

چکیده

با مرور موارد تاریخی مشاهده می‌گردد که درصد خرابی سازه‌های زیرزمینی در اثر زلزله نسبت به سازه‌های روسطحی پایین‌تر می‌باشد. لیکن در زلزله‌هایی نظیر زلزله‌ی سال ۱۹۹۵ کوبه در ژاپن، زلزله‌ی ۱۹۹۹ چی-چی تایوان و زلزله‌ی ۱۹۹۹ قوجالی ترکیه، سازه‌های زیرزمینی دچار خسارت عمده‌ای شدند. در بحث سازه‌های زیرزمینی تغییر شکل تحمیلی از سوی دیواره‌های حفره به سازه‌ی درون آن، در اثر انتشار میدان موج، از اهمیت زیادی برخوردار است. نکته قابل تأمل آن است که تغییر شکل دیواره‌های حفره، پیش از احداث سازه، با تغییر شکل‌های میدان آزاد خاک متفاوت است. این نکته، علی‌رغم اهمیت، کمتر در ادبیات فنی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله تغییر شکل اعوجاجی کلی و اعوجاج محلی حفره‌های مستطیلی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌های عددی در این تحقیق به روش اجزاء محدود با بهره‌گیری از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. نتایج برای زوایای مختلف انتشار میدان موج لرزه‌ای برشی و ابعاد مختلف حفره بحث گردیده و نشان داده شده است که گزاره‌های موجود در ادبیات فنی با محدودیت‌هایی روبه‌رو است.

کلمات کلیدی: آنالیز لرزه‌ای، سازه‌های زیرزمینی، حفره‌های مستطیلی شکل، تغییر شکل اعوجاجی، کرنش برشی

بررسی اعوجاج محلی در حفره‌های مستطیلی و شبه مستطیلی زیرزمینی تحت اثر تغییر زاویه مواجهه با میدان موج برشی

حسین جهانخواه (نویسنده مسؤول)

استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران،
h.jahankhah@iuees.ac.ir

امیرحسین پریز

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران

مرتضی بسطامی

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران

۱- مقدمه

استفاده از معیار مقاومت تحت فشار دینامیکی زمین که با عنوان روش مونوبه-اوکابه شناخته و در سال ۱۹۲۶ مطرح شده است [۱] (ب) به وسیله اعمال بار لرزه‌ای از طریق تغییر مکان و اطمینان از آنکه می‌تواند توسط سازه و یا حفره جذب گردد. روش اخیر با عنوان روش تغییر مکان میدان آزاد برای تخمین اعوجاج سازه توسط کازل در سال ۱۹۶۹ مطرح شده است [۲]. این تحقیق، یکی از نخستین پیشنهادها برای طراحی لرزه‌ای نوین در سازه‌های زیرزمینی را برای تونل‌های مترو مستطیلی تشکیل داد. در این تحقیق تئوری انتشار امواج ساده به منظور تخمین کرنش اعوجاجی - انحنایی و برشی وارد شده به سازه و حفره مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات با محوریت مقاطع زیرزمینی مستطیلی شکل نسبت به مقاطع دایروی شکل بسیار کمتر انجام شده است. جان و زاهرا در سال ۱۹۸۷، سازه‌ها و حفره‌های مستطیلی شکل را طی تحلیل دو بعدی و سه بعدی، تحت بارهای

ویژگی‌های مفهومی، هندسی و عملیاتی سازه‌ها و حفره‌های زیرزمینی، موجب شده است رفتار لرزه‌ای این گونه سازه‌ها تمایز قابل ملاحظه‌ای با سازه‌های روزمینی داشته باشد. در سازه‌ها و حفره‌های زیرزمینی، بیشتر از نیروهای اینرسی، تغییر شکل زمین بر پاسخ لرزه‌ای سازه و حفره تأثیرگذار است. ساختار هندسی و سازه‌ای فضاهای زیرزمینی در دو روش معمول اجرا، یعنی (الف) اجرا به روش حفاری پیش‌رونده و (ب)، اجرا به روش برداشت خاک، جایگذاری سازه و پوشاندن سازه، متفاوت است. حفره‌های مستطیلی زیرزمینی، در طول یک زلزله، ممکن است تغییر شکل‌های اعوجاجی^۱ عرضی را تجربه کنند که بخشی از آن ناشی از حرکت امواج لرزه‌ای برشی در صفحه عمود بر محور حفره می‌باشد.

مسئله تحلیل سازه‌ها و حفره‌های زیرزمینی تحت بارهای لرزه‌ای در ادبیات فنی به دو روش بیان گردیده است: (الف)

استاتیکی مورد بررسی قرار دادند [۳]. این محققان نتیجه گرفتند تغییر شکل اعوجاجی سازه حدود ۵۰ الی ۶۵ درصد تغییر شکل اعوجاجی میدان آزاد می‌باشد. ونگک در سال ۱۹۹۳، بیان نمود فرض برابر بودن تغییر شکل اعوجاجی حفره با تغییر شکل میدان آزاد همواره صحیح نیست [۴]. این تفاوت در مواردی که لرزش ناشی از اعوجاج زمین کوچک نیست، مانند زمانی که خاک نرم است، شدت زمین لرزه بالا است و یا سازه در مقایسه با خاک اطراف سخت تر است، بسیار محافظه کارانه است. وی با انجام تحلیل های اجزای محدود، تأثیر پارامترهای متعددی را بر روی تغییر شکل اعوجاجی سازه و حفره مورد بحث قرار داد. این تحقیق بیان نمود، رفتار سازه تابعی از سختی نسبی خاک به سازه می‌باشد که از آن با عنوان ضریب انعطاف پذیری نام برده می‌شود. این محقق، اعوجاج نرمال شده را برای نسبت های مختلف ضریب انعطاف پذیری در قالب نموداری ارائه و یک روش ساده شده تحلیل قاب برای به دست آوردن پاسخ سازه پیشنهاد نمود. پنزین در سال ۲۰۰۰ تفاوت تغییر شکل های اعوجاجی حفره های مستطیلی شکل را با تغییر شکل های میدان آزاد مورد بررسی قرار داد [۵]. وی در بررسی های خود روابطی را جهت محاسبه میزان اعوجاج حفره های مستطیلی با احتساب اندرکنش خاک - سازه و البته با پیش فرض هایی ساده کننده ارائه نمود. از جمله این پیش فرض ها عمود بودن زاویه انتشار میدان موج بر اضلاع حفره مستطیلی می‌باشد. در این تحقیق تغییر مکان اعوجاجی سازه تحت شرایط کرنش صفحه ای با استفاده از تحلیل استاتیکی تعیین شده است. این محقق بیان نمود، با فاصله گرفتن حفره از سطح زمین، بیشینه ی اعوجاج اندکی افزایش یافته و در مقدار مشخصی ثابت می‌ماند. پلی و همکاران در سال ۲۰۰۶، مطالعاتی بر روی سازه های زیرزمینی مربعی شکل در خاک الاستیک ایزوتروپیک همگن تحت تحریک هارمونیک به انجام رساندند [۶]. در این تحقیق، طی تحلیل دو بعدی تفاضل محدود^۲ حداکثر نیروها و ممان های ایجاد شده در سازه، مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، نتیجه نهایی به صورت تأثیر فرکانس تحریک ورودی و عمق دفن سازه و ضریب

انعطاف پذیری بر روی پاسخ سازه، ارائه گردیده است. در نهایت، نتایج تحلیل با نتایج تحلیل شبه استاتیکی^۳ مقایسه و معتبر نبودن روش ساده شده در شرایط خاص مورد تأکید قرار گرفته است. نیشی آکا و اونجو در سال ۲۰۰۳، طی یک تحلیل اجزای محدود، مطالعاتی بر روی سازه های زیرزمینی بر پایه ی ویژگی انتقال کرنش برشی انجام دادند و یک روش ساده شده شبیه به روش ساده شده ی قاب تحلیلی ونگک [۴]، به انضمام نموداری برای ضریب اعوجاج (R) ارائه نمودند [۷]. جینگری در سال ۲۰۰۷، یک روش ساده محاسباتی به منظور تخمین کرنش برشی سازه به عنوان معیاری برای تخمین اعوجاج ارائه نمود [۸]. وود در سال ۲۰۰۴، طی چندین تحلیل دینامیکی اجزای محدود و با در نظر گیری شرایط کرنش صفحه ای و خاک الاستیک، اولین مد برشی خاک در تحلیل دینامیکی و از همه مهم تر در نظر گیری اثر اندرکنش خاک-سازه، نیروهای داخلی سازه را محاسبه و نمودار ضریب اعوجاج بر حسب پارامترهای مختلف را ارائه نمود [۹]. در این تحقیق در مورد مدل های ساده شده شبهاتی بیان گردیده است. در مطالعات وود در سال ۲۰۰۷، با احتساب اندرکنش دینامیکی خاک-سازه، جمع بندی جامعی در ارتباط با مفاهیم و روش طراحی لرزه ای سازه های زیرزمینی مستطیلی ارائه شده است [۱۰]. حشاش و همکاران در سال ۲۰۱۰، با جمع آوری و به روز نمودن مقاله پیشین خود در سال ۲۰۰۱ [۱۱]، در زمینه ی روش های تحلیل لرزه ای سازه های زیرزمینی، نیازها و محدودیت آنها را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. پیتلاکیس در سال ۲۰۱۱، ضمن ارائه ی مروری بر تحقیقات گذشته در رابطه با تحلیل عددی استاتیکی و دینامیکی، تلویحاً بر این نکته صحه گذاشت که عمده ی پژوهش های زیربنایی در مورد حفره ها و سازه های زیرزمینی به دهه های گذشته برمی گردد [۱۳]. وی همانند دیگر محققین بر تأثیر اندرکنش خاک - سازه در پاسخ سازه های زیرزمینی تأکید داشته است. دیباسی و همکاران در سال ۲۰۱۳، مطالعات گسترده ای را تحت دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی اجزاء محدود انجام دادند [۱۴]. از فرضیات آن تحقیق در نظر گرفتن

