

چکیده

با توجه به کاربرد روزافزون تونل‌های جعبه‌ای شکل در شبکه‌های حمل و نقل بین شهری و درون شهری که اصولاً به صورت تونل‌های کند و پوش اجرا می‌شوند، نیاز به بررسی تأثیر مخاطرات طبیعی مانند زلزله بر این سازه‌های ژئوتکنیکی و روش‌های کاهش بار لرزه‌ای این نوع سازه‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. امروزه استفاده از مصالح سبک‌وزن مانند ژئوفوم در مهندسی عمران جایگاه ویژه‌ای یافته و بسیاری از چالش‌های علم مهندسی را برطرف کرده است. در پژوهش حاضر، نقش مصالح ژئوفوم به عنوان خاک‌ریز برای تونل‌های کند و پوش بر نیروهای داخلی سازه تونل در حین زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از مطالعات عددی با استفاده از نرم‌افزار اختلاف محدود FLAC 2D استفاده شده است. پس از بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که ژئوفوم به عنوان خاک‌ریز در سطح بالای تونل توانسته به خوبی نیروهای داخلی در حالت استاتیکی، لرزه‌ای و کل سازه تونل را تا چندین برابر نسبت به حالت خاک‌ریز خاکی کاهش دهد. این تأثیر برای دیواره و سقف تونل دیده شد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر چنین نتیجه شد که خاک‌ریز ژئوفومی جایگزین مناسبی برای خاک‌ریزهای خاکی از منظر بهسازی لرزه‌ای در تونل‌های کند و پوش می‌باشد.

واژگان کلیدی: تونل کند و پوش، نیروهای داخلی، مصالح خاک‌ریز، ژئوفوم، پاسخ لرزه‌ای.

بررسی عددی تأثیر ژئوفوم به عنوان مصالح خاک‌ریز در تونل‌های کند و پوش بر نیروهای داخلی سازه تونل در حین زلزله

صدری شادابی

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران،
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

مسعود رابطی مقدم (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران، rabeti@yu.ac.ir

منصور پرویزی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

مهدی زمانی لنجانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۱- مقدمه

تونل‌های کند و پوش عموماً در اعماق کمی از خاک احداث می‌شوند، جایی که تغییر شکل‌های لرزه‌ای زمین و شدت لرزش به دلیل صلبیت کمتر خاک و اثر تقویتی ساختگاه، بزرگ‌تر از مکان‌های عمیق‌تر است. اطلاعات مربوط به کارایی تونل‌های قدیمی نشان می‌دهند تونل‌هایی که در محیطی با روباره کم ضخامت ساخته شده‌اند، نسبت به سازه‌هایی که در عمق بیشتری ساخته شده‌اند، آسیب‌پذیرتر هستند [۱]. با توجه به کاربرد فراوان تونل‌های کند و پوش در توسعه فضاهای زیرزمینی شهری و همچنین قرارگیری این سازه‌ها در اعماق کم که تأثیرات زلزله در آن به مراتب توان تخریبی بیشتری خواهند داشت، لازم است تا پوشش این تونل‌ها در مناطق لرزه‌خیز شهری تحت تحلیل و طراحی لرزه‌ای قرار گیرند [۲].

با توجه به توسعه روزافزون سازه‌های زیرزمینی و هزینه‌های فراوانی که برای ساخت هر یک از این سازه‌ها صرف می‌گردد و نیز اهمیت آنها در شبکه حمل و نقل بین شهری و داخل شهری و خطری که در صورت آسیب دیدگی آنها متوجه جان مردم می‌شود، لازم است که پایداری آنها در برابر خطرات ناشی از زلزله مورد مطالعه قرار گیرد. تونل‌ها که جزو شریان‌های حیاتی جوامع به حساب می‌آیند، نقش مهمی در توسعه کشورها ایفا می‌کنند. از انواع تونل‌ها می‌توان به تونل‌های کند و پوش که در عمق کم و اغلب مستطیلی شکل ساخته می‌شوند، اشاره کرد. این نوع تونل‌ها مخصوصاً به دلیل سرعت و هزینه کم ساخت، به صرفه بوده و از لحاظ ایمنی در مناطق شهری به یکی از پرکاربردترین نوع تونل‌ها تبدیل شده است.

نتیجه‌گیری شد که مقادیر کرنش‌های تونل لایه‌بندی شده توسط ژئوفوم بسیار کمتر از تونلی است که عایق‌بندی نشده است. کایرو و همکاران [۸] یک روش برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای دیوارهای تونل کند و پوش که به روش عایق‌بندی پلیمری نام‌گذاری شده است را پیشنهاد دادند. سختی برشی مواد پلیمری تنها حدود یک‌صدم خاک در نظر گرفته شده است. تأثیر این روش پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای تونل به وسیله تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تأثیرپذیری روش پیشنهادی به ضخامت خاک پوششی روی سطح تونل و سختی بین دیوار و سازه بستگی دارد. مقادیر نیروی برش برای حالتی که دیوار به وسیله ژئوفوم عایق‌بندی شده کمتر از حالتی است که دیوار عایق‌بندی نشده است.

ژئوفوم به عنوان یکی از مصالح جاذب موج در بحث ژئوتکنیک لرزه‌ای در مطالعات مختلفی مورد استفاده واقع شده است. باین حال، تاکنون اثر وجود ژئوفوم به عنوان مصالح خاک‌ریز در سازه‌های کند و پوش بر نیروهای داخلی سازه تونل در حین زلزله مطالعه نشده است. لذا در این مطالعه به بررسی اثر ژئوفوم به عنوان مصالح خاک‌ریز در کاهش نیروهای داخلی سازه تونل پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی نتایج

در مطالعه حاضر جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار اختلاف محدود 2D FLAC استفاده شده است. به منظور راستی‌آزمایی نتایج نرم‌افزار، از مطالعه آزمایشگاهی که به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای تونل جعبه‌ای شکل مترو که به صورت کند و پوش احداث شده، استفاده شده است. این آزمایش‌ها در دانشگاه کایست کره جنوبی با دستگاه سانتریفیوژ انجام شده است. جزئیات این آزمایش‌ها در مطالعات بازیار و همکاران [۹-۱۰] آمده است. آزمایش‌ها در مقیاس پروتوتایپ (مدل واقعی) در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. شبکه‌بندی مدل T2 از مجموعه آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام گرفته در شکل (۱) نشان داده شده است.

طراحی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی به طور کامل متمایز از طراحی سازه‌های روی سطح زمین بوده زیرا تغییر شکل زمین در حین زلزله حاکم بر مسئله است و نیروهای اینرسی سازه‌ای (که در طراحی سازه‌های روسطحی غالب است) در درجه دوم اهمیت قرار دارند. امواج برشی منتشر شده از سنگ بستر به سمت بالا در اثر برخورد به سازه زیرزمینی می‌تواند منجر به بیضی شدن^۱ تونل با مقطع دایره‌ای و تغییر شکل جانبی^۲ در تونل‌های با مقطع مستطیلی گردند [۳].

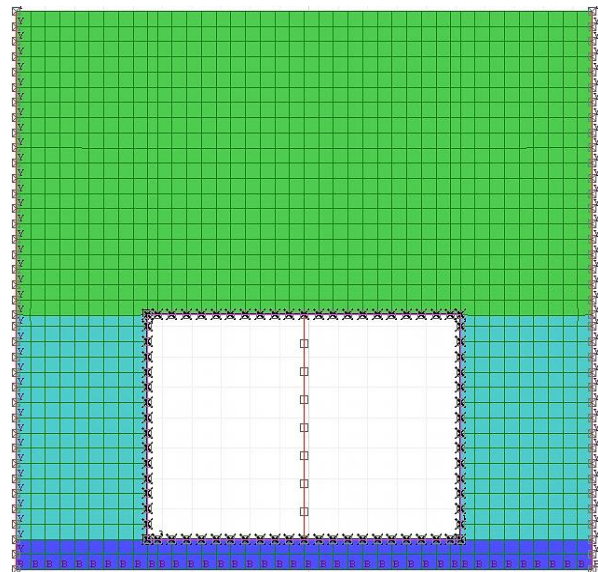
پارک و همکاران [۴] به بررسی تحلیلی آسیب‌های ناشی از بارهای لرزه‌ای بر روی سازه تونل‌های کند و پوش مستطیلی تحت تحلیل‌های غیرخطی قاب فولادی و بتنی پرداخته‌اند. آنها دریافتند که خرابی سازه تونل رابطه مستقیم با سرعت موج برشی خاک دارد. تحلیل‌های آسیب جعبه تونل‌های کند و پوش تحت بارهای لرزه‌ای توسط لی و همکاران [۵] انجام گرفته است. جعبه تونل تغییر شکل‌های برشی را در طول اعمال زلزله تجربه می‌کند و میزان این تغییر شکل‌ها به سختی خاک اطراف تونل بستگی دارد.

