

## Seismic Response of the Orthotropic Ground Surface Including Underground Circular Unlined Tunnel

Saeed Mojtabazadeh-Hasanlouei<sup>1</sup>, Mehdi Panji<sup>2\*</sup>, Mohsen Kamalian<sup>3</sup>

1- Postdoctoral Fellow, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

3- Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.

### ABSTRACT

The actual behavior of the ground surface in the presence of underground structures is strongly influenced by a thorough understanding of the effects of anisotropy in the surrounding half-space. This anisotropy, typically manifested as orthotropic behavior in the soil layers, is intricately linked with the seismic response of orthotropic ground surface. Therefore, this article presents the seismic response of orthotropic ground surface in the presence of an underground circular tunnel without lining subjected to incident SH-waves. The problem model is prepared solely using the boundary element method in the time-domain, with tunnel boundary discretization. Material damping is indirectly applied using exponential functions in integral equations. In addition to providing a brief formulation of the method, several verification examples are analyzed, focusing on key model parameters such as isotropy factor, frequency content, and wave incidence angle. The seismic response of the ground surface containing an unlined circular tunnel is sensitively investigated in both time and frequency domains. The results indicate that the orthotropic properties of materials and geological formations are influential not only in the response amplitudes but also in the amplification patterns around the tunnel and the establishment of safe zones. Additionally, a maximum surface amplification of 3.2 is observed during the onset of horizontal wave-front.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 28 January 2024

Revise Date: 30 April 2024

Accept Date: 29 June 2024

### Keywords:

The DASBEM Project  
Computational seismology  
Earthquake motions  
Circular unlined tunnel  
SH-wave scattering

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440407.3343>

\*Corresponding author: Mehdi Panji  
Email address: m.panji@iauz.ac.ir

## پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل دایره‌ای بدون پوشش مدفون در نیم‌فضای آرتوتروپ

سعید مجتبی‌زاده حسنلوئی<sup>۱</sup>، مهدی پنجمی<sup>۲\*</sup>، محسن کمالیان<sup>۳</sup>

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

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

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

### چکیده

رفتار واقعی سطح زمین در حضور عوارض مدفون زیرزمینی در پی شناخت کامل از تأثیر ناهمسانی نیم‌فضای پیرامون مبرم می‌شود. این ناهمسانی که عموماً به صورت عملکرد آرتوتروپیک در بافت لایه‌های زمین حاصل می‌شود، با قابلیت تغییر در رفتار لرزه‌ای سطح توأم است. بنابراین در این مقاله، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل دایره‌ای بدون پوشش مدفون در نیم‌فضای آرتوتروپ تحت امواج مهاجم *SH* ارائه شده است. مدل مسأله با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌فضا در حوزه‌ی زمان، صرفاً با مش‌بندی مرز تونل تهیه شده است. میرایی مصالح در یک رویکرد غیرمستقیم به کمک توابع نمایی در معادلات انتگرالی اعمال شده است. ضمن ارائه‌ی مختصر فرمول‌بندی روش و تحلیل چند مثال صحت‌سنجی، با محوریت برخی پارامترهای کلیدی مدل از قبیل عامل ایزوتروپی، محتوای فرکانسی و زاویه‌ی انتشار موج، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین حاوی تونل دایره‌ای بدون پوشش در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس به صور مختلف حساسیت‌سنجی شده است. نتایج نشان داد بافت آرتوتروپی مصالح و نهشته‌های تشکیل‌دهنده‌ی زمین نه تنها در دامنه‌ی پاسخ، بلکه در سوگیری الگوهای بزرگنمایی پیرامون تونل و حصول نواحی آمن مؤثر است. همچنین، حداکثر بزرگنمایی سطح در هجوم جبهه‌ی افقی به میزان ۳/۲ برای عامل ایزوتروپی بیشینه‌ی مفروض مشاهده شد.

کلمات کلیدی: داس‌بم، روش اجزای مرزی، نیم‌فضا، حوزه‌ی زمان، زمین آرتوتروپ، تونل دایره‌ای بدون پوشش، موج *SH*.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440407.3343">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440407.3343</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.440407.3343">10.22065/jsce.2024.440407.3343</a>	۱۴۰۳/۱۲/۳۰	۱۴۰۳/۰۴/۰۹	۱۴۰۳/۰۴/۰۹	۱۴۰۳/۰۲/۱۱	۱۴۰۲/۱۱/۰۸
			مهدی پنجمی		*نویسنده مسئول:	
			m.panji@iauz.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی از جمله تونل‌ها و معابر زیرگذر، المان‌های مهمی در شبکه‌ی حمل‌ونقل به ویژه در مناطق شهری به حساب می‌آیند که برای کاربردهای متعددی همچون متروها، خطوط راه‌آهن، بزرگراه‌ها، انبار مصالح و انتقال آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما به دلیل محصورشدگی در زمین، رفتار لرزه‌ای متفاوتی نسبت به سازه‌های سطحی از خود نشان می‌دهند. رفتارسنجی لرزه‌ای عوارض مزبور بیان می‌دارد، الگوی تقویت امواج می‌تواند تا حد زیادی به وضعیت زمین‌شناسی منطقه و شرایط ناهمسانی و غیرایزوتروپی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آن وابسته باشد. تاکنون مطالعات قابل توجه جهت بررسی اثر ساختگاه در حالت همسان خطی/ناهمگن صورت گرفته است که از آن جمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات [۵-۱] 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، هوازگی، لایه‌بندی، ناهمگنی زیرسطحی، تورق و غیره، عوارض توپوگرافی رفتار غیر ایزوتروپ از خود نشان می‌دهند [۶-۷].

براین اساس، 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 بندد [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 نظر گرفتن ناهمسانگردی محیط بسیار حائز اهمیت است. بدین ترتیب رویکردهای مدلسازی و تحلیل دو/سه‌بعدی مسائل انتشار امواج و به‌طور کاربردی در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی به روش‌های تحلیلی<sup>۱</sup>، نیمه‌تحلیلی<sup>۲</sup> و عددی<sup>۳</sup> تفکیک نمود [۱].

در روش‌های تحلیلی عموماً با بهره‌گیری از فرآیندهای ریاضی چون بسط همخوان تابع موج<sup>۴</sup>، توابع مختلط<sup>۵</sup>، بسط سری‌های فوریه<sup>۶</sup>، بسط توابع بسل<sup>۷</sup>، هنکل<sup>۸</sup> و غیره، با در نظرگیری معادله‌ی حاکم بر سیستم و لحاظ نمودن شرایط مرزی و پیوستگی که البته به صورت ویژه به نوع عوارض وابسته است، پاسخ‌های ریاضیاتی به عنوان خروجی و برحسب حد مجموع حاصل می‌گردد. از مهم‌ترین مزایای روش‌های یاد شده، می‌توان دقت بسیار بالای آن‌ها در محاسبه‌ی پاسخ را برشمرد. از جمله مطالعات مهم تحلیلی اخیر در بررسی خواص و پراکنش امواج در محیط ایزوتروپ می‌توان به پژوهش [۹] اشاره کرد که یک راه‌حل جدید مبتنی بر تعمیم قانون هوک و اصل برهم نهی برای محیط‌های با خواص ایزوتروپ ارائه نمود. روش مذکور به کمک المان‌های ساده‌ی خربایی و میله‌ای شکل، امکان تحلیل ساده‌تر محیط‌های ایزوتروپ را فراهم می‌نماید. [۱۰]

پراکنش امواج رایلی در یک نیم‌فضای الاستیک ایزوتروپ در تماس با یک لایه‌ی دیگر الاستیک ایزوتروپ با ضخامت یکسان را به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. [۱۱] توانستند انعکاس و پراکنش امواج  $SH$  در یک لایه‌ی ایزوتروپ ساندویچی واقع در میان دو لایه‌ی متمایز ماسه‌ای خشک واقع در یک نیم‌فضا را تحلیل نمایند. [۱۲] پراکنش امواج لاو<sup>۹</sup> در یک لایه‌ی ماسه‌ای واقع در یک نیم‌فضای پیش‌تحکیم یافته‌ی ایزوتروپ را به صورت تحلیلی با استفاده از روش تفکیک متغیر بررسی

<sup>۱</sup> Analytical Methods

<sup>۲</sup> Semi-Analytical Methods

<sup>۳</sup> Numerical Methods

<sup>۴</sup> Wave Function Expansion

<sup>۵</sup> Complex Functions

<sup>۶</sup> Fourier Series Expansion

<sup>۷</sup> Bessel Function Expansion

<sup>۸</sup> Hankel Function Expansion

<sup>۹</sup> Love-Waves

نمودند. از جمله روش‌های نیمه تحلیلی مورد استفاده در مطالعات مزبور می‌توان به روش عدد موج آکی-لارنر<sup>۱۰</sup>، روش ماتریس T<sup>۱۱</sup> یا میدان صفر<sup>۱۲</sup> و روش بوچان-کمپیلو<sup>۱۳</sup> اشاره نمود [۱۳-۱۵]. در روش‌های مزبور پاسخ مسأله به صورت مجموعه‌ای از موج ورودی و معادلات انتگرال کوپل با اقلع 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 آرتوتروپ را محاسبه نمود. سال‌ها بعد، پراکنش امواج در نیم‌صفحه‌ی آرتوتروپ غیرهمگن توسط [۱۷] مطالعه شد. در مطالعه‌ی [۱۸] نیز یک نیم‌فضای غیرایزوتروپ تحت تأثیر ناهمگنی مصالح مورد بررسی قرار گرفت.