جمع‌بندی جامعی از تفاوت تغییر شکل‌های میدان آزاد با تغییر شکل‌ها در حضور حفره ارائه نشده است. در این مقاله تفاوت میان اعوجاج محلی در حضور حفره و عدم حضور آن، برای زوایای مختلف انتشار میدان موج برشی و نسبت‌های اضلاع مختلف برای حفره‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. این در حالی است که در ادبیات فنی موجود [۵]، تفاوت اعوجاج حفره با تغییر شکل‌های میدان آزاد تنها برای زاویه انتشار میدان موج برشی صفر بیان گردیده است. لازم به ذکر است که در شرایط وجود سطح آزاد افقی زمین و نیز لایه‌بندی افقی زیرسطحی، احتمال مواجهه حفره‌های افقی مستطیلی شکل با میدان‌های موج برشی با زاویه‌های متفاوت کاهش می‌یابد. لیکن شرایط ایده‌آل فوق به‌ندرت در نواحی شهری که عموماً در نواحی دارای توپوگرافی احداث شده‌اند صادق است. چنانچه منطقه دارای توپوگرافی قابل ملاحظه روستایی و یا زیر سطحی باشد این امر کاملاً محتمل خواهد بود که امواج برشی SV تحت انعکاس و انکسارها با زاویه‌های متفاوت به سطح زمین گسیل شوند. در چنین شرایطی با توجه به این که بخشی از بازتاب امواج از سطح نیز معطوف به امواج برشی SV خواهد بود، بخش عمده‌ی میدان‌های موج مهاجم به سطح و انعکاسی از آن، میدان‌های موج برشی زاویه‌دار با تونل خواهند بود. این شرایط در حالت قرارگیری مقاطع در دامنه‌ی توپوگرافی‌های سطحی می‌تواند تشدید شود. همچنین حفره‌های مستطیلی شکل قائم در برابر میدان‌های موج سطحی لاو که از نوع برشی هستند می‌توانند زوایای مواجهه‌ی متفاوتی را تجربه کنند. در مجموع می‌توان گفت در شرایط واقعی شهری، احتمال مواجهه با میدان‌های موج برشی زاویه‌دار قابل چشم‌پوشی نیست. در این تحقیق از طریق مقایسه نتایج حاصل با نتایج موجود در ادبیات فنی نشان داده شده است، با تغییر زاویه میدان موج نسبت به اضلاع حفره و نیز با تغییر نسبت اضلاع حفره مستطیلی، روابط کنونی پیشنهادی جهت محاسبه اعوجاج نیاز به تصحیح دارد. لازم به ذکر است به علت رعایت اختصار در ادامه به‌جای عبارت «نسبت اضلاع حفره مستطیلی» از واژه‌ی «نسبت ابعادی»

رفتار خاک و سازه به‌صورت الاستیک خطی و در شرایط کرنش مسطح بوده است. تحقیق مذکور از محدود پژوهش‌هایی بوده که در آن اثر رفتار غیرخطی تماسی سازه با دیواره حفره و نیز چرخش صلب سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق فوق طبق تحقیقات گذشته، در قالب منحنی ضریب اعوجاج سازه بر حسب ضریب انعطاف‌پذیری ارائه شده است. پنجمی و همکاران در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴، به بررسی تأثیر وجود حفره‌های دایروی شکل کامل و ناقص، بر پاسخ لرزه‌ای سطح آزاد و توپوگرافی‌های روستایی پرداختند [۱۵-۱۶]. روش تحقیق بر اساس روش متداول المان مرزی و نیز روش المان مرزی بهبود یافته بوده است. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق کاهش پاسخ لرزه‌ای در توپوگرافی دره‌ای سطح زمین به‌واسطه‌ی حضور حفره‌ی زیر سطحی است. فوننس در سال ۲۰۱۵ به‌صورت تحلیلی به بررسی توزیع نیروی داخلی در سازه‌های زیرزمینی پرداخته است [۱۷]. تحقیقات وی بیشتر بر روی شمع‌ها استوار بوده است. فرضیات پژوهش به‌صورت الاستیک خطی بوده است. نتایج ارائه شده در تحقیق مذکور به‌صورت لنگر خمشی و انحنا در سازه بوده و حاکی از تأثیر به‌سزای ضریب انعطاف‌پذیری در رفتار این گونه سازه‌ها است.

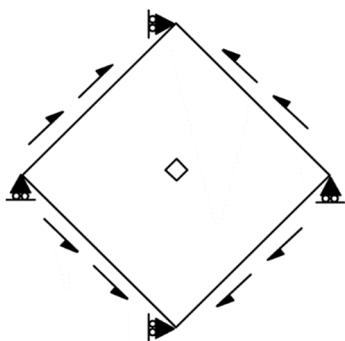
۲- طرح مسئله

در بخش قبل کلیاتی در مورد تحقیقات انجام شده در حوزه سازه‌ها و حفره‌های زیرزمینی عمدتاً مستطیلی شکل بیان گردید. در مطالعات پیشین در بررسی رفتار لرزه‌ای حفره‌های زیرزمینی و متعاقباً تأثیر آن بر روی رفتار سازه‌های درون آنها، برخی نواقص از جنبه تخمین کرنش و تغییر شکل اعوجاجی حفره‌ها بر اثر انتشار میدان موج دیده می‌شود. در اکثر تحقیقات فرض گردیده است که تغییر شکل اعوجاجی و کرنش برشی خاک بر اثر انتشار میدان امواج برشی، در صورت حضور حفره و عدم حضور حفره (میدان آزاد) یکسان می‌باشد. هرچند پترزین در سال ۲۰۰۰ تفاوت میان تحلیل در حضور حفره و عدم حضور حفره را برای یک امتداد انتشار میدان موج مطرح نمود [۵]، لیکن هنوز

مربوط به مقطع مستطیلی کامل به مقاطع شبه مستطیلی است. لازم به ذکر است که میدان‌های موج در نظر گرفته شده در این تحقیق صرفاً برشی بوده و بررسی انعکاس‌ها و انکسارهای احتمالی در مسائل واقعی در دستور کار این مقاله نیست.

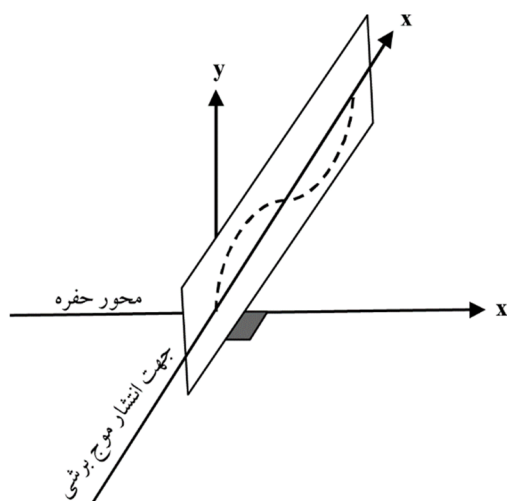
۳- مدلسازی و صحت‌سنجی

در این مقاله بخشی از خاک ایزوتروپیک و همگن به صورت یک محیط مربع‌شکل مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شده است. در این شکل شرایط مرزی و بارگذاری به صورت شماتیک نشان داده شده است. شرایط تکیه‌گامی^۴ و بار خارجی^۵ به گونه‌ای اثر داده شده است که شرایط برش محض حاصل شود. لذا چهار گره گوشه مدل اصلی در جهت عمود بر قطر مقید شده‌اند. این مدل طی تحلیل دو بعدی استاتیکی به روش اجزاء محدود با فرض کرنش مسطح، تحت بار لرزه‌ای ناشی از میدان کرنش برشی به شدت γ_H قرار گرفته است. در شکل (۳) دو حالت تغییر شکل برشی محل احداث حفره، پیش از احداث و پس از آن به صورت شماتیک نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌گردد به ناحیه‌ی در نظر گرفته شده جهت احداث حفره‌ی مستطیلی شکل، در حالت عدم ایجاد حفره، همان کرنش برشی اعمال شده به خاک تحت انتشار میدان موج برشی اعمال می‌گردد. در صورت ایجاد حفره، کرنش برشی حفره در مقایسه با کرنش برشی میدان آزاد، همان‌طور که در شکل (۳-ب) نشان داده شده است از γ_H به γ_c تغییر می‌کند. جهت صحت‌سنجی نحوه‌ی مدلسازی در این تحقیق ضریب تبدیل γ_H به γ_c مورد بررسی قرار گرفته است.