امروزه استفاده از مصالح سبک‌وزن مانند ژئوفوم در مهندسی عمران جایگاه ویژه‌ای یافته و بسیاری از چالش‌های مهندسی ژئوتکنیک را برطرف کرده است. استفاده از این مصالح در کنار سازه‌های ژئوتکنیکی از جمله دیوارهای حائل و خاک‌ریزها به عنوان یکی از روش‌های بهسازی خاک در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای به شمار می‌رود. آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های عددی توسط زرنانی و باترست [۶] بر روی ترکیبات ژئوفوم مورد استفاده در پشت دیوارهای حائل به عنوان خاک‌ریز انجام گرفته است. آنها دریافتند که وجود ژئوفوم در پشت دیوارهای حائل از نیروهای استاتیکی و دینامیکی وارد به دیوار پیش از اعمال زلزله و در حین اعمال زلزله می‌کاهد.

وانگ [۷] در یک مطالعه عددی با نرم‌افزار آباکوس^۳ به بررسی تأثیر ژئوفوم برای کاهش بارهای لرزه‌ای ناشی از زلزله در تونل پرداخته است. از چهار نوع ژئوفوم با مدول الاستیسیته متفاوت برای بررسی تأثیر عایق‌بندی آن استفاده شد. چنین

ورودی به صورت تاریخچه زمانی شتاب به سرتاسر کف مدل اعمال گردید. لازم به ذکر است مدل پروتوتایپ دارای شرایطی مشابه مدل سانتریفیوژی بوده که در آن لایه ماسه‌ای بر روی بستر سنگی واقع شده است. مرزهای جانبی مدل سانتریفیوژی با در نظر گرفتن مشخصه اصلی جعبه EBS مدل‌سازی گردید. عملکرد مرزهای جانبی جعبه EBS به گونه‌ای است که تمام نقاط هم‌ارتفاع دارای تغییر مکان یکسان و هم‌جهت در راستای اعمال لرزش (راستای افقی) هستند و در جهت قائم هیچ گونه تغییر مکانی ندارند. برای مدل‌سازی این مشخصه، از یک المان سازه‌ای (المان لاینر^۷ در FLAC) به ضخامت ناچیز یک میلی‌متر در مرز دو طرف مدل استفاده شد. گره‌های این المان سازه‌ای به گره‌های خاک مقید شده به گونه‌ای که هیچ لغزش و جدایی بین آنها اتفاق نیافتد. مدول الاستیسیته این المان‌ها با مدول الاستیسیته خاک یکسان در نظر گرفته شد. سپس به کمک دستور SLAVE در نرم‌افزار، تغییر مکان افقی گره‌های هم‌ارتفاع دو طرف جعبه به گونه‌ای به یکدیگر مقید شدند که در هر لحظه تغییر مکان یکسان و هم‌جهت داشته باشند. لازم به ذکر است تعریف المان لاینر فقط به منظور شبیه‌سازی شرایط مرزی مرزهای جانبی جعبه EBS تعریف شده است؛ به همین دلیل مشخصات آن عیناً مشابه خاک فرض شده است.

از مدل الاستوپلاستیک موه‌ر کولمب در مدل‌سازی رفتار خاک جهت تحلیل استاتیکی مدل استفاده گردید. میرایی واقعی در محیط‌های خاکی به صورت هیستریزس است لذا رفتار خاک در حالت دینامیکی در مدل غیرخطی به صورت غیرخطی و با میرایی هیستریزس مدل شد. در نرم‌افزار FALC از منحنی‌های کاهش مدول و میرایی که در تحلیل‌های معادل خطی معمول است به منظور مدل‌سازی میرایی هیستریزس جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده می‌شود. به این منظور منحنی تغییرات G/G_{max} (مدول برشی به مدول برشی حداکثر) در برابر کرنش برشی (γ) با مشخصات یکی از مدل‌های هیستریزس موجود در نرم‌افزار کالیبره شده و به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. در این مطالعه از مدل هاردین-درنویچ^۸ استفاده شده است که در آن رابطه بین G/G_{max} و کرنش برشی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:



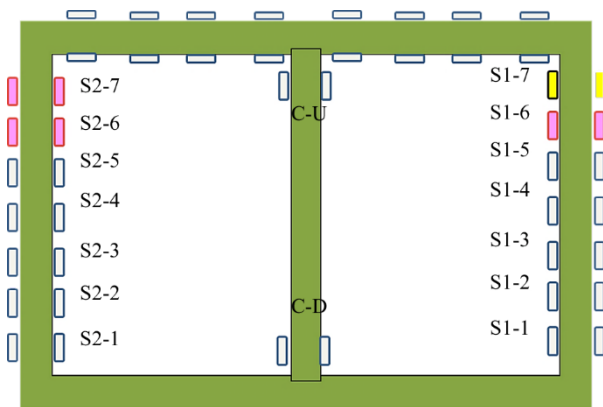
شکل (۱): شبکه‌بندی مدل آزمایشگاهی T2 در نرم‌افزار FLAC 2D.

با توجه به حداقل سرعت موج برشی خاک ماسه‌ای به کار رفته در مدل برابر با ۱۵۰ متر بر ثانیه و فرکانس حداکثر زلزله برابر ۱۰ هرتز، حداکثر ابعاد المان طبق روابط موجود در نرم‌افزار به ۱/۵ متر محدود گردید. لازم به ذکر است در تحلیل‌های عددی، فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ هرتز از امواج ورودی زلزله فیلتر شده‌اند. در تحلیل عددی صورت گرفته از المان‌های چهارضلعی کرنش مسطح با حداکثر ابعاد ۰/۵ متر استفاده شد. انتخاب حداکثر ابعاد المان‌ها برابر ۰/۵ متر منجر به ایجاد ۱۴۸۰ المان چهارضلعی در مدل گردید.

تحریک ورودی در نرم‌افزار FLAC با فرض کف صلب^۴ یا کف نرم^۵ به دو صورت قابل اعمال است. در حالت کف صلب، تحریک ورودی به صورت تاریخچه زمانی شتاب به کف مدل اعمال می‌شود. برای کف نرم، از یک مرز آرام^۶ در کف مدل استفاده شده و تحریک ورودی در قالب تاریخچه زمانی تنش به کف مدل اعمال می‌شود. در آزمایش‌های سانتریفیوژی، کف مدل به صورت یک مرز صلب عمل کرده و امواج ورودی را همانند یک مرز صلب به داخل منعکس می‌کنند؛ بنابراین میرایی تشعشعی در این آزمایش‌ها مدل نمی‌گردد. در مدل عددی، مرز کف به صورت صلب در نظر گرفته شد و با یک لایه سنگی به ضخامت ۱ متر از جنس سنگ بستر محل مدل‌سازی گردید. تحریک

برای نیروی داخلی سازه تونل انجام شده و نتایج آن ارائه شده است و از ذکر نتایج صحت‌سنجی برای شتاب‌های ثبت شده در مدل صرف‌نظر شده است.

نتایج تحلیل‌های عددی آزمایش $T2$ در قالب تاریخچه زمانی برای زلزله کوبه با بیشینه شتاب $0.206g$ و برای زلزله نورتریج با بیشینه شتاب $0.186g$ برداشت شده است. نتایج صحت‌سنجی در ادامه آمده است.



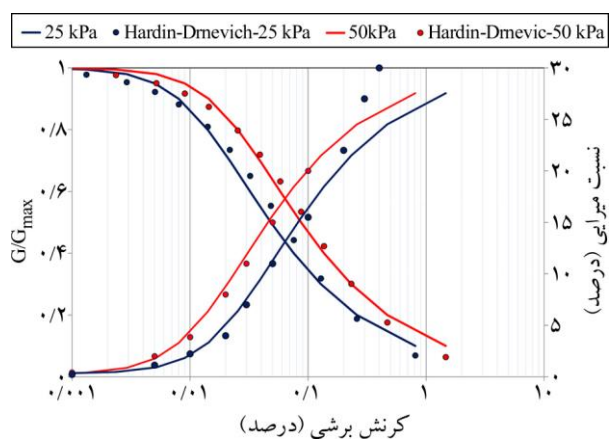
شکل (۳): ابزارگذاری سازه تونل برای برداشت لنگرهای خمشی سازه تونل.

