

### فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده برای تونل‌های دوقلو دارای تفرق از طریق روش نوین *FEM-Scattering Method*

محمدعلی نوده فراهانی<sup>۱\*</sup>؛ حمیدرضا وثوقی فر<sup>۲</sup>؛ بهنام پرماس<sup>۳</sup>؛ بابک افشین فر<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
- ۲- استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
- ۳- دانشجوی دکتری عمران آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران
- ۴- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۴/۱۷  
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2018.6167.1321

واژگان کلیدی	چکیده
تفرق تونل دوقلو دینامیک تاریخچه زمانی اثر تاریخی	<p>خرابی‌های متعدد تونل‌های جدید ساخته شده، تحت بارگذاری زلزله، موجب تحقیقات وسیع‌تری در زمینه ارزیابی اثر زلزله بر روی تونل‌ها گردیده است. در این تحقیق با استفاده از تابع هنکل نوع اول و سه شتاب‌نگاشت مقیاس شده مربوط به زلزله حوزه نزدیک (نورت ریج، طبس و کوبه) و با استفاده از برنامه گسترش یافته <i>FESCAM</i> این تحقیق که در محیط متلب طراحی شده است، تفرق در سازه تاریخی سی‌وسه‌پل بررسی شده است. تابع هنکل نوع اول با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ذکر شده مقدار تفرق، میزان کرنش و تنش در اطراف تونل‌های دوقلو به‌عنوان یک پارامتر اضافه شونده به تحلیل المان محدودی حاضر اضافه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که میانگین جابه‌جایی افقی سی‌وسه‌پل در مقایسه با عدم در نظر گرفتن اثر تفرق ۲۸/۸٪ افزایش داشته و میزان جابه‌جایی قائم سی‌وسه‌پل در مقایسه با عدم در نظر گرفتن اثر تفرق ۳۰/۱۱٪ افزایش یافته است. نتایج آزمون من-ویتنی آماری که با برنامه <i>SPSS</i> انجام شده نشان می‌دهد که اختلاف آماری معنی‌داری مابین عملکرد لرزه‌ای سی‌وسه‌پل با اثر تفرق تونل‌ها و بدون اثر تفرق تونل‌ها وجود ندارد (<math>P - value \geq 0.05</math>).</p>

#### ۱- پیشگفتار

و دیگر فضاهای زیرزمینی منجر به حذف بخشی از توده خاک و بروز تغییرات قابل‌توجهی در وضعیت تنش، به‌خصوص در هنگام وقوع زلزله می‌گردد. از جمله نتایج این دست‌خوردگی‌ها وقوع کرنش‌هایی در توده خاک است. با این تفاسیر بررسی تأثیرات تونل‌ها چه در زمان حفاری و چه در زمان بهره‌برداری و به‌ویژه به هنگام وقوع زلزله بر روی سازه‌های مجاور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که این اهمیت در نزدیکی ابنیه تاریخی با توجه به ارزش‌های فراوان مادی و معنوی آن‌ها چندین برابر خواهد بود (Amorsi &

سازه‌های زیرزمینی با توجه به شرایط گسترش و توسعه شهرها، به‌طور فزاینده‌ای ساخته شده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. تونل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های زیرزمینی هستند. خرابی‌های متعدد تونل‌ها تحت بارگذاری زلزله و به‌ویژه خسارات وارد بر تونل‌ها موجب تحقیقات وسیع‌تری در زمینه ارزیابی اثر زلزله بر روی تونل‌ها گردید. ارتعاشات ناشی از زلزله می‌تواند به شکل امواج مختلف طولی و عرضی سازه‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده و لذا تغییر شکل‌های مختلفی در این ارتعاشات اتفاق می‌افتد. حفر تونل

\* نویسنده مسئول - تهران، خیابان کریم‌خان زند، خیابان ایرانشهر شمالی، شماره ۲۲۳، ساختمان مرکزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب؛ کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۳۳۱۱؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۸۸۸۳۰۸۲۶؛ دورنگار: ۰۲۱-۸۸۸۳۰۸۳۱؛ رایانامه: [node.farahani.civil@gmail.com](mailto:node.farahani.civil@gmail.com)

جابه‌جایی سطحی و دامنه جابه‌جایی در امتداد خطوط افقی نیز مورد بحث قرار داده‌اند (Moeen-Varizi & D. Trifunac, 1988).

هاشمی‌نژاد و همکارش در سال ۲۰۰۲ مدلی برای تفرق امواج هارمونیک در محیط پرو الاستیک اشباع معرفی کرده‌اند. در این تحقیق توسط برنامه متلب مدل مقاومت آکوستیکی بر حسب تابع فرکانس بی‌بعد با استفاده از روابط بسط و توابع مختلط ارائه شده است. منحنی‌های به دست آمده تأثیر پارامترهایی نظیر تخلخل، سطوح مشترک و سختی در پاسخ لرزه‌ای سازه نشان داده است (Hosseini & Hasheminejad, 2002).

در سال ۲۰۰۷ یک راه‌حل تحلیلی برای ارزیابی پراکندگی امواج توسط یک تونل دایره‌ای در محیط ناهمسانگرد و متخلخل الاستیک توسط گتمیری (Gatmiri) و اسلامی (Eslami) ارائه شده است. در روش پیشنهادی دو گروه تابع مختلط برای چارچوب جامد و سیال در صفحه دوبعدی برای حل معادلات بایوت در نظر گرفته شده است. در این تحقیق نتایج تنش‌ها، جابه‌جایی‌ها، فشار منفذی و پراکندگی امواج در محیط و به‌خصوص اطراف تونل بیان شده است (Eslami & Gatmiri, 2007).

هاشمی‌نژاد و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به بررسی اثرات امواج تخت هارمونیک در تونل دایره‌ای موازی با طول نامحدود در یک محیط پروالاستیک اشباع پرداخته‌اند. در این تحقیق روابط گسترش موج با استفاده از تئوری بایوت در محیط‌های پروالاستیک و شرایط مرزی مناسب در مختصات استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج روش پیشنهادی برای فرکانس‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز نشان داده شده است. بر طبق نتایج حاصله در فرکانس ۱۰۰ هرتز اثر تفرق افزایشی چندین برابری و موج‌های اندرکنشی به میزان کمتری افزایش یافته است. در حالی که در فرکانس ۱۰ هرتز ناشی از امواج برشی تأثیر تفرق بسیار ناچیز بوده است. با محدود کردن دو تونل در یک محیط الاستیک نتایج به صورت رضایت بخشی با راه‌حل‌های شناخته‌شده منطبق بوده است (Avazmohammadi & Hasheminejad, 2007).

گتمیری و اسلامی در سال ۲۰۰۸ یک روش برای ارزیابی پاسخ دینامیکی یک حفره استوانه‌ای در یک محیط

در اثر تنش‌های دینامیکی امواج لرزه‌ای، این تنش‌ها به تنش‌های استاتیکی موجود افزوده می‌شوند و باعث ایجاد تنش‌ها و تغییر شکل‌های بیشتری در محیط پیرامون مقطع حفاری می‌گردند. چنانچه این موج به یک حفره زیرزمینی مانند تونل برخورد کند، به دلیل تغییر مشخصات خاک، قسمتی از موج تغییر مسیر داده و بخش دیگر در آن محیط انتشار می‌یابد، این پدیده را تفرق می‌گویند. به طور کلی روش‌ها برای تحلیل تفرق امواج زلزله به دو دسته کلی روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم می‌شوند. در روش‌های تحلیلی تابع گسترش موج به طور گسترده‌ای جهت شبیه‌سازی تفرق امواج به کار می‌رود. در روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود یا روش المان‌های مرزی مسئله شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل می‌شود. محققین بسیاری پدیده تفرق را مورد بررسی قرار داده‌اند اما در ارتباط با مورد تفرق امواج زلزله در تونل‌های مترو مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است. در این تحقیق سعی می‌شود که اثر تفرق امواج زلزله در تغییر مکان و اجزای وابسته به آن بررسی شود و برنامه‌ای جدید جهت تجزیه و تحلیل تونل‌های موجود در مناطق لرزه‌خیز ارائه شود (Liu, Xie, & Liu, 2010).

برای اولین بار پاو و همکاران در سال ۱۹۷۳ تفرق امواج الاستیک را در اطراف یک استوانه در محیط نامحدود بررسی کرده‌اند. تحقیقات در محیط الاستیک نشان داده است که تمرکز تنش دینامیکی (Dynamic Stress Concentration) با در نظر گرفتن تفرق امواج در اطراف ناپیوستگی‌ها و جداشدگی‌ها بیشتر بوده است. پاو و همکاران (Pao & Monalis, 1973) در سال ۱۹۸۰ با به کارگیری روش المان مرزی به بررسی رفتار دینامیکی تونل‌های بدون پوشش با توجه به اثر تفرق امواج پرداخته است. در سال ۱۹۸۸ با کمک همکارش بسکس شکل تفرق امواج را با استفاده از پارامترهای روش مرزهای محدود ارزیابی کرده‌اند (Manolis & Beskos, 1983) و (Manolis G., 1980).

ناصر معین وریزی و همکارانش در سال ۱۹۸۸ پراکندگی و تفرق امواج  $p$  و  $sv$  را در یک محیط ناهمگن در منطقه لس‌آنجلس مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها با استفاده از تکنیک حداقل مربعات و روابط بسل (Bessel) و هنکل (Hankel) میزان تأثیر تفرق امواج را بر دامنه

FLAC نشان می‌دهد که با افزایش زمان بارگذاری متناوب میزان فشار منفذی افزایش و تنش مؤثر کاهش یافته است. همچنین میزان جابه‌جایی بالابرنده تونل  $42/7cm$  و در سطح زمین  $24/5cm$  بوده است. میزان ممان خمشی تونل در ابتدا افزایش یافته و سپس در حدود  $15/5\%$  و  $57/9\%$  کاهش یافته است (Azadi, 2011).

در سال ۲۰۱۲ لیو و همکارش وانگ راه‌حلی تحلیلی برای تمرکز تنش دینامیکی تونل دایره‌ای دوقلو نسبت به امواج قائم و برشی در یک فضای پر با استفاده از روش مشتقات متغیر مختلط پیشنهاد کرده‌اند و با استفاده از تجزیه هلمهولتز پراکندگی و تفرق امواج ما بین دو حفره تونل دایره‌ای با استفاده از تابع موج بیان شده است. در روش متغیر مختلط تغییر شکل‌های یکسان و شرایط مرزی مناسب به منظور رفع مشکل ارزش مرزها به کار گرفته شده‌اند. همگرایی این روش با دامنه وسیعی از فاکتورهای تمرکز تنش با کوتاه‌سازی سری دامنه‌ها ارزیابی شده‌اند. تأثیر فضای مابین دو تونل و فرکانس موج آن بر روی تمرکز تنش در طول دیواره‌های تونل با استفاده از روش پیشنهادی آزمایش شده و نتایج عددی نشان‌دهنده تأثیر به سزای آن‌ها در پاسخ دینامیکی روی دیواره‌های تونل بوده است (Liu & Wang, 2012).

