

چکیده

تخمین پارامترهای خاک پیرامونی و سازه‌ای در پوشش‌های تونلی همواره نیازمند شبیه‌سازی نرم‌افزاری و مطالعات حجیم و زمان‌بر می‌باشد. ارائه روشی که قادر باشد تا این پارامترها را با دقت مناسب و حجم محاسباتی اندک و در سریع‌ترین زمان ممکن ارائه نماید همواره یک چالش مهندسی بوده است؛ بنابراین، هدف از مطالعه حاضر ارائه یک روش مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی برخی از مشخصات مهم نظیر رویداد روانگرایی، تنش خمشی حداکثر پوشش تونلی، نشست سطح زیر محور تونل و فشار آب منفذی تحت زلزله‌های نزدیک و دور از گسل می‌باشد. بدین منظور ابتدا از نرم‌افزار FLAC-3D برای شبیه‌سازی مدل پوشش تونلی در معرض تحریک‌های زمین استفاده می‌شود. ضمناً، اندرکنش خاک-سازه بین پوشش تونلی و لنز ماسه‌ای نیز مد نظر قرار گرفته می‌شود. مدل‌های موهر-کولومب و فین به ترتیب برای در نظر گرفتن نشست رس و ارزیابی روانگرایی لنز ماسه‌ای به کار برده می‌شوند. سپس، از ماشین یادگیری کرانه‌ای برای پیش‌بینی و برآورد کمیت‌های اشاره شده استفاده می‌شود. نتایج مطالعات حاکی از عملکرد و دقت مناسب روش پیشنهادی در تخمین پارامترهای اشاره شده است به گونه‌ای که در بدترین حالت خطای تخمین کمتر از ۶ درصد بوده است. در این مطالعه تأثیر یک لنز ماسه‌ای روانگرا در یک محیط غیرروانگرا با امواج لرزه‌ای متفاوت ارزیابی شده است که نتایج حاصل از آن نشان‌دهنده تأثیرپذیری بالای پارامترهای لنگر خمشی در پوشش تونل، تنش مؤثر، فشار آب حفره‌ای و نشست در راستای محور تونل در حضور لنز ماسه‌ای می‌باشد. همچنین در حضور لنز ماسه‌ای نسبت لنگر خمشی به حالت بدون لنز ماسه‌ای در برخی موارد بالای ۵۰ درصد است که مقدار بسیار چشمگیری می‌باشد و حداکثر نشست در مکان‌های نزدیک به محور تونل رخ داده است.

واژگان کلیدی: فلک سه‌بعدی، یادگیری ماشین، روانگرایی، سازه تونلی، زلزله دور و نزدیک از گسل، اندرکنش خاک و سازه، لنز ماسه‌ای.

تخمین رفتار لرزه‌ای تونل مدفون در لنز ماسه‌ای به کمک یادگیری ماشین

پیام شفيعی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین،
دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

محمد آزادی (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی،
قزوین، ایران، Azadi.mhmm@gmail.com

مهران سید رزاقی

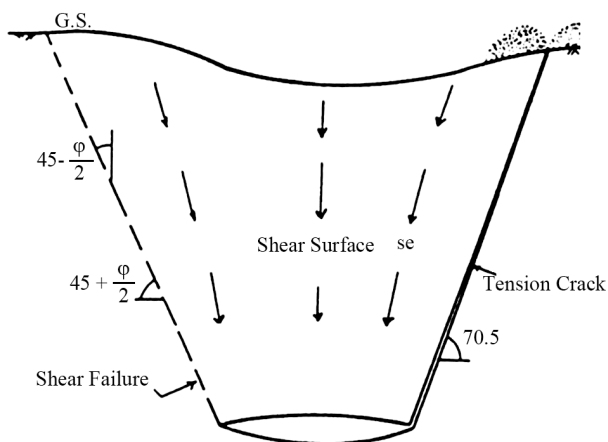
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی،
قزوین، ایران

۱- مقدمه

می‌تواند خاک‌هایی را که حتی مستعد روانگرایی نیستند را تحت تأثیر قرار داده و باعث روانگرایی در آنها شوند. یافته‌های مختلف تحقیقاتی نشان می‌دهد که علی‌رغم احاطه شدن با خاک‌های با کیفیت بالا، پدیده روانگرایی ناشی از شل بودن لنزهای ماسه‌ای است که باعث می‌شود ماسه در برابر روان شدن بی‌دفاع باشد. اگرچه این لنزهای ماسه‌ای می‌توانند کیفیت خود

مطالعات مختلفی روی تونل‌ها و روانگرایی آنها انجام شده است (Jafarnia & Varzaghani, 2016; Fattah et al., 2015; Cetin et al., 2021; Miranda et al., 2020). لنزهای ماسه‌ای نیز یکی از مواردی است که محققان در مورد نحوه عملکرد آنها در شرایط مختلف مانند زلزله مطالعه کرده‌اند. گاهی در مجاورت نقاط پرآب مانند رودخانه‌ها و دریاها، زمین‌لرزه‌ها

کردند و آنرا در معرض بارهای پویا قرار دادند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که ترک‌های فشاری در زاویه 70° درجه از لبه لنز ماسه ایجاد شده‌اند، اگرچه جوشش‌های ماسه‌ای در سطح قابل مشاهده نبودند. هرچند امکان مشاهده ترک‌هایی وجود داشت که در هنگام نمونه‌برداری از ماسه شل پر شده بودند، اما عمق آن ترک‌ها به دلیل اختلال در نمونه‌برداری قابل اندازه‌گیری نبود. این نتایج سازگاری بین مطالعات تجربی و تحلیلی را نشان دادند. اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه روانگرایی لنزهای ماسه‌ای در شرایط مختلف انجام شده است، اما تأثیر این شرایط بر روی سازه‌های زیرزمینی به‌طور گسترده‌ای متمرکز نشده است. نتایج تحقیقات دیگری که در مورد تأثیرات روانگرایی ماسه بر روی پوشش‌های تونلی انجام شده است، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه روانگرایی بر آنهاست (Azadi & Mirmohammad Hosseini, 2010).



شکل (۱): اثرات روانگرایی لنز ماسه‌ای بر مناطق محیط (Azadi & Bryson, 2018).

بر این اساس، روانگرایی لنز ماسه‌ای می‌تواند سبب تغییراتی در نیرو و تغییر شکل پوشش تونل شود. این مسائل در این مقاله مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. تغییر شکل‌ها و اعوجاج‌های نامتقارن در پوشش تونل منجر به افزایش نسبت گشتاور پویا به گشتاور ایستا و فاصله تا قطر می‌شود (Mir Mohammad Hosseini & Azadi, 2012).

علاوه بر این، تحقیقات جدیدی در زمینه مسائل پایداری و

را تحت بار استاتیکی حفظ کنند، اما هنگامی که تحت بار پویا قرار می‌گیرند فوراً ناتوان و نیمه‌روان می‌شوند. زمین‌لرزه‌هایی که در سانفرانسیسکو (۱۹۰۶)، آلاسکا (۱۹۶۴)، شیلی (۱۹۶۰)، گوام (۱۹۹۳) و سیاتل (۲۰۰۱) رخ داد، نمونه‌هایی از چنین نوع روانگرایی است که منجر به ویرانی‌های ناشی از آن در سراسر این سرزمین‌ها شد. به دلیل آنچه در این سرزمین‌ها اتفاق افتاد، بسیاری از محققان شروع به مطالعه مکانیسم لنزهای ماسه‌ای کردند. والجو (Vallejo, 1998) یکی از محققانی بود که از نظریه مکانیسم شکست برای بررسی اثر لنز ماسه‌ای در خاک رس استفاده کرد. او زاویه شکست لنز ماسه‌ای را با استفاده از رویکردی محاسبه کرد. یافته‌های وی نشان داد که ترک خوردگی $70/5^\circ$ درجه‌ای در اثر روانگرایی لنزهای ماسه‌ای در یک طرف و شکستگی‌های برشی در طرف دیگر ایجاد می‌شود. شکل (۱) که در آن نشست مخروطی روی لنز ماسه آشکار است، نشان‌دهنده ترک ناشی از روانگرایی لنزهای ماسه‌ای در خاک رس است. قرار دادن سازه در ناحیه‌ای که نشست مخروطی روی لنز ماسه قرار دارد منجر به یک تغییر شکل نامناسب می‌شود. همچنین، مطالعات مختلفی به غیر از آنچه او انجام داده وجود دارد. به‌عنوان مثال، شکری (Shokri, 1996) پدیده رفتار ارتجاعی در روانگرایی لنزهای ماسه‌ای را ارزیابی کرد. همچنین، بهشتی (Beheshti, 1998) از نرم‌افزاری مناسب برای تعیین پدیده مذکور به نام NISA^۱، که مخفف تجزیه و تحلیل سازه‌ای غیرخطی است، استفاده کرد. در کار وی، از یک مدل الاستیک و کاملاً پلاستیکی به‌عنوان تقریبی مناسب استفاده شد. با این حال، امکان استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تری نظیر مدل‌های سخت‌شونده و نرم‌شونده در خاک وجود دارد؛ بنابراین، به کار بردن آن بر روی مدل موهر-کولمب^۲ امکان‌پذیر است. از نرم‌افزار FLAC-2D به همراه مدل فین^۳ برای ارزیابی پارامترهای مختلف اثر لنز ماسه بر خاک رس استفاده شد (Pashangpish, 2004). در تحقیقاتی آزمایشگاهی، هولچین و والجو (Holchin & Vallejo, 1995) بر روی لنزهای ماسه‌ای، یک مدل فیزیکی از یک لنز ماسه‌ای در زمین خاک رس ایجاد