۱-۲- نتایج صحت‌سنجی: زلزله کوبه با بیشینه شتاب $0.206g$ در شکل (۴) تاریخچه زمانی لنگر داخلی برای چهار المان سازه‌ای دیواره تونل در مدل عددی با نتایج آزمایش سانتریفیوژ مقایسه شده است. از مقایسه نتایج برداشت شده از نرم‌افزار با نتایج ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌های تعبیه شده بر دیواره تونل مشاهده می‌شود که نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی هم‌خوانی مناسبی از نظر شدت و تاریخچه زمانی با یکدیگر دارند.

در شکل (۵) تاریخچه زمانی لنگر داخلی برای چهار المان سازه‌ای سقف تونل در مدل عددی با نتایج آزمایش سانتریفیوژ مقایسه شده است. از مقایسه نتایج برداشت شده از نرم‌افزار با نتایج ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌های تعبیه شده بر دیواره تونل مشاهده می‌شود که نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی هم‌خوانی مناسبی از نظر شدت و تاریخچه زمانی با یکدیگر دارند. در المان‌های سقف تونل، در برخی المان‌ها نتایج نرم‌افزار دارای مقادیر بیشتری نسبت به آزمایشگاه می‌باشد.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} \quad (1)$$

که در آن γ_{ref} کرنش برشی مرجع است و به میزان کرنش برشی در $G/G_{max} = 0.5$ اطلاق می‌شود. منحنی G/G_{max} خاک ماسه‌ای کالیبره شده با مدل هاردین-درینویج در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): منحنی G/G_{max} خاک کالیبره شده با مدل هاردین-درینویج.

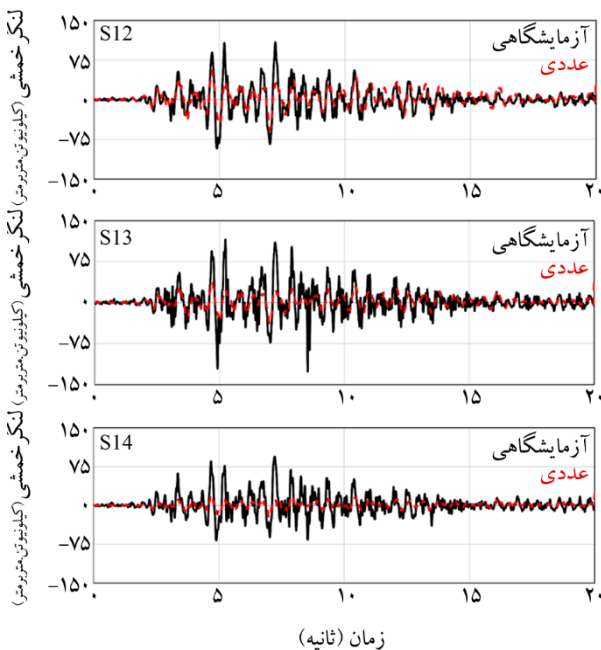
در آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده جهت ثبت لنگر خمشی مقطع سازه‌ای تونل از کرنش‌سنج‌هایی بر روی بدنه تونل زیرزمینی مطابق شکل (۳) استفاده شده است. در این شکل در نقاط مورد نظر دو کرنش‌سنج یکی در بدنه خارجی تونل و دیگری در قسمت داخلی آن تعبیه شده است تا در ضخامت تونل، کرنش در دو طرف آن اندازه‌گیری شود. هشت کرنش‌سنجی که در سقف تونل به کار برده شده است با حرف U نام‌گذاری شده‌اند (کرنش‌سنج‌های U-1 تا U-8). برای دیواره‌های تونل نیز در هر سمت از هفت کرنش‌سنج در داخل بدنه تونل و قسمت خارجی تونل استفاده شده است. برای دیواره به‌اختصار از کلمه S, Side استفاده می‌شود که برای دیواره سمت راست، S1 و برای دیواره سمت چپ، S2 در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است نتایج این آزمایش‌ها توسط یک مطالعه عددی انجام گرفته توسط یکی از نویسندگان مقاله حاضر [۹-۱۰]، برای داده‌های شتاب‌های ثبت شده در اطراف تونل صحت‌سنجی شده بودند ولی در مطالعه حاضر صحت‌سنجی

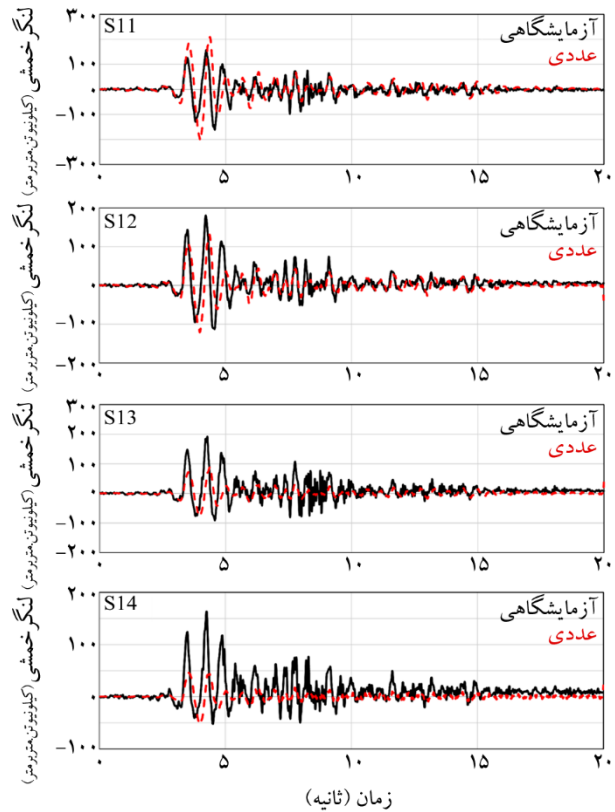
۲-۲- نتایج صحت‌سنجی: زلزله نورث‌ریج با بیشینه شتاب $g/0.186$

مقایسه نتایج نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی در زلزله نورث‌ریج با بیشینه شتاب $g/0.186$ در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. در لنگرهای دیواره تونل برای S11 و S12 مقایسه نتایج قابل قبول است اما در S13 و S14 با حفظ روند تغییرات یکسان با نتایج آزمایشگاهی، هم‌پوشانی قابل قبولی را نشان می‌دهد (شکل ۶). در سقف تونل نیز برای U1 و U2 نرم‌افزار توانسته (شکل ۷). در U3 و U4 با اینکه روند تغییرات مورد قبول است اما دقت مورد نظر را نشان نمی‌دهد.

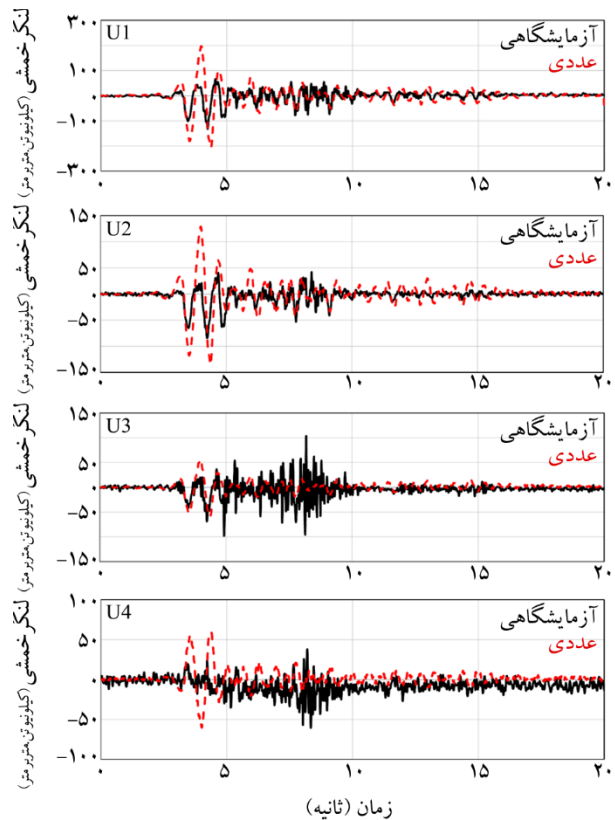
نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب و لنگر در بخش پیشین برای دو زلزله کوبه و نورث‌ریج مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته می‌توان مشاهده کرد نرم‌افزار توانسته به خوبی نتایج به دست آمده از آزمایش ساتریفیوژی را پیش‌بینی کند و نتایج قابل اطمینانی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه دهد. لذا در مرحله بعدی، ابتدا به معرفی نحوه مدل‌سازی عددی مصالح ژئوفوم پرداخته شده و سپس، به تأثیر استفاده از ژئوفوم به عنوان مصالح پوشش در تونل کند و پوش بر نیروهای داخلی تونل پرداخته می‌شود.