با پیشرفت قطعات الکترونیکی و افزایش قدرت رایانه‌ها، رشد قابل توجه در روش‌های عددی به منظور تحلیل مسائل گوناگون مهندسی حاصل شده است. در این روش‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری 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<sup>۱۴</sup>، مرزی<sup>۱۵</sup> و تلفیقی<sup>۱۶</sup> تقسیم‌بندی نمود [۱۹]. از جمله نام‌آشناترین روش‌های حجمی می‌توان به روش اجزای محدود (FEM)<sup>۱۷</sup> و تفاضل محدود (FDM)<sup>۱۸</sup> 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 مسأله شده و زمان تحلیل به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در کاربرد روش‌های حجمی برای تحلیل محیط آرتوتروپ می‌توان تحقیقات [۲۰] را نام برد که توانستند فرمولاسیون الاستوپلاستیک محیط‌های آرتوتروپ با کرنش محدود را بدست آورده و آن را به صورت عددی پیاده‌سازی نمایند. [۲۱] از روش حجمی فاقد گسسته‌سازی محلی پترو-گلرکین<sup>۱۹</sup> در تحلیل صفحات آرتوتروپ بهره گرفتند. با استفاده از روش المان هیبرید-ترنس، [۲۲]، به تحلیل ارتعاش و پایداری صفحات ضخیم آرتوتروپ پرداخت. [۲۳] یک رویکرد جدید جهت تحلیل عددی محیط‌های آرتوتروپ با ترک و بازشدگی بر مبنای روش اجزای محدود پیشنهاد نمودند. اخیراً، در مطالعه‌ی [۲۴] به تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار زیرزمینی در برابر امواج مهاجم قائم  $P/SV$  و  $SH$  با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی پرداخته شده و نتایج حاصل با پاسخ‌های روش اجزای مرزی نیم‌فضای ایزوتروپ دوبعدی در حوزه‌ی زمان مقایسه شده‌اند. [۲۵] پاسخ تحلیلی و المان محدود مسائل تماس صفحه‌ای در محیط‌های آرتوتروپ مدرج را ارائه نمودند. [۲۶] با بهره‌گیری از روش تفاضل محدود، به بررسی مسأله‌ی انتشار و پراکنش امواج  $SH$  در پوسته‌ی آرتوتروپ چندلایه در معرض تنش اولیه پرداختند. اخیراً، [۲۷] از روش اجزای محدود برای تحلیل مسأله‌ی تماس اصطکاکی یک صفحه‌ی مستقر در یک لایه‌ی آرتوتروپ همگن تحت اثر بارگذاری استوانه‌ای بهره گرفتند. لازم به ذکر است، برخی محققان همچون [۲۸-۲۹] از رویکردی موسوم به روش معادله‌ی انتگرال حجمی موازی<sup>۲۰</sup> برای تحلیل پراکنش موج  $SH$  در حضور ناهمگنی چندگانه‌ی آرتوتروپ 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

<sup>۱۰</sup> Aki-Larner Discrete Wavenumber Method

<sup>۱۱</sup> T-Matrix Method

<sup>۱۲</sup> Null-Field Method

<sup>۱۳</sup> Bouchon-Campillo Method

<sup>۱۴</sup> Volumetric Methods

<sup>۱۵</sup> Boundary Methods

<sup>۱۶</sup> Hybrid Methods

<sup>۱۷</sup> Finite Element Method

<sup>۱۸</sup> Finite Difference Method

<sup>۱۹</sup> The Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Method

<sup>۲۰</sup> Parallel Volume Integral Equation Method (PVIEM)

از جمله مزایای بارز آن‌ها به شمار می‌آید [۳۰]. با توجه به اینکه در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دوبعدی، مشاهده‌ی نحوه‌ی انتشار امواج لرزه‌ای در سطح زمین و بزرگنمایی ناشی از امواج مذکور حائز اهمیت است، محیط مسأله 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 مرتبط با قیود، 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 [۳۶-۳۱] در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی منفرد، مرگب 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، [۳۷] و [۳۸] به توسعه‌ی توابع گرین و پراکنش امواج لرزه‌ای در یک نیم‌فضای چندلایه‌ی ارتوتروپ پرداختند. چندی بعد، پاسخ گذرای نیم‌صفحه‌ی الاستیک ارتوتروپ در حضور حفره‌ای با مقطع دلخواه توسط [۳۹] مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از رویکرد اجزای مرزی غیرمستقیم نیم‌فضا در حوزه‌ی فرکانس، [۴۰] بزرگنمایی امواج  $SH$  در حضور یک دره‌ی آبرفتی ارتوتروپ را بررسی نمودند. در ادامه، [۴۱] از روش مزبور برای پراکنش امواج الاستیک درون صفحه و تغییرمکان حاصل در حضور یک دره‌ی آبرفتی ارتوتروپ با مقطع دلخواه استفاده نمودند. [۴۲] به کمک روش اجزای مرزی مستقیم نیم‌فضا، مسائل الاستودینامیک در محیط ناهمسان دوبعدی را تحلیل نمودند. در این پژوهش، از فرمول‌بندی روش اجزای مرزی مستقیم به منظور تحلیل پایدار دوبعدی مسائل الاستودینامیک در محیط‌های ارتوتروپ و غیر ارتوتروپ با هندسه‌ی دلخواه استفاده گردید. [۴۳] با استفاده از یک تابع گرین تقریبی نیم‌فضا، به تحلیل مسائل ناهمسان به کمک روش اجزای مرزی پرداخت. [۴۴] نیز 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 [۴۵] ارائه شده است.

ادبیات فنی نشان داد تأثیر بافت ارتوتروپی محیط پیرامون تونل زیرسطحی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین کمتر مورد توجه محققان بوده است. بنابراین در این پژوهش سعی بر آن است تا با به‌کارگیری روش اجزای مرزی نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ در حوزه‌ی زمان<sup>۲۱</sup> که پیشتر توسط مؤلفان پیشنهاد شده است [۴۵] به مدلسازی الاستودینامیک اسکالر محیط ارتوتروپ مشتمل بر یک تونل دایروی بدون پوشش تحت امواج مهاجم  $SH$  پرداخته شود. بدین ترتیب، پس از ارائه‌ی چند مثال صحت‌سنجی در قیاس با پاسخ موجود در پیشینه‌ی تحقیق، در قالب یک مطالعه‌ی عددی توسعه‌یافته و با استناد به برخی پارامترهای کلیدی مدل تهیه شده چون عامل ایزوتروپی، زاویه‌ی تابش موج و فرکانس پاسخ، الگوی پراکنش امواج در حوزه‌ی زمان و بزرگنمایی سطح زمین تعیین خواهد شد. تسهیل در تهیه‌ی مدل تونل زیرزمینی مستقر در محیط ارتوتروپ، کاهش زمان محاسبات و ارائه‌ی برخی نتایج کاربردی در حوزه‌ی ژئوتکنیک لرزه‌ای، بر لزوم انجام تحقیق و نوآوری این پژوهش صحه می‌گذارد.

## ۲- فرمول‌بندی

مطابق شکل (۱)، یک تونل بدون پوشش با هندسه‌ی دلخواه درون یک نیم‌فضای الاستیک خطی همگن ارتوتروپ میرا در برابر امواج مهاجم قائم  $SH$  استقرار یافته است. معادله‌ی حرکت موج خارج از صفحه  $SH$  مطابق زیر تعریف می‌شود [۴۶]:

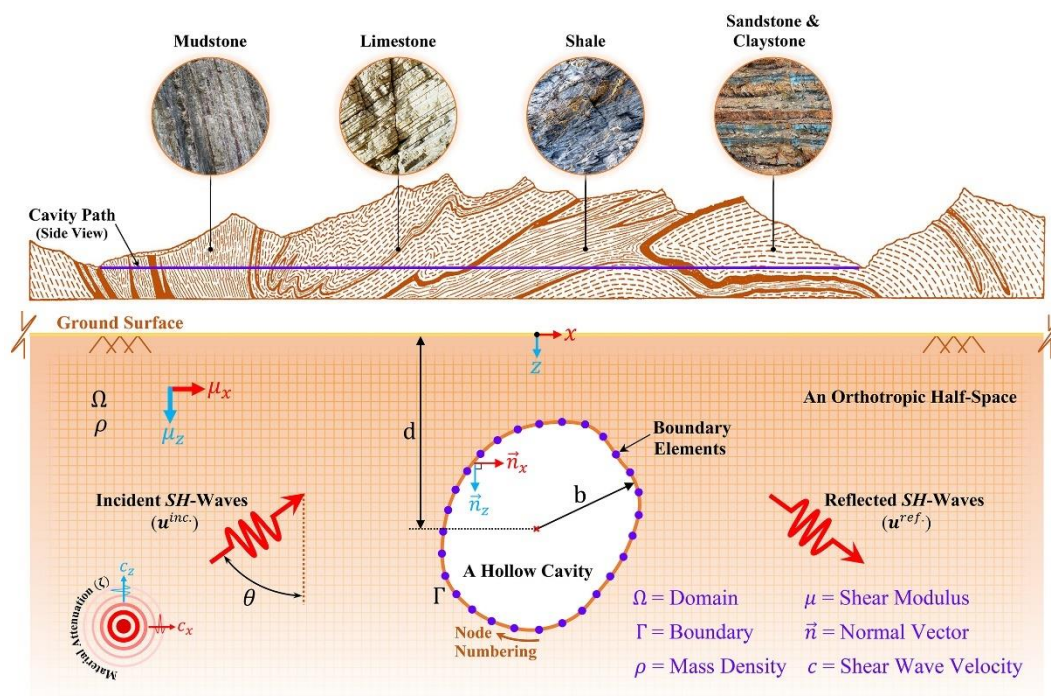
<sup>۲۱</sup> Attenuated Orthotropic Half-Space Time-Domain Boundary Element Method

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

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. ضریب  $\rho$  بیانگر چگالی محیط بوده و ثوابت الاستیک ماتریس استحکام<sup>۲۲</sup> برای محیط ارتوتروپ که مبین مدول برشی محیط در امتداد مختصات  $x$  و  $z$  می‌باشد، به ترتیب با  $c_{66}$  و  $c_{44}$  نشان داده شده است. شرایط مرزی ترکشن آزاد<sup>۲۳</sup> 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. جزئیات فرمول‌بندی و نحوه‌ی حصول معادلات حاکم در مطالعه‌ی [۴۵] یافت می‌شود.