استفاده شد (Marcelino et al., 2021). یک چارچوب مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای تبدیل امواج سراسری به امواج نزدیک ساحل معرفی شد (Kim et al., 2021). یک روش یادگیری ماشین کارآمد برای پیش‌بینی مقاومت بتن ارائه شد (Nguyen et al., 2021). از نظریه مجموعه‌های فازی و روش‌های یادگیری ماشین برای ارزیابی ریسک و مدیریت سیستم حفاری استفاده شد (Lin et al., 2021). یک رویکرد مبتنی بر داده برای ارزیابی بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی چند خانوار ارائه شد (Seyrfar et al., 2021).

هدف اصلی این مطالعه معرفی یک روش جدید با استفاده از ماشین یادگیری کرانه‌ای^۵ برای پیش‌بینی برخی از مشخصات مهم نظیر رویداد روانگرایی، تنش خمشی حداکثر، نشست و فشار آب منفذی می‌باشد. از نرم‌افزار FLAC-3D برای شبیه‌سازی مدل پوشش تونل تحت ده شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌های نزدیک و دور از گسل شامل بیست هزار شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه استفاده می‌شود. اندرکنش خاک و سازه بین تونل و لنز ماسه‌ای نیز در نظر گرفته شده است. مدل‌های موهر-کولومب و فین به ترتیب برای نشان دادن نشست خاک رس و ارزیابی روانگرایی لنزهای ماسه‌ای استفاده می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی سپس با مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار FLAC-3D مقایسه می‌شود تا کارایی روش ارائه شده برای پیش‌بینی موارد اشاره شده در پوشش تونل در داخل لنز ماسه‌ای تحت شرایط مختلف تحریک لرزه‌ای را بیان کند.

۲- تجزیه و تحلیل روانگرایی

در این مطالعه، اثرات روانگرایی بر تغییرات نیروها و تغییر شکل پوشش تونل توضیح داده می‌شود؛ بنابراین، ارزیابی تحلیل پویا در نرم‌افزار FLAC مورد نیاز است. با توجه به ویژگی‌های روانگرایی، تجزیه و تحلیل پویای مد نظر باید در قالب تحلیل روانگرایی بررسی شود. نرم‌افزار FLAC قادر به حل معادلات جریان و دینامیک به صورت پیوسته می‌باشد. بنابراین، استفاده از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی روانگرایی قابل قبول است.

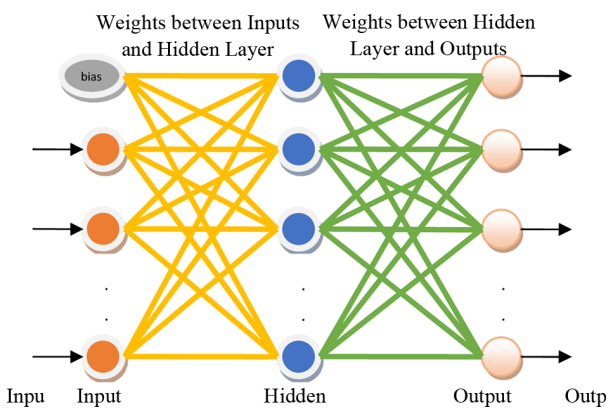
آسیب‌های سازه‌ای، به عنوان مثال خرابی، نشست و غیره، در شرایط مختلف انجام شده است. روانگرایی ماسه ضعیف در حالی اتفاق می‌افتد که دانه‌های جداگانه سعی می‌کنند هنگام تحمل تنش‌های برشی در هنگام زلزله به صورت کلوخه‌ای شوند (Taylor & Madabhushi, 2020). سایر مطالعات یک مدل چرخه‌ای برای اتصالات طولی پوشش تونلی پیشنهاد می‌کنند که می‌تواند رفتار چرخشی مقطع نامتقارن و پیچ‌دار را شبیه‌سازی کند. بر این اساس، چرخه‌های نسبی بیش از حد، ممکن است پلاستیک را بد شکل کرده و ظرفیت آب‌بندی را کاهش دهند (Andreotti et al., 2020).

عناصر خاک در مجاورت تونل مدفون ممکن است به گونه‌ای باشد که برهم‌کنش‌های فزاینده بستر دریا-سازه شرایط تنش پیچیده‌ای را ایجاد کند. این فرآیند می‌تواند منجر به غوطه‌وری تونل شود. علاوه بر این، دامنه‌های فشار بالا در ناحیه سازه جمع شده و متعاقباً باعث تغییر شکل پلاستیک چرخه‌ای اسکلت خاک و تجمع سریع فشار نامنظم منفذی می‌شود (Zhao et al., 2020). مدت زمان محتوای فرکانسی زلزله و امواج سطحی، نمونه‌هایی از تأثیرات ایجاد شده توسط ویژگی‌های ورودی لرزه‌ای هستند که تاکنون اطلاعات کافی در مورد آنها وجود ندارد. از این رو، نیاز اساسی به مدل‌های واقعی وجود دارد که برای تکرار واکنش طبیعی سیستم‌های خاک-تونل مناسب باشد، به ویژه هنگامی که خاک و سازه در هنگام بارگذاری وارد محدوده پلاستیک می‌شوند (Tsinidis et al., 2020).

همواره محاسبات مرتبط با مسائل اندرکنش خاک و سازه با پیچیدگی‌های عدیده‌ای همراه بوده است. در این زمینه محققان متعددی سعی در ارائه روش‌هایی داشتند که تا حد مطلوبی از این پیچیدگی‌ها ضمن حفظ دقت محاسبات انجام یافته بکاهد. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند روشی کارآمدی برای کاهش این نقص باشد. تحقیقات مختلفی در این زمینه وجود دارند که به برخی از آنها به اختصار اشاره می‌شود. از یک تکنیک یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد روسازی‌ها

۳- ماشین یادگیری کرانه‌ای

معماری این شبکه به صورت شکل (۲) می‌باشد. در مطالعه حاضر، تعداد لایه‌ها و نرون‌های الگوریتم یادگیری ماشین کرانه‌ای به ترتیب برابر با یک و ده اتخاذ می‌شوند. همچنین، ۸۰ درصد از مجموعه کل داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی و ۲۰ درصد باقی مانده به عنوان داده‌های آزمایشی در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۲): معماری ماشین یادگیری کرانه‌ای.