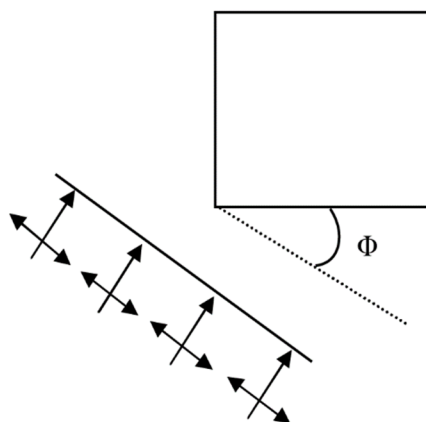


شکل (۲): مدل‌سازی، نحوه‌ی اعمال بار و شرایط تکیه‌گامی

استفاده شده است. در شکل (۱-الف)، زاویه‌ی میان جهت انتشار میدان موج برشی و امتداد محور طولی حفره‌ی زیرزمینی نشان داده شده که در این تحقیق این زاویه ۹۰ درجه فرض شده است. همچنین در شکل (۱-ب) زاویه‌ی پیشانی میدان موج با اضلاع حفره‌ی مستطیلی شکل با Φ نشان داده شده است که اصول تحقیق حاضر بر تغییر این زاویه استوار است. در نهایت نیز به عنوان مثال‌های واقعی، دو مقطع نمونه از حفره‌های ایجاد شده جهت احداث ایستگاه مترو در دو شهر آتن در کشور یونان و کوبه در کشور ژاپن بررسی گردیده است. نمونه‌های مورد اشاره هر دو دارای زائده‌ای مستطیلی در پایین مقطع می‌باشند که شکل آن‌ها را از حالت مستطیل کامل خارج می‌نماید. هدف از ارائه‌ی این دو نمونه نشان دادن تقریب‌های موجود در تعمیم نتایج

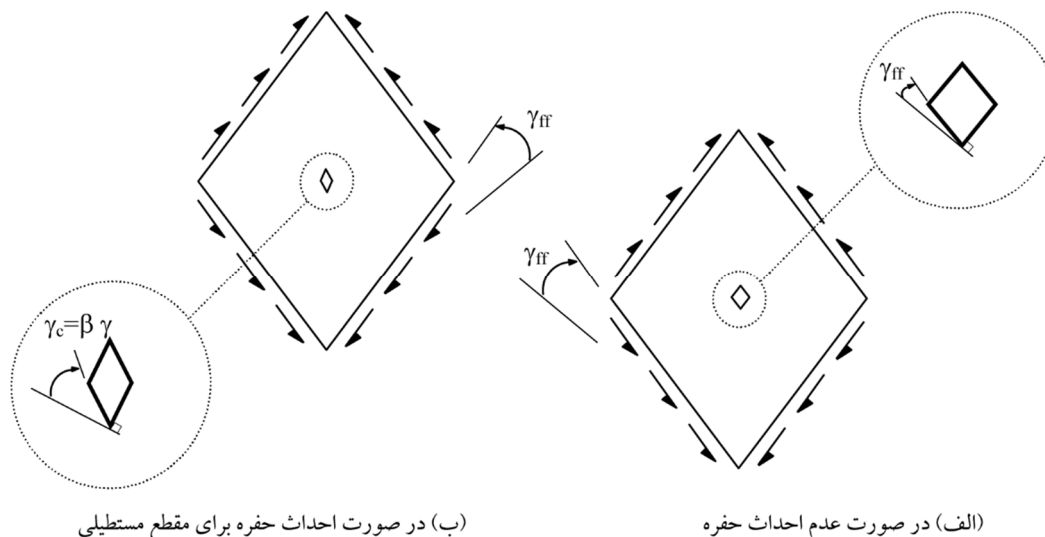


(الف) زاویه‌ی میان جهت انتشار میدان موج برشی و امتداد محور طولی حفره



(ب) زاویه‌ی پیشانی میدان موج با اضلاع حفره‌ی مستطیلی

شکل (۱): زاویه‌ی میدان موج



شکل (۳): تغییر شکل حفره‌ی مستطیلی ناشی از کرنش برشی یکنواخت

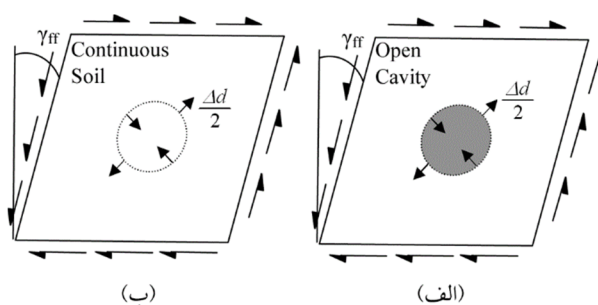
$$\frac{\Delta d}{d} = \pm \gamma_{ff} (1 - v_s) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\gamma_c}{2}$$

در این رابطه v_s ضریب پواسون خاک می‌باشد که در تحقیق حاضر مقدار ۰/۳۳ برای آن در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته و چگالی خاک نیز به ترتیب برابر با ۷۰۲۲۴۰ کیلو پاسکال و ۱/۶۵ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. d نیز قطر حفره دایروی می‌باشد. گفتنی است با توجه به اینکه نتایج این تحقیق به صورت نرمال شده نسبت به کرنش میدان آزاد و بی‌بعد ارائه خواهند شد، قابلیت تعمیم به هر زوج دیگر از مقادیر برای چگالی و مدول الاستیسیته را نیز خواهند داشت. برای محاسبه‌ی زاویه‌ی اعوجاج، ابتدا گره‌های حفره در حالت تغییر شکل یافته با خطوط مستقیم به هم وصل می‌شوند. سپس تغییر زاویه‌ی اضلاع نسبت به حالت پیش از اعوجاج، که زاویه‌ی ۹۰ درجه بوده، محاسبه می‌گردد. نمونه‌ای از روند فوق در شکل (۳) نمایش داده شده است.

تحلیل‌ها استاتیکی بوده و برای حالتی که طول موج نسبت به ابعاد مقطع حفره بسیار بزرگ‌تر باشد به انجام رسیده است. به همین دلیل برش در کل مدل به صورت یکسان وارد شده است. رویکرد مشابهی در مرجع [۵] و تنها برای زاویه‌ی مواجهه صفر به صورت تحلیلی-تقریبی دنبال شده است. لازم به ذکر است تحلیل فضاهای

از آنجا که ضریب مذکور به صورت دقیق در حالت دایروی در ادبیات فنی ارائه شده [۴] و به صورت تقریبی استفاده از آن برای حالت مربعی نیز [۵] قابل قبول دانسته شده است، مقایسه‌ی نتایج این تحقیق برای هر دو حالت در ادامه آمده است. بدین منظور در شکل (۴) دو حالت تغییر شکل برشی محل احداث حفره، پیش از احداث و پس از آن برای مقطع دایروی به صورت شماتیک نشان داده شده است.



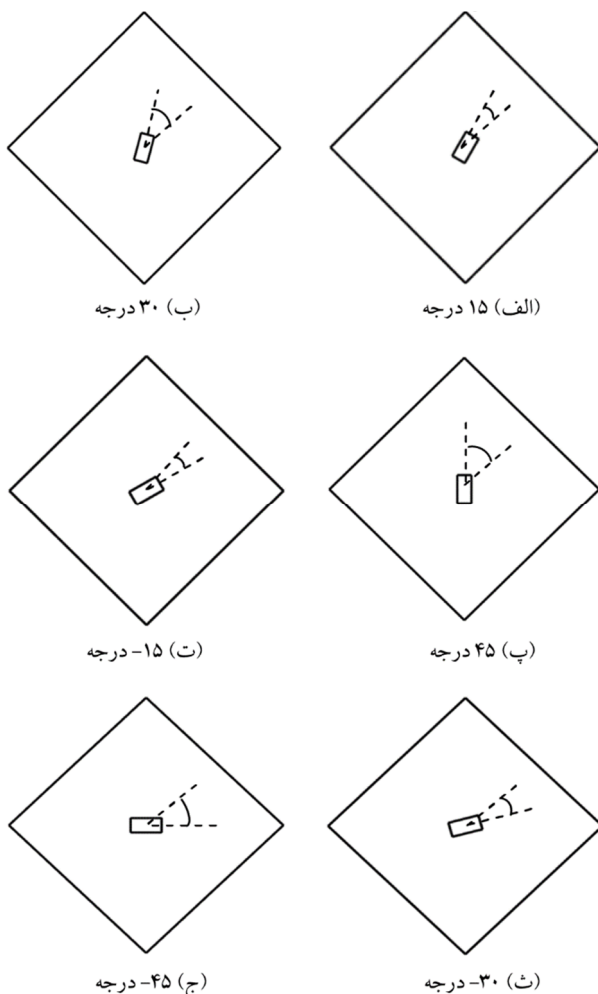
شکل (۴): تغییر شکل حفره‌ی دایروی ناشی از کرنش برشی یکنواخت: (الف) در صورت احداث حفره (ب) در صورت عدم احداث حفره

ضریب اعوجاج حفره‌ی مستطیلی به‌عنوان پارامتر β در مرجع [۵] تعریف گردیده است:

$$\beta = \frac{\gamma_c}{\gamma_{ff}} = 4(1 - v_s) \quad (1)$$

همچنین ضریب اعوجاج حفره‌ی دایروی به‌عنوان پارامتر $(\Delta d / d)$ در مرجع [۴] تعریف گردیده است:

به دو حفره‌ی مستطیلی تحت زاویه‌ی ۳۰- درجه مواجهه‌ی میدان موج با اضلاع حفره نشان داده شده است.