در سال ۲۰۱۳، لیو (Liu) و همکارانش با استفاده از تئوری متغیرهای مختلط در صفحه و روش تصویری یک راه‌حل تحلیلی برای تفرق امواج هارمونیک قائم و برشی و رایلی در یک تونل دایره‌ای کم‌عمق در محیط نیمه الاستیک را پیشنهاد کرده‌اند. بخش اصلی این تحقیق به رفتارشناسی شرایط مرزی در فضای نیمه الاستیک و دیواره‌های تونل پرداخته است. مطالعات پارامتریک این روش پیشنهادی حاکی از تأثیرات قابل توجه عمق قرارگیری تونل، مدول برشی و ضخامت پوشش تونل بر روی پاسخ‌های دینامیکی بوده است (Liu & Wang, 2012).

مطالعات بعدی لیو و همکارانش در سال ۲۰۱۴ در ارتباط با تفرق امواج SH در یک تونل دایره‌ای با توجه به مصالح دانه‌بندی شده بوده است که آن‌ها با استفاده از روابط هلمهولتز (Helmholtz) تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها را بر اساس یک تابع متغیر مختلط بیان کرده‌اند و تأثیرات پارامترهای ناهمگنی، فرکانس بی‌بعد امواج و نسبت فاصله به شعاع

ناهمسانگرد (Anisotropic) متخلخل بی‌نهایت معرفی کرده‌اند. اساس این روش بر مبنای معادلات تثبیت‌شده بایوت در صفحه مختلط است که با استفاده از دو گروه توابع پتانسیل برای چارچوب جامد و مایع (هر گروه شامل سه تابع)، معادلات بایوت استفاده شده است. در این تحقیق نتایج عددی تنش مؤثر، جابجایی و فشار منفذی در مجاورت حفره استوانه‌ای در محیط ناهمسانگرد (Anisotropic) خطی متخلخل تحت موج P مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پارامترهایی نظیر  $(\frac{G_v}{E_v}$  و  $\frac{E_h}{k_v}$ ) بر روی پاسخ‌های به دست آمده برای محیط ناهمسانگرد تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. بر طبق نتایج در شرایط فشار آب منفذی میزان تنش‌ها به شدت به شرایط ناهمسانگردی محیط مذکور وابسته بوده است (Eslami & Gatmiri, 2008).

هاشمی‌نژاد و همکارش در سال ۲۰۰۸ به بررسی فاکتور تنش دینامیکی در تونل‌های دوقلو در داخل محیط اشباع پرداخته‌اند. در این تحقیق تأثیر نوع مواد، فرکانس امواج، شرایط زهکشی و مجاورت دو تونل بر روی تنش خطی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل با استفاده از مثال‌های عددی در دو تونل با پوشش بتنی واقع در محیط اشباع با توجه به تأثیر تفرق امواج در فرکانس‌های مختلف بر روی منحنی‌های پاسخ نشان داده شده است (Avazmohammadi, & Hasheminejad, 2008).

در سال ۲۰۰۹ جیانگ (Jiang) و همکاران با استفاده از معادلات بایوت و متغیرهای مختلط، تقریبی جدید برای تفرق دو بعدی امواج صفحه‌ای یک حفره استوانه‌ای با پوشش پروالاستیک ارائه داده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از مثال‌های عددی به طور کلی با افزایش ضخامت پوشش تونل در شرایط فرکانس‌های پایین، تنش و فشار منفذی کاهش یافته است. همچنین در شرایط فرکانس‌های پایین با افزایش نسبت مدول برشی، تنش دینامیکی و فشار منفذی افزایش یافته‌اند. بر طبق مشاهدات، تخلخل و ضریب پواسون، تأثیر بسیار ناچیزی بر تنش و فشار منفذی داشته‌اند (Jiang Zhou & Wang, 2009).

آزادی در سال ۲۰۱۱، رفتار لرزه‌ای تونل‌های شهری را در شرایط خاک نرم اشباع بدون در نظر گرفتن اثر تفرق مورد بررسی قرار داده است. نتایج تحلیل‌های نرم‌افزار

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- امواج زلزله

آن‌ها تکان‌های ناشی از زلزله که احساس و باعث به بار آمدن خرابی می‌شوند در واقع از سه نوع موج کشسان اساسی تشکیل شده‌اند. از این سه نوع فقط دو نوع در داخل جسم سنگ جامد قابل انتشارند. امواج حجمی خود به دو نوع موج طولی (اولیه یا  $P$ ) و موج عرضی ( $S$ ) تقسیم می‌شوند. در واقع می‌توان گفت سریع‌ترین موج زلزله موج طولی یا  $P$  است. حرکت آن درست شبیه امواج صوتی در یک مایع است. موجی را که با سرعت کمتر از میان جسم سنگ عبور می‌کند، موج ثانویه (عرضی یا  $S$ ) می‌گویند. وقتی یک موج  $k$  منتشر می‌شود تمایل به برش سنگ از پهلو عمود بر مسیر حرکت دارد. بنابراین امواج  $S$  در سطح زمین هم حرکت افقی و هم حرکت عمودی ایجاد می‌کنند. سرعت واقعی امواج  $P$  و  $S$  بستگی به چگالی و مشخصات کشسانی سنگ‌ها و خاک‌هایی دارد که این امواج از میان آن‌ها عبور می‌کنند. در بیشتر زلزله‌ها ابتدا موج  $P$  احساس می‌شود. اثر آن شبیه یک غرش صوتی است که باعث تکان دادن و به صدا در آوردن پنجره‌ها می‌شود. چند ثانیه بعد از امواج  $S$  از راه می‌رسند که اثر آن‌ها عمدتاً به صورت حرکت پهلوپهلو است، به نحوی که آن‌ها تکان‌های زمین هم افقی و هم عمودی خواهد بود. این حرکت ناشی از امواج  $S$  در تخریب سازه بسیار مؤثر است. سرعت امواج طولی بیشتر از امواج عرضی است یعنی  $V_p > V_s$  سومین نوع از امواج زلزله موج سطحی نامیده می‌شود. چون حرکت آن محدود به سطح زمین است. این امواج شبیه چین و شکن‌های آب در سطح یک دریاچه است.

نوع دوم از امواج سطحی به نام موج ریلی خوانده می‌شوند. ذرات سنگ تحت اثر موج ریلی مثل امواج غلتان اقیانوس دچار حرکت عمودی و افقی در یک صفحه‌ی عمودی در امتداد مسیر حرکت امواج می‌شوند. امواج سطحی آهسته‌تر از امواج حجمی حرکت می‌کنند.

### ۲-۲- روابط هنکل

برای امواج  $P$  با دامنه  $\emptyset_0$  که به صورت مایل در فضا منتشر می‌شوند بر اساس رابطه (۱) پتانسیل اولیه موج از طریق تابع  $\emptyset^i$  و پتانسیل موج بازتاب شده  $P$  از طریق تابع  $\emptyset^r$

حفره را بر روی پاسخ دینامیکی محیط نشان داده‌اند (Liu & Zhao, 2014).

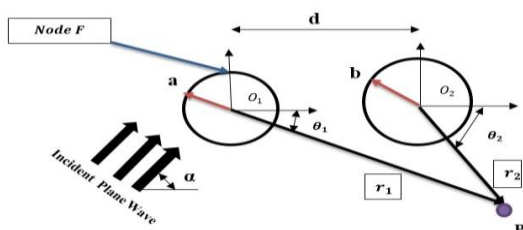
در سال ۲۰۱۴ تحلیل دینامیکی دو حفره با به کارگیری توابع مختلط و روش نقشه‌برداری ساختاری (*Conformal mapping method*) و مختصات محلی، پراکندگی امواج الاستیک، تمرکز تنش دینامیکی در مواد دانه‌بندی شده توسط زو (Zhou) و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی این تحقیق، فاکتور تمرکز تنش دینامیکی (*Dynamic Stress Concentration Factor*) برای دو حفره بیضی‌شکل در مواد دانه‌بندی شده را ارائه داده است. در ادامه تحقیق تأثیر عدد موج و فاصله حفره‌ها را در توزیع تنش دینامیکی تجزیه و تحلیل شده است (Zhou, Hu, Ma & Liu, 2014).

لی در سال ۲۰۱۵، پراکندگی امواج ناپایدار در چند حفره واقع در نزدیکی سطح زمین مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق با استفاده از روش باقی‌مانده وزنی (*Weighted-Residuals Method*) تفرق و پراکندگی امواج سطحی ریلی و امواج  $P$  و  $SV$  در اطراف لایه‌های مختلف و تشدید حرکات زمین در محیط ناهمگن ارائه شده است. نشان داده شد در زمانی که موج عمود بر محور استوانه منتشر می‌شود، موج پراکنده بدون تغییر باقی مانده است و موج پراکنده منتشرشده در این طرح همان موج ورودی بوده است. همچنین در زمانی که موج در راستای تار خنثی منتشر می‌شود (زاویه مورب با محور استوانه) موج تفرق یافته غیر قطبی بوده است، و توزیع فضایی آن سه بعدی به دست آمده است (Lee, 2015).

بنابراین یک روش تقویت برای این سازه پیشنهاد شده است که به لایه‌های سنگ اجازه حرکت بر روی هم را فراهم می‌کند ولی سنگ‌های هر لایه را در کنار هم ثابت نگه می‌دارد. پاسخ‌های شبیه‌سازی المان محدود با روش تقویت پیشنهادی به طور چشم‌گیری پاسخ لرزه‌ای سازه را بهبود داده است (Didem Aktas & Turer, 2015).

در تحقیق حاضر با استفاده از تابع هنکل نوع اول، امواج ورودی تحلیل شده و خروجی تابع امواج تفرق یافته محاسبه و در نهایت به منظور تحلیل عددی، فاکتوری به نام فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح‌شده، معرفی و نمودارهای حاکم بررسی شده است.