ماشین یادگیری کرانه‌ای، یک شبکه عصبی پیش‌خور تک‌لایه^۶ است که اولین بار توسط هوانگ معرفی شد (Huang et al., 2004). در این شبکه، ضرایب وزن لایه مخفی به طور تصادفی انتخاب می‌شود و فقط ضرایب وزن لایه خروجی بهینه می‌شود. برای بهینه‌سازی این ضرایب وزنی، می‌توان از روش معکوس تعمیم یافته مور-پنروز^۷ استفاده کرد. این روش به طور قابل توجهی زمان محاسباتی بهینه‌سازی را کاهش می‌دهد. برای M نمونه آموزشی مشخص، $\{x_i, y_i\}: i=1, \dots, M$ که $\{x_i \in R^m\}$ و $\{y_i \in R^m\}$ ، هدف پیدا کردن رابطه بین $\{x_i\}$ و $\{y_i\}$ است. تابع خروجی ماشین یادگیری کرانه‌ای با N نرون مخفی به شکل زیر نشان داده می‌شود.

$$y = \sum_{i=1}^N \beta_i f(x, w_i, b_i) \quad (1)$$

که در آن، N تعداد گره‌های مخفی، β_i بردار وزنی ارتباط‌دهنده بین i امین گره مخفی و گره‌های خروجی، f تابع فعال‌سازی، w_i بردار وزنی ارتباط‌دهنده بین i امین گره مخفی و گره‌های ورودی، و b_i بایاس i امین گره مخفی می‌باشند. با بازنویسی معادله (۱) به شکل ماتریسی، معادله (۲) حاصل می‌شود:

$$Y = H\beta \quad (2)$$

$$H = \begin{bmatrix} f(x_1; w_1, b_1) & \dots & f(x_1; w_N, b_N) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ f(x_M; w_1, b_1) & \dots & f(x_M; w_N, b_N) \end{bmatrix}$$

که در این رابطه

در معادله (۲)، بردار هدف Y و ماتریس خروجی لایه مخفی H با هم تشکیل یک سیستم خطی می‌دهند. بنابراین، فرآیند یادگیری ماشین یادگیری کرانه‌ای بهینه‌ترین ماتریس وزنی β بین لایه خروجی و لایه مخفی را محاسبه می‌کند. این فرآیند با استفاده از روش معکوس تعمیم یافته مور-پنروز H بر اساس رابطه (۳) انجام می‌گیرد.

$$\hat{\beta} = H^+ Y \quad (3)$$

۳-۱- شاخص‌های عملکرد الگوریتم

برای ارزیابی عملکرد ماشین یادگیری کرانه‌ای، شاخص‌های عملکردی آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون r ، ضریب تعیین R^2 و ریشه میانگین مربعات خطا RMSE به شرح زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$r = \frac{N(\sum_{i=1}^N O_i \cdot P_i) - (\sum_{i=1}^N O_i) \cdot (\sum_{i=1}^N P_i)}{\sqrt{(N\sum_{i=1}^N O_i^2 - (\sum_{i=1}^N O_i)^2) \cdot (N\sum_{i=1}^N P_i^2 - (\sum_{i=1}^N P_i)^2)}} \quad (4)$$

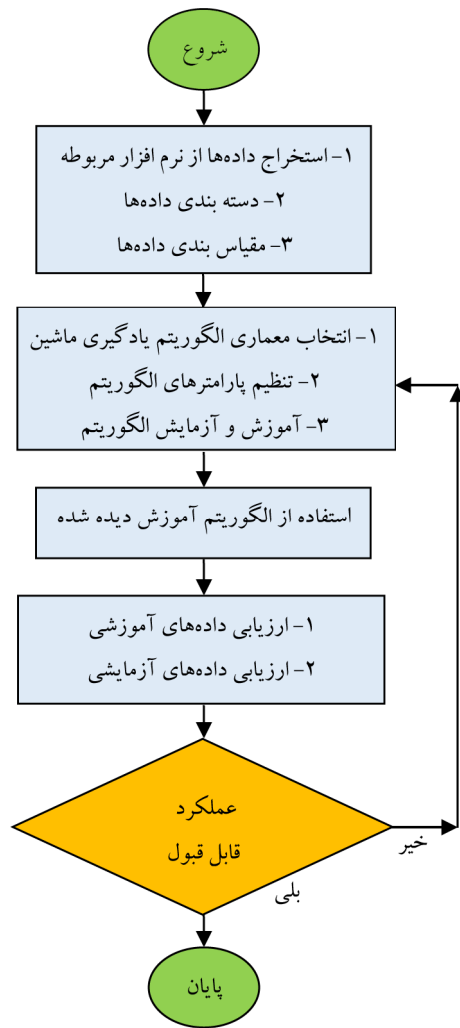
$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) \cdot \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (O_i - P_i)^2} \quad (6)$$

که در این روابط N تعداد نمونه‌های آموزشی و آزمایشی، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده در نمونه i ، \bar{O} و \bar{P} نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشند.

۴- روش ارائه شده

چهار مقدار مختلف عمق لنز ماسه‌ای شامل صفر، پنج، پانزده و بیست متر، مقایسه می‌شود تا کارایی روش ارائه شده برای پیش‌بینی موارد اشاره شده در پوشش تونل در داخل لنز ماسه‌ای تحت شرایط مختلف تحریک لرزه‌ای مورد آزمایش قرار گیرد. فلوجارت (۱) برای بیان روش پیشنهادی ارائه می‌گردد.



فلوجارت (۱): روش ارائه شده.

۵- شبیه‌سازی عددی

۵-۱- مدل مرجع

در این مطالعه، دو مدل مرجع وجود دارد. در یکی از این مدل‌ها، تونل فقط در داخل محیط رسی، مشخص شده در شکل (۳) قرار دارد. در مدل دوم مطابق شکل (۴) که موضوع اصلی این تحقیق است لنز ماسه‌ای ارائه شده در سه بعد مختلف بررسی شده است. طول لنز ماسه‌ای در حالت اول ۵ متر و در

همان‌گونه که قبلاً نیز بدان اشاره شد، هدف از این مطالعه ارائه یک روش جدید مبتنی بر ماشین یادگیری کرانه‌ای برای پیش‌بینی برخی از مشخصات مهم و مورد نیاز نظیر رویداد روانگرایی، تنش خمشی حداکثر، نشست، و فشار آب منفذی در پوشش تونل‌های لرزه‌ای مدفون در لنز ماسه‌ای است. بدین منظور، ابتدا نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار FLAC-3D که قبلاً شبیه‌سازی مدل پوشش تونل تحت شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های نزدیک و دور از گسل با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بین تونل و لنز ماسه‌ای در آن انجام یافته است، استخراج، پیش‌پردازش و نسبت به حداکثر مقادیر خود مقیاس (برای ایجاد داده‌هایی در محدوده ۱- تا ۱) می‌شوند و سپس نتایج پیش‌پردازش شده به دو دسته داده‌های ورودی و خروجی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های موهر-کولومب و فین به ترتیب برای نشان دادن نشست خاک رس و ارزیابی روانگرایی لنزهای ماسه‌ای استفاده می‌شوند. داده‌های ورودی برای آموزش الگوریتم دارای هشت المان و شانزده هزار نمونه شامل شتاب‌های زمین (برای هشت زلزله مختلف دور و نزدیک از گسل)، برخی از مشخصات لنز ماسه‌ای و رس مانند مدول برشی، وزن مدول بالک، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، وزن مخصوص خشک، نفوذپذیری، و عمق لنز ماسه‌ای (برای چهار مقدار مختلف صفر، ۵، ۱۵ و ۲۰ متر)، می‌باشند. داده‌های خروجی نیز متشکل از چهار المان و شانزده هزار نمونه شامل لنگر خمشی حداکثر پوشش تونلی (حداقل ۲/۰۷ و حداکثر ۸۳/۲ تن در متر)، فشار آب منفذی (حداقل ۷۸ و حداکثر ۲۰۰ کیلوپاسکال)، نشست زیر محور تونل (حداقل ۰/۴ و حداکثر ۲۱ سانتی‌متر) و نسبت فشار آب منفذی (عددی بین صفر و یک) برای تخمین پدیده روانگرایی، می‌باشند. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین ارائه شده با مقادیر به‌دست‌آمده از نرم‌افزار FLAC-3D برای باقی‌مانده چهار هزار نمونه که شامل شتاب‌نگاشت‌های دو زلزله دور و نزدیک به گسل چالفان و پارک‌فیلد می‌باشد برای

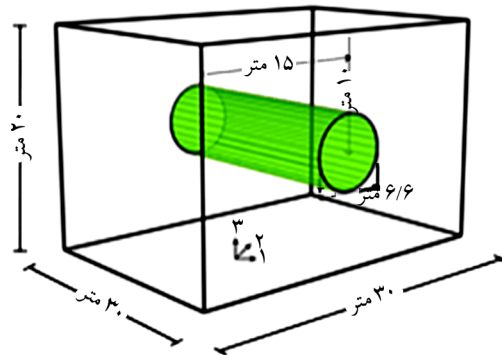
جدول (۲): مشخصات تونل.