(ب) ۳۰ درجه

(الف) ۱۵ درجه

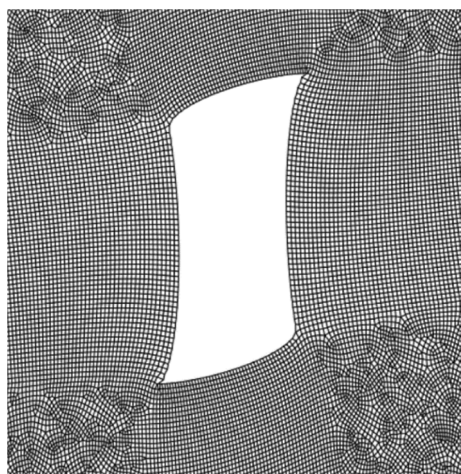
(ت) ۱۵- درجه

(پ) ۴۵ درجه

(ج) ۴۵- درجه

(ث) ۳۰- درجه

شکل (۵): زوایای حفره نسبت به اضلاع مدل اصلی



شکل (۶): نمای تغییر شکل یافته‌ی مدل برای نسبت ابعاد یک به دو حفره تحت زاویه‌ی ۳۰- درجه مواجهه‌ی میدان موج با اضلاع حفره

زیرزمینی به طور کلی از چهار روش استاتیکی معادل، حل‌های به فرم بسته، اعمال استاتیکی پیشینه تغییر مکان‌های میدان آزاد و تحلیل‌های تاریخیچه زمانی (مبتنی بر محاسبات حوزه‌ی فرکانس و یا محاسبات مستقیم حوزه‌ی زمان) انجام می‌پذیرد [۱۲]. تحلیل‌های انجام پذیرفته در این بخش ناظر به حالت سوم یعنی اعمال استاتیکی تغییر مکان‌های میدان آزاد می‌باشد. زاویه‌ی حفره نسبت به اضلاع مدل اصلی به صورت ۴۵، ۳۰، ۱۵، ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵- درجه اعمال و مقدار β برای زوایای مختلف انتشار میدان موج برشی و نسبت‌های ابعادی مختلف حفره محاسبه شده است.

صحت تحلیل برای مقطع مربعی با روش مرجع [۵] و برای زاویه‌ی انتشار میدان موج برشی صفر و نسبت ابعاد یک‌به‌یک حفره سنجیده شده است. مقادیر ضریب اعوجاج حاصل از تحقیق حاضر و ضریب پیشنهادی مرجع [۵] به ترتیب با β_1 و β_2 نمایش داده شده‌اند.

$$\beta_{2,\phi=0} = 2.7; \beta_{1,\phi=0} = 2.9$$

همان‌طور که دیده می‌شود نتایج نزدیک به هم می‌باشد. لازم به ذکر است رابطه‌ی ضریب اعوجاج ارائه شده در مرجع [۵] در اصل مربوط به حالت دایروی است که تفاوت اندک نتیجه این تحقیق با مرجع مذکور ناشی از این مسئله است. همچنین صحت تحلیل برای مقطع دایروی با روش مرجع [۴] سنجیده شده است. مقادیر ضریب اعوجاج حاصل از تحقیق حاضر و ضریب پیشنهادی مرجع [۴] به ترتیب با $(\frac{\Delta d}{d})_1$ و $(\frac{\Delta d}{d})_2$ نمایش داده شده‌اند.

$$(\frac{\Delta d}{d})_1 = 0.011; (\frac{\Delta d}{d})_2 = 0.011$$

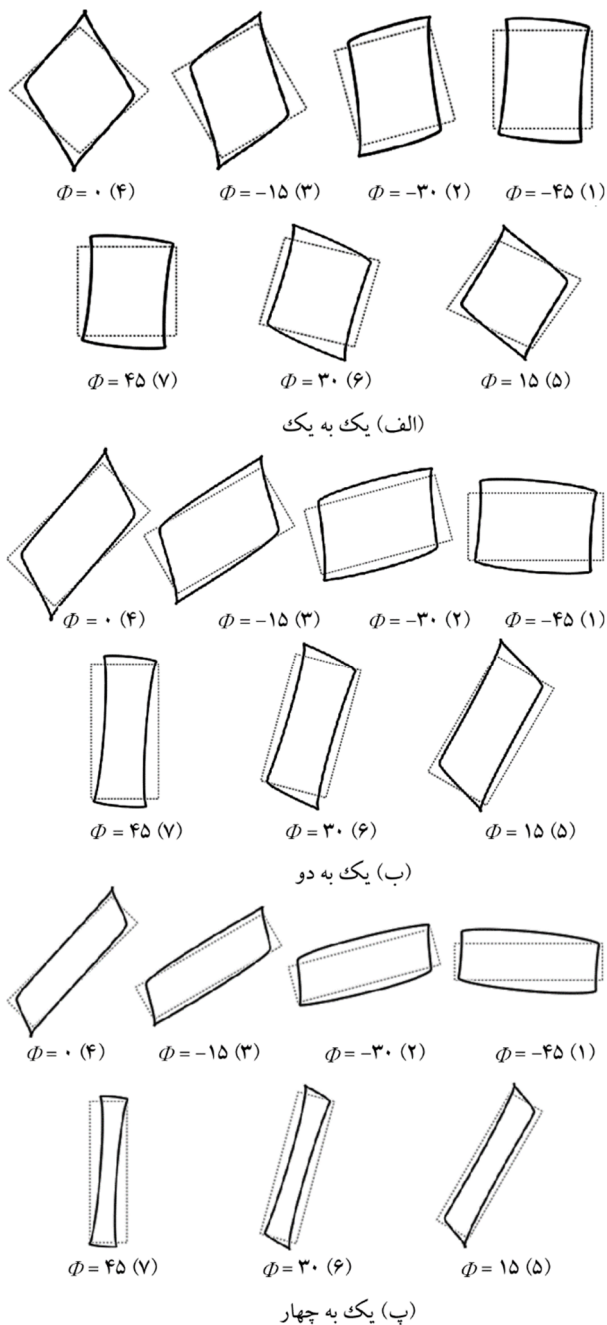
همان‌طور که مشاهده می‌گردد نتایج این تحقیق با نتایج مرجع مبنا مطابقت کاملی دارد. در شکل (۵) سایر زوایای در نظر گرفته شده برای مواجهه حفره با میدان موج نشان داده شده است. در مش‌بندی سعی شده است که هر ضلع متشکل از حداقل ۳۰ المان باشد. شایان ذکر است با توجه به دقت قابل قبول در محاسبه اعوجاج حفره مربعی و نیز حفره‌ی دایروی نیازی به بهینه‌سازی ابعاد مش احساس نگردید. در شکل (۶) نیز نمونه‌ای از مش‌بندی مدل‌سازی اصلی در اطراف حفره برای نسبت ابعادی یک

۴- نتایج و تفسیر

در روش متداول محاسبه‌ی اعوجاج حفره، که پیش‌تر به آن اشاره شد، در حالت حفره مستطیلی کامل برای همه گره‌ها نتیجه مشابهی حاصل می‌شود. به عبارتی از تغییر زاویه هر دو ضلع مجاور می‌توان به ضریب اعوجاج دست یافت. لیکن چنانچه حفره‌ی مستطیلی کامل نباشد، زاویه‌ی اعوجاج برای گره‌های مختلف متفاوت خواهد بود. از این رو نیاز است ضریب اعوجاج به صورت محلی تعریف گردد. در این پژوهش ابتدا به بررسی ضرایب اعوجاج برای مستطیل کامل پرداخته خواهد شد. سپس برای دو مقطع شبه مستطیلی واقعی، ضرایب اعوجاج به صورت محلی بررسی خواهد گردید.