در رابطه (۴)، مقادیر  $\rho_{11}, \rho_{22}, \rho_{12}$  چگالی‌های مؤثر (مستقل از فرکانس)،  $\omega$  فرکانس تحریک،  $\phi_0$  تخلخل،  $K_S$  مدول حجمی (بالک) مواد الاستیک  $K_{F1}$  مدول حجمی سیال اشباع،  $\mu$  مدول برشی و  $\lambda$  پارامتر اول لامه (Lame's first parameter) هستند (Hasheminejad & Avazmohammadi, 2007). برای مدنظر قرار دادن تفرق بر اساس روابط ذکرشده، محدوده در نظر گرفته شده مطابق شکل ۱، نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه مدل تونل دوقلو و امواج P

دینامیک پدیده تفرق با توجه به سری فوریه بیان می‌شود. امواج سریع و آهسته در سیستم مختصات هر یک از حفره‌های استوانه‌ای مطابق رابطه (۵) بیان می‌شوند (Hasheminejad & Avazmohammadi, 2007):

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n^{(i)} J_n(k_{f,s} r_i) e^{in\theta_i} \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

$$Y_n^{(1)} = i^n e^{-in\alpha}$$

$$Y_n^{(2)} = Y_n^{(1)} e^{ikd \cos \alpha}$$

در رابطه ۵،  $J_n$  تابع بسل نوع اول برای محیط استوانه است. به طور مشابه پتانسیل تفرق اطراف حفره‌ها در محیط پروالاستیک از طریق رابطه (۶) بیان می‌شود (Hasheminejad & Avazmohammadi, 2007):

$$\phi_f^{(i)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(i)}(\omega) H_n(k_f r_i) e^{in\theta_i} \quad (6)$$

$$\phi_s^{(i)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(i)}(\omega) H_n(k_s r_i) e^{in\theta_i}$$

در رابطه شماره (۶)  $H_n$  تابع هنکل نوع اول استوانه است. بنابراین تابع پتانسیل کل در محیط پروالاستیک در اطراف حفره‌های استوانه‌ای برای اندرکنش تفرق‌های چندگانه در ابتدا به صورت زیر نوشته می‌شود (Hasheminejad & Avazmohammadi, 2007):

محاسبه می‌شوند (Zhao, Liu & Wang, 2013):

$$\phi^i = \phi \cdot \exp[ik_{L1}(x \sin y + y \cos y)] \quad (1)$$

$$\phi^r = A_1 \exp[ik_{L1}(x \sin y + y \cos y)]$$

در رابطه (۱)،  $i = \sqrt{-1}$  و  $A_1$  ضریب شرایط مرزی است که در بخش شرایط مرزی معرفی می‌گردد (Zhao, Liu & Wang, 2013). مقادیر ذکرشده طبق رابطه (۲) ارائه می‌شوند.

$$k_{L1} = \frac{c_{L1}}{c_{T1}} \quad (2)$$

در رابطه شماره (۲)،  $k_{L1}$  نسبت سرعت موج طولی به عرضی است.

طبق تئوری هلمهولتز، هر میدان برداری را می‌توان به صورت مجموع گرادیان یک میدان اسکالر و کرل یک میدان برداری بیان نمود. از این رو در محیط فرکانسی برای توصیف میدان تغییر مکان هر محیط نامحدود، می‌توان معادلات موج را مطابق رابطه شماره (۳) ارائه نمود (Hasheminejad & Avazmohammadi, 2007):

$$\nabla^2 \phi_{f,s} + k_{f,s}^2 \phi_{f,s} = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\phi_{f,s}$  تابع پتانسیل امواج سریع و آهسته و  $k_f, k_s$  و به ترتیب عدد موج انتخابی در حالت سریع، آهسته‌اند. مقادیر ذکرشده از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شوند.

$$k_t^2 = \frac{c}{\mu(\rho_{\gamma\gamma} \omega^2 + i\omega b)}$$

$$k_{fs}^2 = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$M = \frac{1}{\left( \frac{(\beta - \phi)}{K_S} + \frac{\phi}{K_{F1}} \right)}$$

$$Q = \phi \cdot M (\beta - \phi) \quad (4)$$

$$R = \phi^2 \cdot M$$

$$A = (\lambda + 2\mu)R - Q^2$$

$$B = \omega^2 [\rho_{11}R + \rho_{22}(\lambda + 2\mu) - 2\rho_{12}Q] +$$

$$i\omega b (\lambda + 2\mu + 2Q + R)$$

$$C = \omega^2 [\omega^2 (\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2) + i\omega \rho b]$$

ساده‌سازی در رابطه شماره (۱۱) ارائه می‌شود  
(Hasheminejad & Avazmohammadi, 2008):

$$\begin{aligned} P_p &= Mb_f K_f \varphi_f + Mb_s K_s \varphi_s \\ \sigma_{rr} &= a_f k_f \varphi_f + a_s k_s \varphi_s + \nu \mu_i r \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{\mu}{r} \left( \frac{\partial \mu_r}{\partial \theta} + r \frac{\delta \mu_\theta}{\delta r} - \mu_\theta \right) \\ \sigma_{\theta\theta} &= a_f k_f \varphi_f + a_s k_s \varphi_s + \nu \mu \left( \frac{\mu_r}{r} + \frac{1}{r} u_\theta \right) \end{aligned} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، تنش نرمال،  $\sigma_{r\theta}$  تنش مماسی و  $\sigma_{\theta\theta}$  تنش حلقوی،  $P_p$  فشار منفذی سیال است. مقادیر  $a_{fs}$  و  $b_{fs}$  به صورت رابطه (۱۲) بیان می‌شود  
(Hasheminejad & Avazmohammadi, 2008):

$$\begin{aligned} a_{f,s} &= \lambda_f + \varphi \cdot \beta M \cdot (1 - \mu_{f,s}) \\ b_{f,s} &= \beta + \varphi \cdot (\mu_{f,s} - 1) \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه شماره (۱۲)، مقادیر پارامترهای  $\lambda_{fs}$  و  $\mu_{fs}$  بر اساس رابطه شماره (۱۳) محاسبه می‌شوند  
(Hasheminejad & Hosseini, 2002):

$$\begin{aligned} \lambda_f &= K_F - \frac{\nu \mu}{\nu} \\ \mu_{f,s} &= \frac{\omega^\nu (\rho_{1r} R - \rho_{1\theta} Q) - k_{f,s}^\nu [(\lambda + \nu \mu) R - Q^\nu] + j \omega b (Q + R)}{\omega^\nu (\rho_{1r} Q - \rho_{1\theta} R) + j \omega b (Q + R)} \end{aligned} \quad (13)$$

در این تحقیق برای عمومی‌سازی رابطهٔ هنکل و محاسبهٔ دقیق تفرق از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. امواج ورودی تحقیق شده توسط محققین برای استفاده در تابع هنکل امواج هارمونی‌اند در حالی که طبیعت امواج لرزه‌ای به صورت تاریخچه غالب به دست آمده در تابع هنکل ارزیابی شده است. تبدیل حوزهٔ زمانی به فرکانسی بر اساس رابطهٔ (۱۴) انجام می‌شود.

$$a(t_k) = \sum_{n=-\frac{N}{\nu}+1}^{\frac{N}{\nu}} F(\omega_n) \cdot \exp(i \omega_n t_k) \quad (14)$$

در رابطه ۱۴ مقدار تاریخچه زمانی شتاب در زمان  $t_k$  است.  $F(\omega_n)$  تبدیل فوریه گسسته در فرکانس  $\omega_n$  و  $N$  مرتبه تبدیل فوریه گسسته است. شکل ۲، روند برنامه اجزای محدود گسترش یافته را ارائه می‌کند.

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_f^{(i)} + \phi_s^{(i)} + \phi_f^{(j)} + \phi_s^{(j)} + \phi_{f,s}^{(j)} \\ \phi &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(i)}(\omega) H_n(k_f r_i) e^{in\theta i} + \\ & \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(i)}(\omega) H_n(k_s r_i) e^{in\theta i} + \\ & \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n^{(i)} J_n(k_{f,s} r_i) e^{in\theta i} + \\ & \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(j)}(\omega) H_n(k_f r_j) e^{in\theta j} + \\ & \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(j)}(\omega) H_n(k_s r_j) e^{in\theta j} \end{aligned} \quad (V)$$

در رابطه شماره (V)،  $i, j = 1, 2 (i \neq j)$  می‌باشند. در هر معادله اندیس  $j$  برای بیان حفره  $j$  ام در سیستم مختصات  $j$  ام است. این شرایط باید به سیستم مختصات استوانه  $i$  ام قبل از اعمال شرایط مرزی انتقال داده شود. در رابطه شماره (V)،  $A_n(\omega)$  و  $B_n(\omega)$  ضرایب مرزی هستند  
(Hasheminejad & Avazmohammadi, 2007).

### ۲-۳- شرایط مرزی

به منظور تعیین ضرایب  $A_n(\omega)$  و  $B_n(\omega)$  در معادلات شماره (V) شرایط مرزی و شرایط محیط اندرکنش باید خطی در نظر گرفته شود. شرایط مرزی در سطح زمین برای تنش آزاد به صورت رابطه شماره (۸) ارائه می‌شود  
(Liu & Wang, 2013):

$$\sigma_{y1} = \sigma_{xy1} = 0 \quad (y = 0) \quad (8)$$

شرایط مرزی برای تنش پوشش اطراف تونل به صورت رابطه شماره (۹) بیان می‌شود.