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

## ۲-۱- معادله‌ی انتگرال مرزی با میرایی مصالح

در این تحقیق، از روش غیرمستقیم بارکان<sup>۲۴</sup> [۴۷] برای اعمال میرایی مصالح استفاده شده است. این روش مبتنی بر یک کاهش ثابت لگاریتمی دامنه‌ی پاسخ در هر گام زمانی است که توسط [۴۸] در حوزه‌ی زمان مورد استفاده قرار گرفته است. براین‌اساس، معادله‌ی انتگرال مرزی اصلاح شده به صورت معادله (۳) بازنویسی خواهد شد [۳۰]:

<sup>۲۲</sup> Rigidity Matrix

<sup>۲۳</sup> Traction-Free

<sup>۲۴</sup> Barkan Method

$$c(\xi)u(\xi, t) = \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t \begin{bmatrix} u^*(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, \tau) \cdot e^{-2\pi\zeta(t-\tau)} - \\ q^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u(x, \tau) \cdot e^{-2\pi\zeta(t-\tau)} \end{bmatrix} d\tau \right\} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi, t), \quad (3)$$

به طوریکه،  $\Gamma$  بیانگر مرز عارضه مورد نظر،  $c(\xi)$  ضریب هندسه،  $u^{ff}$  تغییرمکان میدان آزاد و  $\zeta$  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  $\xi$  و  $x$  به ترتیب بردار موقعیت منبع موج و گیرنده می‌باشند. انتگرال‌های کانولوشن ریمان<sup>۲۵</sup> نیز به صورت  $q^* \cdot u$  و  $u^* \cdot q$  نشان داده شده‌اند. از حل گام‌به‌گام معادله‌ی انتگرال مرزی (۳) تغییرمکان و ترکشن برای کلیه‌ی گره‌های مرزی مسأله نتیجه می‌شود. همچنین، با اعمال تساوی  $c(\xi) = 1/0$ ، تغییرمکان برای کلیه‌ی نقاط درونی قابل محاسبه می‌باشد [۴۵].

## ۲-۲- عددی سازی

برای حل انتگرال‌های زمان و مکان معادله (۳) به ترتیب از یک فرآیند تحلیلی و عددی بهره گرفته شده است. بدین ترتیب، با گسسته‌سازی محور زمان از 0 تا  $t$ ، به  $N$  گام مساوی با حد فاصل  $\Delta t$  و بهره‌گیری از توابع شکل<sup>۲۶</sup> خطی زمان در هر گام و با در نظر گرفتن المان درجه‌ی دو ایزوپارامتریک سه‌گره‌ای<sup>۲۷</sup> برای گسسته‌سازی مرز عارضه [۴۹]، معادله‌ی (۳) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$c(\xi)u^N(\xi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left[ \begin{aligned} & \left\{ \int_{\Gamma_m} [U_1^{N-n+1}(x(\kappa), \xi) + U_2^{N-n}(x(\kappa), \xi)] N_\alpha(\kappa) |J| d\kappa \right\} q_\alpha^n - \\ & \left\{ \int_{\Gamma_m} [Q_1^{N-n+1}(x(\kappa), \xi) + Q_2^{N-n}(x(\kappa), \xi)] N_\alpha(\kappa) |J| d\kappa \right\} u_\alpha^n \end{aligned} \right] + u^{ff.N}(\xi), \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق،  $N$  شمارنده‌ی گام‌های زمانی و  $M$  تعداد کل المان‌های مرزی و  $\Gamma_m$  بیانگر بخشی از مرز است که المان 'm' بدان تعلق دارد. همچنین،  $N_\alpha$  توابع شکل المان درجه‌ی دو با  $\alpha = 1, 2, 3$  مبین سیستم مختصات محلی المان‌ها و  $|J|$  دترمینان ژاکوبین برای تبدیل از سیستم مختصات کارتزین به محلی می‌باشد.  $U_1^{(N-n+1)} + U_2^{(N-n)}$  و  $Q_1^{(N-n+1)} + Q_2^{(N-n)}$  نیز به ترتیب هسته‌های الاستودینامیک نیم‌فضای آرتوتروپ در حوزه‌ی زمان برای مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن می‌باشند و از انتگرال‌گیری تحلیلی توابع گرین نظیر حاصل می‌شوند [۴۵ و ۵].

## ۲-۳- شکل ماتریسی

پس از گسسته‌سازی مرز هندسی عارضه مورد نظر، کلیه‌ی عناصر ماتریس‌ها از انتگرال‌گیری مکانی تعیین می‌شوند که فرم ماتریسی آن به صورت معادله‌ی (۵) حاصل می‌شود [۴۵]:

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

<sup>۲۵</sup> Riemann Convolution Integrals

<sup>۲۶</sup> Shape Functions

<sup>۲۷</sup> Three-Node Isoparametric Quadratic Elements

به طوریکه  $H^{N-n+1}$  و  $G^{N-n+1}$  به ترتیب مبنای ماتریس‌های حاصل از انتگرال‌گیری مکانی هسته‌های دینامیکی اسکالر ارتوتروپ برای مؤلفه‌های ترکشن و تغییر مکان می‌باشند.  $\{u^n\}$  و  $\{q^n\}$  نیز بردارهای مقادیر 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 مبنای ماتریس‌های متناظر با مقادیر مجهول و معلوم مرزی بوده و  $\{X^N\}$  و  $\{Y^N\}$  به ترتیب بردار 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:

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

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.

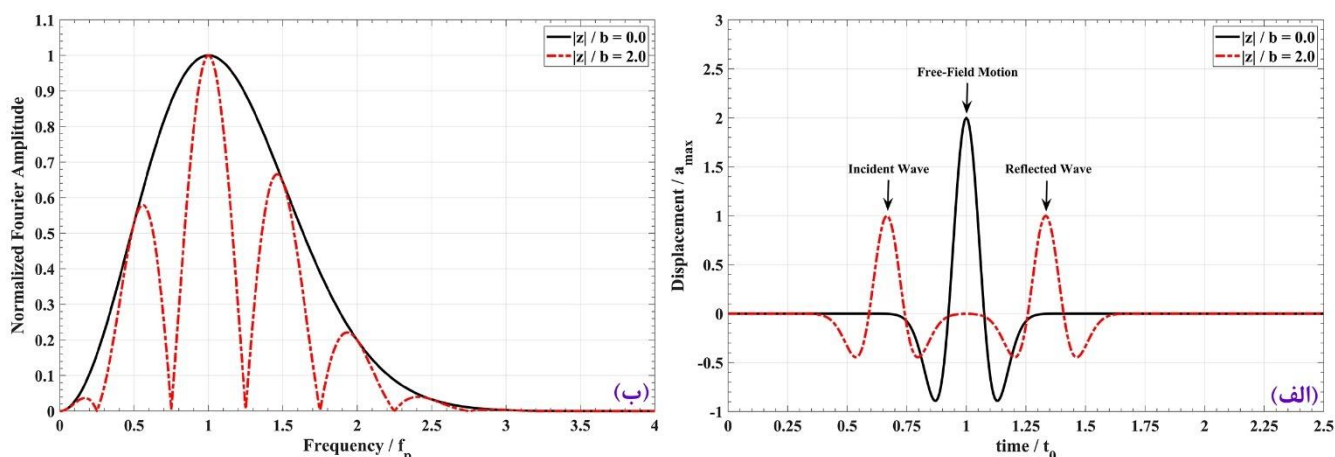
## ۲-۴- موج مهاجم

مطابق رابطه‌ی (۳)، برای تحلیل لرزه‌ای مسائل مختلف 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 ریگر<sup>۲۸</sup> [۵۰] به عنوان موج محرک ورودی استفاده شده است که تابع آن مطابق رابطه‌ی (۸) می‌باشد [۱]:

$$u^{ff}(x, z, t) = a_{max} \cdot \begin{pmatrix} \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc.} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc.} \right)^2} H \left( t - \frac{r^{inc.}}{c} \right) + \\ \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref.} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref.} \right)^2} H \left( t - \frac{r^{ref.}}{c} \right) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

به طوریکه  $u^{ff}(x, y, t)$  تغییر مکان میدان آزاد سطح زمین در مختصات  $(x, y)$  و زمان  $t$  می‌باشد.  $a_{max}$  دامنه‌ی حداکثر موج محرک ورودی،  $\alpha^{inc.}$  و  $\alpha^{ref.}$  به ترتیب فاز امواج مستقیم و منکسر شده در موقعیت‌های  $r^{inc.}$  و  $r^{ref.}$  می‌باشد.  $\theta$  زاویه‌ی موج مهاجم نسبت به امتداد قائم بوده و  $C$  نیز مبنای سرعت موج معادل برشی محیط می‌باشد. شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی موجک ریگر در یک نقطه از سطح صاف زمین در فضای زمان و فرکانس می‌باشد.

<sup>۲۸</sup> Ricker Wavelet



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

### ۳- روش‌شناسی

در ارائه‌ی نتایج،  $d$  معرف عمق عارضه،  $G.S.$  سطح زمین<sup>۲۹</sup> و  $x/b$  بیانگر محدوده‌ی سطح زمین است که نسبت به شعاع عارضه ( $b$ ) بی‌بعد شده است. دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده<sup>۳۰</sup> ( $NDA$ ) عبارت است از نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییر مکان سطح زمین حاصل از روش اجزای مرزی در یک فرکانس معین، بر دامنه‌ی فوریه‌ی امواج مهاجم در فرکانس مذکور. عامل ایزوتروپی<sup>۳۱</sup> ( $IF$ ) 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،  $\mu_x$  و  $\mu_z$  به ترتیب مدول برشی محیط در امتداد محور  $x$  و  $z$  هستند [۴۰]. در صورتی که محیط به صورت ایزوتروپ فرض شود (عامل ایزوتروپی برابر واحد)، در تساوی با  $\mu_z$  خواهد بود. اما برای محیط‌های ارتوتروپ، نسبت‌های  $\mu_z = 2\mu_x$ ،  $\mu_z = 1/5\mu_x$ ،  $\mu_z = 1/15\mu_x$  و  $\mu_z = 2\mu_x$  در نظر گرفته شده و عوامل ایزوتروپی ۱/۴۱۴، ۱/۲۲۵، ۱/۸۱۶ و ۰/۷۰۷ به ترتیب شکل می‌گیرند. فرکانس بی‌بعد ( $\eta$ ) به صورت رابطه‌ی ( $\eta = \omega b / \pi c$ ) تعریف می‌گردد که  $\omega$  بیانگر فرکانس زاویه‌ای موج،  $b$  شعاع تونل و  $c$  معرف سرعت موج برشی معادل محیط می‌باشد. دامنه<sup>۳۲</sup> نیز نسبت تغییر مکان سطح زمین بر شتاب بیشینه‌ی موج ورودی تعریف شده است. لازم به ذکر است، برای تسهیل فرآیند همگرایی نتایج، در کلیه‌ی مثال‌های ارائه شده، میرایی مصالح ( $\zeta$ ) برابر با ۰/۵ اعمال شده است. تمامی مدل‌ها در معرض امواج مهاجم برون صفحه‌ی  $SH$  از نوع ریکر [۵۰] با فرکانس غالب ۳/۰ هرتز (Hz) و دامنه‌ی بیشینه‌ی ۰/۰۱ متر قرار گرفته‌اند که به صورت قائم و افقی به سمت عارضه‌ی 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 محیط مشتمل بر تونل، اثر ارتوتروپی مثال‌ها با همگراسنجی تدریجی خواص مصالح ارتوتروپ به ایزوتروپ و همخوانی پاسخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

