محیط می‌باشد. پریود بی‌بعد^۷ (P) عکس فرکانس بی‌بعد بوده و به صورت ($P = 1/\eta$) تعریف می‌شود. دامنه^۸ نیز نسبت تغییرمکان سطح زمین بر شتاب بیشینه‌ی موج ورودی می‌باشد. لازم به ذکر است، برای تسهیل فرآیند همگرایی نتایج، در کلیه‌ی مثال‌های ارائه شده، میرایی مصالح (ξ) برابر با 5% اعمال شده است. تمامی مدل‌ها در معرض امواج مهاجم برون صفحه‌ی SH از نوع ریکر [۵۰] با فرکانس غالب $3/0$ هرتز (Hz) و دامنه‌ی بیشینه‌ی $0/01$ متر قرار گرفته‌اند که به صورت قائم، افقی و مورب به سمت عوارض مورد نظر تابانده شده است. شایان ذکر است، به دلیل فقدان مطالعات ارتوتروپ در مقایسه با تحقیقات ایزوتروپ، به ویژه در رابطه با سنجش رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی، اثر ارتوتروپی در برخی مثال‌ها با همگرایی تدریجی خواص مصالح ارتوتروپ به حالت ایزوتروپ و همخوانی پاسخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۱- صحت‌سنجی

در شکل (۳)، پاسخ ارتوتروپ یک ناهمگنی دایره‌ای زیرزمینی با نسبت عمق برابر با $2/0$ در معرض امواج مهاجم قائم و افقی SH با نتایج [۵۱] مقایسه شده است. در مطالعه‌ی مزبور از روش اجزای مرزی مستقیم فضای کامل در حوزه‌ی فرکانس به منظور محاسبه‌ی تغییرمکان‌های سطح زمین بهره گرفته شده است. نتایج در محدوده‌ی $b = 10$ تا $10b$ از سطح زمین و برای فرکانس‌های بی‌بعد $0/5$ و $1/0$

^۶ Impedance Ratio

^۷ Dimensionless Period

^۸ Amplitude

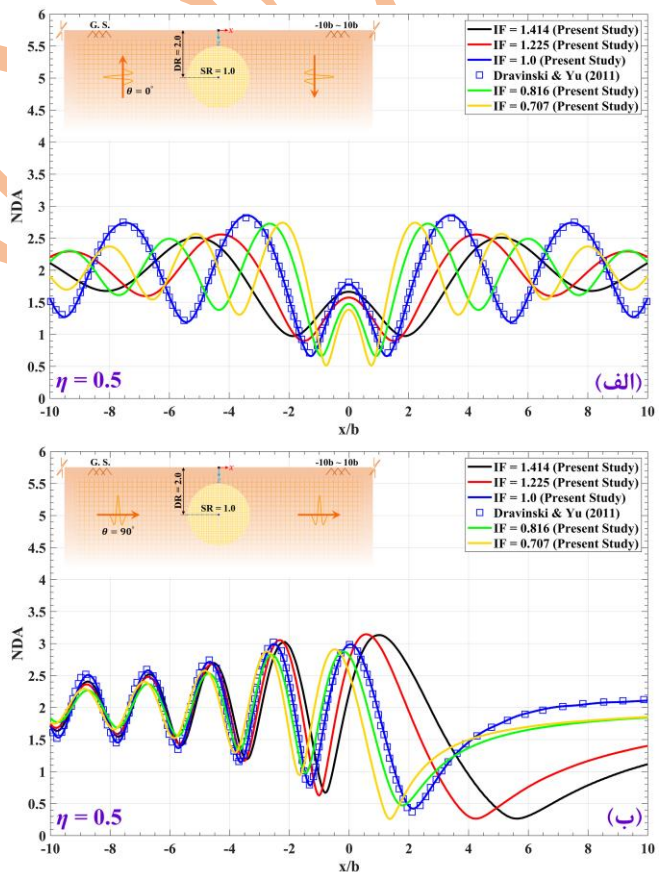
۴- کاربردها

حضور محیط‌های ناهمگن بسته‌ی زیرزمینی که غالباً به صورت لزه‌ها، عدسی‌ها و کارست‌های انباشه از مواد رسوبی در چینه‌بندی زمین وجود دارند، به لزوم آئین‌نامه‌های لرزه‌ای برای شناخت بهتر این قسم عوارض صحه گذاشته است. بنابراین در این بخش به تحلیل گذرای سطح زمین در حضور عوارض مزبور، تحت امواج زمین‌لرزه پرداخته شده است. در تهیه‌ی مدل مزبور از روش پیشنهاد شده‌ی در پژوهش حاضر مبتنی بر تکنیک زیرسازه‌سازی استفاده شده است. مطابق جدول (۱)، ناهمگنی از جنس ماسه‌سنگ به ترتیب با سرعت موج برشی و دانسیته‌ی برابر 800 m.s^{-1} و 2000 kg.m^{-3} و سنگ بستر از جنس شیل با متوسط سرعت موج برشی و دانسیته‌ی 1800 m.s^{-1} و 2700 kg.m^{-3} در حالت ایزوتروپ فرض شده است. نسبت امپدانس مدل در حالت ایزوتروپ برابر 0.33 منظور شده است که مبین نرمی 67% درصدی مصالح تشکیل دهنده‌ی ناهمگنی نسبت به سنگ بستر می‌باشد. در انجام مطالعه‌ی عددی، از پنج مقطع دایروی با نسبت شکل 0.5 ، 0.75 ، 1.0 ، 1.33 و 2.0 بهره گرفته شده است. شایان ذکر است، نسبت شکل ناهمگنی به صورت نسبت شعاع قائم به افقی تعریف شده است. ناهمگنی در نسبت عمق (DR) برابر با $1/5$ استقرار یافته، عامل ایزوتروپی مصالح عارضه مزبور و محیط پیرامون آن برابر فرض شده و میرایی مصالح نیز در هر دو محیط برابر 5% اعمال شده است.

۴-۱- تصویر لحظه‌ای^۱

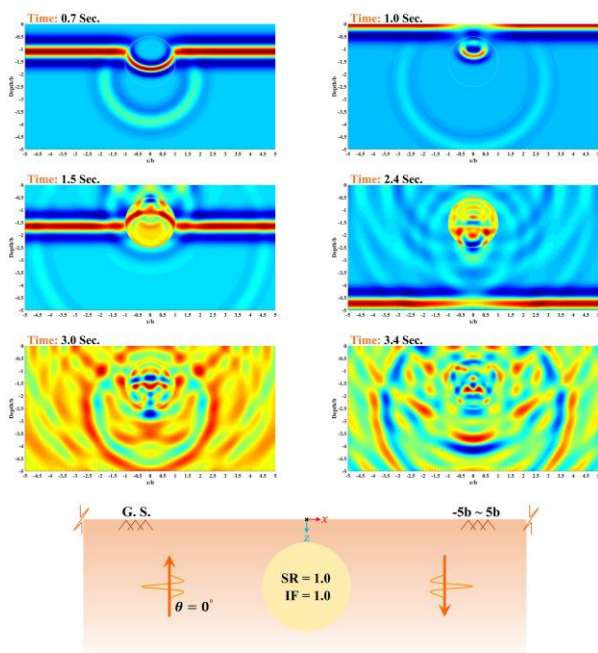
در شکل‌های (۴) الی (۶) تصویر لحظه‌ای ناهمگنی و محیط پیرامون در برخی لحظات کلیدی نشان داده شده است. در تهیه‌ی این نتایج، به ترتیب از نسبت شکل‌های 0.5 ، 1.0 و 2.0 برحسب عوامل ایزوتروپی 0.14 ، 1.0 و 0.707 استفاده شده است. حد فاصل $5b$ تا $5b$ و 0 تا $5b$ به ترتیب برای سطح زمین و عمق در نظر گرفته است. تعداد 61776 و 19881 نقطه‌ی درونی به ترتیب در نیم‌فضا و ناهمگنی دایره‌ای تعریف شده است. هنگامی که

ارائه شده‌اند. نسبت امپدانس برای مدل ایزوتروپ برابر با 0.3 لحاظ شده است. مسأله در 1000 گام زمانی با حد فاصل Δt برابر با 0.06 ثانیه و پارامتر شیفت زمان $1/6$ و $3/7$ ثانیه به ترتیب برای تابش موج قائم و افقی تحلیل شده است. تعداد المان‌های مرزی منظور شده بر مرز ناهمگنی برابر با 94 المان یا 188 گره می‌باشد. چنانچه در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نتایج حاضر هماهنگی و انطباق مناسب با نتایج عددی [۵۱] را دارا می‌باشد. شایان ذکر است، به سبب شهود اختلاف خواص ارتوتروپی مصالح در قیاس با حالت همسان، عامل ایزوتروپی مصالح متشکل ناهمگنی و بستر پیرامون به صورت یکسان فرض شده است.

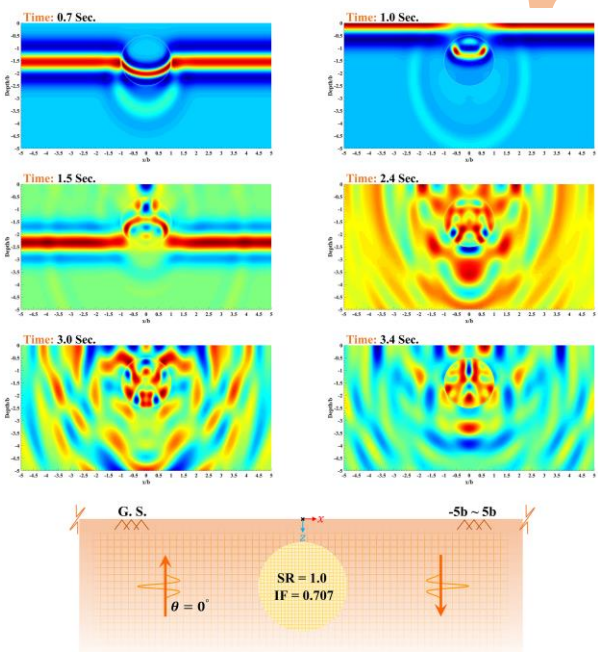


شکل (۳)- دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در مقابل x/b برای ناهمگنی دایره‌ای ارتوتروپ واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ($\zeta = 0.5$) برای نسبت عمق $2/0$ و فرکانس بی‌بعد 0.5 در برابر امواج مهاجم (الف) قائم و (ب) افقی SH.

^۱ Snapshot

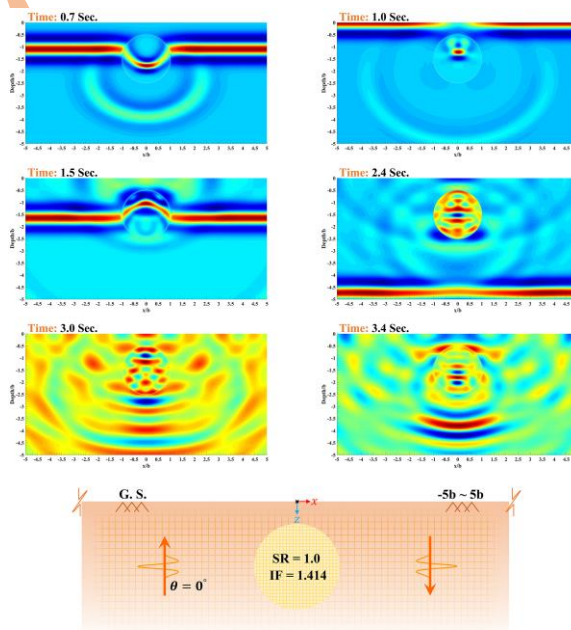


شکل (۵)- تصویر لحظه‌ای پراکنش و تفرق موج مهاجم قائم SH در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) با عامل ایزوتروپی واحد.