شکل (۶): مقایسه تاریخچه زمانی لنگر دیواره تونل در آزمایش T2 با نتایج حاصله از مدل‌سازی عددی برای زلزله نورث‌ریج $g/0.186$. PGA =



شکل (۴): مقایسه تاریخچه زمانی لنگر دیواره تونل در آزمایش T2 با نتایج حاصله از مدل‌سازی عددی برای زلزله کوبه $g/0.206$. PGA =



شکل (۵): مقایسه تاریخچه زمانی لنگر سقف تونل در آزمایش T2 با نتایج حاصله از مدل‌سازی عددی برای زلزله کوبه $g/0.206$. PGA =

دارد. آنها از تابع سیگموییدی برای بیان رفتار غیرخطی ژئوفوم در نرم افزار FLAC استفاده کردند.

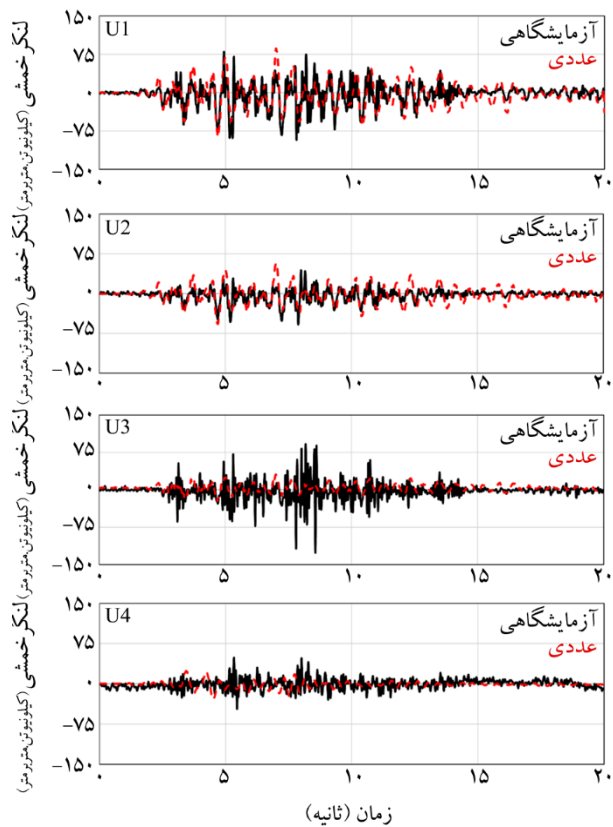
در مدل عددی مطالعه حاضر از مدل رفتاری معادل خطی (ELM) برای مدل سازی رفتار ژئوفوم در نرم افزار استفاده شده است. میرایی هیستریزس در واقع میرایی طبیعی مصالح ژئوتکنیکی بوده و به نوعی جزئی از خصوصیات ذاتی آن محسوب می شود. از آنجا که در تحلیل های عددی از مدل های برگرفته از رفتار واقعی خاک با اعمال فرضیات ساده کننده استفاده می شود، تنها برخی مدل های رفتاری غیرخطی این امکان را دارند که در زمان تحلیل دینامیکی این نوع از میرایی را به طور دقیق در مدل اعمال نمایند. در حالت ایده آل در صورتی که یک مدل رفتاری، طوری عمل کند که بتوان با تقریب خوبی آن را نماینده ی واقعی رفتار هیستریزس خاک دانست، دیگر نیازی به اعمال میرایی اضافی نخواهد بود.

زرنانی و باترست [۱۲] از تابع سیگموییدی سه پارامتری برای شبیه سازی منحنی کاهش مدول برشی ژئوفوم استفاده کردند. تابع مورد نظر به صورت رابطه (۲) است:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{a}{1 + \exp[-(L - x_0)/b]} \quad (2)$$

که در آن $L = \log_{10} \gamma$ و a ، b و x_0 ثابت هایی هستند که برای کالیبره شدن داده ها بر روی نتایج آزمایش ها استفاده می شود.

شکل (۸) نمودارهای G/G_{\max} و میرایی نسبت به کرنش برای مطالعات انجام گرفته توسط آتاناسوپولوس و همکاران [۱۳-۱۴] و اسا و رومو [۱۵] را نشان می دهد. داده های به دست آمده از سعی و خطای سه پارامتر تابع سیگموییدی مورد نظر با منحنی کاهنده سختی برای ژئوفوم با دانسیته بین ۱۲ تا ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب که توسط آتاناسوپولوس و همکاران [۱۳-۱۴] گزارش شده است مقایسه شده و بهترین کالیبره برای نمودارها به عنوان پارامترهای تابع سیگموییدی در نرم افزار FLAC معرفی شده است. اسا و رومو [۱۵] نیز نموداری برای ژئوفوم با دانسیته ۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب ارائه داده اند. با توجه به رابطه (۲)، با سعی و خطا بهترین کالیبره برای نمودارهای معرفی شده با ثابت های $a=1$ ، $b=-0.5$ و $x_0=0.3$ به دست آمده است.



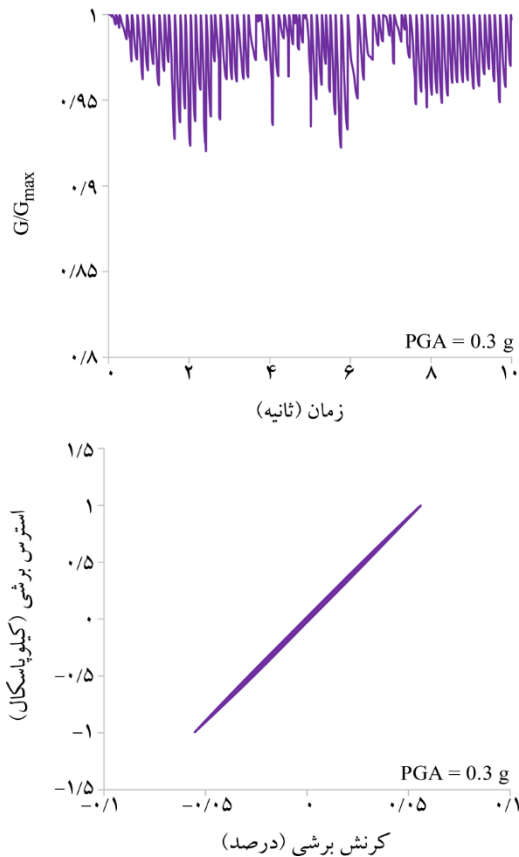
شکل (۷): مقایسه تاریخچه زمانی لنگر سقف تونل در آزمایش T2 با نتایج حاصله از مدل سازی عددی برای زلزله نورتریج $g = 0.186$ PGA.

۳- مدل سازی عددی ژئوفوم

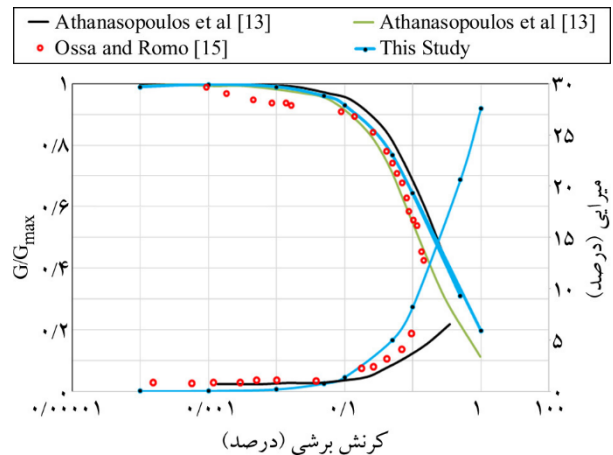
پلی استایرن منبسط شده در صنعت با نام ژئوفوم یا EPS شناخته می شود. از این نوع مصالح به دلیل وزن مخصوص بسیار کم در خاک ریزی ها استفاده می شود. نام گذاری ژئوفوم ها بر اساس دانسیته آنها انجام می شود. ژئوفوم به عنوان یک ماده الاستوپلاستیک در مدل های عددی مدل سازی می شود در حالی که می توان یک مدل قوی تری از این مصالح را در کدهای نرم افزاری معرفی کرد. مدل ساده الاستوپلاستیک برای ژئوفوم به اندازه کافی می تواند رضایت بخش باشد زیرا کرنش های اندازه گیری شده بیشتر مدل های فیزیکی در آزمایش فشاری تک محوری، نشان می دهد که کرنش این مصالح زیر ۱ درصد خواهد بود [۱۱].