<sup>۲۹</sup> Ground Surface

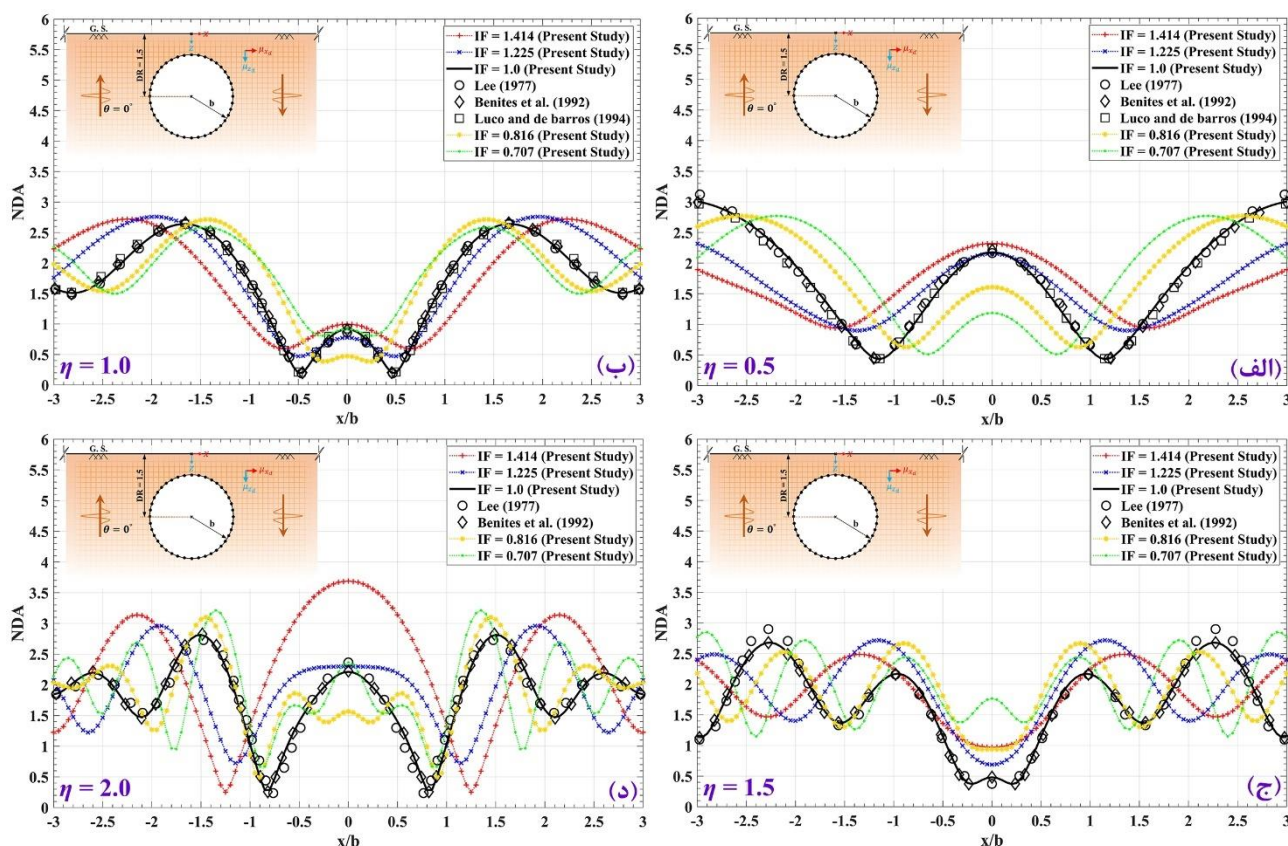
<sup>۳۰</sup> Normalized Displacement Amplitude (NDA)

<sup>۳۱</sup> Isotropy Factor

<sup>۳۲</sup> Amplitude

## ۳-۱- صحت‌سنجی

مطابق شکل (۳)، یک تونل دایره‌ای بدون پوشش در عمق  $b/5$  در برابر امواج مهاجم قائم  $SH$  در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل شده با پاسخ‌های ایزوتروپ [۵۱-۵۳] مقایسه شده‌اند که به ترتیب، به صورت تحلیلی و با استفاده از روش اجزای مرزی غیرمستقیم در حوزه‌ی فرکانس بدست آمده‌اند. محدوده‌ی سطح زمین در بازه‌ی  $3b$  تا  $-3b$  تعریف شده و سرعت موج برشی و دانسیته در دامنه‌ی ایزوتروپ به ترتیب برابر با  $800 \text{ m.s}^{-1}$  و  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  اعمال شده است. فرکانس بی‌بعد  $0.5$  و  $1.0$  نیز برای نمایش نتایج انتخاب شده است. مسأله در  $1000$  گام زمانی با  $\Delta t$  برابر با  $0.06$  ثانیه و پارامتر شیف‌ت زمان  $1/5$  ثانیه حل شده است. تعداد المان‌های مرزی مفروض بر روی تونل برابر با ۷۹ المان یا ۱۵۸ گره می‌باشد. شکل (۳) به وضوح مبین نقش تأثیرگذار عامل ایزوتروپی بر میزان اختلاف نتایج حاصل از خواص ارتوتروپ مصالح می‌باشد.



شکل (۳) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بعد سطح زمین در مقابل  $x/b$  برای تونل دایره‌ای بدون پوشش واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ( $\eta = 0.5$ ) در برابر امواج مهاجم قائم  $SH$  برای فرکانس‌های بی‌بعد (الف)  $0.5$ ، (ب)  $1.0$ .

## ۴- کاربردها

چنانچه در شکل (۱) قابل مشاهده می‌شود، با توجه به طولی بودن مسیر حرکت یک تونل در عمق زمین، عبور آن از درون انواع مختلف مصالح رسوبی با وضعیت لایه‌بندی متفاوت اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، در این بخش به مدلسازی و تحلیل مسأله‌ی مزبور در شرایط ارتوتروپی مختلف پرداخته شده تا نقش عوامل مؤثر از جمله عامل ایزوتروپی (اثر بافت لایه) و زاویه‌ی تابش جبهه‌ی موج بر پاسخ لرزه‌ای سطح آشکار شود. مطابق جدول (۱)، مقادیر  $800 \text{ m.s}^{-1}$  و  $2400 \text{ kg.m}^{-3}$

به طور متوسط برای سرعت موج برشی ( $C$ ) و دانسیته‌ی محیط ( $\rho$ ) در حالت ایزوتروپ در نظر گرفته شده است. در انجام مطالعه‌ی عددی، ۵٪ میرایی مصالح اعمال شده و تونل در عمق برابر با  $1/5 b$  استقرار یافته است.

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

نوع سنگ	سرعت موج برشی ( $m.s^{-1}$ )	دانسیته ( $kg.m^{-3}$ )
رس سنگ و ماسه سنگ	[۵۴] ۹۵۰ ~ ۷۰۰ [۵۵] ۹۰۰ [۵۶] ۱۳۰۰ ~ ۹۰۰ [۵۷] ۲۳۵۰ ~ ۳۵۰	[۶۶] ۲۷۰۰ ~ ۲۰۰۰
لای سنگ	[۵۸] ۹۰۰ ~ ۲۰۰ [۵۷] ۲۳۵۰ ~ ۳۵۰	[۶۷] ۲۸۰۰ ~ ۲۴۰۰
سنگ آهک	[۵۹] ۲۴۰۰ ~ ۱۶۰۰ [۶۰] ۱۰۰۰ ~ ۸۰۰ [۶۱] ۷۰۰ ~ ۳۵۰	[۶۶] ۲۷۰۰ ~ ۲۳۰۰
سنگ شیل	[۶۲] ۲۳۰۰ ~ ۱۹۰۰ [۶۳] ۲۷۰۰ ~ ۲۴۰۰ [۶۴] ۲۳۰۰ ~ ۱۱۰۰ [۶۵] ۶۱۰ ~ ۵۵۰	[۶۶] ۲۷۵۰ ~ ۲۰۰۰