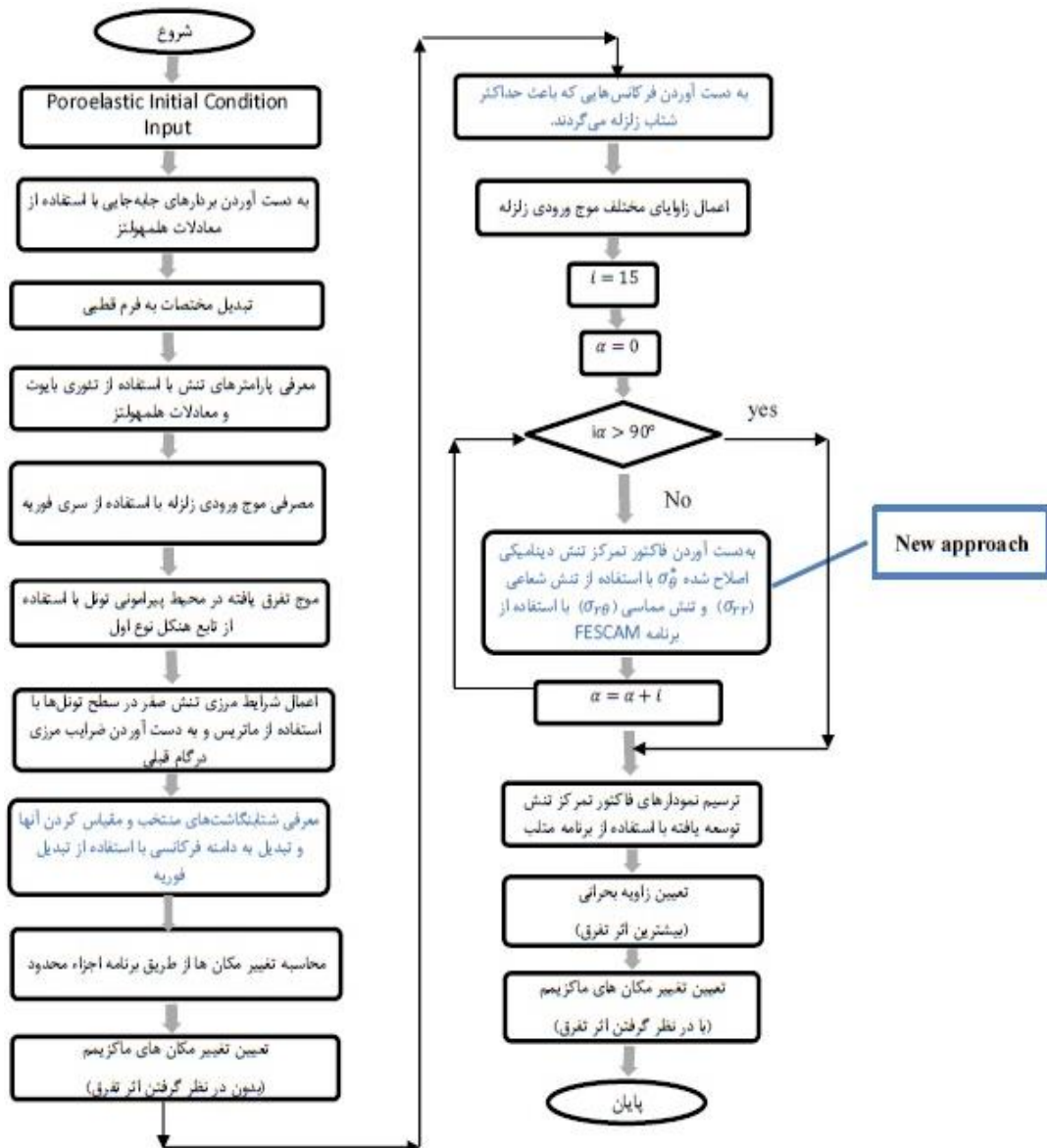
$$\sigma_{r2} = \sigma_{r\theta2} = 0 \quad (r_1 = R_1) \quad (9)$$

شرایط مرزی مناسب در سطح هر یک از حفره‌های استوانه‌ای منجر به راه‌حلی منحصر به فرد برای حل این مسئله شده است که مطابق با روابط (۱۰) ارائه می‌شوند  
(Hasheminejad & Avazmohammadi, 2007):

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(i)} \big|_{r_i=a,b} &= 0 \\ \sigma_{r\theta}^{(i)} \big|_{r_i=a,b} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$w_{rr}^{(i)} \big|_{r_i=a,b} = k_s P_P^{(i)} \big|_{r_i=a,b}$$

در رابطه (۱۰)،  $w_{r=0} = 0 (U_{r=0} - u_{r=0})$ ، سرعت فیلتراسیون،  $U$  جابه‌جایی محیط جامد،  $u$  جابه‌جایی محیط سیال اشباع و  $0 \leq k_s < \infty$  مشخصه نفوذپذیری است. با استفاده از فرضیات تئوری بایوت و معادله (۳) و پس از



شکل ۲- نمودار گردش‌ی بهینه‌شده برنامه تفرق

نظر گرفته شده به‌وسیله روابط ۱۵ به دامنه فرکانسی بسط داده شده است.

$$C_L = \sqrt{\lambda_e + 2\mu_e / \rho_e} C_T = \sqrt{\mu_e / \rho_e} \rho_e = (1 - \phi) \rho_s = \phi \cdot \rho_{fl} \quad (15)$$

که در آن  $C_L$ ،  $C_T$  و  $\rho_e$  به ترتیب ضرایب موج برشی سریع، سرعت برشی موج و چگالی متوسط در محیط الاستیسته هستند. در مرحله بعد مشخصات سه

همان‌طور که در نمودار گردش‌ی ارائه شده نشان داده شده است، روابط ریاضی برای توصیف مقادیر جابه‌جایی و تنش از طریق تئوری بایوت و شرایط اولیه مطالعه موردی انجام شده، مورد استفاده قرار گرفته است. پتانسیل امواج ورودی از طریق تابع هنکل تعریف می‌شوند (Hasheminejad & Hosseini, 2002). پارامتر تخلخل ( $\phi$  Porosity Value) در مدل وابسته به فرکانس در

شتاب‌نگاشت با مشخصات درج شده در جدول ۲، آورده شده است. ۲۰ ثانیه اول این شتاب‌نگاشت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. زیرا به طور معمول بعد از ۲۰ ثانیه زلزله‌های حوزه نزدیک انتخاب شده میرا شده‌اند. فرکانس‌های مورد استفاده در جدول شماره ۳ و ۴ نشان داده شده است.

در جدول شماره ۱،  $\gamma_{sat}$  چگالی اشباع،  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $\psi$  زاویه اتساع و  $C$  چسبندگی خاک است.

با استفاده از رابطه (۱۴) شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده ذکر شده در شکل ۳، دامنه طیف فوریه زلزله‌های مذکور به صورت شکل ۴ نشان داده شده است (Naeim, 2001).

زلزله حوزه نزدیک با بزرگی‌های بیشتر از ۶/۵ ریشتر در مقیاس واحد به وسیله شتاب‌نگاشت‌های آن‌ها معرفی، سپس با استفاده از بسط فوریه از محیط زمانی به محیط فرکانسی تبدیل می‌گردند. ویژگی بارز برنامه توسعه یافته (FESCAM) با تحقیقات مشابه استفاده از طیف فرکانسی مقیاس شده زلزله‌های مذکور به جای امواج هارمونیک و استفاده از این فرکانس‌ها جهت به دست آوردن پارامتر تمرکز تنش دینامیکی تحت فرکانس‌های واقعی است.

## ۲-۴- معرفی شتاب‌نگاشت زلزله مورد استفاده

### در تحقیق

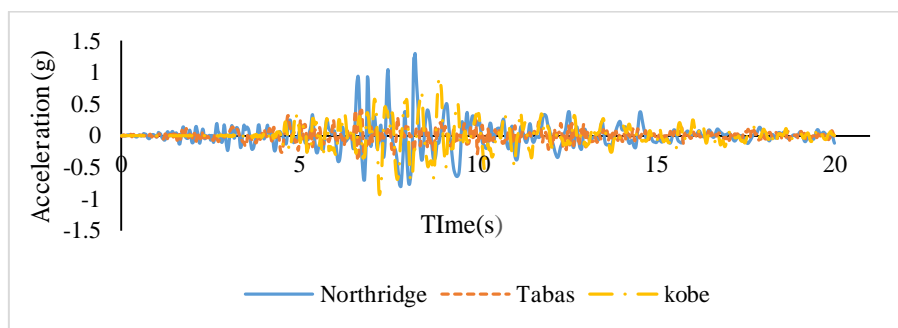
با توجه به مشخصات خاک مطابق جدول ۱ که بیانگر مشخصات زمین‌شناختی بستر است و تدقیق و مقایسه، ۳

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی واحدهای اصلی تشکیل دهنده زمین میزبان مسیر تونل‌ها

نام لایه خاک	ضخامت لایه	$\gamma_{sat}$ ( $kg/m^3$ )	$E$ ( $kg/m^2$ )	$\nu$	$\phi$	$\psi$	$C$ ( $kg/m^2$ )
رسوبات رسی	۱/۱ m	۲۰۴۰	$12 \times 10^5$	۰/۳۵	۲۵	۰/۱	۳۰۰۰
شن و ماسه	۳۰/۱ m	۲۱۲۰	$20 \times 10^5$	۰/۳	۳۵	۰/۱۵	۱۵۰۰
سیلت فشرده	۸ m	۲۰۵۰	$45 \times 10^5$	۰/۳۲	۳۰	۰/۱	۵۰۰۰

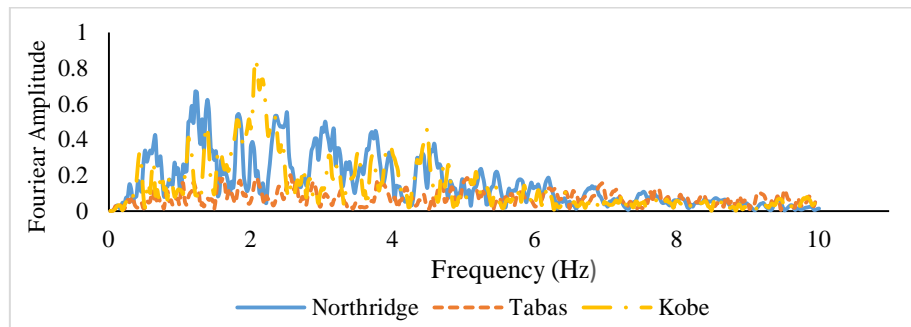
جدول ۲- مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده حوزه نزدیک مورد استفاده

نام زلزله	سال وقوع زلزله	ایستگاه	بزرگی	PGA	فاصله (km)
Northridge	1994	Anacapa Island	۶/۶۹	۱/۲۹۱۹	۲۰/۷۲
Tabas	1978	Dayhook 9102	۷/۳۵	۰/۴۳۰۱	۲۱/۴۱
Kobe	1995	Nishi Akashi	۶/۹	۰/۹۳۴۰	۷/۰۸



شکل ۳- شتاب‌نگاشت سه زلزله‌های حوزه نزدیک (نورتریج - طیس - کوبه)





شکل ۴- طیف فوریه سه زلزله حوزه نزدیک (نورتریج - طیس - کوبه)

جدول ۳- مشخصات فرکانس‌های استخراج‌شده از شتاب‌نگاشت زلزله نورتریج، طیس و کوبه

Frequency	Fouriear Amplitude (Northridge)	Fouriear Amplitude (Tabas)	Fouriear Amplitude (Kobe)
۰/۱	۰/۲۳۴	۰/۰۳۰	۰/۰۲۸
۱	۰/۱۲۹	۰/۰۳۸	۰/۱۲
۱۰	۰/۰۱۴	۰/۰۷۳	۰/۰۲۹

جدول ۴- مشخصات فرکانس‌های زلزله‌های نورتریج، طیس و کوبه در فرکانس حداکثری شتاب‌نگاشت مقیاس شده زلزله

Earthquakes	Frequency (Peak Acceleration)	Fouriear Amplitude
Northridge	۳/۳۹۴	۰/۲۷۶
Tabas	۶/۷۱۴	۰/۰۸۱
Kobe	۷/۲۵۱	۰/۰۹۵

## ۲-۵- تونل دوقلوی اصفهان

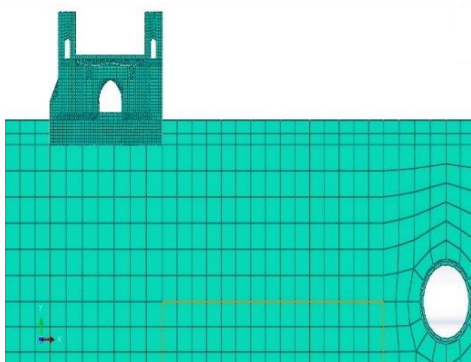
فاصله تونل‌ها از آن، سه لایه خاک زیر پل و ابعاد هندسی تونل‌های دوقلو مترو هستند که مشخصات ذکر شده در جدول ۱، درج شده است. فاصله مرکز به مرکزی تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان ۱۶/۰۴ متر، قطر خارجی و داخلی این تونل‌ها به ترتیب ۶/۹۲ و ۶ متر، ضخامت پوشش تونل‌ها ۰/۲ متر و ضخامت و طول سگمنت‌ها به ترتیب، ۰/۳ و ۱/۴ متر است. شکل ۵، محل قرارگیری تونل و سی‌وسه‌پل را نسبت به یکدیگر و شکل ۶، نیز هندسه سی‌وسه‌پل شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهند. شکل ۶- الف، هندسه تونل‌ها و پل تاریخی شبیه‌سازی شده و نقاط مرجع برای قیاس نتایج و شکل ۶- ب، مش‌بندی انجام شده بر اساس نوع مصالح هر قسمت و ضریب پایداری را نشان می‌دهند.