زرنانی و باترست [۱۲] از مدل معادل خطی (ELM)^۹ برای مدل سازی مصالح ژئوفوم استفاده کردند و مشاهده نمودند که نتایج مدل رفتاری ELM همخوانی قابل قبولی با نتایج آزمایش ها

مدل‌های عددی، در این بخش به بررسی تأثیر مصالح ژئوفوم در کاهش نیروهای داخلی تونل‌های کند و پوشش به عنوان خاکریز در حالت لرزه‌ای پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود دو مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل اول که با خاکریز خاکی و مدل دوم که از ژئوفوم به عنوان خاکریز سطح بالای تونل استفاده شده است.



شکل (۸): نمودار G/G_{max} و میرایی ژئوفوم کالیبره شده تابع سیگموییدی با استفاده از نتایج آزمایش‌های آتاناسوپولوس و همکاران [۱۳-۱۴] و اسا و رومو [۱۵].



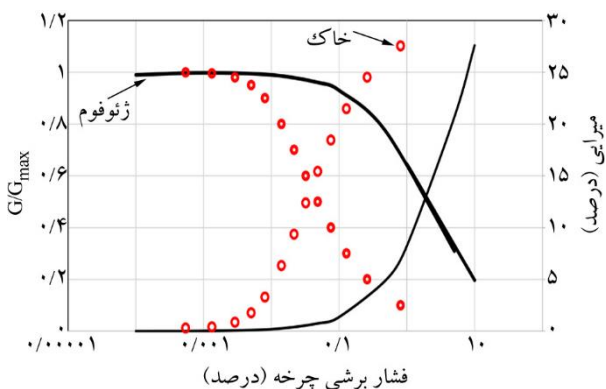
شکل (۹): چرخه هیستریزس تنش-کرنش و نمودار کاهش مدول برشی ژئوفوم برای المان وسط مدل T2 در $PGA = 0.3 \text{ g}$.

با در نظر گرفتن مدل ELM برای مصالح ژئوفوم، چرخه هیستریزس تنش-کرنش غیرخطی در المان وسط مدل T2 که از مصالح ژئوفومی به عنوان خاکریز استفاده شده، برای زلزله کوبه در سطح شتاب 0.3 g در شکل (۹) مشاهده می‌شود. مساحت چرخه نشان‌دهنده میرایی هیستریزس است. با فرض رفتار معادل خطی برای ژئوفوم، چرخه هیستریزس در سطح شتاب 0.3 g برای مصالح ژئوفوم خطی شده که بیانگر رفتار خطی تنش-کرنش است.

شکل (۱۰) نمودارهای مقایسه‌ای G/G_{max} و میرایی در برابر کرنش برشی برای مصالح خاک و ژئوفوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود منحنی‌های مدول و میرایی ژئوفوم در سمت راست منحنی مدول و میرایی خاک واقع شده است. مشاهده می‌شود که تا کرنش حدود 0.1 درصد رفتار ژئوفوم همچنان خطی است ولی در این محدوده کرنشی، خاک رفتار غیرخطی داشته و مدول برشی آن به 0.3 مدول در کرنش صفر کاهش یافته است. با افزایش میزان کرنش، G/G_{max} در خاک نسبت به ژئوفوم بیشتر افت کرده و مقادیر بیشتری از کاهش سختی و افزایش میرایی را در خاک نسبت به ژئوفوم نشان می‌دهد.

۴- مطالعات پارامتری

پس از صحت‌سنجی مدل عددی بر اساس نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ و آشنایی با مدل رفتاری ژئوفوم در



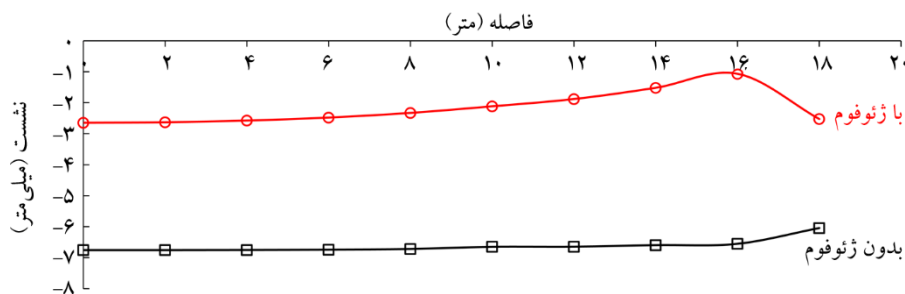
شکل (۱۰): نمودارهای مقایسه‌ای G/G_{max} و میرایی نسبت به کرنش برای خاک و ژئوفوم.

حالت لرزه‌ای و کل (استاتیکی + دینامیکی) ارائه شده است. پیش از شروع مطالعات پارامتری ابتدا به بررسی نشست سطح زمین برای چهار چیدمان پرداخته شده است. شکل (۱۲) نشست‌های استاتیکی سطح زمین برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در صورت استفاده از خاک ریز ژئوفومی به جای خاک، نشست‌ها در سطح زمین کمتر از ۱ سانتی‌متر بوده است که به دلیل وزن مخصوص پایین ژئوفوم و ایجاد تنش‌های کم در عمق می‌باشد.

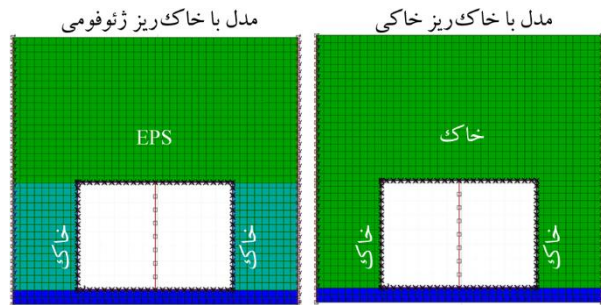
۵-۱- بررسی نیروهای داخلی دیواره تونل در حالت لرزه‌ای و کل برای زلزله کوبه با بیشینه شتاب $g/0.30$

شکل (۱۳) عملکرد لنگرهای خمشی لرزه‌ای و کل دیواره تونل برای زلزله کوبه در بیشینه شتاب $g/0.30$ را نشان می‌دهد. با افزایش میزان شتاب، لنگرهای مدل خاکی نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مدل ژئوفومی همانند شدت پایین زلزله، این میزان کاهش لنگر به‌صورت قابل توجهی در نمودارها مشاهده می‌شود و عملکرد خوب ژئوفوم در کاهش لنگرهای لرزه‌ای در شتاب بالا نیز مشاهده می‌شود.

در شکل (۱۴) نمودار نیروهای برشی لرزه‌ای و کل برای دیواره تونل در زلزله کوبه با شدت $g/0.30$ رسم شده است. در مقایسه نمودارها دیده می‌شود که مدل ژئوفومی توانسته به‌خوبی نیروهای برشی لرزه‌ای را نسبت به مدل خاکی کاهش بدهد به‌طوری‌که این مدل، نیروهای لرزه‌ای را تا نصف کاهش می‌دهد. این مدل نیز در کاهش نیروهای برشی کل نیز به‌خوبی عمل کرده به‌طوری‌که توانسته این نیروهای برشی کل را تا یک‌سوم کاهش دهد.



شکل (۱۲): نشست سطح زمین در حالت استاتیکی برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در X/a های متغیر.



شکل (۱۱): مدل‌های به کار رفته در مطالعه پارامتری.

از EPS19 به عنوان خاک ریز ژئوفومی در تحلیل‌ها استفاده شده است. مشخصات ژئوفوم به کار رفته در تحلیل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. از تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت دو زلزله کوبه و نورث‌ریج با بیشینه شتاب برابر $g/0.30$ در تحلیل‌ها استفاده شده است.