#### ۴-۱- نتایج حوزه‌ی زمان

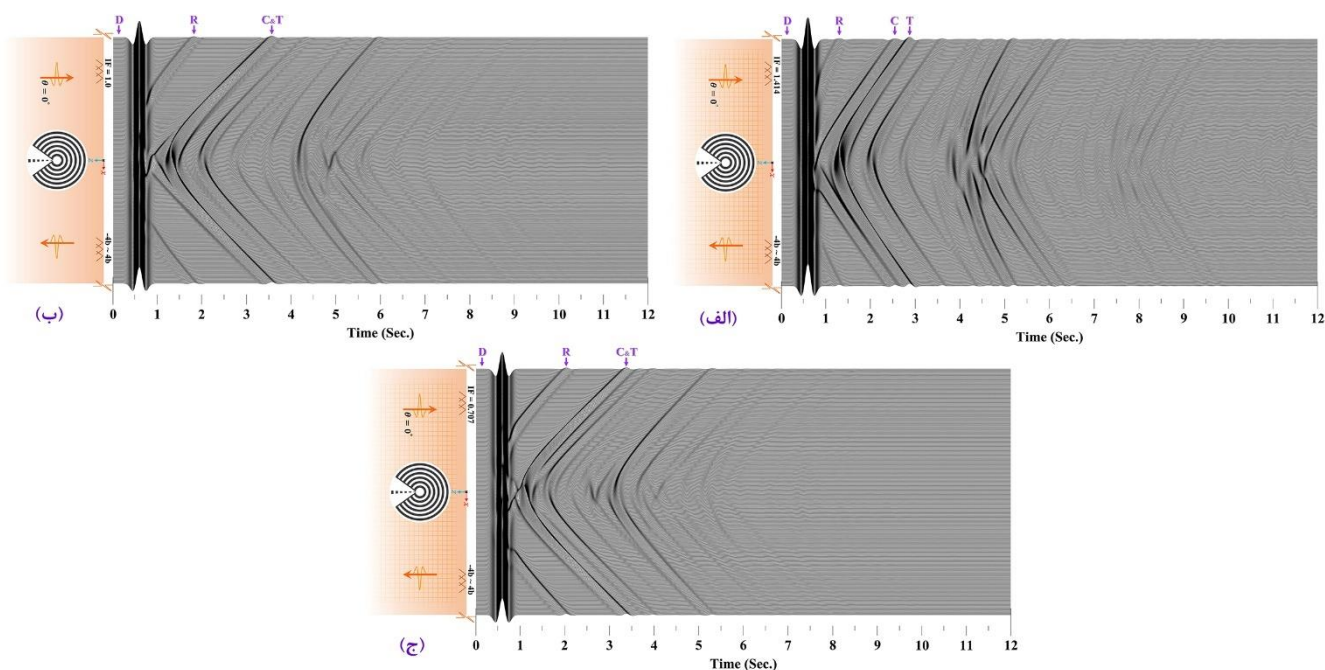
در شکل‌های (۴) و (۵) الگوی کلی پاسخ تاریخی‌ی زمانی سطح زمین ارتوتروپ در حضور یک تونل زیرزمینی دایره‌ای شکل بدون پوشش در برابر امواج مهاجم  $SH$  نشان داده شده است. نتایج در عوامل ایزوتروپی  $1/0$ ،  $1/4$  و  $1/07$  برای برخورد قائم موج، در بازه‌ی  $4b$  تا  $4b$  از سطح زمین ارائه شده است. ایستگاه‌های فازی موج بر روی شکل‌ها مشخص شده که (D) فاز مستقیم<sup>۳۳</sup> موج، (R) امواج انعکاس یافته<sup>۳۴</sup> از مرز عارضه و یا سطح زمین و (C) فاز خزنده‌ی امواج<sup>۳۵</sup> بر روی مرز عارضه می‌باشد. ایستگاه (T) نیز معرف فاز محبوس شده‌ی موج<sup>۳۶</sup> می‌باشد. این امواج در فضای میان مرز فوقانی تونل و سطح زمین به دام افتاده و در اثر انعکاس متناوب، موجب تأخیر زمان همگرایی در نتایج می‌شود. در انتشار قائم جبهه‌ی موج (شکل ۴)، علاوه بر مشاهده‌ی پدیده‌ی تقارن در نتایج، ارتعاش بیشتر در پاسخ مربوط به  $IF$  برابر  $1/414$  به چشم می‌خورد. در این حالت (شکل ۴ الف) مدول برشی غالب در راستای افق، فاصله‌ی اندک مرز فوقانی عارضه تا سطح زمین و مقطع مدور تونل، موجب تداخل فازهای انعکاسی، خزشی و انحصاری موج در نزدیکی سطح زمین شده و متعاقباً افزایش مدت زمان همگرایی نتیجه می‌شود. از مقایسه‌ی ایستگاه‌های فازی یک موج استنتاج می‌شود، در  $IF$  برابر  $1/414$  حضور عارضه با شدت بیشتر تجربه شده که منجر به جدایی مسیره‌های فاز خزشی و انحصاری می‌شود. با اعمال جبهه‌ی موج افقی (شکل ۵)، علاوه بر ارتعاش کمتر پاسخ نسبت به نتایج پیشین، حرکت آزادانه‌ی امواج افقی در  $IF$  برابر  $1/414$ ، زمینه‌ساز افزایش قابل توجه دامنه‌ی فاز انعکاسی موج شده است. اگرچه ناحیه‌ی سایه [۶۸] در عامل ایزوتروپی مزبور دارای بیشترین قوت است، لکن به دلیل برخورد شدید موج به مرز تونل، بخش غالب آن در سطح زمین انعکاس یافته و شرایط بحرانی نسبت به سایر حالات رقم خورده است.

<sup>۳۲</sup> Direct Waves

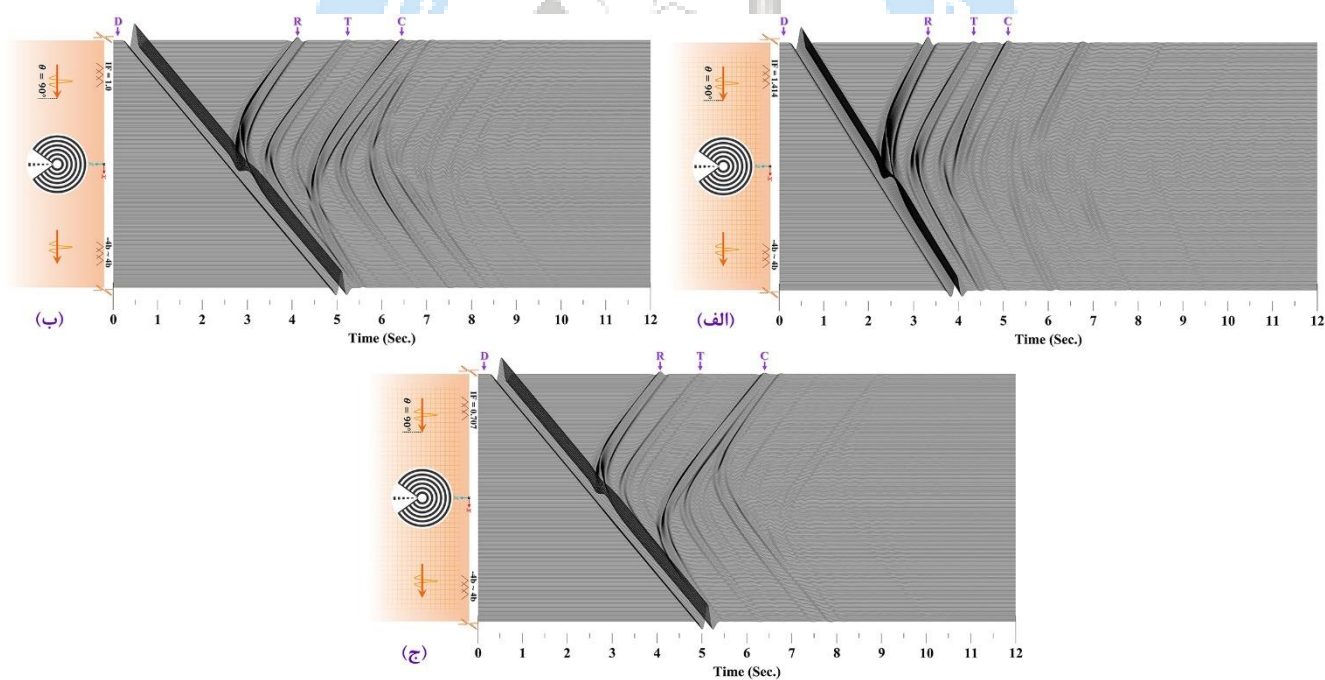
<sup>۳۴</sup> Reflected Waves

<sup>۳۵</sup> Crawler Waves

<sup>۳۶</sup> Trapped Waves



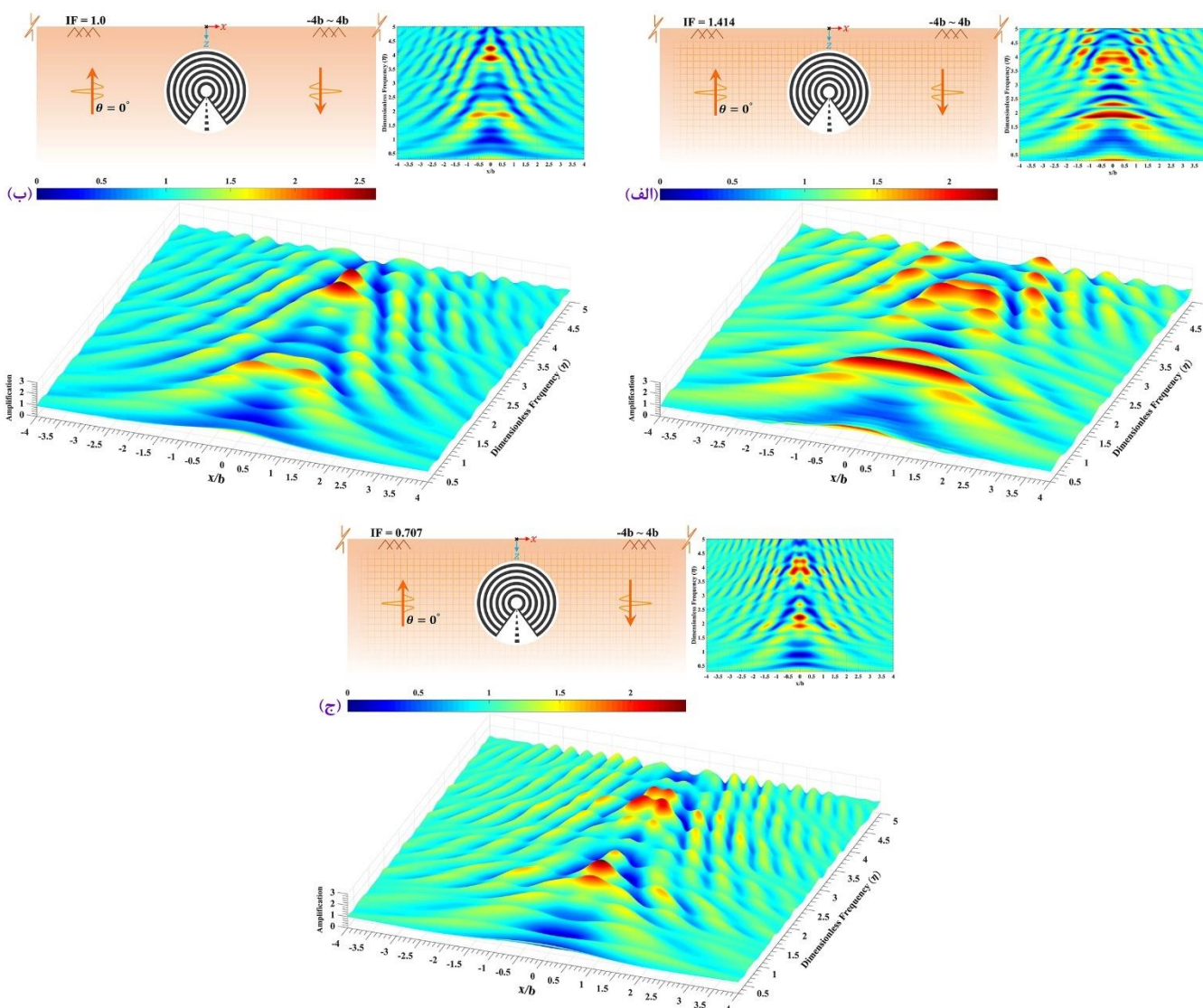
شکل (۴) - الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور یک تونل زیرزمینی دایره‌ای شکل بدون پوشش، واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ( $\zeta = 0.5$ ) در برابر امواج مهاجم قائم  $SH$ .