بخشی از خط متروی اصفهان در نزدیکی سازه تاریخی سی‌وسه‌پل به‌عنوان مطالعه موردی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. سی‌وسه‌پل یا پل الله‌وردی خان پلی با ۳۳ دهانه، ۲۹۵ متر طول و ۱۴ متر عرض است که توسط الله‌وردی خان بر روی زاینده‌رود در شهر اصفهان در اوایل قرن هفدهم میلادی ساخته شده است (Manoochehri, 2015). بخش انتخاب‌شده برای تحقیق قسمتی است که تونل‌های دوقلوی متروی اصفهان در عرض رودخانه زاینده‌رود و از عمق ۱۴ تا ۱۸ متر و در امتداد طول سی‌وسه‌پل عبور می‌کنند. در واقع مدل شبیه‌سازی شده دارای مشخصات: مقطع عرضی سازه تاریخی پل سی‌وسه‌پل،

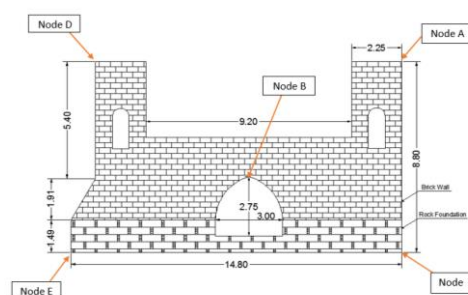
فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده برای تونل‌های دوقلو دارای تفرق از طریق روش نوین...: ص ۲۹-۴۹



شکل ۵- موقعیت تونل‌ها نسبت به سازه تاریخی سی‌وسه‌پل



ب) مش‌بندی مدل در برنامه المان محدود



الف) هندسه سی‌وسه‌پل

شکل ۶- هندسه و مش‌بندی سی‌وسه‌پل

### ۳- نتایج و تحلیل عددی

تونل در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی اثر تفرق از طریق برنامه گسترش‌یافته پارامتر بدون بعد فاکتور تمرکز تنش دینامیکی (*DSCF*) ارائه شده در رابطه (۱۲) استفاده شده است. بر اساس تئوری بایوت مقادیر مورد نیاز در تحلیل عددی مطابق جدول شماره ۵، به مدل گسترش‌یافته تعریف شده است. مقادیر فرکانس‌های ورودی بر اساس تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی مطابق جدول ۳، به‌عنوان ورودی فرکانس در برنامه *FESCAM* در نظر گرفته شده است. فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها و سی‌وسه‌پل همانند آنچه در شکل ۲، آمده است از  $d=38$  الی  $d=95.96$  متر متغیر بوده است. جابه‌جایی‌ها در فواصل  $d=95.96$  و  $d=60$ ،  $d=38$  متر محاسبه شده است. در نهایت فاصله  $d=38$  متر با توجه به نزدیک‌تر بودن تونل به سی‌وسه‌پل و اثر القایی بیشتر آن، به‌عنوان فاصله بحرانی

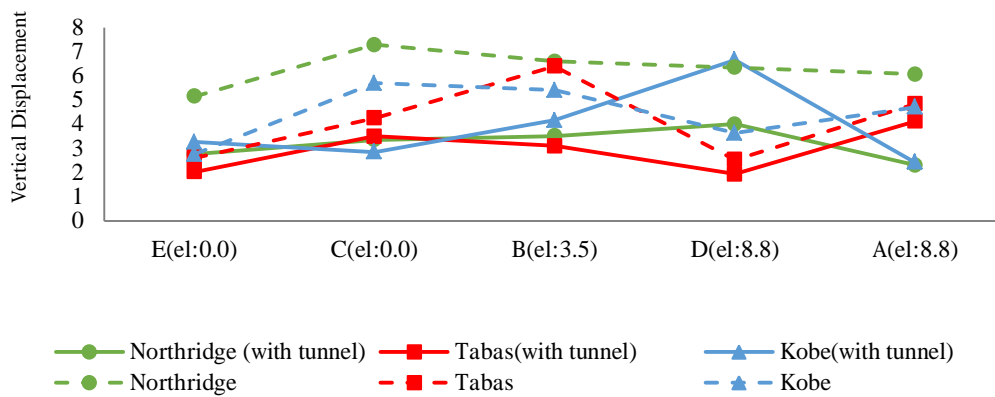
در این مقاله روشی جدید جهت به دست آوردن میزان جابه‌جایی و تنش در اطراف تونل و سازه‌های مجاور پیشنهاد شده است. در مقالات قبلی تنش و نشست در حالت فقط تفرق (*Hasheminejad & Avazmohammadi, 2008*) و یا فقط در حالت بدون اثر تفرق (*Afifpour, Sharifzadeh, Shahriar & Jamshidi, 2011*) شده‌اند. در این مقاله روشی جدید جهت به دست آوردن فاکتور تمرکز تنش دینامیکی ارائه شده است، به طوری که اثر زلزله و تفرق رو توأمان در نظر می‌گیرد. مقادیر استفاده شده در کدنویسی انجام شده در جدول ۵، آورده شده است.

در این بخش از طریق نرم‌افزار گسترش‌یافته المان محدود مقادیر جابه‌جایی‌های افقی و قائم سازه سی‌وسه‌پل تحت زلزله‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر جابه‌جایی‌ها در دو حالت حضور تونل و بدون حضور

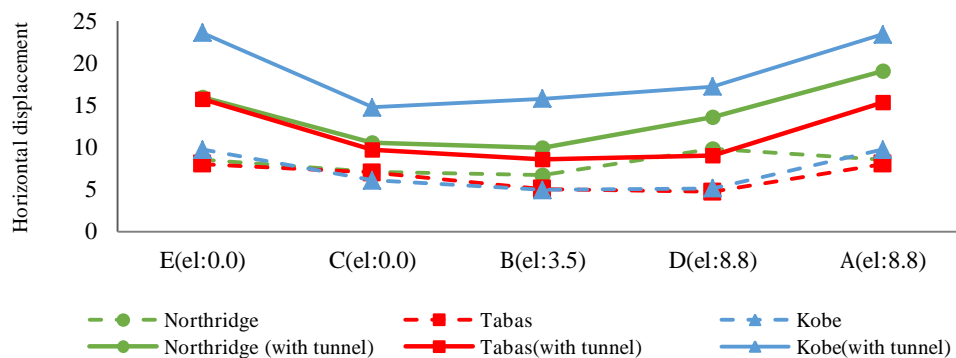
انتخاب شده است. نتایج در شکل‌های ۷ و ۸ درج شده است.

جدول ۵- مقادیر مورد استفاده در برنامه نوشته شده

پارامتر	خاک ماسه‌ای در حالت اشباع	پارامتر	خاک ماسه‌ای در حالت اشباع
$a_{\infty}$	1.58	$K (m^2)$	$27.7 \times 10^{-12}$
$\rho_s (kg/m^3)$	2120	$K_s (N/m^2)$	$4.99 \times 10^{12}$
$K (N/m^2)$	$5.24 \times 10^{11}$	$\mu (N/m^2)$	$3.26 \times 10^{11}$
$\rho_{fi} (kg/m^3)$	1000	$K_{fi} (N/m^2)$	$2.25 \times 10^{11}$
$\eta (kg/ms)$	0.1	$\Lambda (m)$	$19.4 \times 10^{-6}$



شکل ۷- تغییر مکان قائم نقاط سازه سی‌وسه‌پل در شرایط حضور تونل و عدم حضور تونل تحت سه زلزله حوزه نزدیک

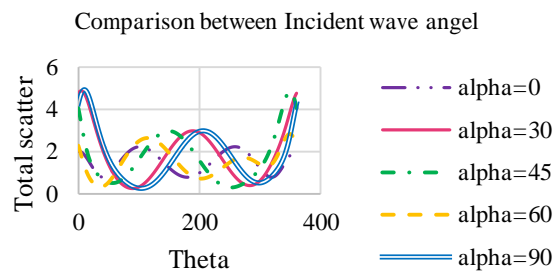
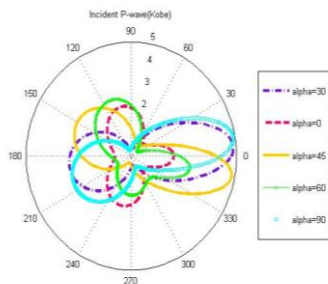


شکل ۸- تغییر مکان افقی سازه سی‌وسه‌پل در شرایط حضور تونل و عدم حضور تونل تحت سه زلزله حوزه نزدیک

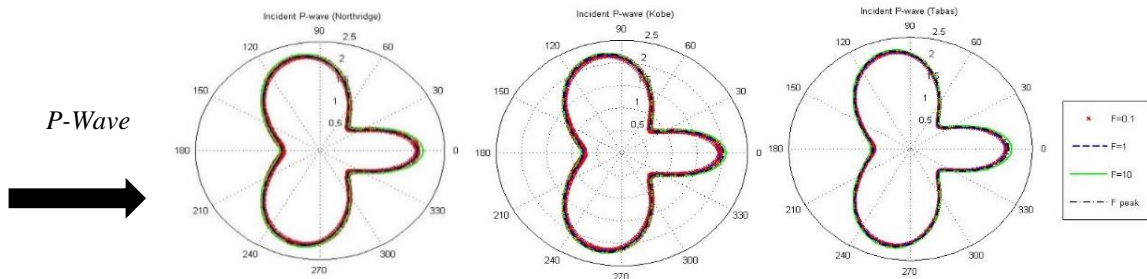
قائم در نظر گرفته‌اند (Liu & Wang, 2012).