جدول (۱): مشخصات ژئوفوم EPS19 به کار رفته در مدل‌سازی عددی.

| GEOFOAM | EPS19 |
|-----------------------------|--------|
| ρ (kg/m ³) | ۱۸/۴ |
| E (kPa) | ۴۰۰۰ |
| ν | ۰/۱ |
| G (kPa) | ۱۸۱۸/۲ |
| V_s (m/s) | ۳۱۴ |

۵- نتایج تحلیل‌های عددی

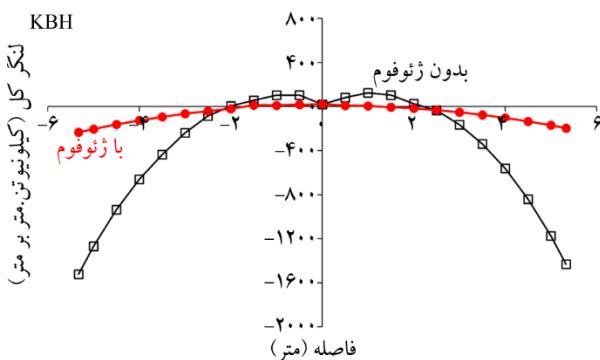
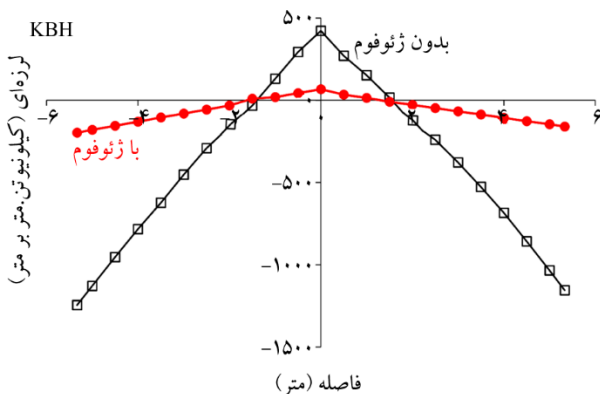
پس از اجرای نرم‌افزار نتایج به‌صورت دیاگرام لنگر و برش سقف و دیواره تونل در حالت پوش تعیین شده است. داده‌های برداشت شده، مقادیر کل هستند که با کسر این مقادیر از مقادیر استاتیکی که در مرحله اجرای نرم‌افزار در حالت استاتیکی حاصل شده‌اند، مقادیر دینامیکی یا لرزه‌ای به دست می‌آید. نمودارها برای

۵-۲- بررسی نیروهای داخلی سقف تونل در حالت استاتیکی،

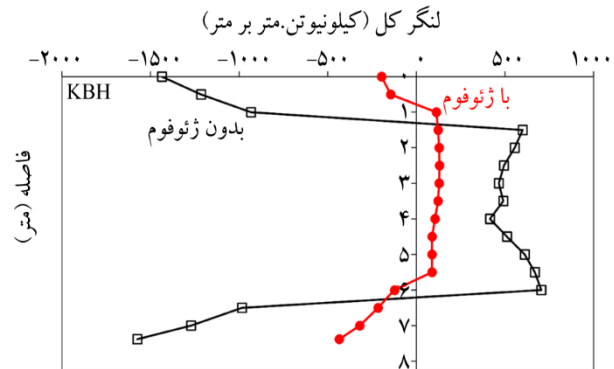
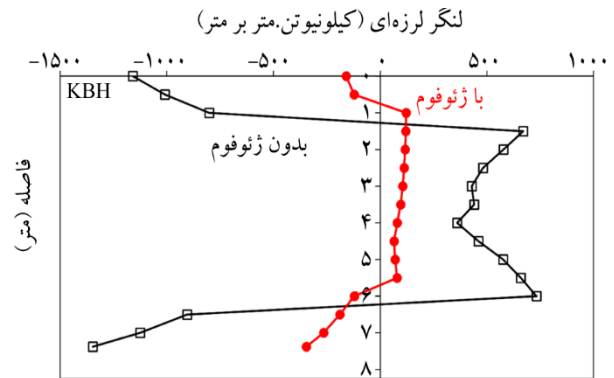
لرزه‌ای و کل برای زلزله کوبه با بیشینه شتاب $0.30g$

لنگرهای لرزه‌ای و کل برای سقف تونل در زلزله کوبه با بیشینه شتاب $0.30g$ مطابق شکل (۱۵) نیز همانند لنگرهای دیواره در شتاب بالاتر مقادیر بیشتری را نسبت به شتاب پایین به خود اختصاص می‌دهند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود در مدل خاکی لنگرهای گوشه تونل مقادیر بیشتری نسبت به مرکز را نشان می‌دهد اما در مدل ژئوفومی با وجود ژئوفوم در ترکیب خاک‌ریز، این لنگرها در سقف تونل، به‌طور یکنواخت توزیع شده و گوشه‌های تونل لنگرهای بیشتری را نسبت به بقیه نقاط تجربه نمی‌کنند. یکنواختی توزیع لنگرهای لرزه‌ای و کل در سقف تونل نشان‌دهنده عملکرد خوب ژئوفوم است.

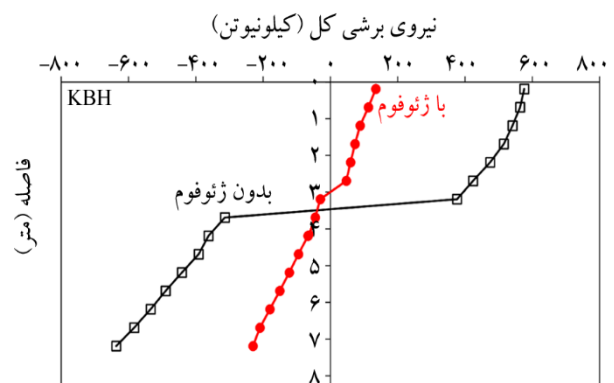
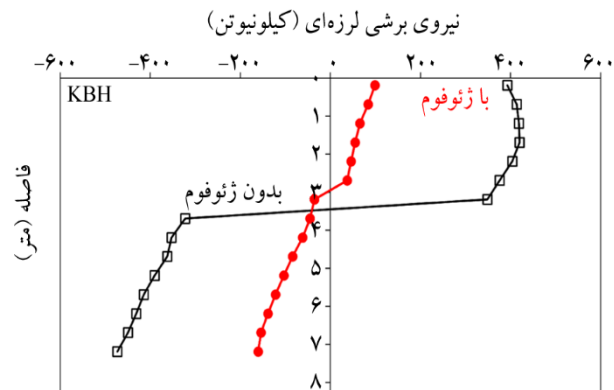
نیروهای برشی لرزه‌ای و کل برای دیواره در زلزله کوبه با شتاب بالا در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مدل ژئوفومی به‌خوبی توانسته نیروهای برشی و لرزه‌ای را نسبت به مدل خاکی کاهش دهد. نیروهای برشی لرزه‌ای در مرکز تونل مقادیر بسیار کمتری را نسبت به مدل خاکی نشان می‌دهند.



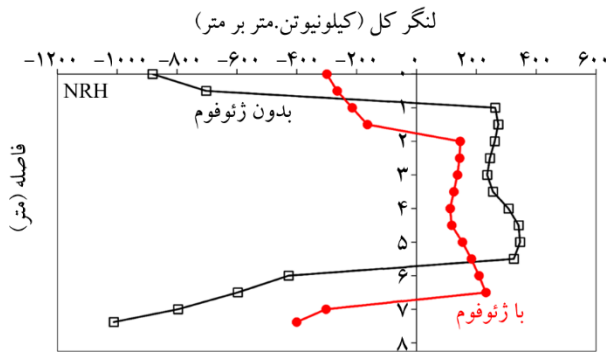
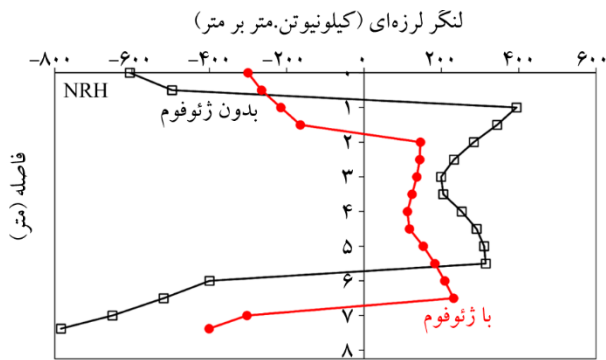
شکل (۱۵): مقایسه لنگرهای لرزه‌ای (بالا) و کل (پایین) در سقف تونل برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله کوبه.