شکل (۶)- تصویر لحظه‌ای پراکنش و تفرق موج مهاجم قائم SH در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) با عامل ایزوتروپی 0.707 .

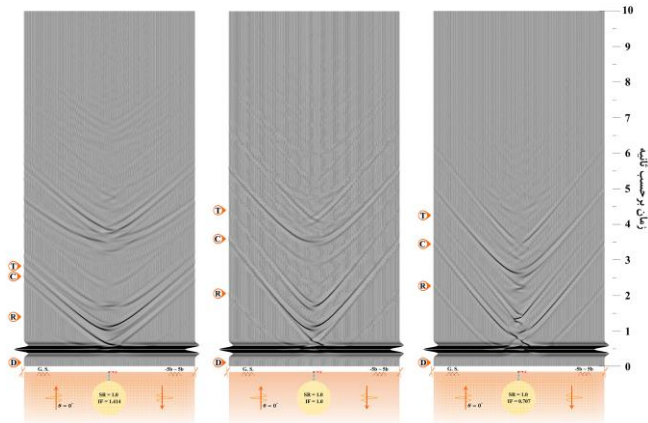
امواج مهاجم لرزه‌ای قائم به مرز تحتانی ناهمگنی دایروی برخورد می‌کند، بخشی از آن به دلیل امپدانس مصالح دچار انعکاس شده و با گذر زمان از محیط خارج می‌شود. اما بخش قابل توجه از این امواج وارد مصالح عارضه شده که حجم تداخل امواج با انعکاس جبهه‌ی موج از سطح زمین ازدیاد می‌یابد. در این حالت، رفتار متقابل مرز عارضه مانع از خروج آسان امواج از درون عارضه می‌شود. بنابراین، انعکاس‌های متناوب از ثانیه $2/4$ در ناهمگنی مشاهده می‌شود. با هر بار برخورد امواج محصور به مرز پیرامون، بخشی از آن انکسار یافته و وارد محیط شده و بخش دیگر در فرآیند احتباس باقی می‌ماند. در IF برابر $1/414$ ، تمایل بیشتر امواج به پراکنش و تفرق در راستای افقی و کاهش اثر فازهای انعکاسی، خزشی و احتباسی همواره مشاهده می‌شود. مطابق نتایج (شکل‌های ۴ تا ۶)، در ثانیه‌ی $0/7$ و در حداقل و حداکثر IF به ترتیب بیشترین و کمترین حجم امواج گذرا وارد مصالح ناهمگنی شده است. از سوی دیگر، IF برابر $0/707$ موجب برخورد شدید امواج به مرز پیرامون ناهمگنی شده که این پدیده در ثانیه‌ی $2/4$ به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۶). در این میان، هندسه‌ی دوار عارضه موجب تسهیل در تشکیل فاز خزشی موج می‌شود.



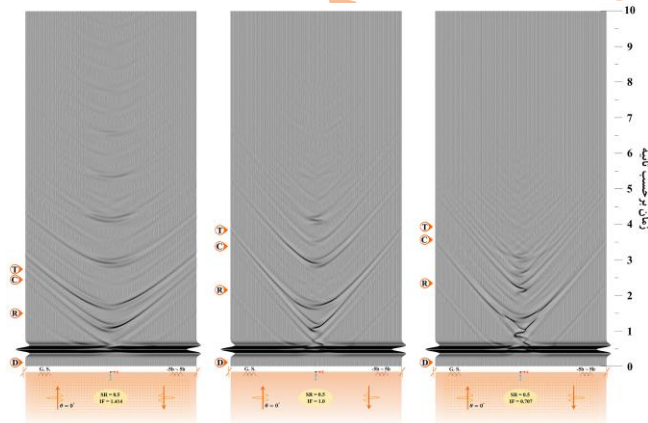
شکل (۴)- تصویر لحظه‌ای پراکنش و تفرق موج مهاجم قائم SH در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) با عامل ایزوتروپی $1/414$.

۲-۴- نتایج حوزه‌ی زمان

نسبت شکل ۲/۰ (شکل ۹)، میزان خزش امواج بر روی مرز عارضه افزایش یافته و دامنه‌ی خزشی قوی‌تر بر روی سطح زمین به چشم می‌خورد. در IF برابر ۱/۴۱۴، به دلیل تمایل امواج به پراکنش در راستای افق و درگیری اندک با عارضه، کاهش ارتعاش پاسخ و زمان همگرایی حاصل شده است.



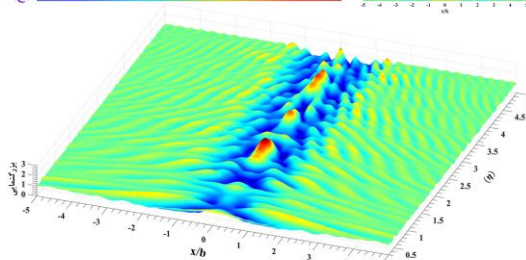
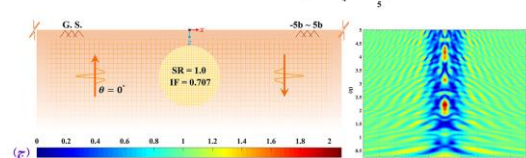
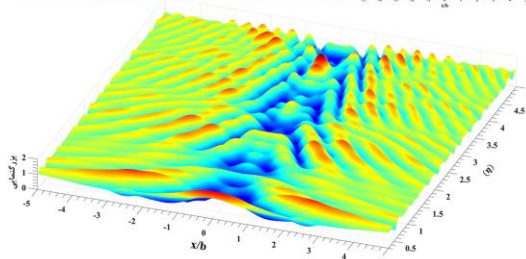
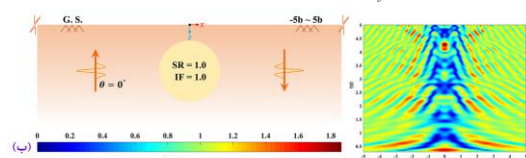
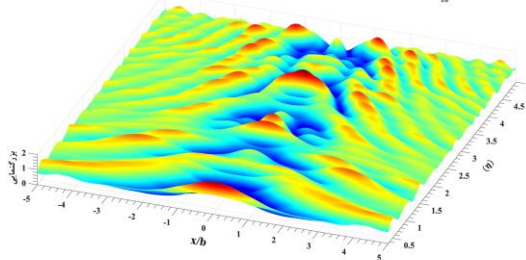
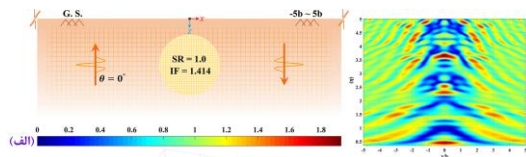
شکل (۷) - الگوی کلی پاسخ تاریخی‌ی زمانی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل واحد مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .



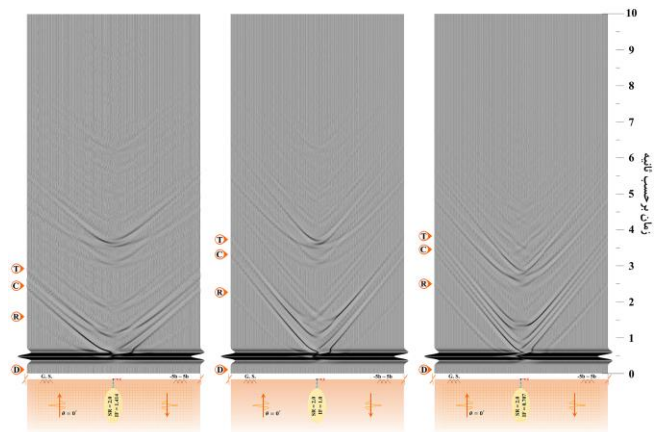
شکل (۸) - الگوی کلی پاسخ تاریخی‌ی زمانی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵ مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

در شکل‌های (۷) الی (۹) الگوی پراکنش و تفرق امواج لرزه‌ای قائم در برخورد با ناهمگنی زیرزمینی در نسبت شکل‌های ۱/۰، ۰/۵ و ۲/۰ نشان داده شده است. مطابق بخش پیشین، نتایج در عوامل ایزوتروپی ۱/۴۱۴، ۱/۰ و ۰/۷۰۷ ارائه و حد فاصل سطح زمین در بازه‌ی $5b$ تا $5b$ تعریف شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در برخورد امواج به عارضه، بخشی از آن به صورت مستقیم از مرز عارضه منعکس شده و بخشی دیگر بر روی مرز ناهمگنی خزش یافته و پس از انحراف از مسیر اولیه به سطح زمین برخورد می‌نماید. بخش سوم نیز با دخول به مصالح ناهمگنی سبب تکرر انعکاسی و متعاقباً آشفتگی پاسخ سطح زمین می‌شود. جهت تفسیر نتایج، مشابه قبل ایستگاه‌هایی با علائم اختصاری D, R, C و T تعریف شده است. با اعمال جبهه‌ی موج قائم، متعاقباً پاسخ بدست آمده به صورت متقارن حاصل می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود، در مقطع دایروی عارضه (شکل ۷)، دامنه‌ی امواج خزشی افزایش می‌یابد. هرچه مقطع ناهمگنی دوارتر باشد، خزیدن امواج بر روی مرز آن با سهولت بیشتر صورت می‌گیرد و دامنه‌ی قوی‌تر حاصل می‌شود. با توجه به نسبت اِمدانس، مصالح ناهمگنی ۶۶/۷ درصد نرم‌تر از مصالح محیط پیرامون فرض شده است. بنابراین مرز عارضه در احتباس امواج نقش بسزایی دارد. از سوی دیگر، هرچه محیط احاطه شده توسط ناهمگنی وسیع‌تر باشد، حجم بیشتری از امواج را به درون خود جذب نموده و ارتعاش قوی‌تر در پاسخ سطح مشاهده می‌شود. در نسبت شکل ۰/۵ (شکل ۸) با کاهش محیط ناهمگنی، انعکاس امواج از بخش زیرین عارضه ازدیاد می‌یابد. هرچه محیط ناهمگنی کوچک‌تر باشد، تکرر انعکاس موج افزایش یافته و تضاداً مدت زمان تعویق در انعکاس‌ها کاهش می‌یابد. چنانچه در حداکثر IF مشاهده می‌شود، چینه‌بندی افقی مصالح رسوبی تشکیل‌دهنده‌ی عارضه و محیط پیرامون آن از یک سو و هندسه‌ی منحصر بفرد عارضه از سوی دیگر، در ممانعت بیشتر خروج امواج از محیط مسأله سهیم هستند. در

کمترین میزان بزرگنمایی نسبت به حالات پیشین حاصل شده است. آن چه مسلم است، ناهمگنی با نسبت شکل مذکور، تأثیر اندک بر امواج لرزه‌ای دارد. در این حالت، بیشینه‌ی بزرگنمایی در IF برابر $1/414$ به میزان $1/68$ به وقوع پیوسته است.