قطر حفاری (متر)	قطر داخلی (متر)	ضخامت (متر)	E (کیلو نیوتن بر مترمربع)	γ (کیلو نیوتن بر مترمربع)
۶/۶	۶	۰/۳	$۲/۲۲۳ \times ۱۰^۷$	۲۴

۲-۵- شبیه‌سازی مدل

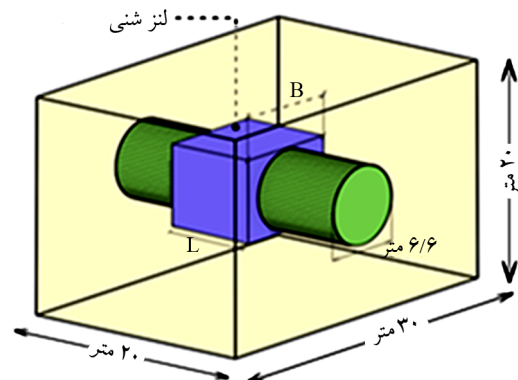
همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در این مطالعه دو نوع مدل اصلی وجود دارد. در مدل دوم یک محیط خاک رس با یک تونل در وسط آنکه با لنز ماسه‌ای احاطه شده است، ساخته شده است. این مدل در سه حالت مختلف شبیه‌سازی و تحلیل شده است که شامل لنز ماسه‌ای با طول ۱۰، ۵ و ۲۰ متر است. بدین منظور، در ابتدا، یک منطقه خاک رس ساخته می‌شود و یک تونل با قطر ۶ متر و ارتفاع ۱۰ متر (از مرکز تونل) مدل‌سازی می‌شود. سپس، لنز ماسه‌ای در اطراف تونل در مساحتی به عرض ۸ متر و طول ۱۰ متر ساخته می‌شود.

حالت دوم و سوم به ترتیب ۱۵ و ۲۰ متر عمق دارد. دلیل اصلی استفاده از نرم‌افزار FLAC-3D تغییر ابعاد لنز ماسه در عمق است. تونل مورد نظر در وسط لنز ماسه‌ای و در یک محیط بزرگ‌تر از خاک رس واقع شده است. تغییرات لنز ماسه‌ای در اطراف تونل و نشست آن در اثر زمین‌لرزه حوزه‌های دور و نزدیک در ادامه بحث شده است. مشخصات خاک در جدول (۱) آمده است. همچنین، ویژگی‌های پوشش تونل در جدول (۲) آمده است.


شکل (۳): مدل مرجع شماره ۱.

۳-۵- شبکه‌بندی و کنترل تعادل مدل

ابعاد شبکه‌بندی بهتر است بزرگ‌تر از Cs/f در نظر گرفته نشوند که در این رابطه، f ، از زلزله به دست آمده (در این مطالعه برابر با ۱۰ در نظر گرفته می‌شود) و Cs (در این مطالعه برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود) از مشخصات خاک به دست می‌آید که نشان‌دهنده سرعت موج برشی در خاک است. بنابراین، بر اساس مقادیر به دست آمده حداکثر سائز شبکه‌بندی نباید از یک متر بیشتر در نظر گرفته شود.


شکل (۴): مدل مرجع شماره ۲.
جدول (۱): مشخصات خاک.

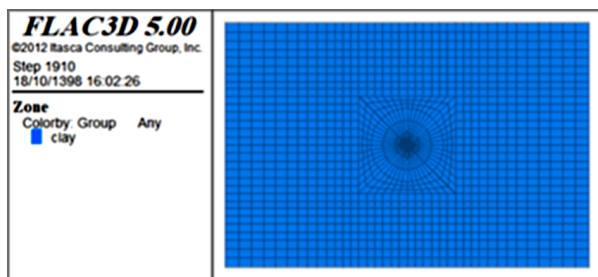
مشخصات خاک	واحد	نوع خاک
مدل رفتاری	-----	لنز ماسه‌ای
مدول برشی (G)	مگاپاسکال	مور-کولومب
مدول بالک (B)	مگاپاسکال	رس
φ	درجه	فین
C	کیلو پاسکال	۲۵
γd	کیلو نیوتن بر متر مکعب	۳۰
K	متر بر ثانیه	۲۵
		۱۰ ^{-۴}
		۱۰ ^{-۶}

شبکه‌های شعاعی در اطراف تونل ایجاد می‌شوند تا دقت تجزیه و تحلیل نتایج مدل افزایش یابد. این مناطق به دلیل شعاعی بودن و انحنای آن، بیش از ۵۰ درصد در ناحیه ماسه قرار دارند و از تراکم شدن شبکه‌ها در برابر شبکه‌های ساخته شده در محیط رس جلوگیری می‌کند. دو راه برای جلوگیری از تراکم شبکه‌ها وجود دارد. متداول‌ترین روش‌ها، تغییر پی‌درپی اندازه شبکه‌ها تا زمانی است که خطوط منطقه دقیقاً در یک جهت قرار گیرند و راه حل بهتر و دقیق‌تر این است که شبکه‌ها را در ناحیه تونل به شکل شعاعی مدل‌سازی شود. ناحیه اطراف تونل نیز به صورت

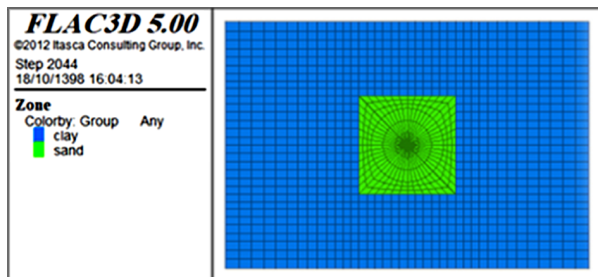
می‌تواند بسیار تأثیرگذار باشد. K_n و K_s از جمله پارامترهایی هستند که برای محاسبه اندرکنش خاک و سازه تعیین می‌شوند و محاسبه دقیق آنها می‌تواند بسیار مورد توجه باشد.

$$k_s \text{ \& } k_n = \frac{k + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \quad (7)$$

تصاویر مربوط به شبکه‌بندی در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه می‌شوند. محیط پیرامون تونل از ماسه‌ای به عرض ۸ متر تشکیل یافته است.



شکل (۵): شبکه‌بندی در مدل مرجع شماره ۱.



شکل (۶): شبکه‌بندی در مدل مرجع شماره ۲.

۵-۵- مدل‌سازی لنز ماسه‌ای

علاوه بر ارزیابی روانگرایی ماسه، مطالعه حاضر در هر دو مدل با و بدون لنز ماسه‌ای به بررسی تأثیر اندرکنش بین تونل و خاک می‌پردازد. جابه‌جایی و میزان روانگرایی عوامل اصلی در نظر گرفته شده در این تحلیل توسط تحریک لرزه‌ای هستند. علاوه بر این، لنز ماسه‌ای با ابعاد مختلف در اطراف تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اندرکنش بین تونل و لنز ماسه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. از نظر عمق، لنز ماسه‌ای در سه حالت ۵ متر، ۱۰ متر و ۲۰ متر بررسی می‌شود. شکل‌های (۷) تا (۹) لنز ماسه‌ای داخل مدل را نشان می‌دهند.

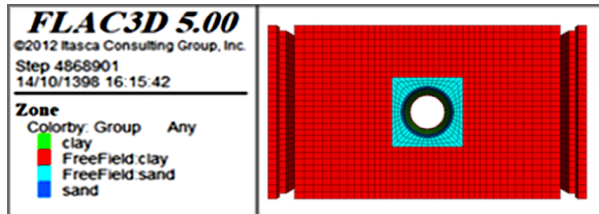
یک شبکه مربع با محیط 8×8 متر به شکل شعاع ساخته شده است و بقیه محیط به صورت یک شبکه مربعی تا ۳۰ متر مدل‌سازی شده است. عیب این روش افزایش زمان تجزیه و تحلیل در نرم‌افزار است که از طرفی باعث افزایش دقت در تجزیه و تحلیل نتایج می‌شود. در این نوع مدل‌سازی، باید توجه داشت که نمی‌توان ابتدا شبکه‌ها را برای محیط رسی که یک شبکه مربع است، مدل کرد و سپس شعاع اطراف تونل را در آن ساخت؛ بنابراین، ابتدا باید شبکه‌های تونل و سپس شبکه‌های اطراف تونل مدل‌سازی شوند که در این مطالعه به این صورت انجام شده است. علاوه بر راه‌حل‌های فوق، مرزهایی در شبکه‌های کنار لنزهای ماسه‌ای ایجاد شده است تا از متراکم شدن خطوط منطقه به‌طور کامل جلوگیری شود. پس از تمام این مراحل، محل تونل‌ها حفر می‌شود و با استفاده از امواج زلزله، تعادل دینامیکی آنها بررسی می‌شود.

اندازه شبکه‌بندی طرح 0.35 سانتی‌متر است. محیط اطراف تونل به شکل شعاع با یک شبکه خاکی است که دقت تجزیه و تحلیل را افزایش می‌دهد تا از متراکم شدن مدل جلوگیری شود. این محیط با شبکه‌هایی به اندازه ۳ سانتی‌متر ساخته شده است که این اندازه از شبکه ضمن حفظ دقت مانع از ازدیاد زمان تحلیل نیز می‌شود. عوامل متعددی برای اطمینان از تعادل مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود. مقادیر مورد بررسی شامل حداکثر نیروی عدم تعادل در کل مدل و حداکثر نسبت نیروی نامتعادل در یک گره به مقدار اولیه آن است. این دو پارامتر باید به‌طور مداوم کاهش یابد و عدم کاهش آنها به این معنی است که مدل به درستی شبیه‌سازی نشده است. پارامترهای سرعت و جابه‌جایی نیز برای این منظور مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برای اثبات صحت مدل‌سازی و دستیابی به تعادل ایستا و پویا، جابه‌جایی باید در نقاط بحرانی ثابت باشد.