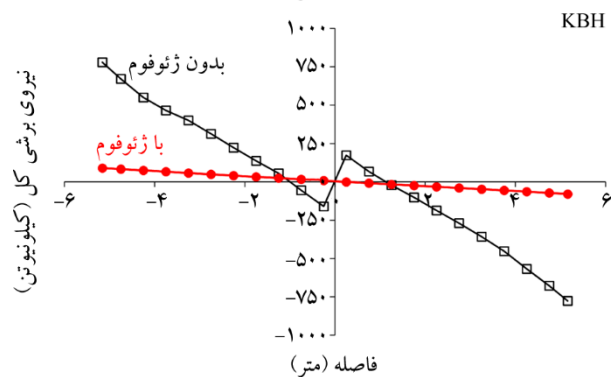
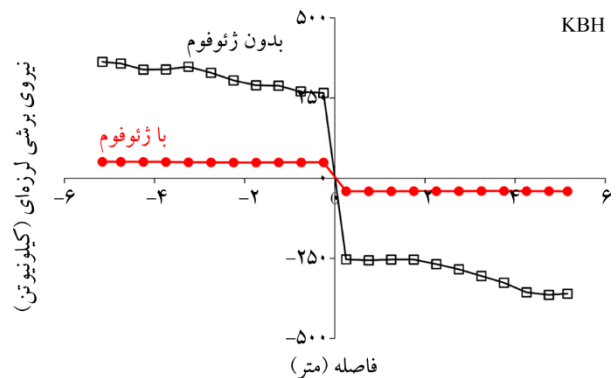
شکل (۱۳): مقایسه لنگرهای لرزه‌ای (بالا) و کل (پایین) در طول دیواره تونل برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله کوبه.



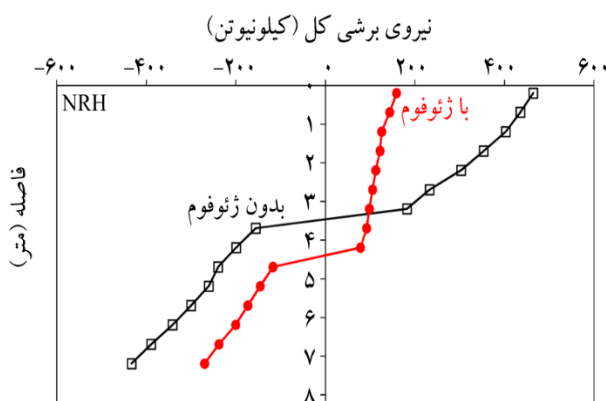
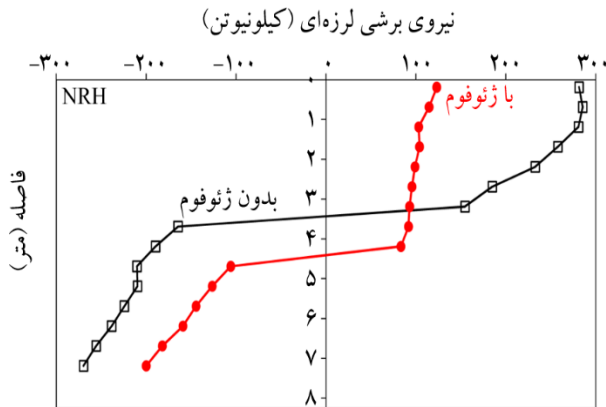
شکل (۱۴): مقایسه نیروهای برشی لرزه‌ای و کل در طول دیواره برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله کوبه.



شکل (۱۷): مقایسه لنگرهای لرزه‌ای و کل در طول دیواره برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله نورث‌ریج.



شکل (۱۶): مقایسه نیروهای برشی لرزه‌ای و کل در سقف برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله کوبه.

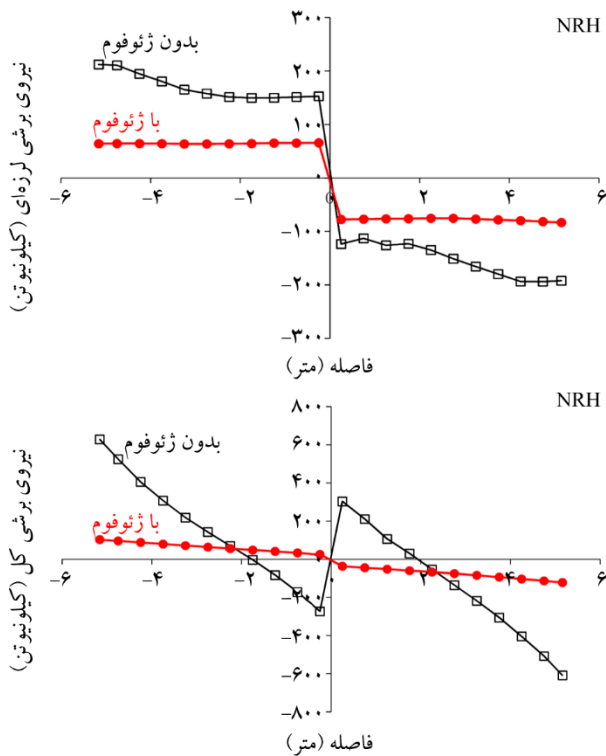


شکل (۱۸): مقایسه نیروهای برشی لرزه‌ای و کل در طول دیواره برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله نورث‌ریج.

۵-۳- بررسی نیروهای داخلی دیواره تونل در حالت لرزه‌ای و کل برای زلزله نورث‌ریج

لنگرهای لرزه‌ای و کل در طول دیواره برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله نورث‌ریج با شتاب $0.30g$ در شکل (۱۷) نشان داده شده است. لنگرهای لرزه‌ای و کل با افزایش میزان شتاب تحریک ورودی افزایش می‌یابد. لنگرهای لرزه‌ای و کل برای مدل ژئوفومی مقادیر کمتری را نسبت به مدل خاکی نشان می‌دهد به طوری که در بالای دیوار خاک ریز ژئوفومی لنگر لرزه‌ای را تا نصف کاهش می‌دهد.

نیروهای برشی لرزه‌ای و کل در طول دیواره برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله نورث‌ریج با شتاب بالا در شکل (۱۸) نشان داده شده است. نیروهای برشی برای مدل ژئوفومی نیز در حالت لرزه‌ای و کل مقادیر کمتری را نسبت به مدل خاکی نشان می‌دهد. در بالای دیواره نیز نیروهای برشی در خاک ریز ژئوفومی نصف مقادیر نیروهای برشی در خاک ریز خاکی است.



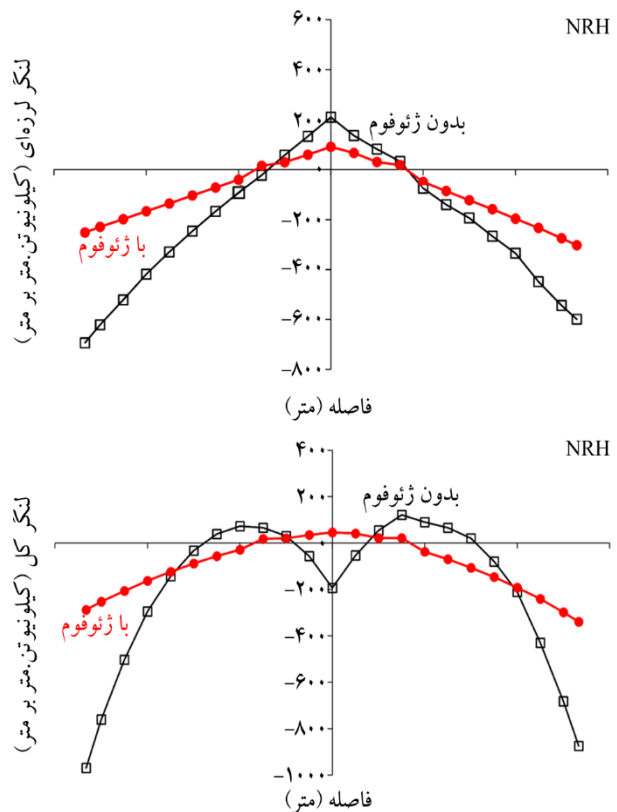
شکل (۲۰): مقایسه نیروهای برشی لرزه‌ای و کل در سقف برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله.