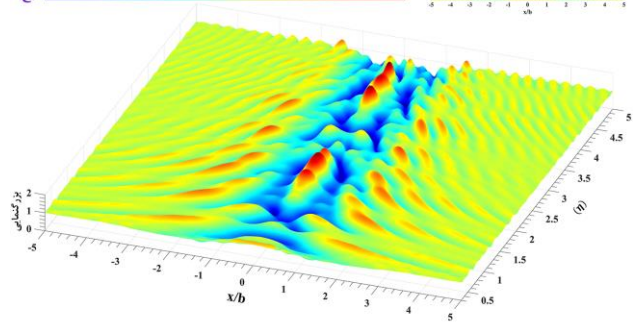
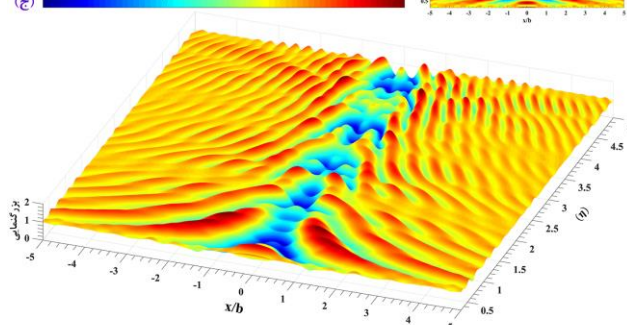
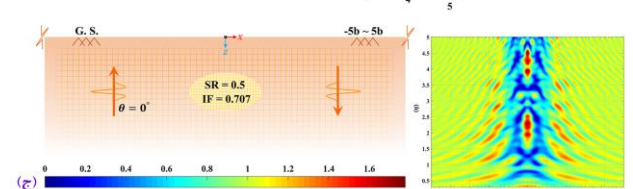
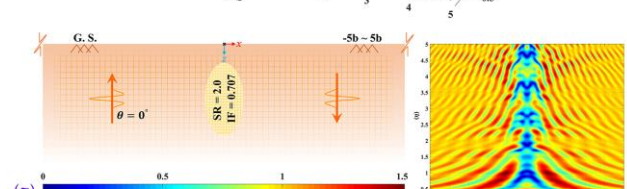
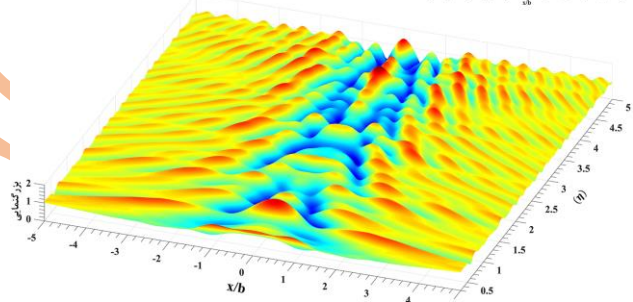
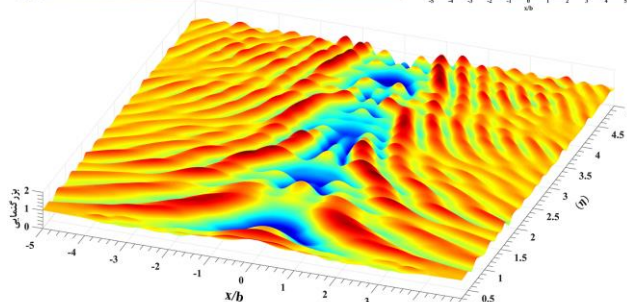
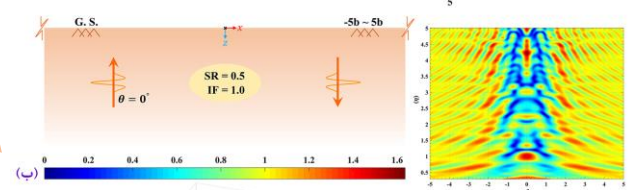
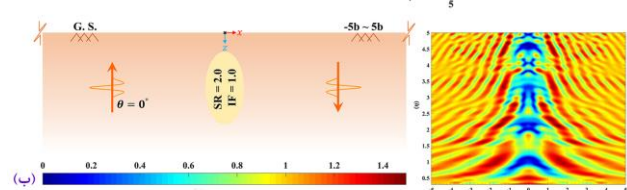
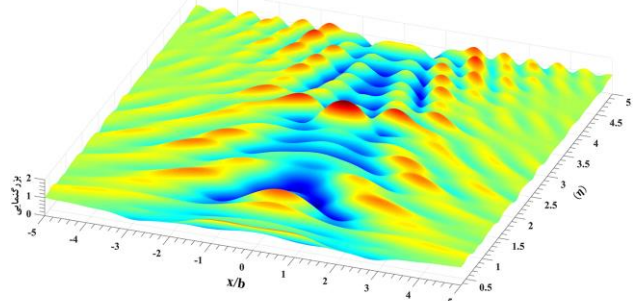
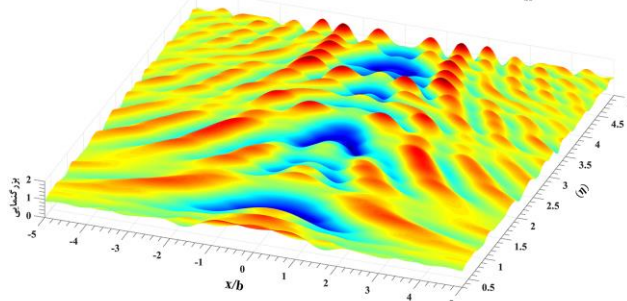
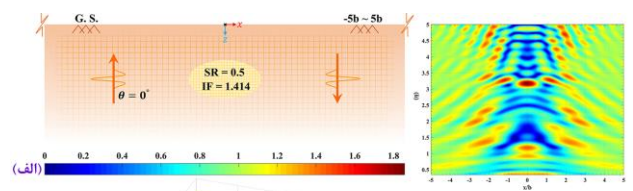
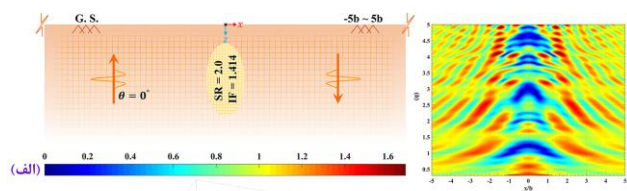
شکل (۱۰) - الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$)



شکل (۹) - الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل $2/0$ مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

۳-۴ - الگوی بزرگنمایی

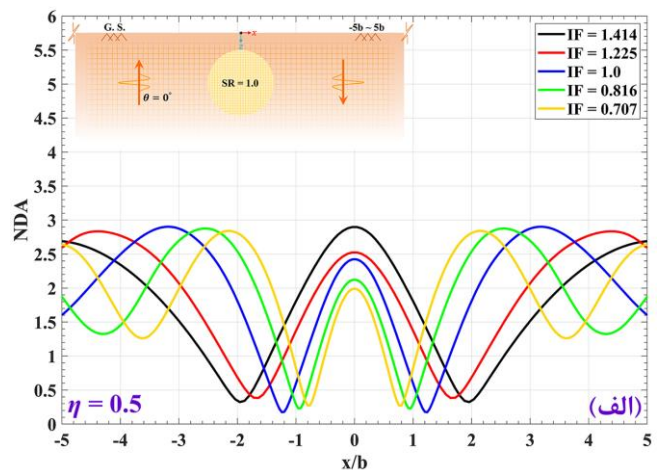
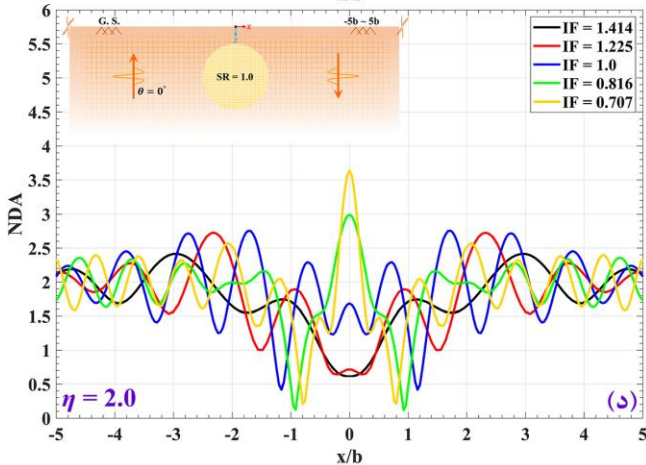
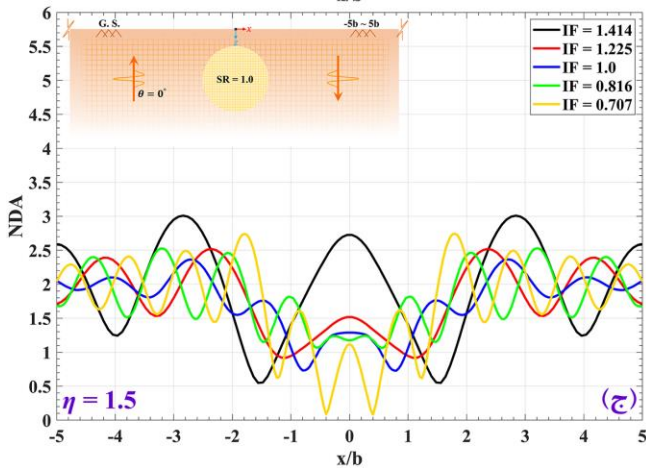
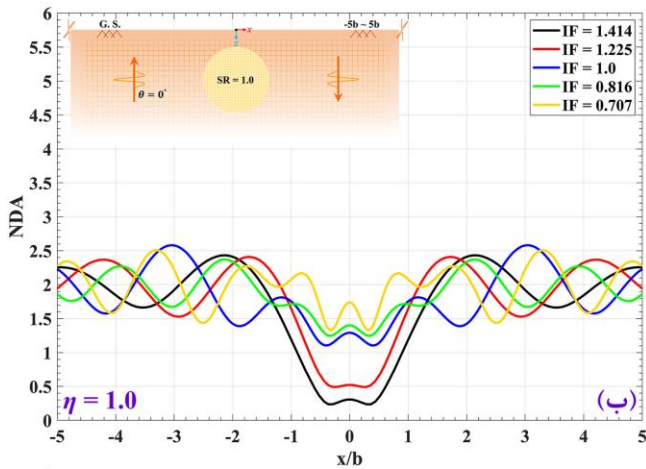
در این بخش، الگوی بزرگنمایی سه‌بعدی سطح زمین در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، هنگامی که ناهمگنی به صورت دایره‌ای می‌باشد (شکل ۱۰) به دلیل اشغال فضای بزرگتر، جذب حجم بیشتر امواج به درون آن میسر می‌شود. با توجه به اینکه در IF برابر 0.707 (چینه‌بندی قائم در مصالح رسوبی) تا حد زیادی از تفرق امواج در امتداد افق ممانعت می‌شود، سهم چشم‌گیر امواج در راستای قائم پراکنش می‌یابد. بنابراین، حداکثر بزرگنمایی به مقدار $2/08$ در IF برابر 0.707 به وقوع می‌پیوندد. از مقایسه‌ی الگوهای پاسخ به خوبی اثر ایزولاسیون عارضه بر سطح و همچنین نواحی تمرکز بزرگنمایی ناشی از عامل ایزوتروپی مشاهده می‌شود. هنگامی که نسبت شکل ناهمگنی برابر با 0.5 می‌باشد (شکل ۱۱)، حجم کمتری از امواج لرزه‌ای وارد ناهمگنی شده و در آن محصور می‌شود. بنابراین، بیشینه‌ی بزرگنمایی به مقدار $1/86$ در IF برابر $1/414$ حاصل شده است. از مقایسه‌ی الگوهای پاسخ در عوامل ایزوتروپی مختلف ملاحظه می‌گردد، اگرچه در IF برابر 0.707 مسیر بزرگنمایی بر خط مرکزی ناهمگنی متمرکز شده است، اما به علت عرض کم ناهمگنی، تأثیر حضور آن بر روی پاسخ سطح زمین کم‌رنگ می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود، در نسبت شکل $2/0$ (شکل ۱۲)