موج با زوایای ورودی  $\alpha = 0^\circ, \alpha = 30^\circ, \alpha = 45^\circ$  از طریق برنامه توسعه داده شده FESCAM به تونل سمت چپ اعمال شده است. شکل ۱۰ تا ۱۴ نشان‌دهنده فاکتور تمرکز تنش دینامیکی (DSCF) در فاصله ۳۸ متر است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است بیشترین مقدار پدیده تفرق در تونل‌های دوقلو تحت زلزله با موج ورودی طولی  $\alpha = 30^\circ$  در زاویه  $(\theta = 90^\circ)$  تونل‌های دوقلوی مورد بررسی رخ داده است. این مسئله آشکار گردید که در فرکانس‌های به مراتب کمتر از فرکانس بحرانی بایوت ( $f_c = \varphi \cdot \eta / \sqrt{2\pi\rho\eta} k \alpha_\infty = 1.35 \times 10^2 \text{ Hz}$ ) اثر چسبناکی بر لایه‌های داخلی حکم‌فرما می‌شود.

شکل ۹، نشان‌دهنده پارامتر تمرکز تنش دینامیکی برای موج طولی زلزله کوبه با زوایای موج متفاوت و فرکانس دارای حداکثر قدرت موج است. همان‌طور که از شکل مشخص است در زاویه  $\alpha = 30^\circ$  بیشترین مقدار تفرق در زاویه  $\theta = 90^\circ$  مشاهده شده است. همچنین زلزله با موج ورودی  $\alpha = 90^\circ$  و  $\alpha = 60^\circ$  به ترتیب دارای بیشترین مقدارهای تفرق در زوایای  $\theta = 104^\circ$  و  $\theta = 36^\circ$  و به طور کلی بیشترین مقدار تفرق در زاویه  $\alpha = 30^\circ$  اتفاق افتاده است. البته محققین قبلی به منظور نمایش بهتر فیزیک مسئله زاویه موج ورودی  $\alpha = 0$  را برای زلزله‌های افقی (Hasheminejad & Avazmohammadi, 2008) و  $\alpha = 90^\circ$  را برای زلزله‌های



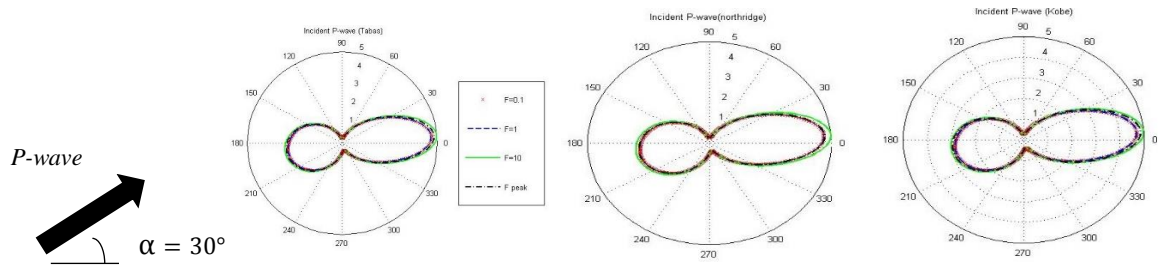
شکل ۹- پارامتر تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده برای موج طولی زلزله کوبه با زوایای موج متفاوت و فرکانس دارای حداکثر قدرت موج



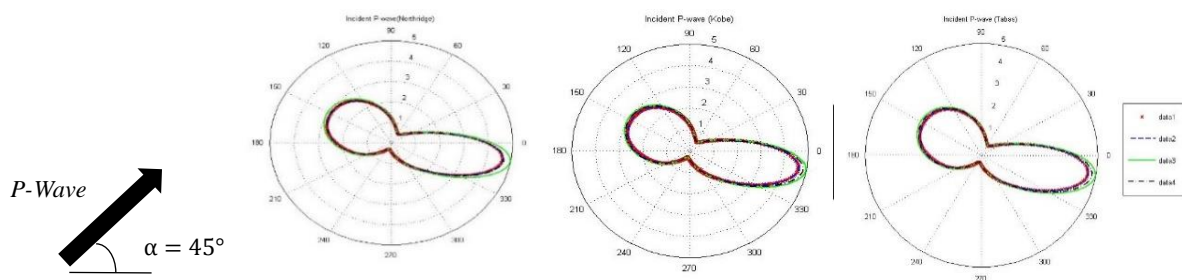
شکل ۱۰- فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده موج ورودی طولی (P) در فرکانس‌های مختلف و زاویه ورودی  $(\alpha=0)$

با شیب آهسته‌تری افزایش می‌یابد. از این‌رو فرکانس مرزی بایوت تبدیل به یک فرکانس سرعت پایین می‌شود. در این حالت امواج کمتری منتشر می‌شوند و انتشار در محیط‌های متخلخل همانند محیط‌های الاستیک است (Bourbie, Coussy & Zinszner, 1987).

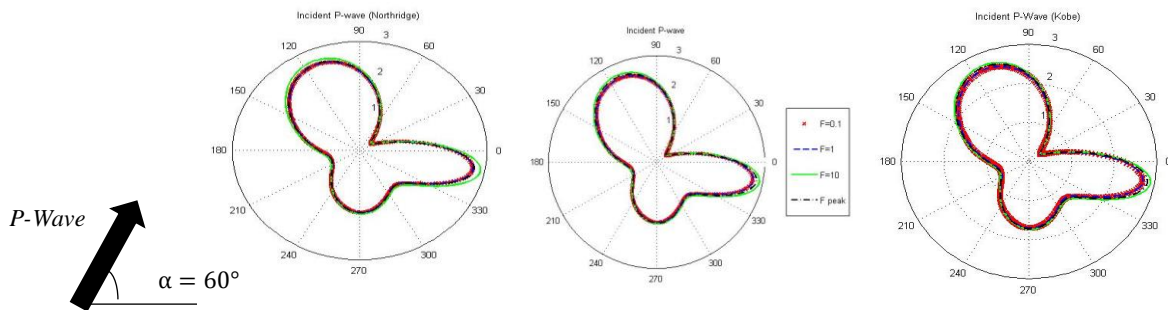
به طور مثال جریان خطی (Poiseuille) اتفاق می‌افتد، در حالی که لایه مرزی در مقابل اندازه هسته ضخامت بیشتری دارد و چسبناکی سیال باعث اثر (lock-on) بر حرکت قسمت جامد شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۰ الی ۱۴ با افزایش سرعت موج، پدیده تفرق نیز



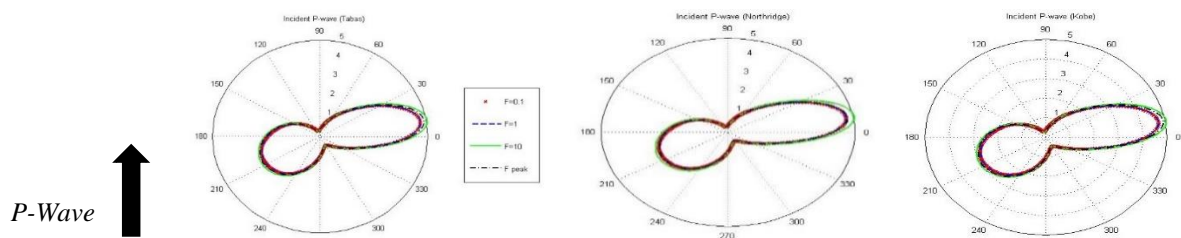
شکل ۱۱- فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده موج ورودی طولی ( $P$ ) در فرکانس‌های مختلف و زاویه ورودی ( $\alpha=30$ )



شکل ۱۲- فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده موج ورودی طولی ( $P$ ) در فرکانس‌های مختلف و زاویه ورودی ( $\alpha=45$ )



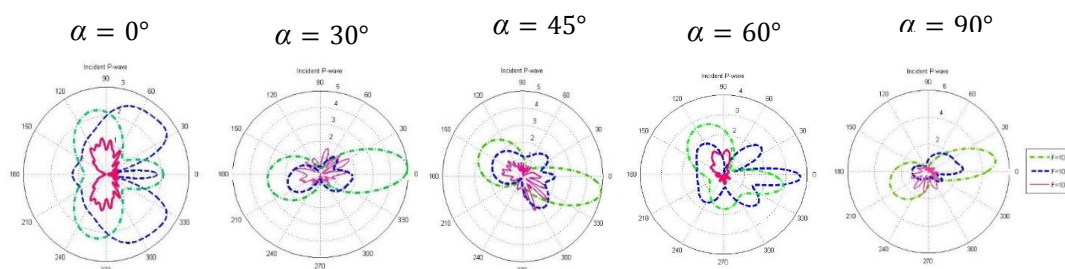
شکل ۱۳- فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده موج ورودی طولی ( $P$ ) در فرکانس‌های مختلف و زاویه ورودی ( $\alpha=60$ )



شکل ۱۴- فاکتور تمرکز تنش دینامیکی اصلاح شده موج ورودی طولی ( $P$ ) در فرکانس‌های مختلف و زاویه ورودی ( $\alpha=90$ )

در فرکانس‌های پایین موج انرژی بیشتری داشته و تقریباً بدون پراکندگی قابل توجهی از حفره تونل عبور می‌کند. بالعکس موج‌هایی با فرکانس‌های بالا در نتیجه برخورد به دیواره‌های تونل، دچار تفرق بیشتری می‌شوند که این امر به خوبی در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود.

به منظور نشان دادن بهتر تأثیر تفرق در شکل شماره ۱۵ منحنی‌های تفرق موج (*Wave Scattering*) ورودی طولی با زاویه ورودی  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  در فرکانس‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز نشان داده شده است. با توجه به اینکه انرژی موج با فرکانس آن رابطه عکس دارد



شکل ۱۵- فاکتور تمرکز تنش دینامیکی موج ورودی طولی ( $P$ ) در فرکانس‌ها و زوایای مختلف

### ۳-۱- نتایج آزمون من-ویتنی

بیشترین مقدار ممکن برابر با  $\frac{N_A \times N_B}{2}$  است. زمانی که فرضیه درست باشد  $P$ -value یا احتمال محاسباتی در واقع تخمین احتمال رد فرضیه صفر درباره سؤال تحقیق است که معمولاً به عنوان  $\alpha = 0.05$  در نظر گرفته می‌شود. زمانی که  $P$ -value بزرگ‌تر از  $0.05$  باشد فرضیه صفر درست خواهد بود و در حالت خاص نزدیک به یک خواهد بود. همچنین فرضیه صفر زمانی که  $RS_{\alpha} < WilcoxonW < RS_{\beta}$  باشد هم درست است.