۵-۴- محاسبه ساین شبکه در مدل

از آنجایی که برخی از المان‌ها وابسته به ساین دقیق شبکه هستند، به دست آوردن مقدار دقیق ساین شبکه در نتایج تحلیل

تجزیه و تحلیل دینامیکی شرایط مرزی متفاوتی نسبت به مدل استاتیک دارد؛ بنابراین، از جذب کننده انرژی در این تجزیه و تحلیل استفاده می شود. تصویر کلی مدل برای حالت دینامیکی به صورت شکل (۱۰) است.



شکل (۱۰): نمای کلی مدل.

۵-۶- رکوردهای زلزله انتخابی

نوع نیروی اعمال شده بر مدل تفاوت اصلی این تحقیق با سایرین است. در این تحقیق از ده نوع زمین لرزه طبیعی برای دستیابی به نتایج کامل و دقیق استفاده شده است. پیش از این، محققان با پنج نوع زمین لرزه دور از گسل یا بارهای سینوسی به نتایجی دست یافته بودند. مشخصات زمین لرزه های مورد استفاده در جداول (۳) و (۴) ذکر شده است. با در نظر گرفتن فاصله های کانونی، زمین لرزه های موجود به دو گروه پنج تایی تقسیم می شود. جدول (۳) شامل زمین لرزه های نزدیک به گسل است و جدول (۴) زمین لرزه های دور از گسل را نشان می دهد. محدوده پاسخ زلزله در شکل (۱۱) ذکر شده است.

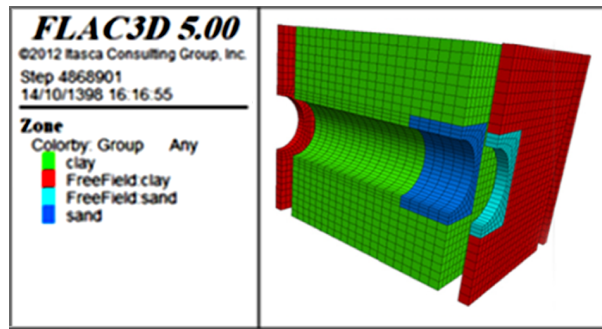
۶- نتایج عددی

۶-۱- شرایط جریان آب

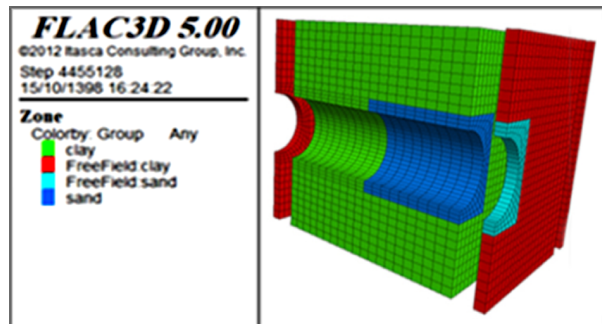
همان طور که در شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است، شرایط جریان آب قبل از اعمال نیرو متعادل و منظم است.

جدول (۳): زلزله های نزدیک به گسل.

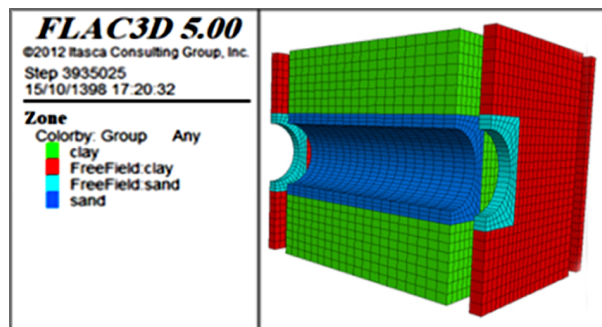
شدت	فاصله از کانون (کیلومتر)	ایستگاه	سال	رخداد زمین لرزه
۶/۱۹	۹/۵۸	Cholame-Shandon Array #5	۱۹۶۶	Parkfield
۶/۸	۳/۹۲	Karakyr	۱۹۷۶	Gazli, USSR
۶/۵۳	۳/۸۶	El Centro Array	۱۹۷۹	Imperial Valley-06
۶/۰۵	۶/۶۱	Pacoima Kagel Canyon	۱۹۹۴	Northridge-02
۶/۲	۱۳/۱۹۱	MQZ	۲۰۱۱	Christchurch, New Zealand



شکل (۷): لنز ماسه ای با عمق ۵ متر.



شکل (۸): لنز ماسه ای با عمق ۱۰ متر.

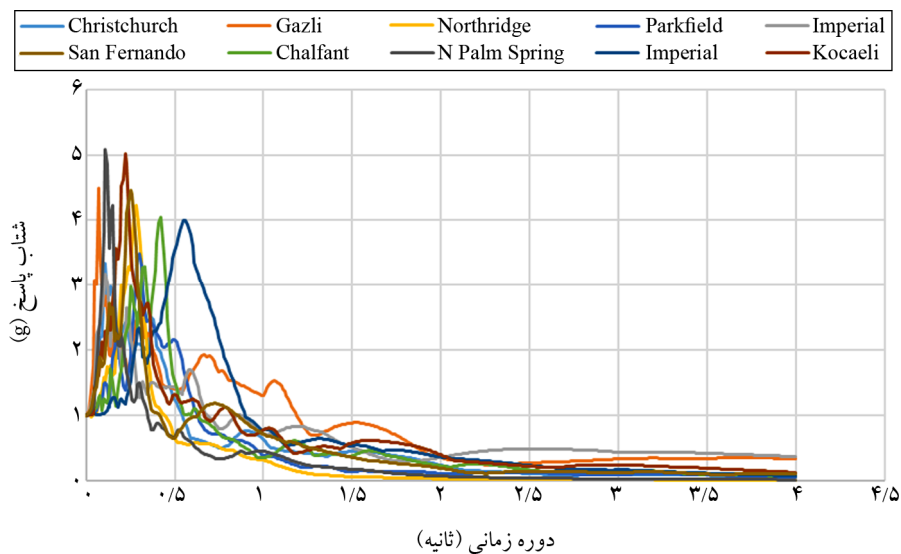


شکل (۹): لنز ماسه ای با عمق ۲۰ متر.

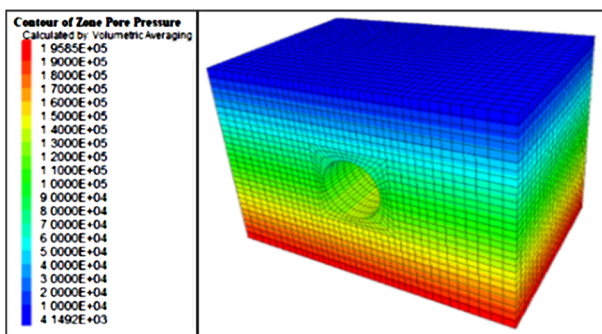
در شکل های (۷) تا (۹)، منطقه سبز مربوط به محیط رسی، منطقه آبی کم رنگ مرزی نشان دهنده ماسه و منطقه آبی پررنگ مربوط به لنز ماسه است. همچنین، منطقه قرمز مربوط به رس است.

جدول (۴): زلزله‌های دور از گسل.

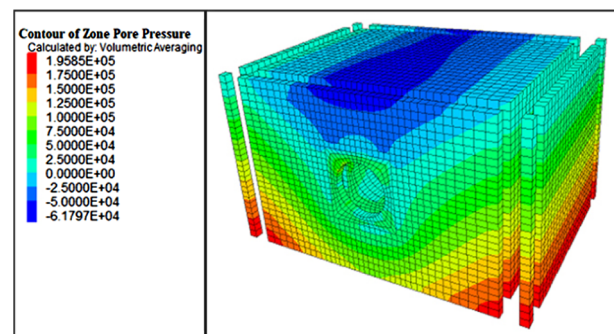
شدت	فاصله از کانون (کیلومتر)	ایستگاه	سال	رخداد زمین لرزه
۶/۱۹	۳۴/۹۲	Mammoth Lakes Sheriff Subst.	۱۹۸۶	Chalfant
۶/۵۳	۴۹/۱	Coachella Canal	۱۹۷۹	Imperial
۷/۵۱	۳۱/۷۴	Goynuk	۱۹۹۹	Kocaeli
۶/۰۶	۳۴/۴۸	Hemet Fire Station	۱۹۸۶	N Palm Spring
۶/۶۱	۲۵/۵۸	Fairmont Dam	۱۹۷۱	San Fernando



شکل (۱۱): طیف پاسخ زمین لرزه.