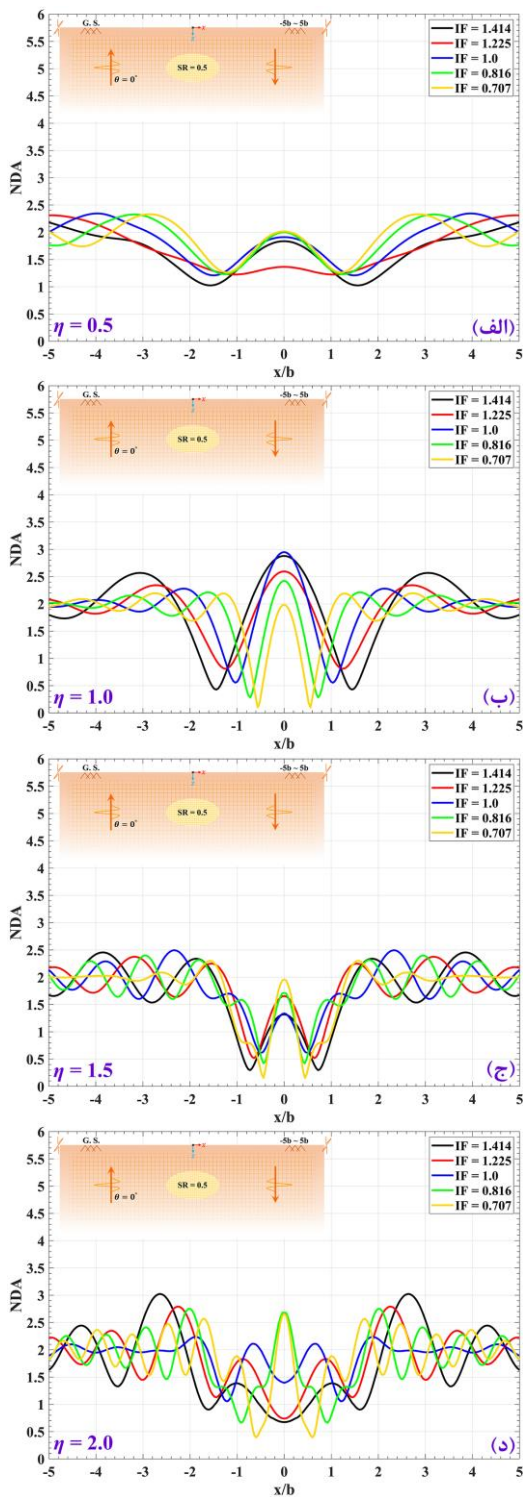
شکل (۱۲) - الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل ۲/۰، مدفون در نیم‌فضای میرا شدهی آرتوتروپ (۰/۵ = ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

شکل (۱۱) - الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵، مدفون در نیم‌فضای میرا شدهی آرتوتروپ (۰/۵ = ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

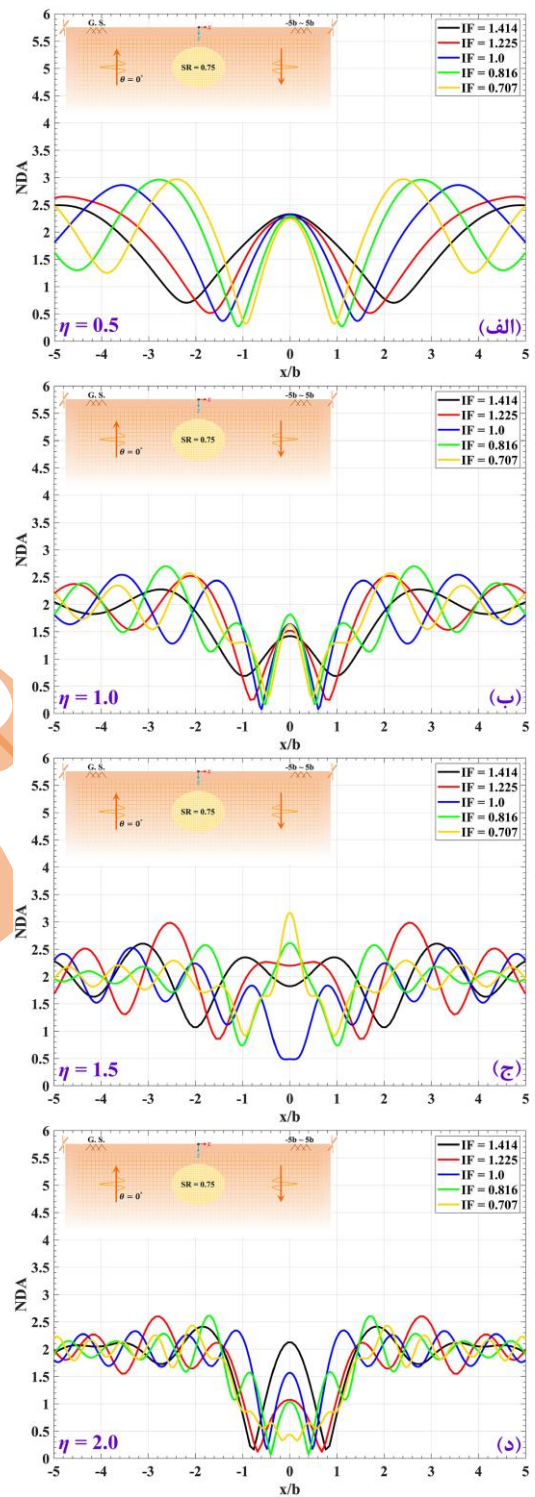
در شکل‌های (۱۳) الی (۱۷) تغییر مکان سطح زمین در حضور ناهمگنی زیرزمینی با نسبت شکل‌های مختلف برای فرکانس‌های بی‌بعد ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس، میزان ارتعاش پاسخ همواره افزایش یافته است. تغییر مکان حداکثر در خط مرکزی ناهمگنی دایره‌ای برابر ۳/۶۴ در فرکانس ۲/۰ و برای IF برابر ۰/۷۰۷ حاصل شده است. مشابه نتایج قبل، کمینه‌ی عامل ایزوتروپی موجب تمرکز فازهای موج در امتداد قائم و پیرامون عارضه شده است. در ناهمگنی بیضی شکل، عملکرد ایزولاسیون قوی‌تر نسبت به ناهمگنی دایره‌ای در کاهش پاسخ به چشم می‌خورد. در نسبت شکل‌های ۰/۷۵ (شکل ۱۴) و ۰/۵ (شکل ۱۵)، هندسه‌ی عارضه موجب انعکاس معکوس موج از مرز تحتانی، تفرق امواج به سوی نواحی پیرامونی و ممانعت از تشکیل فاز خزشی موج شده است. از سوی دیگر، کوچک بودن ابعاد ناهمگنی موجب کاهش حجم امواج محصور درونی شده است. عوامل مزبور موجب کاهش چشم‌گیر تغییر مکان نسبت به حالت دایره‌ای شده است. همچنین، به خوبی تأثیر ناهمگنی در ایجاد شکاف در جبهه‌ی موج برای نسبت شکل‌های ۱/۳۳ (شکل ۱۶) و ۲/۰ (شکل ۱۷) مشاهده می‌شود. در این حالات، محدوده‌ی ایزولاسیون ناشی از حضور عارضه با افزایش عامل ایزوتروپی گسترش یافته و فضای ایمن در موقعیت استقرار ناهمگنی پدید می‌آید.



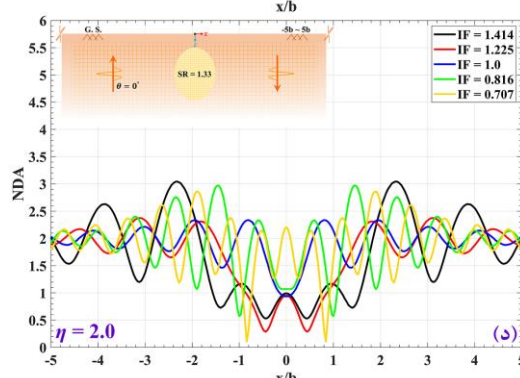
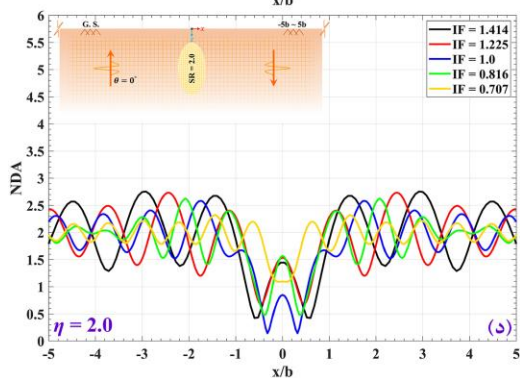
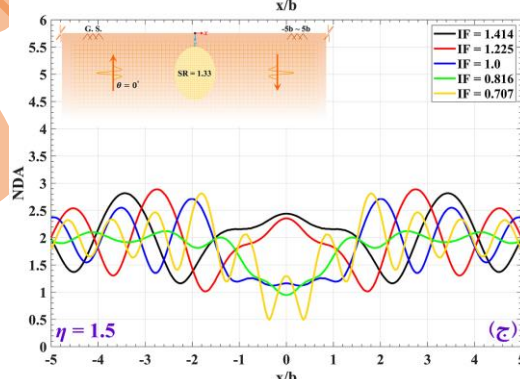
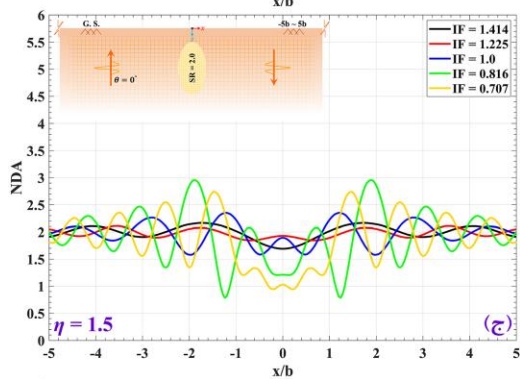
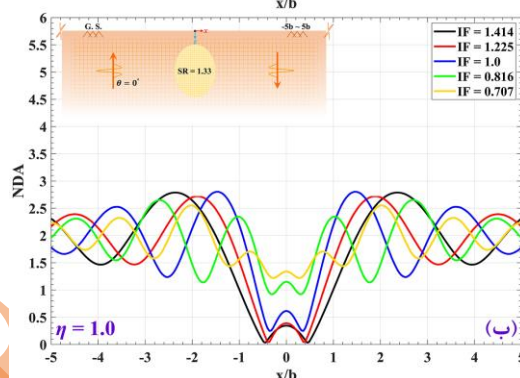
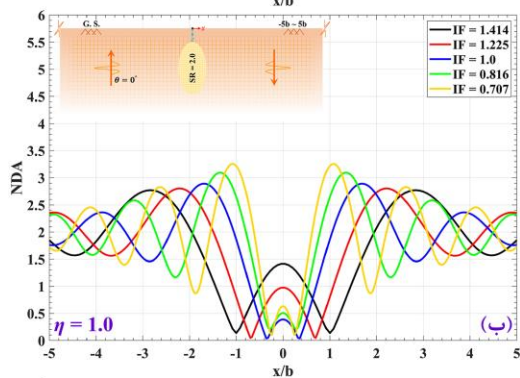
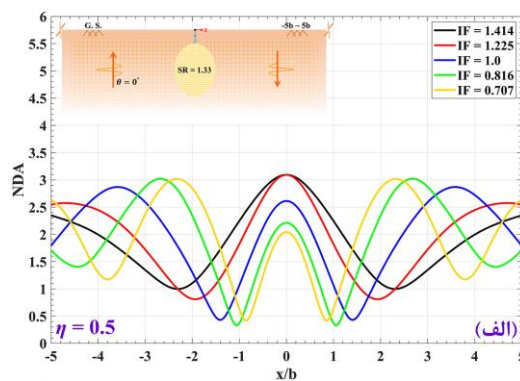
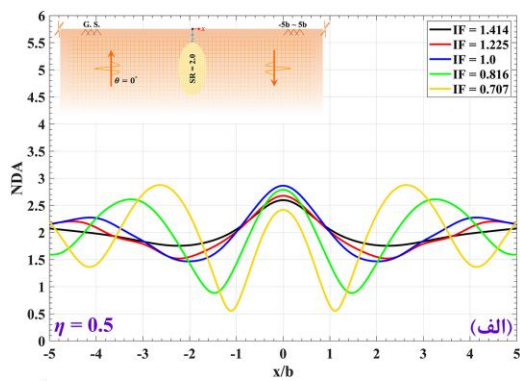
شکل (۱۳) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\gamma = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .



شکل (۱۵) - دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ (۰/۵ = ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH .



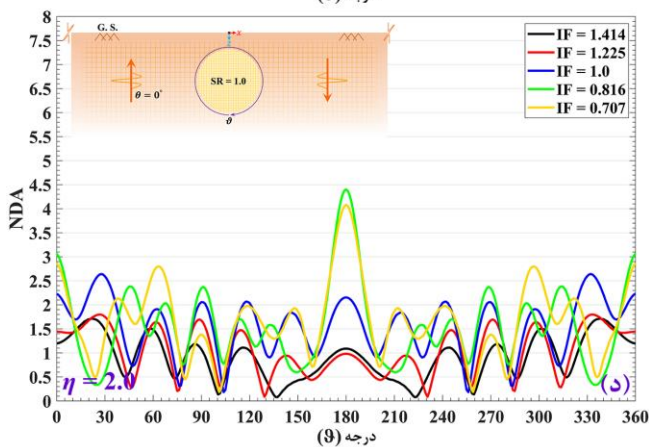
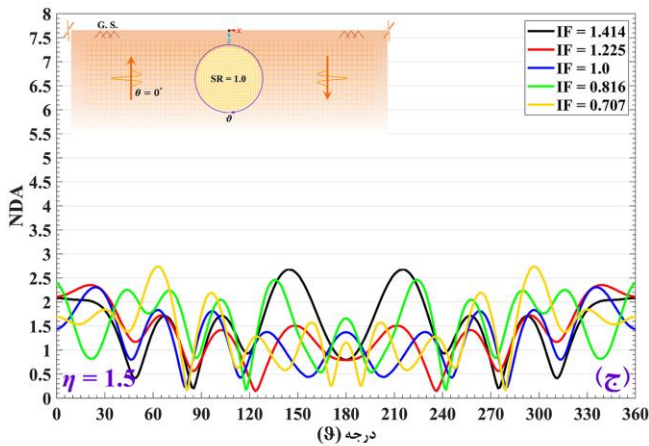
شکل (۱۴) - دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل ۰/۷۵، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ (۰/۵ = ζ) در برابر امواج مهاجم قائم SH .



شکل (۱۷) - دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل ۲/۰، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

شکل (۱۶) - دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت شکل ۱/۳۳، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

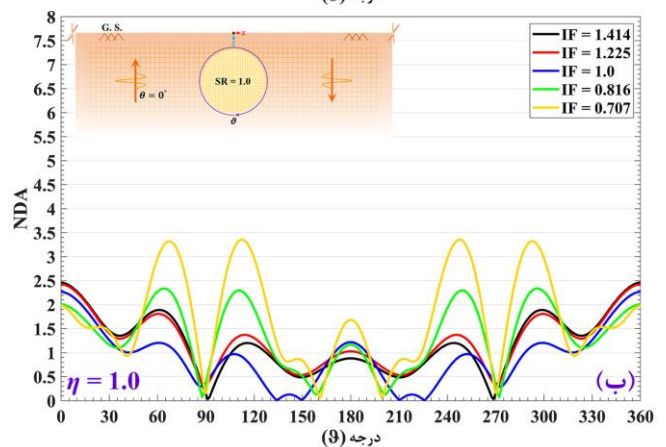
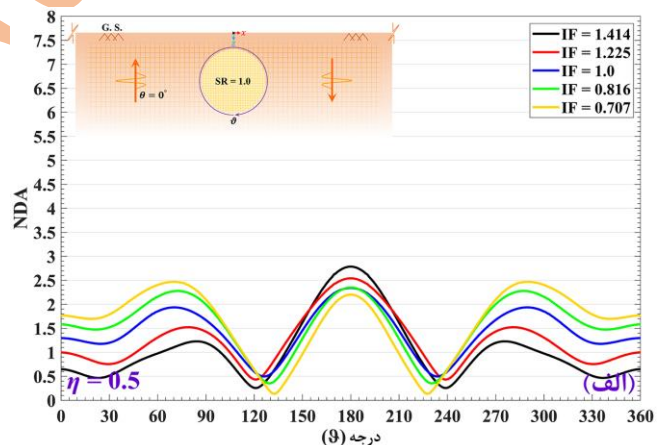
در شکل‌های (۱۸) تا (۲۲) تغییر مکان پیرامون ناهمگنی ارتوتروپ واقع در نیم‌فضای ارتوتروپ برای نسبت شکل‌های مختلف به نمایش گذاشته شده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد، شرایط بحرانی در حداکثر تغییر مکان ناحیه‌ی فوقانی ناهمگنی دایره‌ای به میزان $4/4$ در IF برابر $0/816$ حاصل شده است. چنانچه در نسبت شکل $0/5$ مشاهده می‌شود (شکل ۲۰)، بیشینه‌ی تغییر مکان در حداقل عامل ایزوتروپی و در نواحی جانبی نزدیک به خط مرکزی ایجاد شده است. در این حالت، با توجه به دخول حجم بیشتر امواج لرزه‌ای به درون ناهمگنی، همواره انعکاس‌های متناوب در درون عارضه فزونی می‌یابد. اما هندسه‌ی بیضوی ناهمگنی، موجب تمرکز امواج در پیرامون خط مرکزی و بروز تغییر مکان‌های بیشینه به میزان $3/8$ شده است. در نسبت شکل‌های $1/33$ (شکل ۲۱) و $2/0$ (شکل ۲۲) نیز بیشینه‌ی تغییر مکان در عامل ایزوتروپی کمینه و در مرز زیرین ناهمگنی به میزان $3/25$ حاصل شده است.

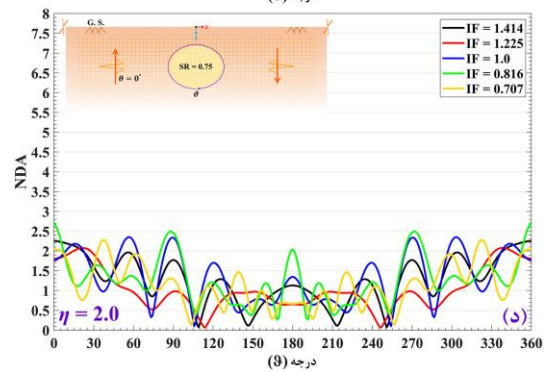
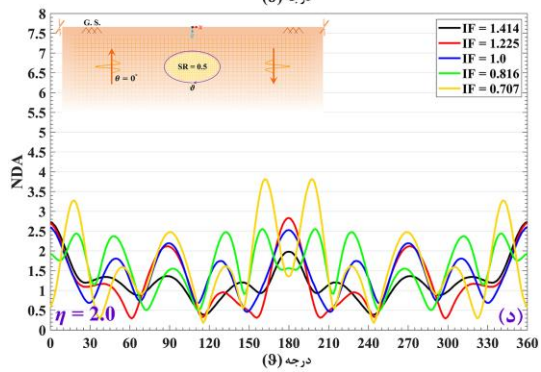
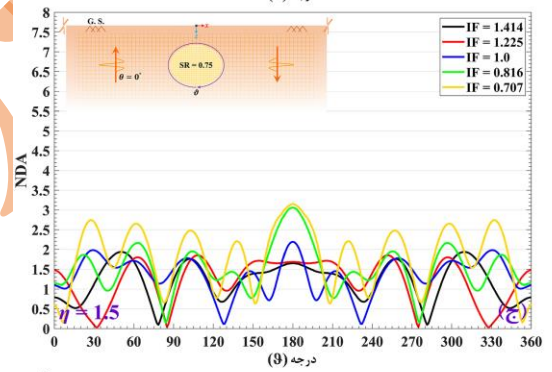
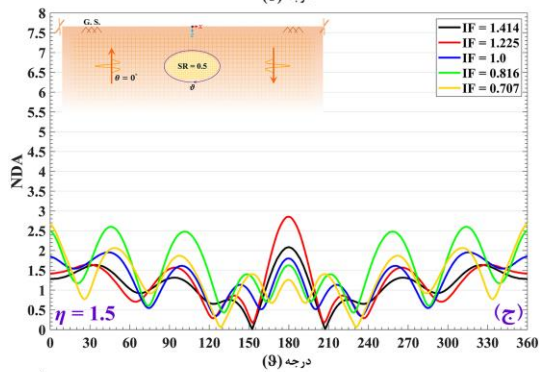
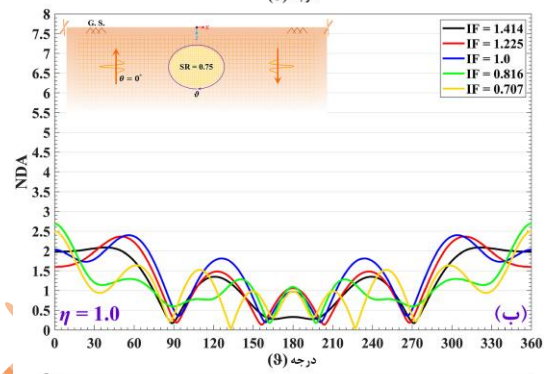
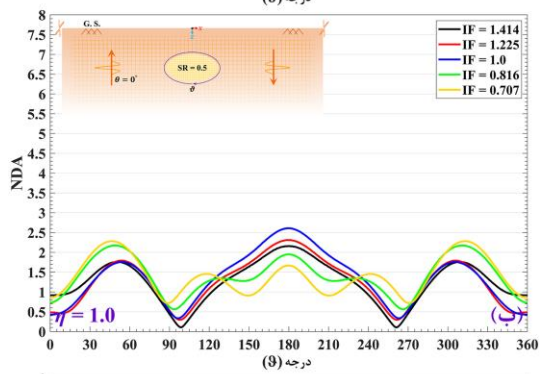
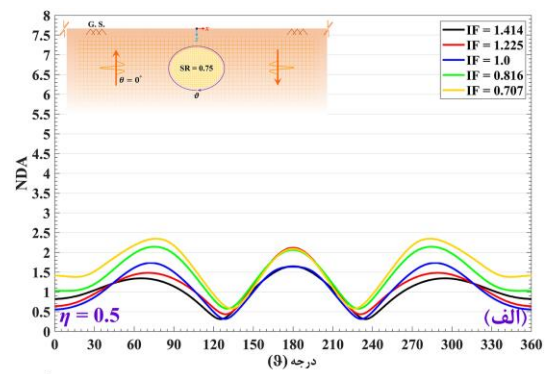
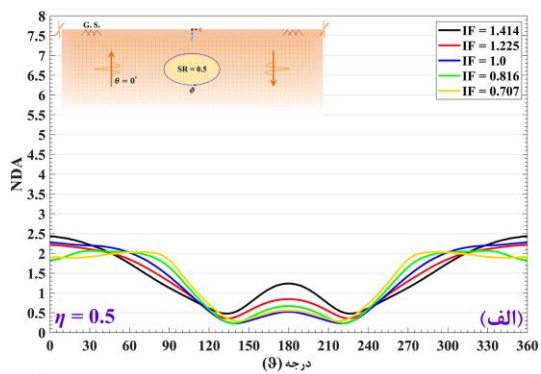


شکل (۱۸) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی ارتوتروپ با نسبت شکل واحد، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ($\zeta = 5\%$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

جدول (۱) - مشخصات خاک/سنگ‌های رسوبی ارائه شده توسط محققان مختلف.