۶- نتیجه گیری

مقایسه مقادیر بیشینه لنگرهای کل دیواره و سقف تونل برای دو مدل خاکی و ژئوفومی برای دو زلزله کوبه و نورتریج در سطح شتاب $0.3g$ انجام گرفت. طبق نتایج مطالعات عددی تحقیق حاضر مشاهده شد که مدل ژئوفومی عملکرد بسیار مناسبی در کاهش لنگرها و نیروهای برشی در حالت استاتیکی و لرزه‌ای دارد. پس از بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که ژئوفوم به عنوان خاکریز در سطح بالای تونل توانسته به خوبی نیروهای داخلی در حالت استاتیکی، لرزه‌ای و کل سازه تونل را تا چندین برابر نسبت به حالت خاکریز خاکی کاهش دهد. این تأثیر برای دیواره و سقف تونل دیده شد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر چنین نتیجه شد که خاکریز ژئوفومی جایگزین مناسبی برای خاکریزهای خاکی از منظر بهسازی لرزه‌ای در تونل‌های کند و پوش می‌باشد. لازم به ذکر است نتایج حاصله در مورد تأثیرات ژئوفوم بر نیروهای داخلی تونل کند و پوش، محدود به شرایط خاص این مطالعه (جنس خاک، هندسه تونل، عمق

۴-۵- بررسی نیروهای داخلی سقف تونل در حالت لرزه‌ای و کل برای زلزله نورتریج

لنگرهای سقف تونل در حالت لرزه‌ای و کل برای زلزله نورتریج با بیشینه شتاب بالا در شکل (۱۹) نشان داده شده است. نیروهای کل در گوشه‌های تونل برای خاکریز ژئوفومی نزدیک به مرز 300 کیلو نیوتن متر بر متر است در حالی که در همین نقطه برای مدل خاکی نزدیک به مرز 1000 کیلو نیوتن متر بر متر را نشان می‌دهد و کاهش بسیار خوبی از لنگرهای کل را با خاکریز ژئوفومی نشان می‌دهد. لنگرهای لرزه‌ای نیز برای مدل ژئوفومی مقادیر کمتری نسبت به مدل خاکی نشان می‌دهد.



شکل (۱۹): مقایسه لنگرهای لرزه‌ای و کل در سقف برای مدل ژئوفومی و مدل خاکی در زلزله نورتریج.

نیروهای برشی لرزه‌ای و کل در سقف تونل برای زلزله نورتریج با شتاب $0.3g$ در شکل (۲۰) نشان داده شده است. نیروهای برشی لرزه‌ای و کل همانند لنگرهای خمشی در مدل ژئوفومی مقادیر کمتری نسبت به مدل خاکی را نشان می‌دهد.

10. Baziar, M.H., Rabeti Moghadam, M., Dong-Soo, K., and Choo, Y.W. (2015) Effect of Underground Structure on PGA at Ground Surface Considering Linear and Nonlinear Behavior for the Soil. *JCME*, **34**(1), 119-137 (in Persian).
11. BASF (1997) *Styropor Technical Information CD-ROM*. Ludwigshafen, Germany.
12. Zarnani, S. and Bathurst, R.J. (2009) Numerical modeling of EPS seismic buffer shaking table tests. *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(5), 371-383.
13. Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C., and Xenaki, V.C. (1999) Dynamic properties of EPS geofam an experimental investigation. *Geosynthetics International*, **6**(3), 171-94.
14. Athanasopoulos, G.A., Nikolopoulou, C.P., Xenaki, V.C., and Stathopoulou, V.D. (2007) Reducing the seismic earth pressure on retaining walls by EPS geofam buffers—numerical parametric study. In: CD, *Proceedings of 2007 Geosynthetics Conference*, Washington, D.C., USA, 15.
15. Ossa, A. and Romo, M.P. (2011) Dynamic characterization of EPS geofam. *Geotext Geomembrane*, **29**(1), 40-50.

واژه‌نامه

| | |
|--------------------------------|--------------------|
| Ovaling | ۱- بیضی شدن |
| Racking | ۲- تغییر شکل جانبی |
| ABAQUS | ۳- آباکوس |
| Rigid Base | ۴- کف صلب |
| Compliant Base | ۵- کف نرم |
| Quiet Boundary | ۶- مرز آرام |
| Liner | ۷- لاینر |
| Hardin-Drnevich | ۸- هاردین-درنویچ |
| Equivalent Linear Method (ELM) | ۹- مدل معادل خطی |

سنگ بستر، عمق استقرار تونل از سطح زمین و نوع زلزله‌های به کار رفته در تحلیل‌های عددی) می‌شود.

مراجع

1. Owen, G.N. and Scholl, R.E. (1981) *Earthquake Engineering of Large Underground Structures*. Report no. FHWA/RD-80/195, Federal Highway Administration and National Science Foundation, 279.
2. Salemi, A., Salemi, A., and Salehi, A.F. (2009) Analysis and design of lining of a cut and cover tunnel with rectangular section. (Case study: Line 1 Tabriz subway). *8th Tunnel Conference*, Tarbiat Modares University (in Persian).
3. Maugeri, M. and Soccodato, C. (2014) *Earthquake Geotechnical Engineering Design. Chapter: 11*. Publisher: Springer International Publishing, Editors: 279-340.
4. Park, D., Lee, T.H., and Kim, J.M. (2015) Damage states of cut-and-cover tunnels under seismic excitation. *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*.
5. Lee, T.H., Park, D., Nguyen, D.D., and Park, J.S. (2015) *Damage Analysis of Cut-and-Cover Tunnel Structures Under Seismic Loading*. Springer Science+Business Media Dordrecht.
6. Zarnani, S. and Bathurst, R.J. (2010) Numerical parametric study of geofam seismic buffers with different. Constitutive models. *9th International Conference on Geosynthetics*, Brazil.
7. Wang, D. (2011) Seismic Isolation Effect of a Tunnel Covered with Expanded Polystyrene Geofam. *Advanced Materials Research Vols. 1943-1946*.
8. Kiryu, S., Yoshitaka, M., and Hitoshi, M. (2012) Seismic response of a cut-and-cover tunnel isolated by polymer material. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2043-2057.
9. Baziar, M.H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D.S., and Choo, Y.W. (2014) Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **44**, 10-22.

Numerical Investigation of Geofom Effect on the Internal Forces of Cut and Cover Tunnels during Earthquakes

Sadri Shadabi¹, Masoud Rabeti Moghadam^{2*}, Mansour Parvizi³, and Mahdi Zamani Lenjani⁴

1. M.Sc. Student of Geotechnics, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran, *Corresponding Author, email: rabeti@yu.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

According to increasing demand of box-shaped tunnels in transportation networks, which are mainly built as cut and cover tunnels, the impact of natural hazards such as earthquakes on these geotechnical structures and seismic load reduction methods of these types of structures is more important than before. Nowadays, the use of lightweight materials such as geofom plays fundamental role in civil engineering and has solved many of the challenges of civil engineering.

In the present study, the role of geofom materials as embankments for cut and cover tunnels on the internal forces of the tunnel structure during the earthquake have been investigated. The numerical modeling was performed by two-dimensional finite difference software, FLAC 2D v7.0. The results of an experimental study were used to verify the numerical model. Time histories of acceleration and bending moments for Kobe and Northridge earthquakes were examined. Based on the analysis, it was observed that the software was able to predict the results of the centrifugal experiment well and provided reliable results.

EPS19 has been used as a geofom embankment in the analyzes. The acceleration time history of the Kobe and Northridge earthquakes with a maximum acceleration of 0.3 g has been used in the analysis. In the numerical model of the present study, the equivalent linear model (ELM) has been used to model the behavior of the geofom. Mohr-Coulomb elastoplastic model was used in soil behavior modeling for static analysis. The behavior of the soil in dynamic analyses was considered as nonlinear and modeled with hysteretic damping. The results are determined in the form of bending moment and shear force diagrams for the roof and wall of the tunnel. The diagrams were provided for static and seismic loading conditions.

According to the results of numerical studies, it was observed that the geofom model has a very good performance in reducing the bending moments and shear forces in static and seismic conditions. Present study shows that geofom, as the cover material of the cut and cover tunnel, is able to reduce internal forces of the tunnel structure in static, seismic loading condition compared to the soil. Based on the results, it was concluded that geofom is a suitable material for retrofitting the cut and cover tunnels during earthquakes.

Keywords: Cut and Cover Tunnel, Backfill Material, Geofom, Seismic Response.