۴-۱- حفره‌های به شکل مستطیل کامل

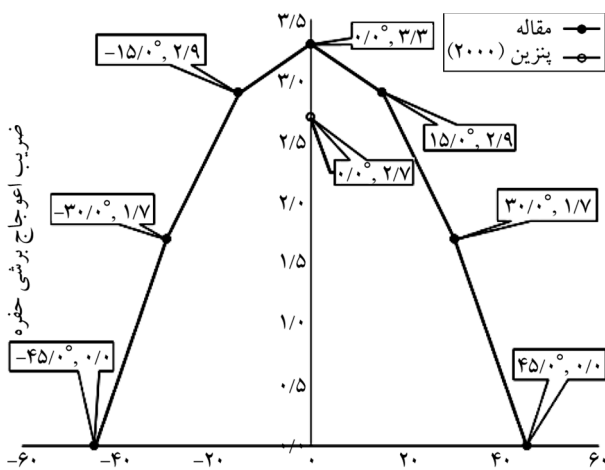
در این بخش ابتدا اعوجاج برای سه نسبت متفاوت ابعاد حفره و برای هفت زاویه‌ی مواجهه با میدان موج برشی نمایش داده شده است. شکل اعوجاج یافته بر روی شکل اعوجاج نیافته‌ی حفره در شکل (۷) نشان داده شده است. در شکل‌های (۷-الف)، (۷-ب) و (۷-پ) به ترتیب نتایج اعوجاج حفره برای نسبت‌های ابعادی یک به یک، یک به دو و یک به چهار ترسیم شده است. همچنین برای هر نسبت ابعادی، هفت زاویه‌ی مواجهه میدان موج و حفره برابر با ۴۵، ۳۰، ۱۵، ۰، -۱۵، -۳۰ و -۴۵ درجه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میدان جابه‌جایی و به تبع آن میدان تنش حتی در حالت برش محض نیز در راستاهای مختلف متفاوت است. به‌طور مثال المانی مربعی که در حالت برش محض قرار دارد و حالت متوازی‌الاضلاع به خود گرفته است، در راستای قطرهای کشش و فشار را تجربه می‌نماید. در مدلسازی‌های این پژوهش محیط خاک به صورت یک مربع مدل شده که محیط حفاری شده مستطیلی با ابعاد بسیار کوچک‌تر در مرکز آن قرار گرفته است. چنانچه اضلاع ناحیه‌ی حفاری شده در راستای قطر مربع خاک قرار گیرد (زاویه‌ی مواجهه ۴۵ و -۴۵ درجه)، انتظار می‌رود حفره در یک جهت حالت کشیدگی و در جهت دیگر حالت



شکل (۷): اعوجاج حفره برای زوایای مختلف مواجهه میدان موج با حفره به صورت بزرگنمایی شده در نسبت‌های ابعادی

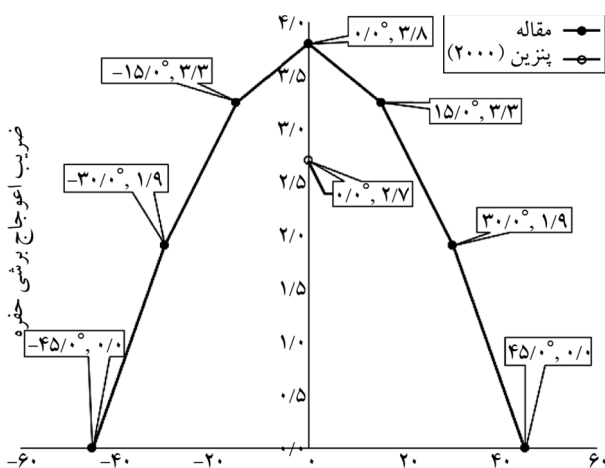
فشرده‌گی پیدا کند. چنانچه اضلاع ناحیه‌ی حفاری شده در راستای اضلاع مربع خاک قرار گیرند (زاویه‌ی مواجهه صفر)، انتظار می‌رود تغییر شکل‌ها به حالت برش محض نزدیک‌تر باشد. برای زوایای حدفاصل این دو زاویه، ترکیبی از تغییر شکل‌های برشی و کشش-فشار به دیواره‌ها تحمیل می‌گردد. مطابق شکل‌های (۷-ب) و (۷-پ) هر چه نسبت ابعادی

رابطه‌ی مرجع [۵] در مقایسه با نسبت ابعادی یک به یک بیشتر می‌گردد. علی‌رغم تفاوت تغییر شکل‌های موضعی برای زوایای قرینه‌ی انتشار موج، مانند ۱۵- و ۱۵+ درجه، ضریب اعوجاج کلی یکسانی در زوایای مذکور مشاهده می‌شود.



زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره

شکل (۹): مقادیر ضریب اعوجاج حفره (β) برای زوایای مختلف انتشار میدان موج برشی و نسبت ابعادی ۲ به ۱ حفره مستطیلی

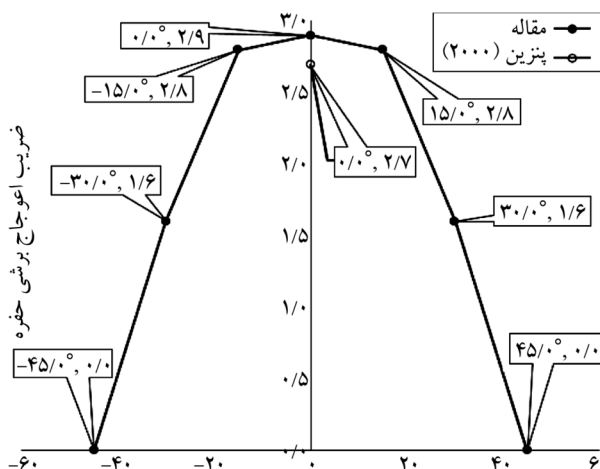


زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره

شکل (۱۰): مقادیر ضریب اعوجاج حفره (β) برای زوایای مختلف انتشار میدان موج برشی و نسبت ابعادی ۴ به ۱ حفره مستطیل

مطابق نتایج فوق می‌توان گفت با تغییر زاویه‌ی مواجهه میدان موج با حفره و نیز با تغییر نسبت ابعادی مقطع، استفاده از روابط موجود در بسیاری موارد محافظه کارانه و در برخی موارد نیز

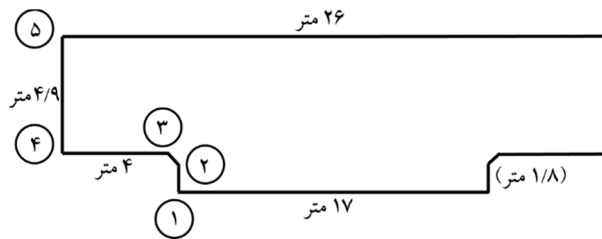
افزایش می‌یابد رفتار فوق با وضوح بیشتری قابل دنبال کردن است. اعوجاج در حضور حفره و عدم حضور حفره نیز متفاوت می‌باشد. برای محاسبه‌ی تغییر شکل کلی هر حفره ابتدا خطوط اصلی بین گره‌های حفره‌ی اعوجاج یافته ترسیم شده و سپس مشابه شکل (۳) اعوجاج کلی محاسبه شده است. در شکل (۸) مقادیر محاسبه شده β برای نسبت ابعاد یک به یک حفره در برابر زاویه مواجهه میدان موج با حفره ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زاویه‌ی مواجهه صفر مشمول بیشترین اعوجاج بوده و زوایای ۴۵- و ۴۵+ درجه متناظر اعوجاج صفر می‌باشد. به عبارتی هر چه از زاویه‌ی مواجهه صفر به سمت زاویه مواجهه ۴۵- یا ۴۵+ درجه حرکت کنیم، اعوجاج کلی مقطع کاهش می‌یابد.



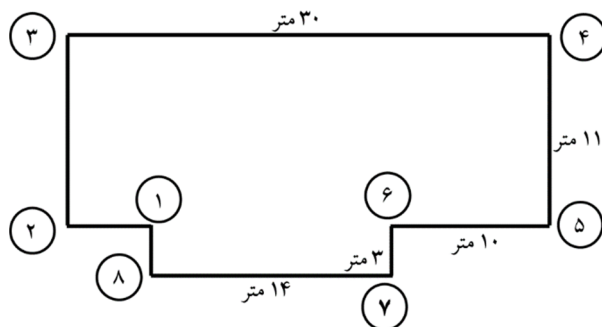
زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره

شکل (۸): مقادیر ضریب اعوجاج حفره (β) برای زوایای مختلف انتشار میدان موج برشی و نسبت ابعادی ۱ به ۱ حفره مستطیلی

همچنین مطابق شکل (۸)، نتایج مرجع [۵] تنها برای زاویه‌ی انتشار میدان موج برشی صفر، ۱۵- و ۱۵+ درجه نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. لیکن با تغییر زاویه‌ی مواجهه میدان موج با حفره، رابطه مرجع [۵] تقریب قابل ملاحظه‌ای در محاسبه‌ی اعوجاج کلی حفره نشان می‌دهد. در شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج برای نسبت‌های ابعادی یک به دو و یک به چهار نیز نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش نسبت ابعادی، تقریب



شکل (۱۱): مقطع نمونه از ایستگاه مترو دایکای در شهر کوبه در کشور ژاپن (مقطع A) [۱۲]



شکل (۱۲): مقطع نمونه از ایستگاه مترو سپلیا در شهر آتن در کشور یونان (مقطع B) [۱۲]

اخیر نشان دادن این واقعیت است که با فاصله گرفتن از اشکال استاندارد، گزاره‌های ارائه شده در ادبیات فنی نیاز به تصحیح مضاعف دارد. شکل اعوجاج یافته بر روی شکل اعوجاج نیافته‌ی مقاطع حفره‌های A و B به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. هفت زاویه‌ی مواجهه میدان موج و حفره برابر با ۴۵، ۳۰، ۱۵، ۰، -۱۵، -۳۰ و -۴۵ درجه نمایش داده شده است.