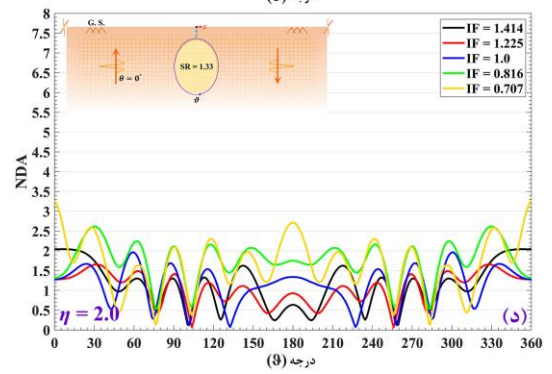
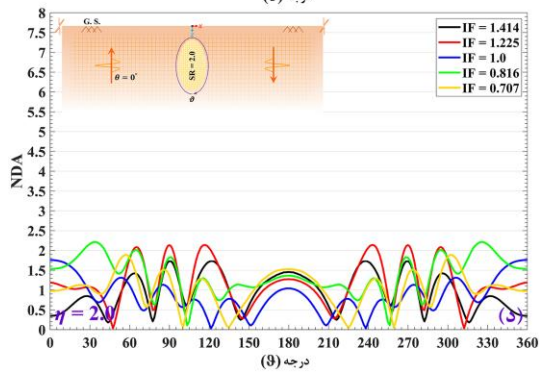
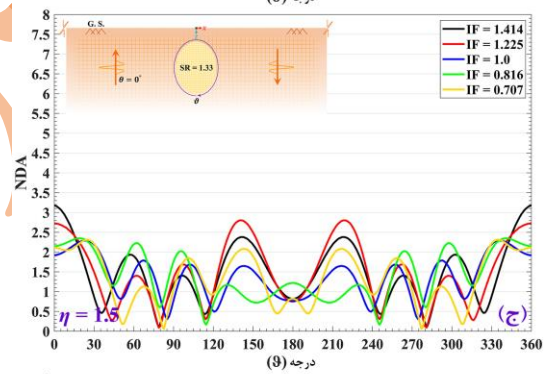
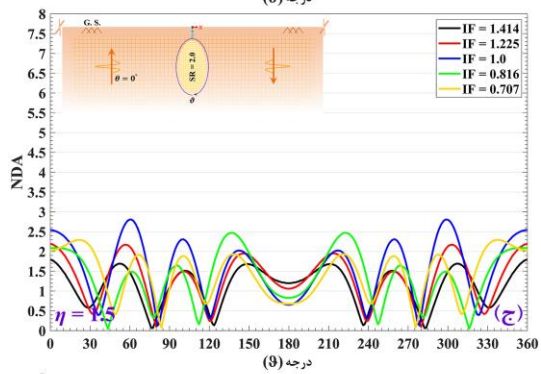
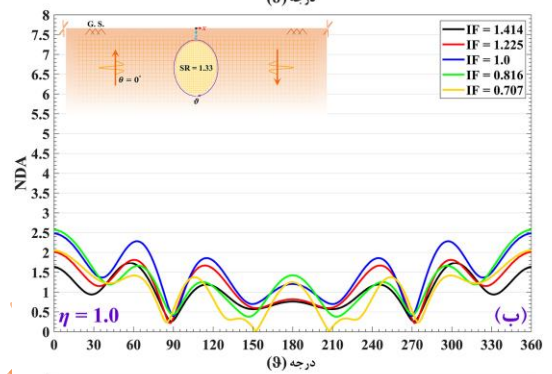
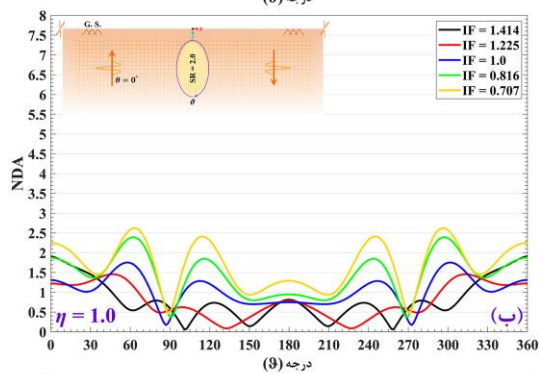
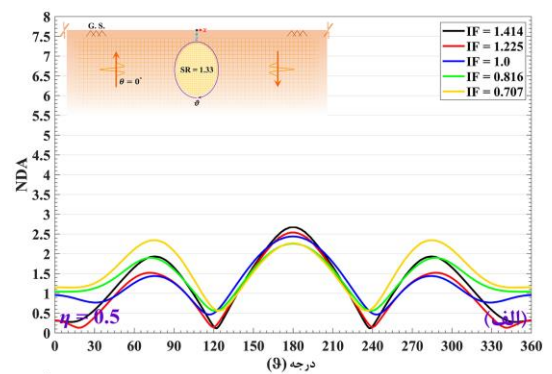
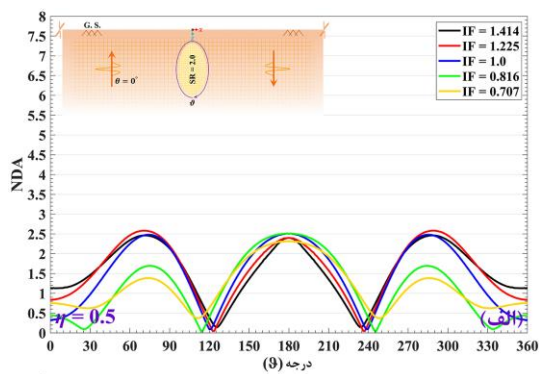
نوع سنگ	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)
رس سنگ	[۵۲] ۹۵۰ ~ ۷۰۰	[۶۴] ۲۷۰۰ ~ ۲۰۰۰
و	[۵۳] ۹۰۰	
ماسه سنگ	[۵۴] ۱۳۰۰ ~ ۹۰۰	
	[۵۵] ۲۳۵۰ ~ ۳۵۰	
لای سنگ	[۵۶] ۹۰۰ ~ ۲۰۰	[۶۵] ۲۸۰۰ ~ ۲۴۰۰
سنگ آهک	[۵۷] ۲۴۰۰ ~ ۱۶۰۰	[۶۴] ۲۷۰۰ ~ ۲۳۰۰
	[۵۸] ۱۰۰۰ ~ ۸۰۰	
	[۵۹] ۷۰۰ ~ ۳۵۰	
سنگ شیل	[۶۰] ۲۳۰۰ ~ ۱۹۰۰	
	[۶۱] ۲۷۰۰ ~ ۲۴۰۰	
	[۶۲] ۲۳۰۰ ~ ۱۱۰۰	[۶۴] ۲۷۵۰ ~ ۲۰۰۰
	[۶۳] ۶۱۰ ~ ۵۵۰	





شکل (۲۰) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بعد پیرامون یک ناهمگنی زیرزمینی ارتوتروپ با نسبت شکل ۰/۵، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

شکل (۱۹) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی ارتوتروپ با نسبت شکل ۰/۷۵، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

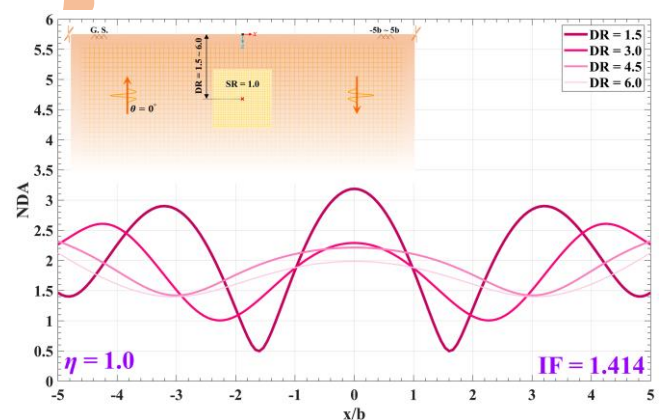


شکل (۲۲) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بُعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی ارتوتروپ با نسبت شکل ۲/۰، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

شکل (۲۱) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بُعد پیرامون ناهمگنی زیرزمینی ارتوتروپ با نسبت شکل ۱/۳۳، واقع در یک نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ($\zeta = 0.5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

۴-۴- عوارض گوشه‌دار

به منظور نمایش قابلیت رویکرد پیشنهاد شده در تهیه و تحلیل عوارض توپر دارای گوشه، یک ناهمگنی مربعی شکل با نسبت شکل واحد و عامل ایزوتروپی $1/414$ در نسبت عمق $1/5$ ، $3/10$ ، $4/5$ و $6/10$ در نظر گرفته شده است. چنانچه در شکل (۲۳) ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت عمق ناهمگنی از $1/5$ ، دامنه‌ی نتایج به صورت قابل توجه کاهش یافته است، به طوری که در نسبت عمق برابر با $1/5$ ، دامنه‌ی بیشینه‌ی $3/2$ در موقعیت عارضه ثبت شده است، در حالیکه برای سایر حالات، این مقدار از $2/25$ فراتر نرفته است. از سوی دیگر، هر چه نسبت عمق عارضه افزایش یافته، بیشینه‌ی دامنه‌ی تغییرمکان سطح زمین از موقعیت استقرار عارضه به سوی نواحی پیرامونی انتقال یافته و مقدار بیشینه‌ی $2/9$ برای نسبت عمق $1/5$ را رقم زده است. همچنین، در نسبت عمق $6/10$ ، اثر حضور عارضه بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، تا حد زیادی از بین رفته است.



شکل (۲۳)- دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک ناهمگنی مربعی زیرزمینی آرتوتروپ با نسبت عمق‌های مختلف، مدفون در نیم‌فضای میرا شده‌ی آرتوتروپ ($\gamma = 1/5$) در برابر امواج مهاجم قائم SH .