شکل (۱۳): جریان آب قبل از تخلیه آن از تونل.



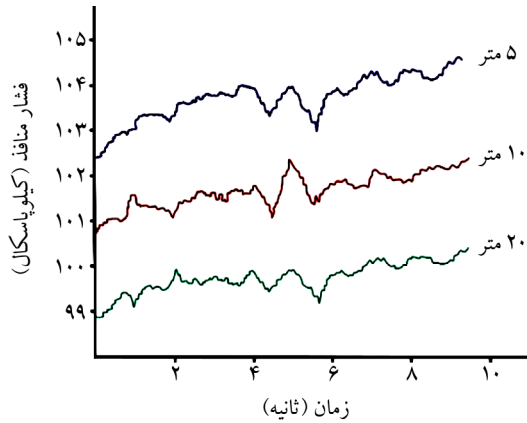
شکل (۱۲): جریان آب بعد از رخداد زلزله.

۶-۲- بررسی فشار آب منفذی در ابعاد مختلف لنز ماسه‌ای در شرایط زلزله‌های دور و نزدیک از گسل. فشار آب منفذی باید برای بررسی روانگرایی کنترل شود. دامنه فشارهای آب منفذی در هر دو حالت اعمال نیرو نزدیک به هم است و شباهت جالبی در دو حالت زلزله دور و نزدیک گسل وجود دارد به طوری که این مقدار در لنز ماسه‌ای ۱۰ متری

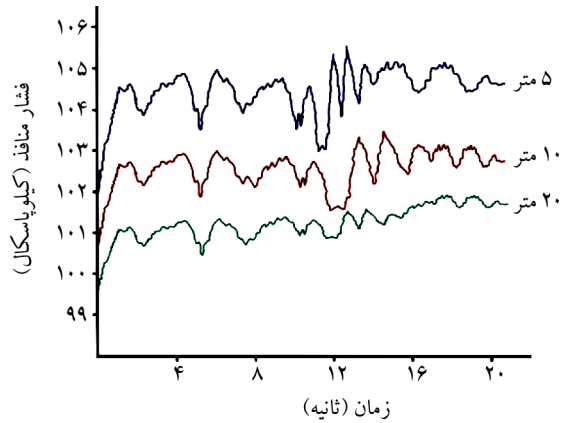
با این حال، برخی تغییرات در جریان آب پس از اعمال نیرو به محیط رخ می‌دهد که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. اگر جریان آب بدون فشار در محیط متعادل نباشد، نشان می‌دهد که مدل معیوب است. همان‌طور که انتظار می‌رود، جریان آب در شکل (۱۳) در مدل شبیه‌سازی شده است و هیچ تلاطمی در محیط وجود ندارد.

نسبت فشار آب منفذی به عدد یک نزدیک تر باشد خاک پتانسیل روانگرایی بیشتری دارد و هرچه این عدد کمتر از یک و به صفر نزدیک تر باشد خاک اصطلاحاً غیر روانگرا تشخیص داده می‌شود.

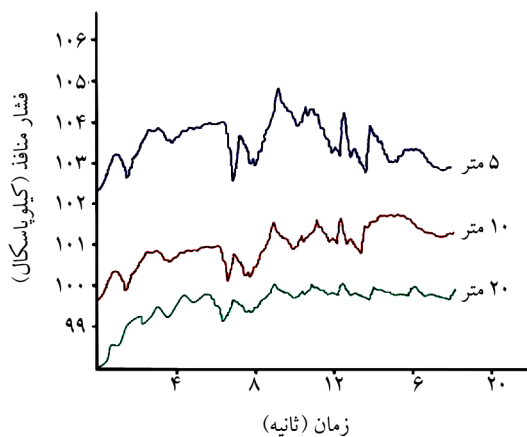
مابین حالت‌های ۵ و ۲۰ متری است. چند نمونه از مقادیر و روند تغییرات فشار آب منفذی در شکل (۱۴) آورده شده است. ضمناً، مقادیر مرتبط با نسبت فشار آب منفذی نیز برای تخمین میزان روانگرایی در جداول (۶) و (۷) ارائه شده‌اند. هر چه میزان



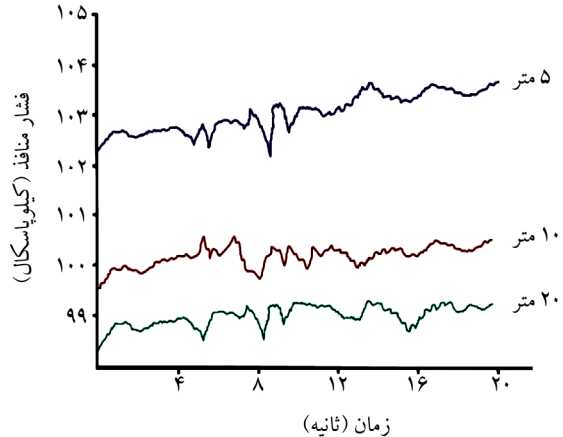
(ب) زلزله نورثربیق



(الف) زلزله کرایست چرچ



(ت) زلزله پالم اسپرینگ



(ب) زلزله چالفانت

شکل (۱۴): فشار بیش از حد منفذی در مدل مرجع شماره ۲ (زیر محور تونل).

جدول (۶): نتایج زلزله‌های نزدیک گسل.

رخداد	عمق لنز ماسه‌ای (متر)	حداکثر لنگر خمشی در خطوط تونل (تن-متر)	فشار آب منفذی (کیلو پاسکال)	نشست سطح زیر محور تونل (سانتی‌متر)	نسبت فشار منفذی	حالت روانگرایی
Gazi 1976	بدون لنز ماسه	۱۵/۹۳	۲۰۰	نزدیک به صفر	۰/۷۲	غیر روانگرا
	۵	۲۶/۲۸	۱۰۰	۱۱/۵	۰/۹۹	روانگرا
	۱۰	۱۷/۱۶	۹۸	۱۰	۰/۹۹	روانگرا
	۲۰	۸۳/۲	۱۲۰	۲۱	۰/۹۹	روانگرا
Imperial 1979	بدون لنز ماسه	۷/۲۱	۲۱۷	نزدیک به صفر	۰/۷	غیر روانگرا
	۵	۹/۴۶	۱۰۴	۲/۵	۰/۹۹	روانگرا
	۱۰	۳۴/۴۹	۱۲۰	۸/۳	۰/۹۹	روانگرا
	۲۰	۸/۱۸	۹۴	۴/۵	۰/۹۹	روانگرا

ادامه جدول (۶).

رخداد	عمق لنز ماسه‌ای (متر)	حداکثر لنگر خمشی در خطوط تونل (تن - متر)	فشار آب منفذی (کیلو پاسکال)	نشست سطح زیر محور تونل (سانتی متر)	نسبت فشار منفذی	حالت روانگرایی
Parkfield 1966	بدون لنز ماسه	۳/۶۱	۱۹۸	نزدیک به صفر	۰/۸۶	غیر روانگرا
	۵	۴۰/۶۲	۷۸	۴/۵	۰/۹۹	روانگرا
	۱۰	۳۷/۲۸	۱۰۰	۵/۸۸	۱	روانگرا
Christchurch 2011	۲۰	۶/۷۲	۱۰۵	۴/۲	۰/۹۹	روانگرا
	بدون لنز ماسه	۲/۵۶	۱۹۹	نزدیک به صفر	۰/۷۳	غیر روانگرا
	۵	۵/۵۹	۱۰۴	۱	۰/۹۹	روانگرا
Northridge 1994	۱۰	۵/۶۷	۱۰۲	۱/۵	۰/۹۹	روانگرا
	۲۰	۵/۳۲	۹۶/۵	۱/۵	۰/۹۹	روانگرا
	بدون لنز ماسه	۲/۱۵	۱۹۹	نزدیک به صفر	۰/۷۸	غیر روانگرا
	۵	۵/۳۲	۱۰۳	۰/۴	۰/۷	غیر روانگرا
	۱۰	۵/۳۶	۱۰۱	۰/۵	۰/۶۲	غیر روانگرا
	۲۰	۵/۱۶	۹۹	۰/۵	۰/۷۴	غیر روانگرا

جدول (۷): نتایج زلزله‌های دور از گسل.