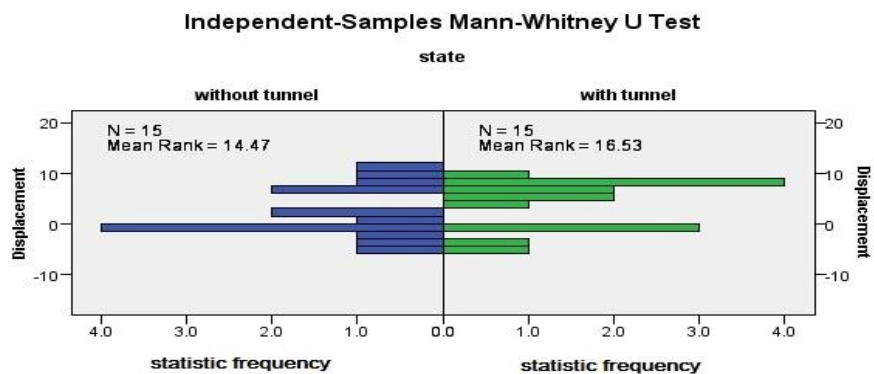
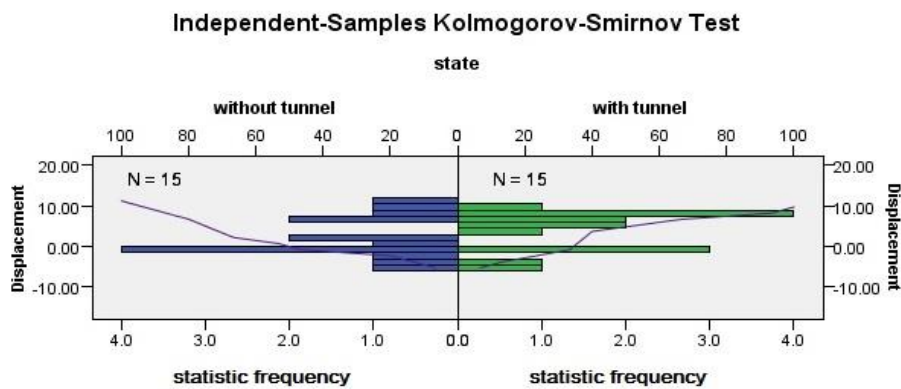
$RS_{\alpha}$  مجموع رتبه‌های گروه اول و  $RS_{\beta}$  مجموع رتبه‌های گروه دوم است که در تحقیق حاضر به ترتیب برابر ۲۱۷ و ۲۵۰ برای جابه‌جایی‌های افقی و ۲۹۸/۵ و ۱۶۷/۵ برای جابه‌جایی‌های عمودی بوده است. در این پژوهش تمام شرایط بالا در جدول شماره ۶ و ۷ نشان داده شده است. بنابراین اختلاف معناداری مابین نتایج جابه‌جایی در شرایط عدم حضور تونل و حضور تونل برای سی‌وسه‌پل مشاهده نشده است. در شکل ۱۶ و ۱۷ این موضوع برای جابه‌جایی‌های افقی و عمودی به تصویر کشیده شده است.

به منظور مقایسه دو گروه از داده‌های آماری، فرضیه صفر ( $H_0$ ) یکی از رایج‌ترین فرضیه‌ها در مسائل *nondifference* است. به این معنا که هیچ تفاوتی بین رتبه دو گروه مقایسه وجود ندارد. آزمون من-ویتنی (*Mann-Whitney*) در آمار، جزء آزمون‌های غیر پارامتری است و برای سنجش تفاوت میان نمونه‌ها به کار می‌رود. آزمون من-ویتنی معادل غیر پارامتری آزمون تی مستقل است و برای مقایسه داده‌هایی که از طرح‌های گروه‌های مستقل به دست می‌آیند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرگاه شرایط استفاده از آزمون‌های پارامتری در متغیرها موجود نباشد، یعنی متغیرها پیوسته و نرمال نباشند، واریانس دو مجموعه برابر نباشد و متغیرها رتبه‌ای و ترتیبی و کوچک‌تر از ۱۰ مورد باشند، از این آزمون استفاده می‌شود. در این تحقیق دو گروه جابه‌جایی‌های سی‌وسه‌پل در حالت عدم حضور تونل و حضور تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در محاسبه مقدار آزمون من-ویتنی، تعداد مقایسه‌ها برابر است با حاصل ضرب تعداد داده‌های گروه اول ( $N_A$ ) در تعداد داده‌های گروه دوم ( $N_B$ ) که  $N_A \times N_B$  است. اگر فرضیه صفر درست باشد آنگاه ارزش آزمون من-ویتنی باید در حدود  $0.5$  (*Half Their Value*) باشد. کمترین مقدار این آزمون صفر است.

جدول ۶- نتایج آزمون‌های صحت سنجی جابه‌جایی‌های افقی نقاط پل سی‌وسه‌پل

Independent Samples Mann-Whitney U Test				Independent Samples Kolmogorov- Smirnov Test			
	Total N	Mann-Whitney U	Wilcoxon W	P-value	Total N	Test Statistic	P-value
Horizontal Displacement	30	128.00	248.00	0.520	30	0.913	0.375
Vertical Displacement	30	46.5	166.5	0.006	30	1.826	0.005

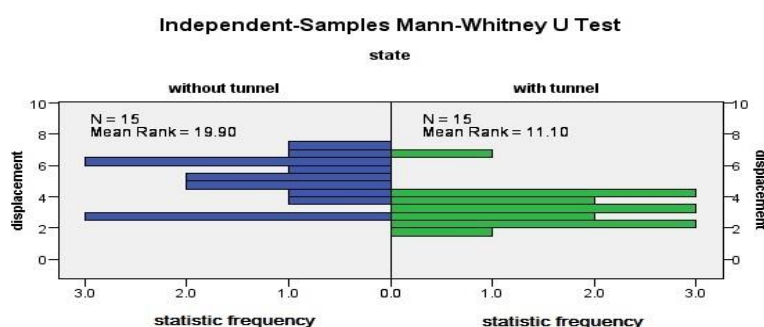
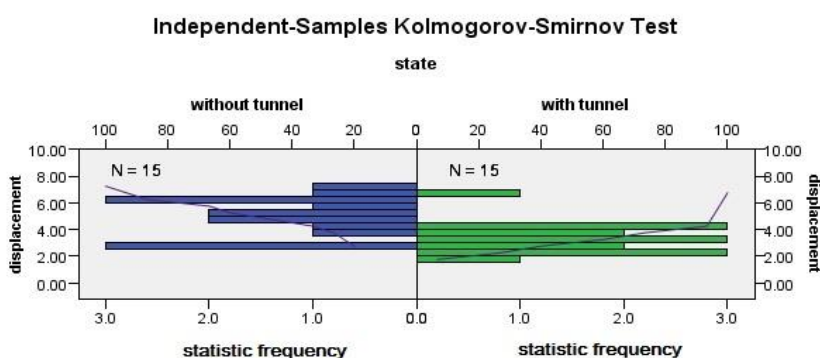
Independent Samples Mann-Whitney U Test				Independent Samples Kolmogorov- Smirnov Test			
	Total N	Mann-Whitney U	Wilcoxon W	P-value	Total N	Test Statistic	P-value
	30	128.00	248.00	0.520	30	0.913	0.375



شکل ۱۶- نتایج آزمون من-ویتنی و کولموگروف-اسمیرنوف برای جابه‌جایی‌های افقی سی‌وسه‌پل

جدول ۷- نتایج آزمون‌های صحت سنجی جابه‌جایی‌های عمودی نقاط سی‌وسه‌پل

Independent Samples Mann-Whitney U Test				Independent Samples Kolmogorov- Smirnov Test		
Total N	Mann-Whitney U	Wilcoxon W	P-value	Total N	Test Statistic	P-value
30	46.5	166.5	0.006	30	1.826	0.005



شکل ۱۷- نتایج آزمون من-ویتنی و کولموگروف-اسمیرنوف برای جابه‌جایی‌های عمودی سی‌وسه‌پل

#### ۴- نتیجه‌گیری

نورتریچ، طبس و کوبه با استفاده از آیین‌نامه زلزله ایران مقیاس شده و با استفاده از بسط فوریه ماهیت فرکانسی آن‌ها به دست آمده است (*Permanent Comittee for Revising the Irainian Code , 2005*). با توجه به بررسی‌های انجام شده از جمله عوامل تأثیرگذار بر جابه‌جایی سازه‌های روزمینی در مجاورت تونل‌های دوقلو می‌توان به نوع سازه سطحی و نوع و مکانیزم زلزله ورودی اشاره کرد. همچنین با به دست آوردن جابه‌جایی یک نقطه از تونل غربی در حالات مختلف و حساسیت سنجی فاصله تونل‌ها

در این مقاله پدیده تفرق با استفاده از روابط ریاضی بسط داده و سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب رابطه نویسی انجام شده است. مطالعه موردی انجام شده تونل‌های دوقلو زیرین سی‌وسه‌پل می‌باشند. مقادیر جابه‌جایی و تنش‌های بی‌بعد سازه سی‌وسه‌پل اصفهان در دو حالت متفاوت بدون تونل و در حضور تونل تحت اثر زلزله حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مسیر عبوری تونل‌ها از مجاورت پل و فاصله عرضی آن‌ها نسبت به پل فاصله بحرانی  $d=38 m$  انتخاب شده است. سپس سه شتاب‌نگاشت زلزله‌های



کمتر باشند، که نتایج ارائه شده نیز مبین این موضوع است.