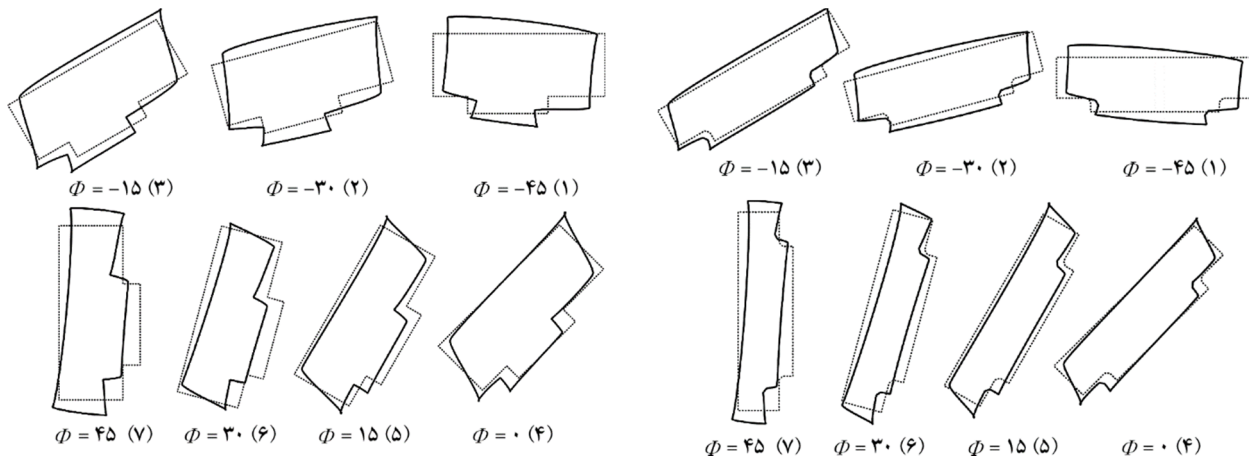
همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود نمای کلی تغییر شکل‌های مقطع A مشابهت معناداری با مقاطع استاندارد شکل (۷) دارد. به‌طور مشابه مطابق شکل (۱۴) نمایش اعوجاج یافته‌ی مقطع B شباهت کلی با شکل (۷) نشان می‌دهد. لیکن علی‌رغم این مشابهت‌های کلی، نتایجی که در پی خواهد آمد روند متفاوتی را در اعوجاج‌های محلی‌های روایت می‌نماید.

در شکل (۱۵) مقادیر ضریب اعوجاج برای مقطع A نشان داده شده است. در نمودارهای این شکل، محور قائم ضریب اعوجاج و محور افقی زاویه‌ی مواجهه میدان موج با حفره را نمایش می‌دهد. شماره گره مورد بررسی در کنار هر نمودار درج شده است.

غیر محافظه کارانه خواهد بود. به بیان دیگر مطابق نتایج این پژوهش پیشنهاد‌های طراحی فعلی به نحوی با چالش مواجه می‌شود. زیرا در روش متداول ابتدا پیشینه کرنش میدان آزاد برشی برآورد می‌شود. سپس اثر تشدیدکنندگی خاک‌برداری محل حفره بر اعوجاج، با ضریب افزایش اعوجاج اعمال شده و تغییر شکل تحمیلی به سازه محاسبه می‌شود. در نهایت این تغییر شکل به صورت جابجایی نسبی به سازه اعمال شده و سازه طرح می‌گردد. در چنین روشی به صورت ضمنی تنها زاویه‌ی مواجهه صفر لحاظ شده و توزیع نیروها الگویی خاص خواهد داشت. لیکن با تغییر زاویه‌ی مواجهه، تغییر شکل‌های ایجاد شده در دیواره‌ها و به تبع آن نیروهای تحمیلی به سازه می‌تواند مشمول تغییرات قابل ملاحظه گردد. قابل ذکر است که عدم وجود اعوجاج کلی به معنای عدم تغییر شکل دیواره‌های حفره نیست. لیکن در این تحقیق تنها اعوجاج کلی مقطع مورد بررسی قرار گرفته است.

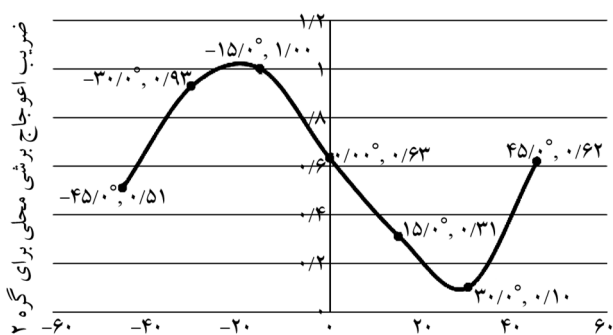
۴-۲- حفره‌های شبه مستطیلی

در این بخش دو مثال واقعی از مقاطع حفره‌های مربوط به ایستگاه‌های مترو در شهرهای کوبه در کشور ژاپن و آتن در کشور یونان بررسی شده است [۱۲]. مقاطع این تونل‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. مقطع نخست، همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، مربوط به ایستگاه مترو دایکای در شهر کوبه بوده و از این پس مقطع A نامیده می‌شود. این مقطع دارای یک زائده‌ی مستطیلی در پایین بوده و تنها دارای یک محور تقارن است. در این تحقیق برای پنج نقطه از این مقطع مقادیر اعوجاج موضعی مورد بررسی قرار گرفته که نقاط مذکور با شماره روی شکل مشخص شده‌اند. مقطع دوم، مطابق شکل (۱۲)، مربوط به ایستگاه مترو سپلیا در شهر آتن بوده و از این پس مقطع B نامیده می‌شود. این مقطع نیز دارای یک زائده‌ی مستطیلی در پایین بوده، ولی فاقد محور تقارن است. برای این مقطع به دلیل عدم وجود محور تقارن اعوجاج تمامی گره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مطابق شکل (۱۲) گره‌ها از شماره‌ی ۱ الی ۸ نام‌گذاری شده‌اند. در حقیقت هدف از ارائه‌ی نتایج دو مقطع

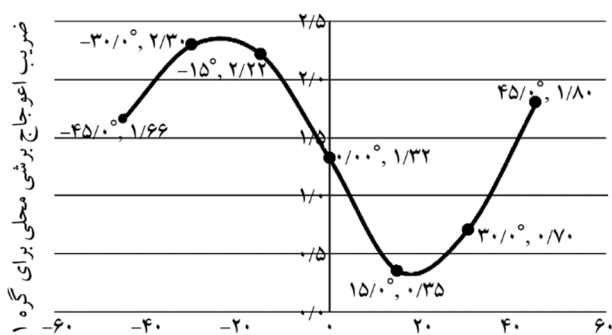


شکل (۱۳): اعوجاج حفره مقطع تونل A برای زوایای مختلف مواجهه میدان موج با حفره به صورت بزرگنمایی شده

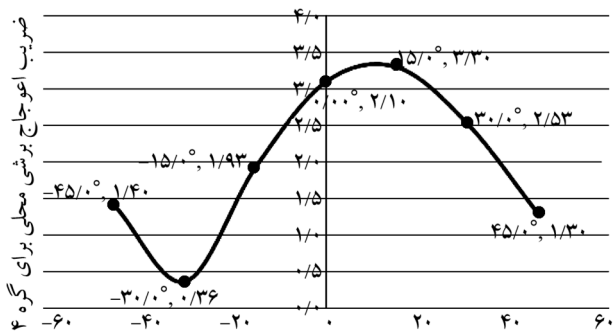
شکل (۱۴): اعوجاج حفره مقطع تونل B برای زوایای مختلف مواجهه میدان موج با حفره به صورت بزرگنمایی شده



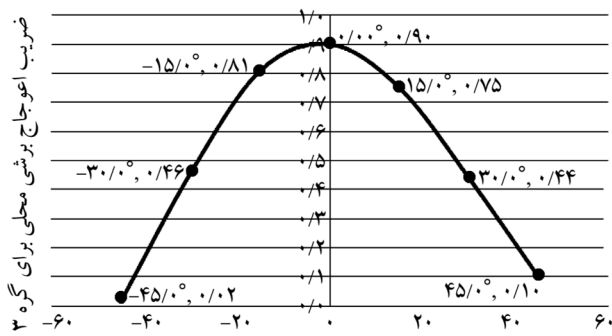
زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره



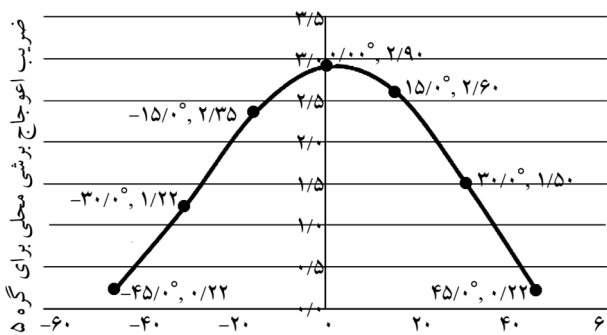
زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره



زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره



زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره



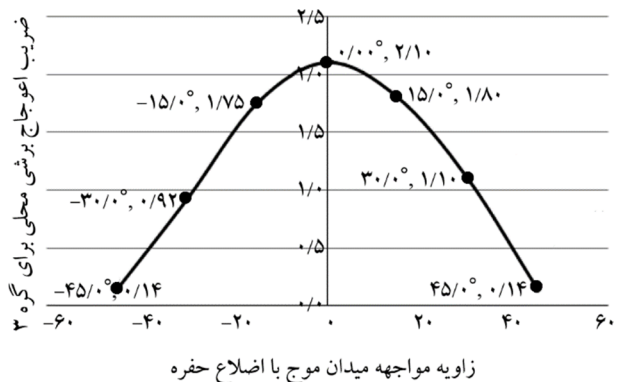
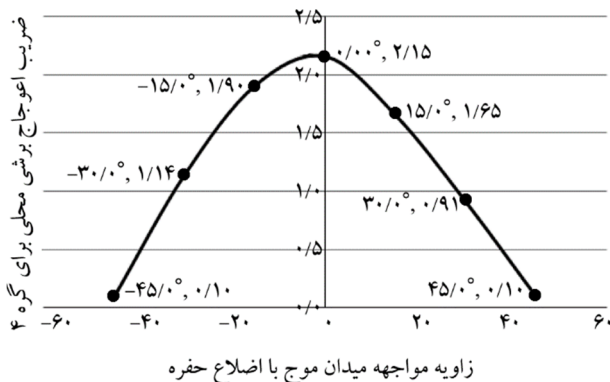
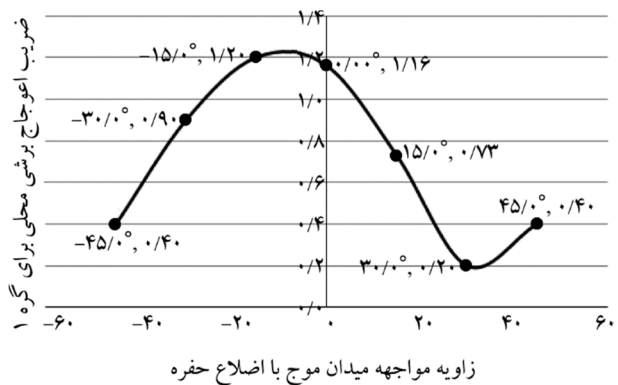
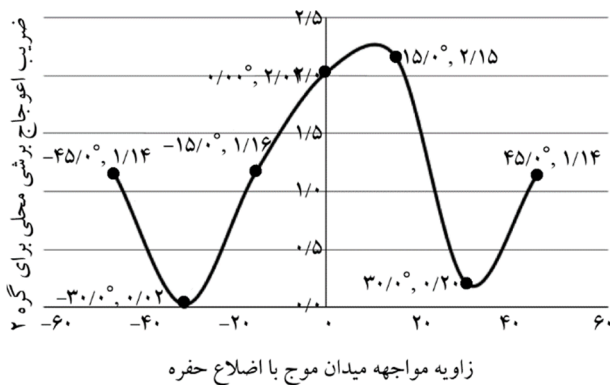
زاویه مواجهه میدان موج با اضلاع حفره

شکل (۱۵): ضرایب اعوجاج برشی محلی مقطع حفره A در گروه‌های مختلف مقطع تحت زوایای مختلف مواجهه میدان موج با اضلاع حفره

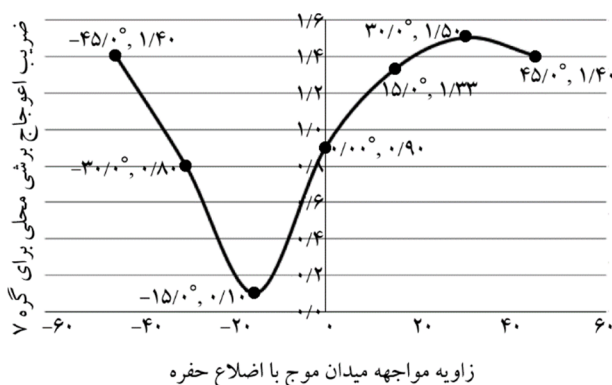
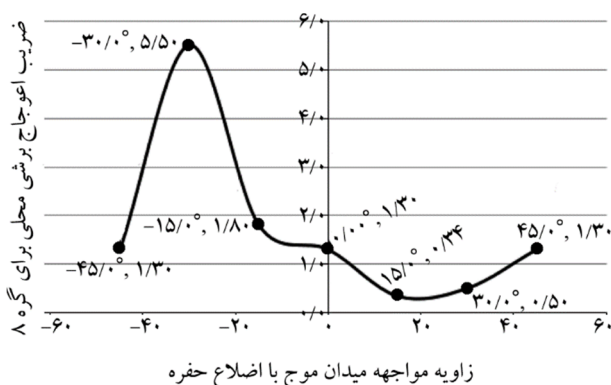
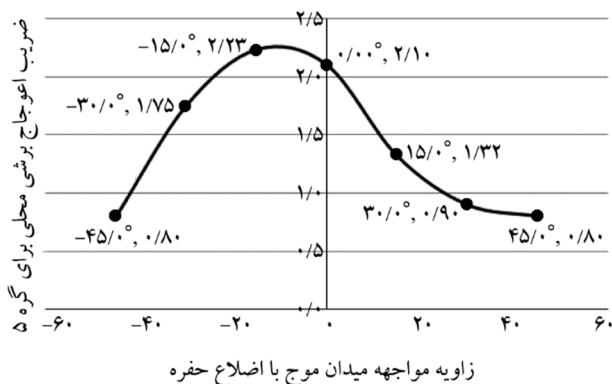
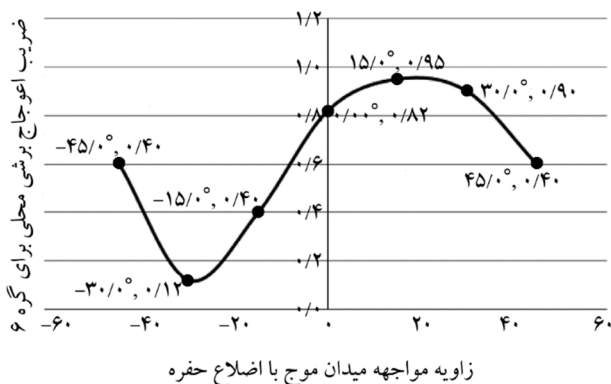
مستطیل کامل که پیش‌تر ارائه شده نمی‌رسد. در شکل (۱۶) مقادیر ضریب اعوجاج برای مقطع B نمایش داده شده است. محورهای قائم و افق همانند شکل (۱۵) مدرج شده‌اند. تقریباً تمامی گزاره‌های ارائه شده برای مقطع A، در مورد مقطع B نیز برقرار است. در این میان تفاوت‌هایی نیز وجود دارد که در ادامه به آنها پرداخته خواهد شد: در گره ۲، به عنوان نزدیک‌ترین گره اصلی به زائده‌ی مستطیلی، کمینه‌ی اعوجاج، علاوه بر زاویه -۳۰° ، در زاویه ۳۰° نیز دیده می‌شود. در گره ۸، از گره‌های زائده‌ی مستطیلی، بیشینه اعوجاج محلی تا حدود $۵/۵$ برابر بیشینه کرنش برشی میدان موج می‌رسد که بسیار بالاتر از مقادیر مشابه در مستطیل کامل است. لازم به ذکر است نتایج ارائه شده مربوط به دو مقطع A و B تنها به منظور نشان دادن اثر عدم تقارن کامل مقاطع مستطیلی بر اعوجاج محلی مورد بحث قرار گرفته و جهت بررسی اثرات کامل این پدیده نیاز به تحقیقات گسترده‌تری است.

به‌طور کلی گزاره‌های زیر از تغییرات نمودارها قابل برداشت می‌باشد:

- برای هر گره زاویه مواجهه مشخصی اعوجاج بحرانی را ایجاد می‌نماید که با سایرین متفاوت است.
- زاویه مواجهه ۴۵° ، تقریباً برای تمامی گره‌ها اعوجاج مشابهی را با زاویه -۴۵° نشان می‌دهد. همچنین، در مقایسه با سایر زوایا، هیچ کدام از این دو زاویه منجر به ایجاد بحرانی‌ترین اعوجاج محلی در گره‌ها نشده‌اند. لیکن در برخی گره‌ها مانند گره‌های ۲ و ۵، زوایای مواجهه فوق کمینه‌ی اعوجاج محلی را موجب شده‌اند.
- در گره‌هایی که زاویه مواجهه‌ی صفر بیشترین اعوجاج محلی را ایجاد کرده است، زوایای مواجهه ۴۵° و -۴۵° کمینه اعوجاج را موجب شده‌اند.
- کمینه اعوجاج محلی گره ۴ که مجاور زائده است، در زاویه‌ی مواجهه -۳۰° درجه رخ داده است که با حالت مستطیل کامل متفاوت است.
- بیشینه اعوجاج در هیچ کدام از گره‌ها، به بیشینه اعوجاج



شکل (۱۶): ضرایب اعوجاج برشی محلی مقطع حفره‌ی B در گره‌های مختلف مقطع تحت زوایای مختلف مواجهه‌ی میدان موج با اضلاع حفره



ادامه شکل (۱۶)