رخداد	عمق لنز ماسه‌ای (متر)	حداکثر لنگر خمشی در خطوط تونل (تن - متر)	فشار آب منفذی (کیلو پاسکال)	نشست سطح زیر محور تونل (سانتی متر)	نسبت فشار منفذی	حالت روانگرایی
Chalfant 1986	بدون لنز ماسه	۲/۱	۱۰۵	نزدیک به صفر	۰/۸۷	غیر روانگرا
	۵	۵/۳۳	۱۰۳	۰/۴	۰/۹۹	روانگرا
	۱۰	۵/۴۴	۱۰۰/۲۶	۰/۴	۰/۹۹	روانگرا
Imperial 1979	۲۰	۵/۱۴	۹۰/۲۶	۰/۵۶	۰/۹۹	روانگرا
	بدون لنز ماسه	۲/۹۴	۱۱۵	نزدیک به صفر	۰/۸۶	غیر روانگرا
	۵	۲۶/۹۱	۹۹	۰/۶	۰/۹۹	روانگرا
Kocaeli 1999	۱۰	۶/۰۲	۹۳	۳/۱	۰/۹۹	روانگرا
	۲۰	۶/۴۶	۱۰۳	۳/۴	۰/۹۹	روانگرا
	بدون لنز ماسه	۲/۰۷	۱۱۵	نزدیک به صفر	۰/۷۷	غیر روانگرا
N Palm Spring 1986	۵	۵/۸۷	۱۰۱	۲/۹	۰/۹۹	روانگرا
	۱۰	۶/۱۱	۱۰۳	۲/۵	۱	روانگرا
	۲۰	۶/۲۲	۱۰۷	۲/۸	۰/۹۹	روانگرا
San Fernando 1971	بدون لنز ماسه	۲/۰۶	۱۰۵	نزدیک به صفر	۰/۸۱	غیر روانگرا
	۵	۵/۵۴	۱۰۳	۰/۸	۰/۹۹	روانگرا
	۱۰	۵/۶۲	۱۰۱/۲۶	۰/۹	۰/۹۹	روانگرا
	۲۰	۵/۶۸	۹۹	۰/۹	۰/۹۹	روانگرا
	بدون لنز ماسه	۲/۰۹	۱۱۹	نزدیک به صفر	۰/۸۱	غیر روانگرا
	۵	۵/۴۸	۱۰۳	۰/۹	۰/۸۱	غیر روانگرا
	۱۰	۵/۵۴	۹۹	۱/۱	۰/۷۱	غیر روانگرا
	۲۰	۵/۰۵	۹۹	۰/۸	۰/۹۲	غیر روانگرا

۳-۶- تغییرات لنگر خمشی

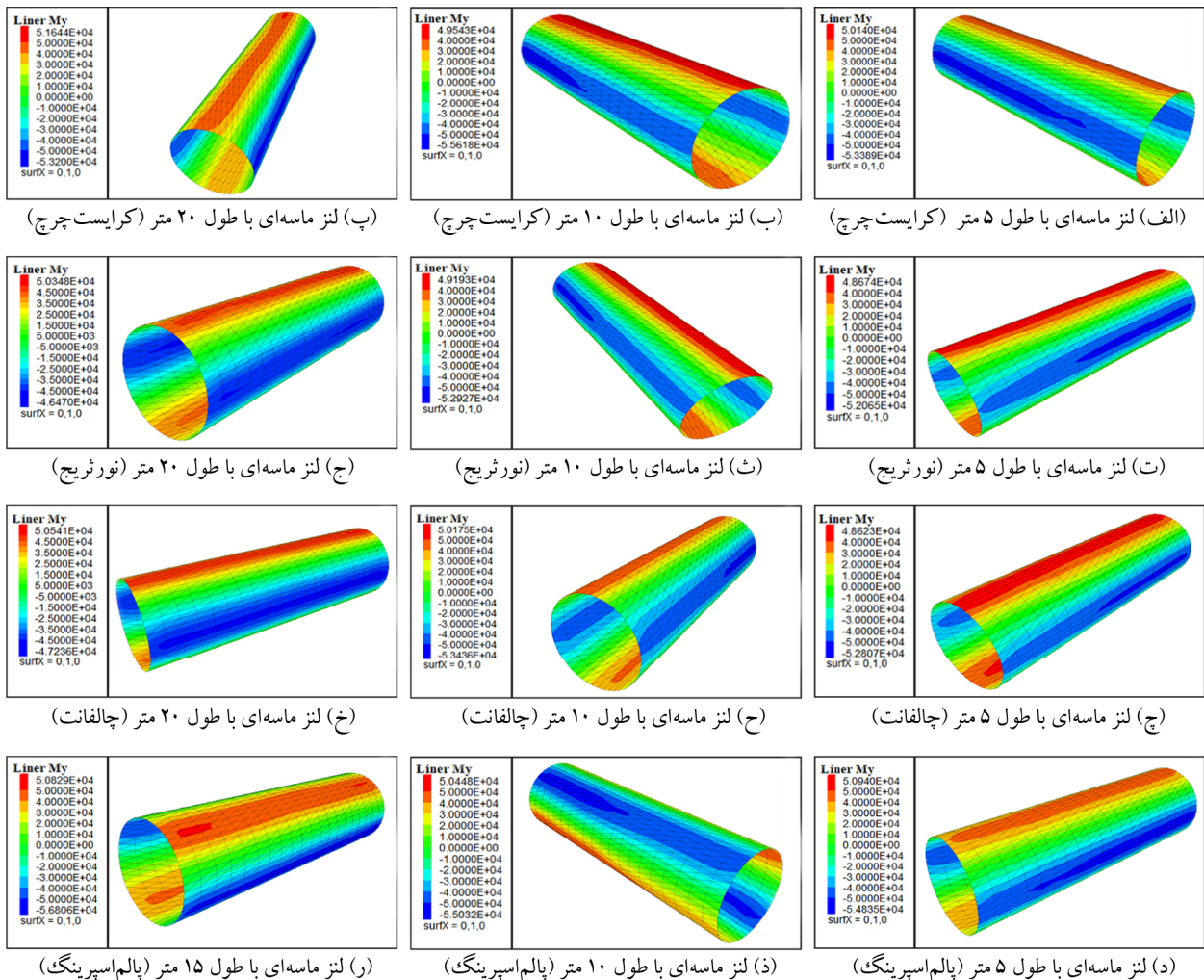
مقادیر گشتاور خمشی در زلزله‌های دور و نزدیک گسل نزدیک یکدیگر هستند و همچنین بسیار نزدیک به مطالعه قبلی انجام شده توسط آزادی و برایسون (Azadi & Bryson, 2018) با بار سینوسی هستند. نیروهای متداول ناشی از گشتاور خمشی در پوشش تونل در شکل (۱۵) نشان داده شده است. حداکثر گشتاورهای خمشی در جدول (۵) آمده است.

روانگرایی هم وجود دارد. روانگرایی معمولاً در زلزله‌های حوزه نزدیک تجربه می‌شود، اما در بیشتر موارد در مناطق دور از گسل، روانگرایی وجود ندارد. حتی در حالت‌هایی که شدت زلزله در مناطق دور از گسل بزرگ‌تر از زلزله در مناطق نزدیک گسل است، عمدتاً هیچ‌گونه روانگرایی رخ نمی‌دهد. به‌عنوان مثال، نتایج به‌دست آمده از برخی زلزله‌ها در مناطق نزدیک و دور در نمودارها آمده است.