جدول ۸- میانگین جابجایی‌های افقی و قائم در حالات مختلف و تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

حالات مختلف جابجایی	در حضور تونل (فاصله ۳۸ متری)	
	بدون حضور تونل	حضور تونل
$U_h$ (cm)	۲/۳۷	۳/۹۵
$U_v$ (cm)	۴/۹۴	۳/۳۲

#### ۵- فهرست نمادها

جدول ۹- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
سطح	$m^2$	$k$
مدول الاستیسیته	$N/m^2$	$E$
مدول برشی	$N/m^2$	$G$
تخلخل یا پوکی	بدون واحد	$\emptyset$
فاصله	$m$	$r, x, y$
ضرایب مجهول مرزی	بدون واحد	$A_n, B_n$
سرعت موج طولی	$m/s$	$C_{L\gamma}$
سرعت موج عرضی	$m/s$	$C_{T\gamma}$
مدول حجمی سیال اشباع	$N/m^2$	$k_f$
مدول حجمی بالک	$N/m^2$	$k_s$
چگالی مؤثر	$kg/m^3$	$\rho$
پارامتر اول لامه	$kg/m^3$	$\lambda$

این امر بیش‌ازپیش مشخص شده است. جابه‌جایی سازه‌های زیرزمینی در هنگام وقوع زلزله کمتر از این مقدار برای سازه‌های روزمینی است. البته با مقایسه نتایج به دست آمده میان جابه‌جایی نقاط مختلف حداکثر جابه‌جایی رخ داده مربوط به نقطه  $A$  است که به دلیل ارتفاع بلندتر سازه و نزدیکی به نقطه اثر زلزله در این محل این امر تا حدودی قابل پیش‌بینی بوده است. حداکثر جابه‌جایی قائم نیز به نقطه  $C$  در پاشنه پل و مجاور تونل‌ها تعلق دارد. با توجه به شکل شماره ۷ تغییر مکان قائم در شرایط عدم حضور تونل به طور کلی بیشتر گزارش شده است، البته در نقطه  $D$  جابه‌جایی تقریباً یکسان گزارش شده است. همچنین تغییر مکان افقی سازه در حضور تونل در تمامی زلزله‌های مورد بحث بیشتر از حالت عدم حضور تونل گزارش شده است، البته پیش‌بینی اولیه نیز افزایش جابه‌جایی در اثر حفر تونل بوده است که این افزایش جابه‌جایی منجر به خرابی مؤثر سی‌وسه‌پل در زمان زلزله خواهد شد. موارد مذکور نشان می‌دهد اگرچه سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی در برابر زلزله آسیب‌پذیری کمتری دارند ولی سازه‌های کاملاً ایمنی نیستند. بنابراین لازم است که برای طراحی و ساخت هر نوع سازه زیرسطحی مطالعات مربوط به پایداری آن‌ها در برابر زلزله‌های محتمل انجام گیرد. جدول ۸، بیانگر میانگین جابه‌جایی‌های افقی و قائم در حالت حضور و عدم حضور تونل برای زلزله‌های مذکور است.

همان‌طور که از جدول مشخص است جابه‌جایی‌های افقی و قائم در حضور تونل به ترتیب ۴۰٪ افزایش و ۳۲/۷٪ کاهش داشته است. بدین معنی که وجود تونل‌های دوقلو در جابه‌جایی افقی سازه تاریخی مورد بحث تأثیرگذار بوده است. با توجه به مشخصات زمین‌شناسی و وزن سرباره تونل و سازه انتظار می‌رود که جابه‌جایی‌های قائم نسبت به افقی

#### ۶- مراجع

Abramowitz, M., & Stegun, I. (1964). *Handbook of mathematical functions*. Washington, DC: National Bureau of Standards.

- Afifipour, M., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., & Jamshidi, H. (2011). Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass, Shiraz metro, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 356-363.
- Amorosi, A., & Boldini, D. (2009). Numerical modelling of the transverse dynamic of circular tunnels in clayey soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. doi:10.1016/j.soildyn.2008.12.004
- Azadi, M. (2011). The Seismic Behavior of Urban Tunnels in Soft Saturated Soils. *Procedia Engineering*, 14, 3069-3075.
- Bourbie, T., Coussy, O., & Zinszner, B. (1987). *Acoustics of porous media*. Hoston: Golf Publishing.
- Didem Aktas, Y., & Turer, A. (2015). Seismic evaluation and strengthening of nemrut monuments. *Journal of Cultural Heritage* (16), 381-385.
- Gatmiri, B., & Eslami, H. (2007). Scattering of Harmonic Waves by a Circular Cavity in a Porous Medium: Complex Functions Theory Approach. *International Journal of Geomechanics*, 17(5), 371-381.
- Gatmiri, B., & Eslami, H. (2008). Wave scattering in cross-anisotropic porous media around the cavities and inclusions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(12), 1014-1027.
- Hasheminejad, S., & Avazmohammadi, R. (2007). Harmonic Wave Diffraction by two circular cavities in a poroelastic formation. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 27(1), 29-41. doi:10.1016/j.soildyn.2006.05.001
- Hasheminejad, S., & Avazmohammadi, R. (2008). Dynamic Stress Concentrations in Lined Twin Tunnels within Fluid-Saturated Soil. *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS*, 134(7), 542-554.
- Hasheminejad, S., & Hosseini, H. (2002). Radiation Loading of a Cylindrical Source in a Fluid-Filled Cylindrical Cavity Embedded Within a Fluid-Saturated Poroelastic Medium. *Journal of Applied Mechanics*, 69. doi:10.1115/1.1488664
- Jalali, S. M., & Eftekari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines. *Modern Management of Mine Producing, Geology & Environmental Protection* (pp. 27-34). Alben: International Scientific GeoConference.
- Jalali, S. M., Emami, M., Najafi, M., Gharib-Bolok, F., Mohammadi, H., & Ramezanzadeh, A. (2015). Underground Coal Gasification as a Strategy to Improve Energy Economy of Iran. *Iranian Energy Economics*, 4(13), 63-88. Retrieved from [http://jjee.atu.ac.ir/article\\_852\\_202.html](http://jjee.atu.ac.ir/article_852_202.html)
- Jalali, S. M., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. *Safety Science*, 49(5), 664-669. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.12.015>
- Jiang, L.-F., Zhou, X.-L., & Wang, J.-H. (2009). Scattering of a plane wave by a lined cylindrical cavity in a poroelastic half-plane. *Computers and Geotechnics*, 36, 773-786.
- Lee, S.-C. (2015). Evanescent waves scattering at off-axis incidence on multiple cylinders located near a surface. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 151, 239-250. doi:10.1016/j.jqsrt.2014.10.002
- Liu, Q., Zhao, M., & Zhang, C. (2014). Antiplane scattering of SH waves by a circular cavity in an exponentially graded half space. *International Journal of Engineering Science*, 78, 61-72.
- Liu, Q., Zhao, M., & Wang, L. (2013). Scattering of plane P, SV or Rayleigh waves by a shallow lined tunnel in an elastic half space. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49, 52-63. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.02.007>

- Liu, Q., & Wang, R. (2012). *Dynamic response of twin closely-spaced circular tunnels to harmonic plane waves in a full space. Tunnelling and Underground Space Technology* 32, 212-220.
- Liu, Q., & Wang, R. (2012). *Dynamic response of twin closely-spaced circular tunnels to harmonic plane. Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 212-220.
- Liu, G.-b., Xie, K.-h., & Liu, X. (2010). *Dynamic response of a partially sealed tunnel in porous rock under inner water pressure. Tunneling and Underground Space Technology. doi:10.1016/j.tust.2010.02.005*
- Moeen-Varizi, N., & D. Trifunac, M. (1988). *Scattering and diffraction of plane P and SV waves by two-dimensional inhomogeneities: Part II. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7(4), 189-200.
- Manolis, G., & Beskos, D. (1983). *Dynamic response of lined tunnels by an isoparametric boundary element method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 36(3), 291-307. doi:00457825/83/0000-0000/\$03.
- Manolis, G. (1980). *Dynamic response of underground structures. A thesis presented to the Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.*
- Manoochehri, D. H. (2015). *Isfahaan City Historic city of Iran. Dr.Hossein Manoochehri.*
- Naeim, F. (2001). *The Seismic Design Handbook (Volum1). Us: Springer.*
- Pao, Y., & MOW, C. (1973). *The diffraction of elastic waves and dynamics stress concentrations. Soil Dynamic & Earthquake Engineering*, 16, 111-118.
- Permanent Comittee for Revising the Irainian Code . (2005). *Iranian code of practice for seismic resistant design of building(Standard NO.2800-5)Third Edition. Tehran: Building & Housing Research Center.*
- Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V.*
- Zhou, C., Hu, C., Ma, F., & Liu, D. (2014). *Elastic wave scattering and dynamic stress concentrations in exponential graded materials with two elliptic holes. Wave Motion*, 51(3), 466-475. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.wavemoti.2013.11.005

## *Upgraded Dynamic Stress Concentration Factor for Twin Tunnels Dispersed by New Method FEM-Scattering Method*

*M. Nodefarahani<sup>1</sup>; H. Vosoughifar<sup>2</sup>; B. Parmas<sup>3</sup>; B. Afshinifar<sup>4</sup>*

*1. PhD Student in Water Resource Engineering; Department of Civil Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran*

*2. Assistant Professor; Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran*

*3. PhD Student in Water Resource Engineering; Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Tehran Science and Research Branch*

*4. PhD Student in Water Resource Engineering; Department of Civil Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran*

*Received: 27 Aug 2017; Accepted: 08 July 2018  
DOI: 10.22044/TUSE.2018.6167.1321*

---

### **Keywords**

*Scattering  
Twin Tunnels  
Dynamic  
Time History  
Monument*

---

### **Extended Abstract**

#### **Summary**

*Several newly constructed tunnels, which have been damaged by earthquake loading, have led to extensive research on the evaluation of earthquake effects on tunnels. Underground structures are increasingly being built and exploited in the context of urban expansion and development. Tunnels are one of the most important underground structures. Failure of several tunnels under earthquake loading, and especially damage to these tunnels, have been the reasons to investigate the effects of earthquake on the tunnels.*

### **Introduction**

*Various activities, especially during earthquake, on the adjacent structures are of particular importance. This importance will be more in the vicinity of the historical building, due to their vast material and spiritual values. In this research, using the Henkel type I and three scale accelerometers related to the earthquakes in Northridge, Tabas and Kobe, and employing the expanded FESCAM program in MATLAB environment, the historical structures of thirty-three buildings have been studied.*

### **Methodology and Approaches**

*In this research, nonlinear time histories analysis has been used to generalize Henkel's relationship and to calculate the exact difference. The input waves have been investigated by the researchers for use in the Henkel harmonic waves function. The Henkel function of the first type using the mentioned accelerations is used considering the amount of dissociation, the degree of strain and stress around the twin tunnels as an additive parameter to the limited element analysis of the present study.*

### **Results and Conclusions**

*In this paper, the operation of differentiation is expanded with the use of mathematical relations. A case study of twin tunnels is Si-o-se-pol twin tunnels. The results of this study show that the mean displacement of horizontal thirty three bridges there in comparison with the failure to consider the effect of fractionation is increased by 28.8% and the displacement rate of the thirty three bridges compared to the failure includes the difference of 11 / 30%. Moreover, the displacement of underground structures during an earthquake is less than that of the ground structures. The results of the Mann-Whitney test with the SPSS software program have shown that there is no significant difference between the seismic performance of the thirty three bridges with the effect of tunneling dispersion and without the effect of*

---

*tunneling dissociation (P-value $\geq$ 0.05).*

---