۵- جمع‌بندی

در این مقاله، یک مطالعه‌ی عددی توسعه‌یافته با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌فضای میرا شده در حوزه‌ی زمان برای تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور ناهمگنی نرم آرتوتروپ انجام شد. نحوه‌ی پراکنش امواج مهاجم لرزه‌ای SH در حضور عارضه‌ی مزبور توسط نتایج حوزه‌ی زمان و در قالب تصاویر لحظه‌ای در اهم لحظات ارائه شد. در ادامه، کالبد بزرگنمایی سطح زمین با محوریت پارامترهای کلیدی چون عامل ایزوتروپی، محتوای فرکانسی و نسبت شکل عارضه ارائه شد. در انتها نیز پیرامون تکمیل نتایج، برخی منحنی‌های دوبعدی تغییرمکان برای نقاط مختلف از سطح زمین و عارضه، حساسیت‌سنجی شد. برخی دستاوردهای پژوهش حاضر به شرح ذیل جمع‌بندی می‌شود:

۱- در حداقل ($0/707$) و حداکثر ($1/414$) عامل ایزوتروپی مفروض به ترتیب بیشینه و کمینه احتباس موج در ناهمگنی مدفون مشاهده شد.

۲- هرچه هندسه‌ی ناهمگنی دوآرتر شد، سهولت در تشکیل فاز خزشی موج و متعاقباً، ارتعاش بیشتر پاسخ در حصول دامنه‌ی قوی‌تر مشاهده شد.

۳- با کاهش نسبت شکل ناهمگنی، نه تنها تعویق در تکرر انعکاس بلکه حجم تداخل امواج درونی نیز کاهش یافت.

۴- هرچند افزایش نسبت شکل ناهمگنی در تقویت پاسخ مؤثر بود، لکن افزایش عامل ایزوتروپی در تضاد با آن، سبب کاهش ارتعاش و زمان همگرایی جبهه‌ی موج قائم شد.

۵- بیشینه‌ی مقدار بزرگنمایی در حداقل عامل ایزوتروپی ($0/707$) به میزان $2/08$ بر روی سطح زمین حاصل شد.

۶- حداکثر دامنه‌ی تغییرمکان پیرامون عارضه به میزان $4/4$ در عامل ایزوتروپی $0/816$ تعیین شد.

۷- عملکرد ایزولاسیون حضور ناهمگنی بیضوی در کاهش پاسخ سطح زمین در قیاس با عارضه‌ی دایروی برتر بود.

[۴] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., ۲۰۱۸. Time-history responses on the surface by regularly distributed enormous embedded cavities: Incident *SH*-waves. *Earthq Sci*, ۳۱, ۱-۱۷. <http://dx.doi.org/10.29382/eqs-2018-0137-3>

[۵] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., ۲۰۲۰. Transient response of irregular surface by periodically distributed semi-sine shaped valleys: Incident *SH*-waves. *J Earthq Tsu*, ۱۴(۱), ۲۰۵۰۰۰۵. <https://doi.org/10.1142/S1793431120500050>

[۶] Li, Y.G., ۱۹۸۸. *Seismic wave propagation in anisotropic media with applications to denning fractures in the Earth* [Ph.D. dissertation]. University of Southern California.

[۷] Babuska, V., Cara, M., ۱۹۹۱. *Seismic anisotropy in the Earth*. Kluwer Academic Pub., Dordrecht, MA, ۱۹۹۱. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-3600-6>

[۸] Aki, K., ۱۹۹۳. Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophys*, ۲۱۸(۱-۳), ۹۳-۱۱۱. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90262-I](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90262-I)

[۹] Ke, J., ۲۰۱۲. A new model of orthotropic bodies. *Appl Mech Mater*, ۲۰۴, ۴۴۱۸-۴۴۲۱. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4418>

[۱۰] Vinh, P.C., Anh, V.T.N., Linh, N.T.K., ۲۰۱۶. Exact secular equations of Rayleigh waves in an orthotropic elastic half-space overlaid by an orthotropic elastic layer. *Int J Sol Struct*, ۸۳, ۶۵-۷۲. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.12.032>

[۱۱] Gupta, S., Smita, S., Pramanik, S., ۲۰۱۷. Refelction and refraction of *SH*-waves in an orthotropic layer sandwiched between two distinct dry sandy half-space. *Procedia Eng*, ۱۷۳, ۱۱۴۶-۱۱۵۳. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.084>

[۱۲] Rajak, B.P., Kundu, S., ۲۰۱۹. Love wave propagation in a sandy layer under initial stress lying over a pre-stressed heterogeneous orthotropic half-space. *AIP Conference Proceedings*, ۲۰۶۱(۱), ۲۰۰۱۵. <https://doi.org/10.1063/1.5086637>

[۱۳] Aki, K., Larner, K.L., ۱۹۷۰. Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane *SH*-waves. *J Geophys Res*, ۷۵(۵), ۹۳۳-۹۵۴. <https://doi.org/10.1029/JB075i05p0933>

[۱۴] Varadan, V.K., Varadan, V.V., Pao Y.H., ۱۹۷۸. Multiple scattering of elastic waves by cylinders of arbitrary cross

۸- در ناهمگنی مربعی شکل، افزایش نسبت عمق عارضه از ۱/۵ به ۳/۰، موجب کاهش ۱/۰ واحدی بیشینه‌ی دامنه‌ی تغییر مکان سطح زمین در موقعیت استقرار عارضه و انتقال نقاط بحرانی به نواحی پیرامونی شد.

۶- تعارض منافع

این پژوهش، با حمایت مالی بنیاد ملی نخبگان (www.bmn.ir) با شناسه‌ی اعطای ۵۰۱۱۰۰۰۳۹۶۷ و شناسه‌ی استناد دارد بین‌المللی (ISNI) ۰۰۰۰-۰۰۰۴-۵۹۰۷-۰۰۸۹. برای دریافت درجه‌ی پسادکتری از دانشگاه آزاد اسلامی زنجان (www.iauz.ac.ir) صورت گرفته است.

۷- تشکر و قدردانی از بنیاد ملی نخبگان

با تشکر فراوان از بنیاد ملی نخبگان (www.bmn.ir) که با حمایت مالی خود، زمینه‌ی پیشرفت هرچه بهتر و بیشتر این طرح پژوهشی را برای نویسندگان فراهم نمودند. امید است در پرتو عنایات الهی، در حمایت از محققان و پژوهشگران کشور عزیزمان، برای اعتلای علمی و فرهنگی ایران قوی، همواره موفق و ثابت قدم باشند. ان شاء...

مراجع

[۱] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., ۲۰۱۳. Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophys J Int*, ۱۹۴(۳), ۱۸۴۹-۱۸۶۵. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt200>

[۲] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., ۲۰۱۴. Analysing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. *Geophys J Int*, ۱۹۷(۱), ۵۹۱-۶۰۷. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu012>

[۳] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., Yasemi, F., ۲۰۲۰. A half-plane time-domain BEM for *SH*-wave scattering by a subsurface inclusion. *Comp. Geosci.*, ۱۳۴, ۱۰۴۳۴۲. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104342>

- [۲۵] Gupta, S., Smita, S., Pramanik, S., ۲۰۱۷. *SH-wave in a multilayered orthotropic crust under initial stress: A finite difference approach. Cogent Math*, ۴(۱). <https://doi.org/10.1080/23311835.2017.1284294>
- [۲۶] Comez, I., Yilmaz, K., Guler, M., Yildirim, B., ۲۰۱۹. On the plane frictional contact problem of a homogeneous orthotropic layer loaded by a rigid cylindrical stamp. *Arch Appl Mech*, ۸۹, ۱۴۰۳-۱۴۱۹. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01511-6>
- [۲۷] Lee, J.K., Han Y.B., Ahn, Y.J., ۲۰۱۵. *SH-wave scattering problems for multiple orthotropic elliptical inclusions. Adv Mech Eng*, ۵, ۱-۱۴. <https://doi.org/10.1155/2015/370893>
- [۲۸] Lee, J.K., Lee, H., Jeong, H., ۲۰۱۶. Numerical analysis of *SH-wave* field calculations for various types of a multilayered anisotropic inclusion. *Eng Analy BE*, ۶۴, ۳۸-۶۷. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2015.11.015>
- [۲۹] Dominguez, J., ۱۹۹۳. *Boundary elements in dynamics*, Comp Mech Pub, Southampton, Boston.
- [۳۰] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., ۲۰۱۹. Seismic amplification pattern of the ground surface in presence of twin unlined circular tunnels subjected to *SH-waves*. *J Transp Infrac Eng*, ۲۰۱۹. [In Persian] <https://doi.org/10.22075/jtie.2019.16056.1342>
- [۳۱] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., ۲۰۲۱. Surface motion of alluvial valleys subjected to obliquely incident plane *SH-wave* propagation. *J Earthq Eng*. <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1927886>
- [۳۲] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., ۲۰۲۱. On Subsurface Box-Shaped Lined Tunnel under Incident *SH-wave* Propagation. *Front Struct Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0740-x>
- [۳۳] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., ۲۰۲۱. Seismic antiplane response of gaussian-shaped alluvial valley. *Sharif J Civ Eng*. [In Persian] <https://doi.org/10.24200/j30.2020.56151.2801>
- [۳۴] Mojtazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M., Kamalian, M., ۲۰۲۰. On subsurface multiple inclusions model under transient *SH-wave* propagation. *Wave Rand Compl Med*. <https://doi.org/10.1080/174455.30.2020.1842553>
- [۳۵] Mojtazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M., Kamalian, M., ۲۰۲۱. A review on *SH-wave* propagation for orthotropic topographic features. *Bull Earthq Sci Eng*, ۸(۱), section, I, *SH-waves, J Acoust Soc Am*, ۶۳(۵), ۱۳۱۰-۱۳۱۹. <https://doi.org/10.1121/1.381883>
- [۱۵] Campillo, M., Bouchon, M., ۱۹۸۵. Synthetic *SH-seismograms* in a laterally varying medium by the discrete wavenumber method. *Geophys J Int*, ۸۳, ۳۰۷-۳۱۷. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1985.tb05168.x>
- [۱۶] Chen, J., Liu, Z.X., Zou, Z.Z., ۲۰۰۲. Transient internal crack problem for a nonhomogeneous orthotropic strip (mode I). *Int J Eng Sci*, ۴۰, ۱۷۶۱-۱۷۷۴. [https://doi.org/10.1016/S0020-7225\(02\)0028-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7225(02)0028-1)
- [۱۷] Rangelov, T.V., Manolis, G.D., Dineva, P.S., ۲۰۱۰. Wave propagation in a restricted class of orthotropic inhomogeneous half-planes. *Acta Mechanica*, ۲۱۰, ۱۶۹-۱۸۲. <https://doi.org/10.1007/s00707-009-0199-7>
- [۱۸] Bagault, C., Nélias, D., Baietto, M., ۲۰۱۲. Contact analyses for anisotropic half space: effect of the anisotropy on the pressure distribution and contact area. *Int J Sol Struct*, ۱۳۴(۳), ۳۱۴۰۱-۳۱۴۰۹. <https://doi.org/10.1016/j.ijstr.2012.11.002>
- [۱۹] Sanchez-Sesma, F.J., Palencia, V.J., Luzon, F., ۲۰۰۲. Estimation of local site effects during earthquakes: An overview. *ISIJ Earthq Technol*, ۳۹(۳), ۱۶۷-۱۹۳.
- [۲۰] Eidel, B., Gruttmann, F., ۲۰۰۳. Elastoplastic orthotropy at finite strains: multiplicative formulation and numerical implementation. *Comput Mater Sci*, ۲۸, ۷۳۲-۷۴۲. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2003.08.027>
- [۲۱] Sladek, J., Sladek, V., Zhang, C., Krivacek, J., Wen, P., ۲۰۰۶. Analysis of orthotropic thick plates by meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) method. *Int J Numer Methods Eng*, ۶۷, ۱۸۳۰-۱۸۵۰. <https://doi.org/10.1002/nme.1683>
- [۲۲] Petrolito, J., ۲۰۱۴. Vibration and stability analysis of thick orthotropic plates using hybrid-Trefftz elements. *Appl Math Model*, ۳۸, ۵۸۵۸-۵۸۶۹. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.04.026>
- [۲۳] Nguyen, M., Nha, N., Bui, T.Q., Tich, T.T., ۲۰۱۷. A novel numerical approach for fracture analysis in orthotropic media. *Sci Tech Dev J*, ۲۰, ۵-۱۳.
- [۲۴] Guler, M.A., Kucuksucu, A., Yilmaz, K., Yildirim, B., ۲۰۱۷. On the analytical and finite element solution of plane contact problem of a rigid cylindrical punch sliding over a functionally graded orthotropic medium. *Int J Mech Sci*, ۱۲۰(C), ۱۲-۲۹. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.004>