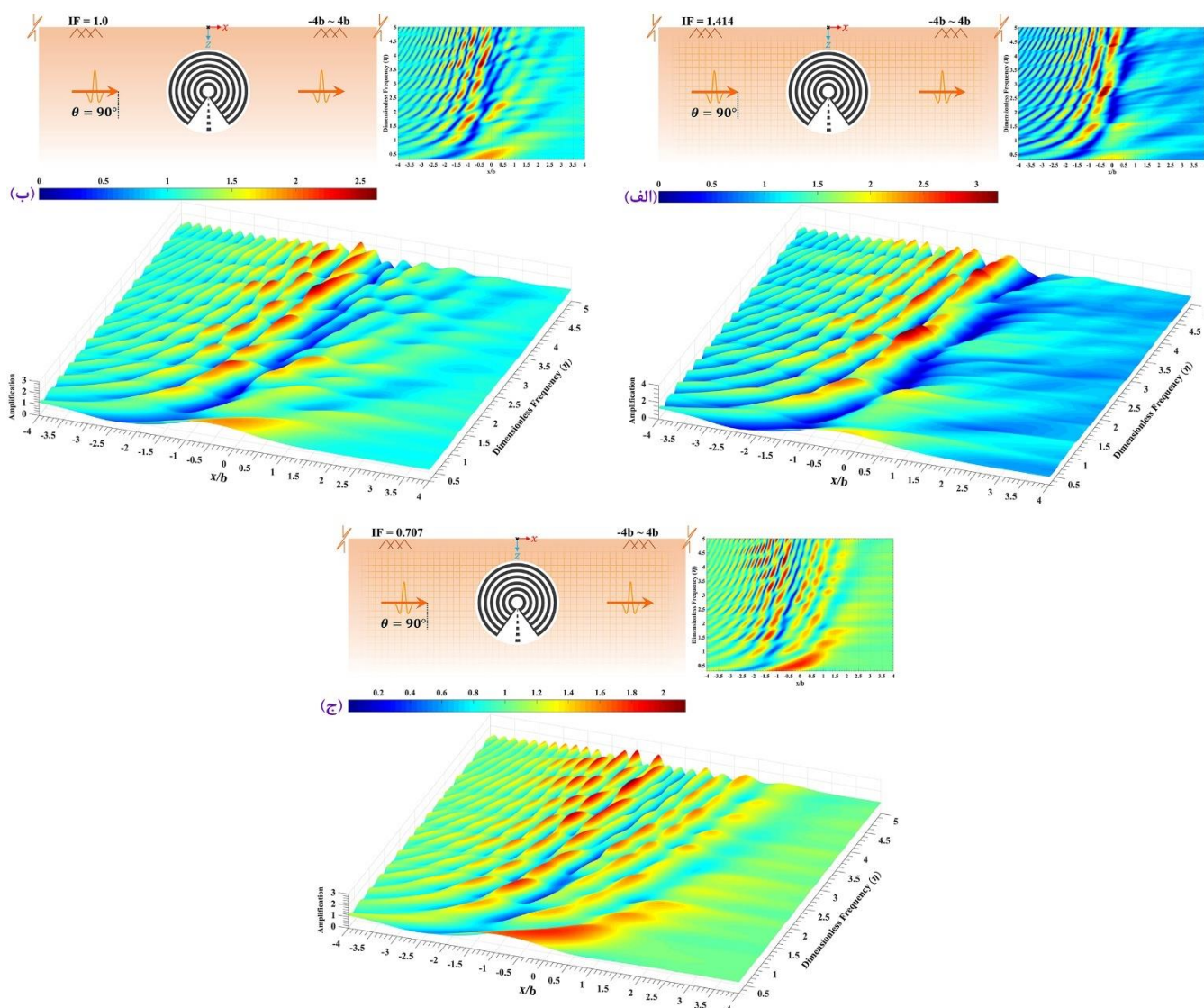
شکل (۵) - الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور یک تونل زیرزمینی دایره‌ای شکل بدون پوشش، واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ( $\zeta = 0.5$ ) در برابر امواج مهاجم افقی  $SH$ .

## ۴-۲- الگوی بزرگنمایی

در شکل‌های (۶) و (۷) الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور یک تونل دایره‌ای بدون پوشش در عوامل ایزوتروپی در شکل‌های (۶) و (۷) تحت امواج مهاجم  $SH$  قائم و افقی نشان داده شده است. در هجوم قائم موج (شکل ۶)، بیشینه‌ی بزرگنمایی در موقعیت فوقانی تونل به مقدار  $2/63$  و در عامل ایزوتروپی برابر واحد مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی الگوی نتایج نشان می‌دهد، در  $IF$  برابر  $1/414$ ، تمرکز کمتر بزرگنمایی در موقعیت عارضه موجب کاهش مقادیر بیشینه شده است. علاوه بر این، در  $IF$  برابر  $0/707$ ، اگرچه تمرکز بیشتر بزرگنمایی تا مقدار بیشینه‌ی  $2/39$  در موقعیت عارضه به چشم می‌خورد، اما امکان تجمع نواحی بزرگنمایی در یک نقطه‌ی واحد فراهم نشده است. هنگام هجوم جبهه‌ی موج افقی (شکل ۷)، بحران‌ترین وضعیت شکل گرفته که بیشینه‌ی بزرگنمایی را تا مقدار  $3/20$  در  $IF$  برابر  $1/414$  افزایش داده است.

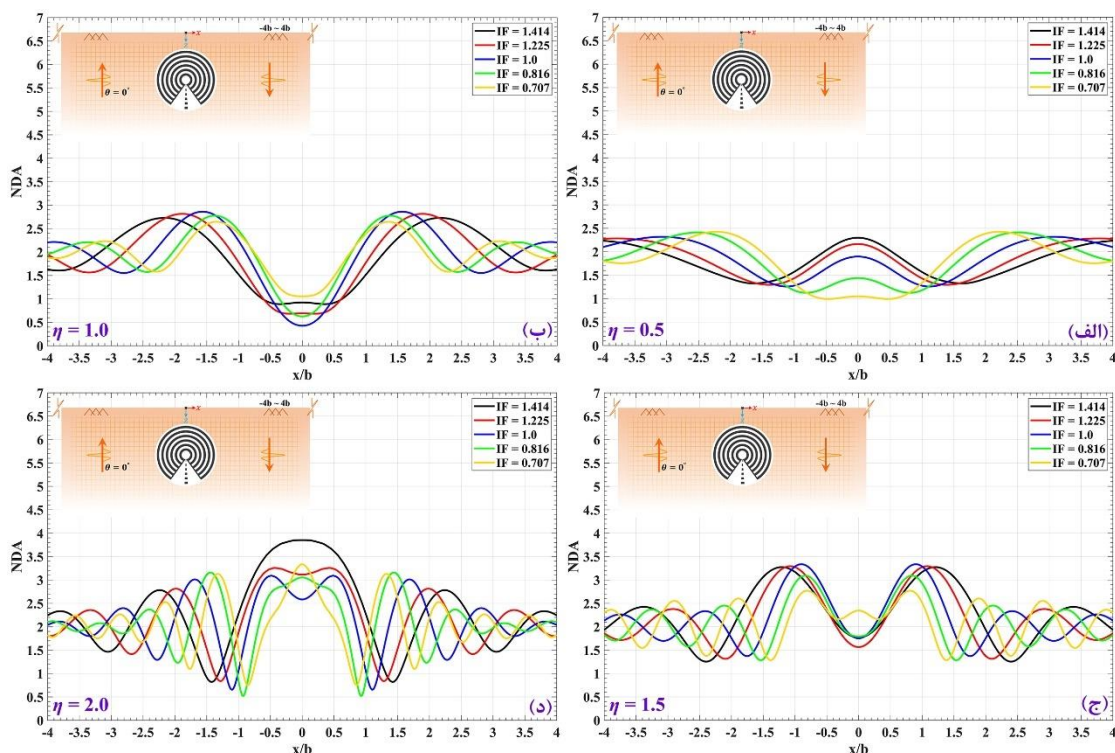


شکل (۶) - الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور یک تونل زیرزمینی دایره‌ای شکل بدون پوشش با نسبت عمق  $1/5$ ، واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ( $\kappa = 1/5$ ) تحت امواج مهاجم قائم  $SH$  در (الف)  $IF = 1/414$ ، (ب)  $IF = 1/0$  و (ج)  $IF = 0/707$ .