۶- نتیجه گیری

موارد نیز غیر محافظه کارانه خواهد بود. در ادامه جهت نشان دادن رفتار مقاطع شبه مستطیلی که از حالت مستطیل کامل فاصله گرفته‌اند، دو مقطع مربوط به ایستگاه‌های مترو در شهرهای کوبه و آتن که هر کدام دارای یک زائده‌ی مستطیلی در ضلع پایین خود هستند مورد بحث قرار گرفته است. در این میان مقطع انتخابی اول تنها دارای یک محور تقارن بوده و مقطع دوم محور تقارن نداشته است. برای این دو مقطع به دلیل تفاوت اعوجاج در گره‌های مختلف، اعوجاج محلی مختص هر گره جداگانه گزارش شده است. مطابق نتایج مشاهده شده است که در نواحی نزدیک زائده نتایج از حالت مستطیل کامل فاصله گرفته و در برخی موارد اعوجاج‌های مشاهده شده بسیار بیشتر از حالت مستطیل کامل بوده است. همچنین با فاصله گرفتن از زائده‌ی مستطیلی، نتایج به حالت مستطیل کامل نزدیک می‌شود. لازم به ذکر است جهت دستیابی به چارچوب جامع‌تری از میزان اعوجاج کلی مقاطع مستطیلی در برابر میدان موج برشی به تحقیقات بیشتری نیاز است. همچنین شایان ذکر است که نتایج ارائه شده

در این مقاله اثر تغییر زاویه‌ی انتشار میدان موج برشی بر اعوجاج حفره‌های مستطیلی شکل بررسی گردیده است. برای این منظور ناحیه‌ای از خاک اطراف حفره در قالب یک مدل دو بعدی به صورت ایزوتروپیک و همگن تحت بار لرزه‌ای شبیه‌سازی شده با تغییر مکان‌های برشی استاتیکی قرار گرفته است. شرایط تکیه گاهی و بار خارجی به گونه‌ای اثر داده شده است که شرایط برش محض حاصل شود. تحلیل‌ها به روش اجزاء محدود و برای نسبت‌های ابعادی مختلف حفره‌ها انجام پذیرفته و اعوجاج کلی مقطع حفره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که روابط موجود در ادبیات فنی تنها برای حالاتی خاص مانند زاویه مواجهه نزدیک به صفر حفره و میدان موج برشی و نیز برای نسبت ابعادی یک به یک حفره، دقت مناسبی دارد. لیکن با تغییر زاویه‌ی مواجهه میدان موج با حفره و نیز با تغییر نسبت ابعادی حفره‌ی مستطیلی شکل، استفاده از روابط موجود در بسیاری موارد محافظه کارانه و در برخی

11. Hashash, Y.M., Hook, J.J., Schmidt, B., John, I., and Yao, C. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**(4), 247-293.
12. Hashash, Y.M.A., Karina, K., Koutsoftas, D., and O'Riordan, N. (2010). Seismic design considerations for underground box structures. *Earth Retention Conference*, **3**, 620-637.
13. Ptilakis, Kyriazis (2011) *Seismic Design and Risk Assessment of Underground Long Structures [Report]*. MONICO Workshop-Structural Monitoring and Assessment of Underground Transportation Facilities, Athens, Greece.
14. Debiassi, E., Gajo, A., and Zonta, D. (2013) On the seismic response of shallow-buried rectangular structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **38**, 99-113.
15. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2013) Transient analysis of wave propagations problems by half-plane BEM. *Geophysical Journal International*, **194**, 1849-1865.
16. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2014) Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded Truncated Circular Cavity: a half-plane time-domain BEM. *IJCE*, **12**(2), 193-206.
17. Fuentes, R. (2015) Internal forces of underground structures from observed displacements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 50-66.

در این تحقیق تنها ناظر به اعوجاج گره‌های حفره بوده و تغییر شکل‌های موضعی میان گره‌های مورد بررسی قرار نگرفته است.

مراجع

1. Okabe, S. (1926) General theory of earth pressure. *Journal of the Japanese Society of Civil Engineers*, **12**(1), 311-329.
2. Kuesel, T.R. (1969) Earthquake design criteria for subways. *Journal of the Structural Division, ASCE*, **ST6**, 1213-1231.
3. St. John, C.M. and Zahrah, T.F. (1987) Aseismic design of underground structures. *Tunneling Underground Space Technol*, **2**(2), 165-197.
4. Wang, J.N. (1993) *Seismic Design of Tunnels: A Simple State-of-the-Art Design Approach*. Parsons Brinckerhoff, Monograph No. 7, New York.
5. Penzien, J. (2000) Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(5), 683-691.
6. Pelli, E., Yiouta-Mitra, P., and Sofianos, A.I. (2006) Seismic behaviour of square lined underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**(3-4), 441.
7. Nishioka, T., Unjoh, S. (2003) A simplified evaluation method for the seismic performance of underground common utility boxes. *Proceedings 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Auckland.
8. Gingery, J. (2007) A simplified method for estimating shear strains for ovaling and racking analysis of tunnels. *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece, 25-28.
9. Wood, J.H. (2004) *Earthquake Design Procedures for Rectangular Underground Structures*. Earthquake Commission Research Foundation, EQC No 01/470.
10. Wood, J.H. (2007) Earthquake design of rectangular underground structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **40**(1), 1-6.

اصطلاحات فنی

Racking Deformation	۱- تغییر شکل‌های اعوجاجی
Finite-Difference	۲- تفاضل محدود
Simplified Frame Analysis Model	۳- نتایج تحلیل شبه استاتیکی
Boundary Condition	۴- شرایط تکیه گاهی
External Load	۵- بار خارجی

An Investigation on Seismically Induced Local Distortions to Underground Rectangular 2D Cavities: The Case of Shear Wave Field of Motion with Different Incident Angles

Hossein Jahankhah^{1*}, Amir Hossein Pariz², and Morteza Bastami³

1. Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Iran,
*Corresponding Author, e-mail: h.jahankhah@iiees.ac.ir
2. M.Sc. Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Iran
3. Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Iran

A classical approach to soil-structure interaction problems includes three analysis stages. The first is the estimation of free field motion (FFM). The second stage accounts for the effect of excavation on FFM alternations in the perimeter of excavated part. The third and final step deals with soil-structure interaction, usually in two sub-parts, i.e. kinematic and inertial interactions. For the case of underground systems, the first two stages and also the first sub-part of the third stage, govern the forces imposed to embedded structures.

To implement the above analysis plan, FFM is usually considered as shear waves with upward propagation direction. Such assumption has formed the popular simplified seismic design method of underground structures [1-6]. Though, this common assumption may not be valid for topographic urban areas where wave fields reach surface through different incident angles. Such inclination would lead to various states of confrontation between embedded cavities and wave fields. The state variety, in turn, cause underground openings to experience different stress fields and hence dissimilar void-wall deformations. The tractions that affect embedded structures are the results of such deformations. Therefore, there is a serious need to uncover the role of wave field-cavity face-off orientation on void-wall distortions.

Here, the effect of face-off angle, between shear wave field and rectangular cavities, on semi-local distortions is investigated. For this purpose, a 2D isotropic soil model including homogeneity is included under statically simulated seismic shear deformations. The analysis was performed through the finite element method regarding different aspect ratios for cavity and subsequently global distortions were reported. To drive semi-local distortions, in the analyzed model, the cavity junctions were initially connected by straight lines. Then, the divergences from perpendicularity between adjacent edge lines of the opening were calculated. This approach would provide the same results for different corners of perfect rectangular cavities. However, this is not the case for imperfect rectangles where the responses would not take similar values for different junctions. The first part of this research examines the performance of perfect cavities against different incident angles. The second part deals with the samples of semi-rectangular sections.

With an overview on results for perfect rectangles, it can be figured out that the traditional formulations for cavity distortion estimation just cover special incident angles, which are close to zero value and also specified to square sections rather than general rectangular shapes. However, as the incident angle varies from zero to 45 degrees and also sections tend to more slender shapes, usual suggestions would become in many cases conservative and also in a number of occasions unconservative. For instance, in the case of 45 and -45 incident angles, global distortion of sections vanishes in spite of existence of local arching shapes. This means that wall deformations are totally different from what is expected in the case of zero confrontation angle.

Furthermore, the above investigation is extended to two of semi-rectangular sections. The selected cases, which belong to different metro stations in Kobe and Athens metropolitans, possess rectangular sub-parts at the bottom.

These sub-parts make deviations from perfect rectangles. In the former case, the added part is placed in the middle length with which one of two symmetry axis is removed and the other one still remains. In the later one, the added part is placed at an arbitrary position that removes both symmetry axes. In this second round of analysis, as distortions vary from node to node, each nodal distortion is reported separately. Due to the results, it is seen that by approach to the position of added parts, deformations become more different from perfect states. This difference may result in more than 50% increase in corner angle adjustments. That is while far regions from added inclusions experience approximately the similar responses to perfect rectangles.

It is worth mentioning that to reach a comprehensive influence map on the effect face-off angle, further investigation is required. Besides, it is important to note that this document has focused on edge junctions for the calculation of nodal distortions. Other local deformations were out of the scope of this paper.

Keywords: Seismic Analysis; Underground Structures; Rectangular Cavities; Semi-Local Distortions; Shear Deformations

References

1. Wang, J.N. (1993) *Seismic Design of Tunnels: a Simple State-of-the-Art Design Approach*. Parsons Brinckerhoff, Monograph No. 7, New York.
2. Penzien, J. (2000) Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(5), 683-691.
3. Hashash, Y.M., Hook, J.J., Schmidt, B., John, I., and Yao, C. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**(4), 247-293.
4. Wood, J.H. (2007) Earthquake design of rectangular underground structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **40**(1), 1-6.
5. Debiassi, E., Gajo, A., and Zonta, D. (2013) On the seismic response of shallow-buried rectangular structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **38**, 99-113.
6. Fuentes, R. (2015) Internal forces of underground structures from observed displacements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 50-66.