- [۴۵] Kausel, E., ۲۰۰۶. *Fundamental solutions in elastodynamics*. Cambridge University Press, ۹۷۸.۵۱۱۵۴۶۱۱۲. Massachusetts Institute of Technology. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546112>
- [۴۶] Jin, F., Pekau, O.A., Zhang, C.H., ۲۰۰۱. A ۲-D time-domain boundary element method with damping. *Int J Numer Meth Eng*, ۵۱(۶), ۶۴۷-۶۶۱. <https://doi.org/10.1002/nme.1۷۲>
- [۴۷] Barkan, D.D., ۱۹۶۲. *Dynamics of bases and foundations*, McGraw-Hill series in soils engineering and foundations.
- [۴۸] Galvin, P., Domínguez, J., ۲۰۰۷. Analysis of ground motion due to moving surface loads induced by high-speed trains, *Eng. Analy. B.E.*, ۳۱(۱۱), ۹۳۱-۹۴۱. <https://doi.org/10.1016/j.enganbound.۲۰۰۷.۰۳.۰۰۳>
- [۴۹] Israil, A.S.M., Banerjee, P.K., ۱۹۹۰. Advanced time-domain formulation of BEM for two-dimensional transient elastodynamics. *Int J Numer Methods Eng*, ۲۹(۷), ۱۴۲۱-۱۴۴۰. <https://doi.org/10.1002/nme.۱۶۲۰۲۹۰۷۰۴>
- [۵۰] Ricker, N., ۱۹۵۳. The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geophys*, ۱۸(۱), ۱۰-۴۰. <https://doi.org/10.1190/1.14۳۷۸۴۳>
- [۵۱] Dravinski, M., Yu, M.C., ۲۰۱۱. Scattering of plane harmonic SH-waves by multiple inclusions. *Geophys J Int*, ۱۸۶, ۱۳۳۱-۱۳۴۶. <https://doi.org/10.1111/j.1۳۶۵-۲۴۶۵.۲۰۱۱.۰۵۱۱۱.x>
- [۵۲] Ahmed, H., ۱۹۸۹. Applications of mode-converted shear waves to rock-property estimation from vertical seismic profiling data. *Geophysics*, ۵۴(۴), ۴۷۸-۴۸۵. <https://doi.org/10.1190/1.14۴۲۶۷۴>
- [۵۳] Niehoff, J.W., ۲۰۱۰. The Use of Geophysical Methods to Detect Abandoned Mine Workings. *GeoTrends 2010*, ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1091-4144\(۲۰۱۰\)۱۱](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1091-4144(۲۰۱۰)۱۱)
- [۵۴] Roy, S., Stewart, R.R., ۲۰۱۲. Near-surface seismic investigation of barringer (meteor) crater, Arizona. *J Env Eng Geophys*, ۱۷(۳), ۱۱۷-۱۲۷. <https://doi.org/10.2113/JEEG1۷,۳,۱۱۷>
- [۵۵] Ellefsen, K.J., Burton, W.C., Lacombe, P.J., ۲۰۱۲. Integrated characterization of the geologic framework of a contaminated site in west trenton, New Jersey. *J Appl Geophys*, ۷۹, ۷۱-۸۱. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.۲۰۱۱.۱۲.۰۰۸>
- ۱-۱۵. [In Persian] <https://doi.org/10.۴۸۳۰۳/bese.۲۰۲۱,۲۴۴۲۴۰>
- [۳۶] Leung, K.L., Vardoulakis, I.G., Beskos, D.E., Tasoulas, J.L., ۱۹۹۱. Vibration isolations by trenches in continuously nonhomogeneous soil by the BEM. *Soil Dyn Earthq Eng*, ۱۰, ۱۷۲-۱۷۹. [https://doi.org/10.1016/0۲۶۷-۷۲۶۱\(۹۱\)۹۰۰۳۰-۴](https://doi.org/10.1016/0۲۶۷-۷۲۶۱(۹۱)۹۰۰۳۰-۴)
- [۳۷] Hisada, J., ۱۹۹۲. The BEM based on the Green's function of the layered half-space and the normal mode solution. *In Proceedings of Conference on Effects of Surface Geology*, Odawara.
- [۳۸] Rajapakse, R.K.N.D., Gross, D., ۱۹۹۵. Transient response of an orthotropic elastic medium with a cavity. *Wave Motion*, ۲۱, ۲۳۱-۲۵۲. [https://doi.org/10.1016/0۲۶۷-۲۱۲۵\(۹۴\)۰۰۵۰-F](https://doi.org/10.1016/0۲۶۷-۲۱۲۵(۹۴)۰۰۵۰-F)
- [۳۹] Zheng, T., Dravinski, M., ۱۹۹۸. Amplification of SH-waves by an orthotropic basin. *Earthq Eng Struct Dyn*, ۲۷, ۲۴۳-۲۵۷. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-۹۸۴۵\(۱۹۹۸.۰۳\)۲۷:۳<۲۴۳::AID-EQE۷۲۷>۳.۰.CO;۲-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-۹۸۴۵(۱۹۹۸.۰۳)۲۷:۳<۲۴۳::AID-EQE۷۲۷>۳.۰.CO;۲-J)
- [۴۰] Zheng, T., Dravinski, M., ۱۹۹۹. Amplification of waves by an orthotropic basin: Sagittal plane motion. *Earthq Eng Struct Dyn*, ۲۸, ۵۶۵-۵۸۴. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-۹۸۴۵\(۱۹۹۹.۰۶\)۲۸:۶<۵۶۵::AID-EQE۸۲۵>۳.۰.CO;۲-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-۹۸۴۵(۱۹۹۹.۰۶)۲۸:۶<۵۶۵::AID-EQE۸۲۵>۳.۰.CO;۲-Q)
- [۴۱] Ahmad, S., Leyte, F., Rajapakse, R.K.N.D., ۲۰۰۱. BEM analysis of two-dimensional elastodynamic problems of anisotropic solids. *J Eng Mech, ASCE*, ۲۷(۲), ۱۴۹-۱۵۶. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)۰۷۳۳-۹۳۹۹\(۲۰۰۱\)۲۷:۲\(۱۴۹\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۹۹(۲۰۰۱)۲۷:۲(۱۴۹))
- [۴۲] Ge, Z., ۲۰۱۰. Simulation of the seismic response of sedimentary basins with constant-gradient velocity along arbitrary direction using boundary element method: SH-case. *Earthq Sci*, ۲۳, ۱۴۹-۱۵۵. <https://doi.org/10.1007/s11۵۸۹-۰۰۹-۰۰۶۰-z>
- [۴۳] Dineva, P., Manolis, G., Rangelov, T., Wuttke, F., ۲۰۱۴. SH-wave scattering in the orthotropic half-plane weakened by cavities using BIEM. *Acta Acustica united Acustica*, ۱۰۰, ۲۶۶-۲۷۶. <https://doi.org/10.23۸۱۳/AAA.۹۱۸۷۰۶>
- [۴۴] Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M., Kamalian, M., ۲۰۲۲. Attenuated orthotropic time-domain half-space BEM for SH-wave scattering problems. *Geophys J Int*. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac۰۳۲>

[۵۶] Rucker, M.L., Crum, G., Meyers, R., Lommler, J.C., ۲۰۰۵. Geophysical identification of evaporite dissolution structures beneath a highway alignment. *Sinkholes and the Eng Env Impacts Karst*, ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1080-6975\(2005\)10:1\(1061\)1-10](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1080-6975(2005)10:1(1061)1-10)

[۵۷] Robinson, J.L., Anderson, N.L., ۲۰۰۸. Geophysical Investigation of the Delaware Avenue Sinkhole Nixa, Missouri. *Sinkholes Eng Env Imp Karst*, ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1080-6975\(2008\)10:1\(1061\)1-10](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1080-6975(2008)10:1(1061)1-10)

[۵۸] Nettles, S., Jarret, B., Cross, E.C., ۲۰۱۰. Application of surface geophysics for providing a detailed geotechnical assessment of a large resort development site in Anguilla, BWI. *GeoFlorida 2010, GSP ۱۹۹*, ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1080-6975\(2010\)10:1\(1061\)1-10](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1080-6975(2010)10:1(1061)1-10)

[۵۹] Parker, E.H., Hawman, R.B., ۲۰۱۲. Multichannel analysis of surface waves (MASW) in karst terrain, southwest Georgia: implications for detecting anomalous features and fracture zones. *J Eng Env Geophys*, ۱۷(۳), ۱۲۹-۱۵۰. <https://doi.org/10.2113/JEEG17.3.129>

[۶۰] Lingle, R., Jones, A.H., ۱۹۷۷. Comparison of log and laboratory measured *P*-wave and *S*-wave velocities. *Soc Prof Well Log Analysts*, ۱۸th Annual Logging Symposium.

[۶۱] Eastwood, R.L., Castagna, J.P., ۱۹۸۳. Basis for the Interpretation of *V_p/V_s* Ratios in Complex Lithologies. *Soc Prof Well Log Analysts*, ۲۴th Annual Logging Symposium.

[۶۲] Castagna, J.P., Batzle, M.L., Eastwood, R.L., ۱۹۸۴. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, ۵۰(۴), ۵۷۱-۵۸۱. <https://doi.org/10.1190/1.1441933>

[۶۳] Hiltunen, D.R., ۲۰۰۵. Practical applications of engineering geophysics to help solve tough problems and lead to improved technologies. *Soil Dyn Symp Honor Prof Richard D Woods*, GSP ۱۳۴, ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1080-6975\(2005\)10:1\(1061\)1-10](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1080-6975(2005)10:1(1061)1-10)

[۶۴] Schön, J.H., ۲۰۱۵. Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics, Chapter ۴. *Dev Petrol Sci*, ۶۵, ۱۰۹-۱۱۸.

[۶۵] Zhang, X., Tsang, L., Wang, Y., Zhao, B., ۲۰۰۹. Petrologic composition model of the upper crust in Bohai Bay basin, China, based on Lamé impedances. *Applied Geophysics*, ۶. ۳۲۷-۳۳۶. <https://doi.org/10.1007/s11770-009-0039-5>