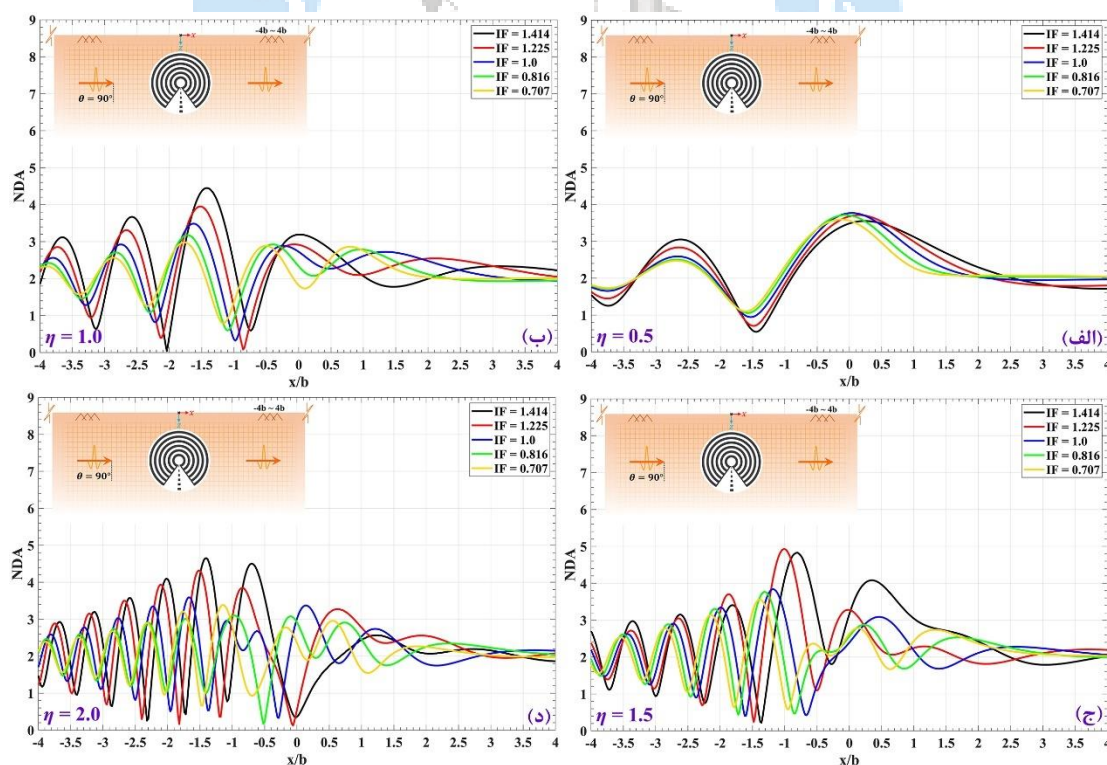


شکل (۷) - آنگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور یک تونل زیرزمینی دایره‌ای شکل بدون پوشش با نسبت عمق ۱/۵، واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ( $\zeta = 0.5$ ) در برابر امواج مهاجم افقی  $SH$  در (الف)  $IF = 1/414$ ، (ب)  $IF = 1/0$  و (ج)  $IF = 0/707$ .

در شکل‌های (۸) و (۹) تأثیر عامل ایزوتروپی مصالح بر دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در حضور تونل دایره‌ای زیرزمینی بدون پوشش در برابر هجوم امواج قائم و افقی نشان داده شده است. نتایج حاصل در فرکانس‌های بی‌بعد ۱/۵، ۱/۰ و ۲/۰ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، هرچه فرکانس افزایش یافته، ارتعاش بیشتر در پاسخ مشاهده می‌شود. همچنین، در برخورد قائم جبهه‌ی موج (شکل ۸)، میزان دامنه‌ی تغییرمکان در موقعیت استقرار تونل و در عامل ایزوتروپی برابر ۱/۴۱۴، از ۳/۸۵ فراتر نمی‌رود. اما در جبهه‌ی موج افقی (شکل ۹) مقدار تغییرمکان حداکثر در پشت عارضه به مقدار ۴/۹۲ برای  $IF$  برابر ۱/۲۲۵ یافته است. بنابراین می‌توان گفت، افزایش عامل ایزوتروپی (چینه‌بندی افقی مصالح) از یک سو و تمایل جبهه‌ی موج به افق (زلزله‌ی میدان نزدیک) از سوی دیگر، زمینه‌ساز بروز بحرانی‌ترین شرایط به ویژه در ناحیه‌ی استقرار تونل می‌شود.



شکل (۸) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک تونل زیرزمینی دایره‌ای شکل بدون پوشش در نسبت عمق  $1/5$ ، واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ( $\zeta = 1/5$ ) در برابر امواج مهاجم قائم  $SH$  در فرکانس بی‌بعد (الف)  $\eta = 0.5$ ، (ب)  $\eta = 1.0$ ، (ج)  $\eta = 1.5$  و (د)  $\eta = 2.0$ .



شکل (۹) - دامنه‌ی تغییر مکان بی‌بعد سطح زمین در حضور یک تونل زیرزمینی دایره‌ای شکل بدون پوشش در نسبت عمق  $1/5$ ، واقع در نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ ( $\zeta = 1/5$ ) در برابر امواج مهاجم افقی  $SH$  در فرکانس بی‌بعد (الف)  $\eta = 0.5$ ، (ب)  $\eta = 1.0$ ، (ج)  $\eta = 1.5$  و (د)  $\eta = 2.0$ .

## ۵- جمع بندی

در این مقاله، یک مطالعه‌ی عددی توسعه یافته با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌فضای میرا شده‌ی ارتوتروپ در حوزه‌ی زمان برای تعیین پاسخ لرزه‌ای زمین در حضور تونل زیرسطحی بدون پوشش تحت امواج مهاجم  $SH$  انجام شد. ضمن ارائه‌ی مختصر فرمول‌بندی و تحلیل مثال‌های صحت‌سنجی، نحوه‌ی تفرق امواج بر روی سطح زمین توسط نتایج پتویی حوزه‌ی زمان مشاهده شد. در ادامه، الگوی بزرگنمایی سطح زمین با محوریت پارامترهای کلیدی چون عامل ایزوتروپی و زاویه‌ی انتشار موج ارائه شد و در انتها نیز برخی منحنی‌های دوبعدی تغییر مکان بی‌بعد در فرکانس‌های مختلف برای سطح زمین، حساسیت‌سنجی شد. مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش حاضر به شرح ذیل جمع‌بندی می‌شود:

۱- با توجه به شکل دوآر مقطع تونل و تداخل کلیه‌ی فازهای انعکاسی، خزشی و احتباسی، همواره فی‌مابین سطح زمین و مرز فوقانی بازشدگی، شرایط بحرانی حاصل شد.

۲- هرچند در عامل ایزوتروپی حداکثر مفروض (۱/۴۱۴)، سهولت در حرکت افقی موج غالب شد و محدوده‌ی وسیع از سطح زمین متأثر شد، لکن دامنه‌ی پاسخ در قیاس با عامل ایزوتروپی حداقل (۰/۷۰۷) کاهش داشت.

۳- اثر ایزولاسیون حضور تونل در کاهش پاسخ سطح زمین در عامل ایزوتروپی حداقل مفروض چشمگیر بود که این موضوع در عامل ایزوتروپی حداکثر، حالت معکوس داشت.

۴- وضعیت بحرانی ارتعاش پاسخ در عامل ایزوتروپی حداکثر مفروض در هجوم جبهه‌ی موج قائم به چشم خورد که این موضوع در هجوم موج افقی، حالت عکس داشت.

۵- حداکثر بزرگنمایی سطح زمین در هجوم جبهه‌ی موج افقی به میزان ۳/۲۰ برای عامل ایزوتروپی حداکثر مفروض ثبت شد.

اگرچه در روش اجزای مرزی (BEM) محدودیت‌هایی چون فرمولاسیون پیچیده و توسعه‌ی کمتر در محیط‌های با خواص پلاستیک، غیرخطی و چند فازه به چشم می‌خورد، اما نویسندگان سعی دارند از طریق ترکیب رویکرد حاضر با سایر روش‌های عددی، بر این محدودیت‌ها در جهت تحلیل غیرخطی عوارض توپوگرافی پیچیده، فایز آیند.

## ۶- اعلام تعارض منافع

این پژوهش، با حمایت مالی بنیاد ملی نخبگان ([www.bmn.ir](http://www.bmn.ir)) با شناسه‌ی اعطای ۵۰۱۱۰۰۰۰۳۹۶۷ و شناسه‌ی استاندارد بین‌المللی (ISNI) ۰۰۰۰-۰۰۰۴-۵۹۰۷-۰۰۸۹، برای دریافت درجه‌ی پسادکترا از دانشگاه آزاد اسلامی زنجان ([www.iauz.ac.ir](http://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](http://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 ثابت‌قدم باشند. ان‌شاء...

## ۸ - مراجع

- [1] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., (2013) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophys J Int*, **194**(3), 1849-1865.
- [2] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., (2014) Analysing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. *Geophys J Int*, **197**(1), 591-607.
- [3] Panji, M., Ansari, B., (2017) Modeling pressure pipe embedded in two-layer soil by a half-plane BEM. *Comp Geotech*, **81**, 360-367.
- [4] Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2018) Time-history responses on the surface by regularly distributed enormous embedded cavities: Incident *SH*-waves. *Earthq Sci*, **31**, 1-17.
- [5] Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2019) Seismic amplification pattern of the ground surface in presence of twin unlined circular tunnels subjected to *SH*-waves [In Persian]. *J Transp Infrast Eng*, 2019, 10.22075/jtie.2019.16056.1342.
- [6] Li, Y.G., (1988) *Seismic wave propagation in anisotropic media with applications to denning fractures in the Earth* [Ph.D. dissertation]. University of Southern California.
- [7] Babuska, V., Cara, M. (1991) *Seismic anisotropy in the Earth*. Kluwer Academic Pub., Dordrecht, MA, 1991.
- [8] Aki, K., (1993) Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophys*, **218**(1-3), 93-111.
- [9] Ke, J., (2012) A new model of orthotropic bodies. *Appl Mech Mater*, **204**, 4418-4421.
- [10] Vinh, P.C., Anh, V.T.N., Linh, N.T.K., (2016) Exact secular equations of Rayleigh waves in an orthotropic elastic half-space overlaid by an orthotropic elastic layer. *Int J Sol Struct*, **83**, 65-72.
- [11] Gupta, S., Smita, S., Pramanik, S., (2017) Reflection and refraction of *SH*-waves in an orthotropic layer sandwiched between two distinct dry sandy half-space. *Procedia Eng*, **173**, 1146-1153.
- [12] Rajak, B.P., Kundu, S., (2019) Love wave propagation in a sandy layer under initial stress lying over a pre-stressed heterogeneous orthotropic half-space. *AIP Conference Proceedings*, **2061**(1), 020015, 10.1063/1.5086637.
- [13] Aki, K., Larner, K.L., (1970) Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane *SH*-waves, *J Geophys Res*, **75**(5), 933-954.
- [14] Varadan, V.K., Varadan, V.V., Pao Y.H., (1978) Multiple scattering of elastic waves by cylinders of arbitrary cross section, I, *SH*-waves, *J Acoust Soc Am*, **63**(5), 1310-1319.
- [15] Campillo, M., Bouchon, M., (1985) Synthetic *SH*-seismograms in a laterally varying medium by the discrete wavenumber method. *Geophys J Int*, **83**, 307-317.
- [16] Chen, J., Liu, Z.X., Zou, Z.Z., (2002) Transient internal crack problem for a nonhomogeneous orthotropic strip (mode I). *Int J Eng Sci*, **40**, 1761-1774.
- [17] Rangelov, T.V., Manolis, G.D., Dineva, P.S., (2010) Wave propagation in a restricted class of orthotropic inhomogeneous half-planes. *Acta Mechanica*, **210**, 169-182.
- [18] Bagault, C., Nélias, D., Baietto, M., (2012) Contact analyses for anisotropic half space: effect of the anisotropy on the pressure distribution and contact area. *Int J Sol Struct*, **134**(3), 031401-031409.
- [19] Sanchez-Sesma, F.J., Palencia, V.J., Luzon, F., (2002) Estimation of local site effects during earthquakes: An overview. *ISET J Earthq Technol*, **39**(3), 167-193.
- [20] Eidel, B., Gruttmann, F., (2003) Elastoplastic orthotropy at finite strains: multiplicative formulation and numerical implementation. *Comput Mater Sci*, **28**, 732-742.
- [21] Sladek, J., Sladek, V., Zhang, C., Krivacek, J., Wen, P., (2006) Analysis of orthotropic thick plates by meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) method. *Int J Numer Methods Eng*, **67**, 1830-1850.
- [22] Petrolito, J., (2014) Vibration and stability analysis of thick orthotropic plates using hybrid-Trefftz elements. *Appl Math Model*, **38**, 5858-5869.
- [23] Nguyen, M., Nha, N., Bui, T.Q., Tich, T.T., (2017) A novel numerical approach for fracture analysis in orthotropic media. *Sci Tech Dev J*, **20**, 5-13.
- [24] Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Qiasvand, A., (2021) Seismic analysis of the surface in the presence of underground lined tunnel subjected to vertical incident *P/SV* & *SH*-Waves: a comparative study [In Persian]. *Tunn Underg Space Eng*, **9**(3), 267-283, 10.22044/tuse.2021.10002.1397.
- [25] Guler, M.A., Kucuksucu, A., Yilmaz, K., Yildirim, B., (2017) 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*, **120**(C), 12-29.
- [26] Gupta, S., Smita, S., Pramanik, S., (2017) *SH*-wave in a multilayered orthotropic crust under initial stress: A finite difference approach. *Cogent Math*, **4**(1), 10.1080/23311835.2017.1284294.
- [27] Comez, I., Yilmaz, K., Guler, M., Yildirim, B., (2019) On the plane frictional contact problem of a homogeneous orthotropic layer loaded by a rigid cylindrical stamp. *Arch Appl Mech*, **89**, 1403-1419.

- [28] Lee, J.K., Han Y.B., Ahn, Y.J., (2015) *SH*-wave scattering problems for multiple orthotropic elliptical inclusions. *Adv Mech Eng*, **5**, 1-14.
- [29] Lee, J.K., Lee, H., Jeong, H., (2016) Numerical analysis of *SH*-wave field calculations for various types of a multilayered anisotropic inclusion. *Eng Analy BE*, **64**, 38-67.
- [30] Dominguez, J., (1993) *Boundary elements in dynamics*, Comp Mech Pub, Southampton, Boston.
- [31] Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2020) Transient response of irregular surface by periodically distributed semi-sine shaped valleys: Incident *SH*-waves. *J Earthq Tsu*, **14**(1), 2050005, 10.1142/S1793431120500050.
- [32] Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2021) Surface motion of alluvial valleys subjected to obliquely incident plane *SH*-wave propagation. *J Earthq Eng*, 10.1080/13632469.2021.1927886.
- [33] Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2021) On Subsurface Box-Shaped Lined Tunnel under Incident *SH*-wave Propagation. *Front Struct Civ Eng*, 10.1007/s11709-021-0740-x.
- [34] Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2021) Seismic antiplane response of gaussian-shaped alluvial valley [In Persian]. *Sharif J Civ Eng*, 10.24200/j30.2020.56151.2801.
- [35] Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M., Kamalian, M., (2020) On subsurface multiple inclusions model under transient *SH*-wave propagation. *Wave Rand Compl Med*, 10.1080/17455030.2020.1842553.
- [36] Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M., Kamalian, M., (2021) A review on *SH*-wave propagation for orthotropic topographic features. *Bull Earthq Sci Eng*, **8**(1), 1-15.
- [37] Leung, K.L., Vardoulakis, I.G., Beskos, D.E., Tasoulas, J.L., (1991) Vibration isolations by trenches in continuously nonhomogeneous soil by the BEM. *Soil Dyn Earthq Eng*, **10**, 172-179.
- [38] Hisada, J., (1992) 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.
- [39] Rajapakse, R.K.N.D., Gross, D., (1995) Transient response of an orthotropic elastic medium with a cavity. *Wave Motion*, **21**, 231-252.
- [40] Zheng, T., Dravinski, M., (1998) Amplification of *SH*-waves by an orthotropic basin. *Earthq Eng Struct Dyn*, **27**, 243-257.
- [41] Zheng, T., Dravinski, M., (1999) Amplification of waves by an orthotropic basin: Sagittal plane motion. *Earthq Eng Struct Dyn*, **28**, 565-584.
- [42] Ahmad, S., Leyte, F., Rajapakse, R.K.N.D., (2001) BEM analysis of two-dimensional elastodynamic problems of anisotropic solids. *J Eng Mech, ASCE*, **27**(2), 149-156.
- [43] Ge, Z., (2010) Simulation of the seismic response of sedimentary basins with constant-gradient velocity along arbitrary direction using boundary element method: *SH*-case. *Earthq Sci*, **23**, 149-155.
- [44] Dineva, P., Manolis, G., Rangelov, T., Wuttke, F., (2014) *SH*-wave scattering in the orthotropic half-plane weakened by cavities using BIEM. *Acta Acustica united Acustica*, **100**, 266-276.
- [45] Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M., Kamalian, M., (2022) Attenuated orthotropic time-domain half-space BEM for *SH*-wave scattering problems. *Geophys J Int*, 10.1093/gji/ggac032.
- [46] Kausel, E., (2006) *Fundamental solutions in elastodynamics*. Cambridge University Press, 9780511546112. Massachusetts Institute of Technology, 10.1017/CBO9780511546112.
- [47] Barkan, D.D., (1962) *Dynamics of bases and foundations*, McGraw-Hill series in soils engineering and foundations.
- [48] Galvin, P., Domínguez, J., (2007) Analysis of ground motion due to moving surface loads induced by high-speed trains, *Eng. Analy. B.E.*, **31**(11), 931-941.
- [49] Israil, A.S.M., Banerjee, P.K., (1990) Advanced time-domain formulation of BEM for two-dimensional transient elastodynamics. *Int J Numer Methods Eng*, **29**(7), 1421-1440.
- [50] Ricker, N., (1953) The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geophys*, **18**(1), 10-40.
- [51] Lee, V.W., (1977) On the deformations near circular underground cavity subjected to incident plane *SH*-waves. In: Conference proceedings, *Appl Comp meth Eng*, Los Angeles: Uni South California. **9**, 51-62.
- [52] Benites, R., Aki, K., Yomigida, K., (1992) Multiple scattering of *SH*-waves in 2-D media with many cavities, *Pure Appl Geophys*, **138**, 353-390.
- [53] Luco, J.E., de-barros, F.C.P., (1994) Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half-space. *Earthq Eng Struct Dyn*, **23**, 321-340.
- [54] Ahmed, H., (1989) Applications of mode-converted shear waves to rock-property estimation from vertical seismic profiling data. *Geophysics*, **54**(4), 478-485.
- [55] Niehoff, J.W., (2010) The Use of Geophysical Methods to Detect Abandoned Mine Workings. *GeoTrends 2010*, ASCE.
- [56] Roy, S., Stewart, R.R., (2012) Near-surface seismic investigation of barringer (meteor) crater, Arizona. *J Env Eng Geophys*, **17**(3), 117-127.
- [57] Ellefsen, K.J., Burton, W.C., Lacombe, P.J., (2012) Integrated characterization of the geologic framework of a contaminated site in west trenton, New Jersey. *J Appl Geophys*, **79**, 71-81.

- [58] Rucker, M.L., Crum, G., Meyers, R., Lommler, J.C., (2005) Geophysical identification of evaporite dissolution structures beneath a highway alignment. *Sinkholes and the Eng Env Impacts Karst*, ASCE.
- [59] Robinson, J.L., Anderson, N.L., (2008) Geophysical Investigation of the Delaware Avenue Sinkhole Nixa, Missouri. *Sinkholes Eng Env Imp Karst*, ASCE.
- [60] Nettles, S., Jarret, B., Cross, E.C., (2010) Application of surface geophysics for providing a detailed geotechnical assessment of a large resort development site in Anguilla, BWI. *GeoFlorida 2010*, GSP **199**, ASCE.
- [61] Parker, E.H., Hawman, R.B., (2012) Multichannel analysis of surface waves (MASW) in karst terrain, southwest Georgia: implications for detecting anomalous features and fracture zones. *J Eng Env Geophys*, **17**(3), 129-150.
- [62] Lingle, R., Jones, A.H., (1977) Comparison of log and laboratory measured *P*-wave and *S*-wave velocities. *Soc Prof Well Log Analysts*, 18<sup>th</sup> Annual Logging Symposium.
- [63] Eastwood, R.L., Castagna, J.P., (1983) Basis for the Interpretation of  $V_p/V_s$  Ratios in Complex Lithologies. *Soc Prof Well Log Analysts*, 24<sup>th</sup> Annual Logging Symposium.
- [64] Castagna, J.P., Batzle, M.L., Eastwood, R.L., (1984) Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks. *Geophysics*, **50**(4), 571-581.
- [65] Hiltunen, D.R., (2005) Practical applications of engineering geophysics to help solve tough problems and lead to improved technologies. *Soil Dyn Symp Honor Prof Richard D Woods*, GSP **134**, ASCE.
- [66] Schön, J.H., (2015) Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics, Chapter 4. *Dev Petrol Sci*, **65**, 109-118.
- [67] Zhang, X., Tsang, L., Wang, Y., Zhao, B., (2009) Petrologic composition model of the upper crust in Bohai Bay basin, China, based on Lamé impedances. *Applied Geophysics*, **6**, 327-336.
- [68] Trifunac, M.D., (1973) Scattering of plane *SH*-waves by a semi cylindrical canyon. *Earthq Eng Struct Dyn*, **3**(1), 267-281.