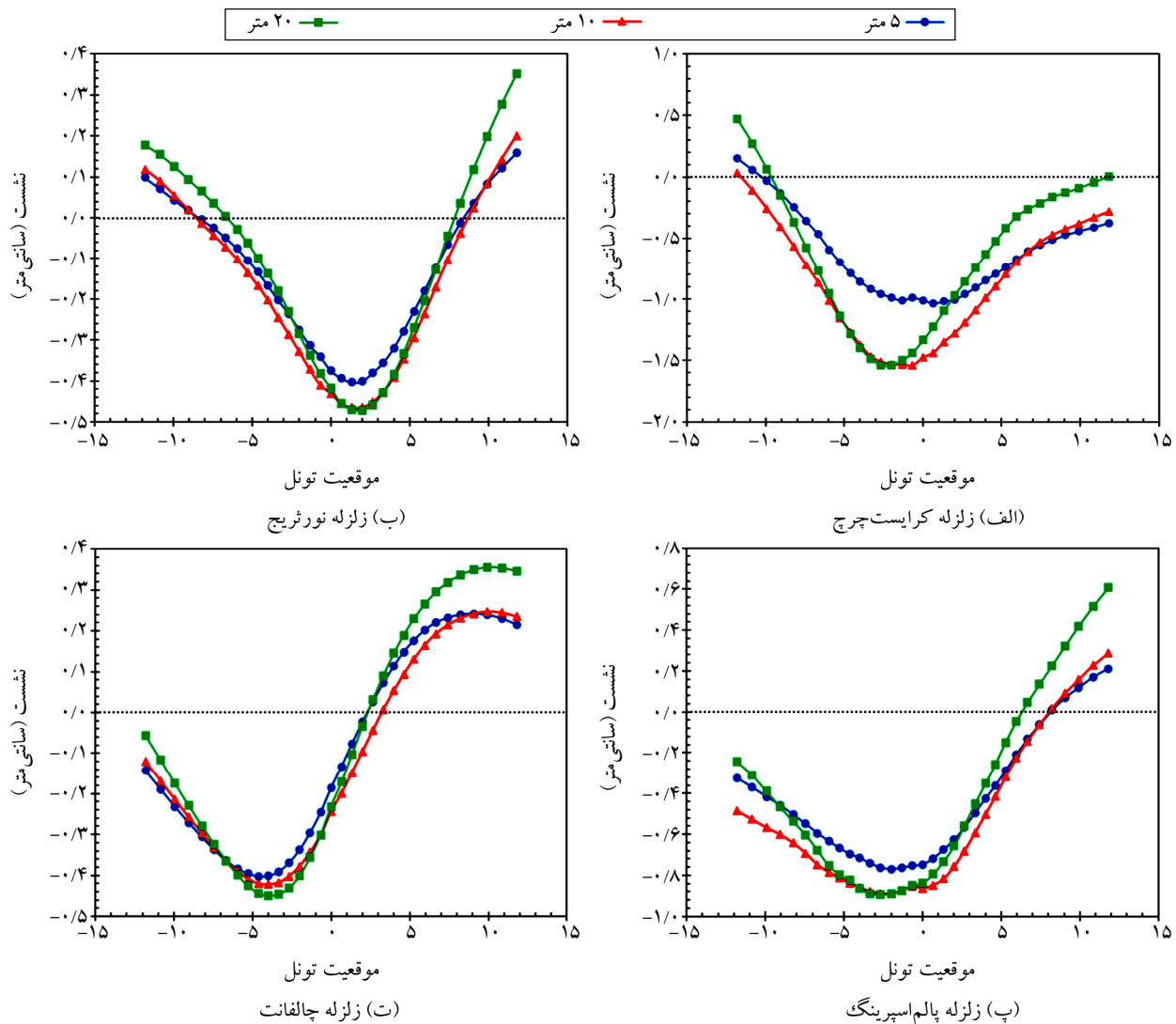
۴-۶- بررسی نشست تونل در اثر روانگرایی

اگرچه در مدل‌هایی با لنز ماسه‌ای در محیط‌های پوشیده از خاک رس با وجود مقداری نشست روانگرایی رخ نمی‌دهد. با این حال، در مواردی که لنز ماسه‌ای وجود دارد، نشست و

همان‌طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، نشست در مواردی که زلزله‌های نزدیک به گسل اعمال می‌شود بسیار بیشتر از مواردی است که تحت زمین لرزه‌های دور از گسل هستند. چندین نتیجه کلی وجود دارد که برخی از آنها در جداول (۶) و (۷) آورده شده است.



شکل (۱۵): تغییرات لنگر خمشی در خطوط تونل با لنز ماسه‌ای با طول‌های مختلف.



شکل (۱۶): تغییرات نشست سطح در موقعیت تونل برای لنزهای ماسه‌ای با طول‌های مختلف.

فرایند آزمایش با استفاده از الگوریتم ماشین یادگیری کرانه‌ای برای ۲۰ درصد باقیمانده از مجموعه داده انجام می‌شود. نتایج به دست آمده سپس برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی مقایسه می‌شوند.

در شکل (۱۷)، نمودار مربوط به خروجی نرم‌افزار FLAC-3D با مقادیر مرتبط با خروجی الگوریتم یادگیری ماشین کرانه مقایسه شده‌اند. نتایج حاصله نشان از دقت مناسب روش پیشنهادی برای تخمین مقادیر مورد نظر می‌باشد به گونه‌ای که در بدترین حالت خطای تخمین روش پیشنهادی کمتر از ۶ درصد بوده است. لازم به ذکر است که هرچه تعداد نمونه‌های ورودی و خروجی برای آموزش بیشتر باشند دقت الگوریتم پیشنهادی بیشتر خواهد بود.

۵-۶- نتایج مربوط به یادگیری ماشین

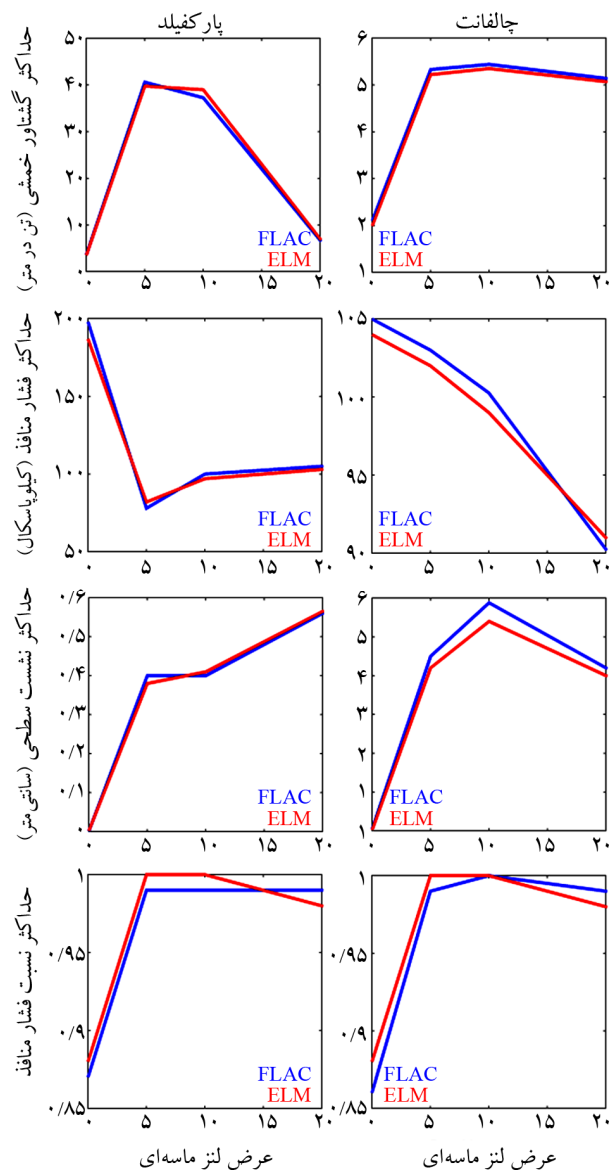
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ۸۰ درصد از کل مجموعه داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای آزمایش اختصاص داده می‌شود. این مجموعه داده از ورودی و خروجی نرم‌افزار FLAC-3D به دست می‌آید. حداکثر گشتاور خمشی در پوشش تونل، فشار آب منفذی، نشست سطح زیر محور تونل و نسبت فشار منفذی به عنوان خروجی الگوریتم یادگیری ماشین و شتاب‌های زلزله و برخی از خواص لنز ماسه‌ای و خاک رس، از جمله مدول برشی، مدول بالک، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، وزن مخصوص خشک، نفوذپذیری و عمق لنز ماسه‌ای به عنوان ورودی این الگوریتم برای آموزش در نظر گرفته می‌شوند. پس از آن،

جدول (۹): اندیس عملکردی الگوریتم یادگیری کرانه‌ای در فاز آزمایشی.

اندیس‌های عملکردی			الگوریتم
RMSE	r	R ²	
۴/۶۷۴۳	۰/۸۷۹۴	۰/۹۰۲۳	ELM

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از الگوریتم جدید ماشین یادگیری کرانه‌ای برای پیش‌بینی رویداد روانگرایی در پوشش تونل تحت زمین‌لرزه در داخل لنز ماسه‌ای استفاده می‌شود. نرم‌افزار FLAC-3D برای شبیه‌سازی مدل پوشش تونل تحت رکوردهای زمین‌لرزه میدان دور و نزدیک استفاده می‌شود. اندرکنش خاک و سازه نیز بین تونل و لنز ماسه در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های موهر-کولومب و فین به ترتیب برای نشان دادن نشست رس و ارزیابی روانگرایی لنز ماسه‌ای استفاده می‌شوند. تغییرات لنگر خمشی در پوشش تونل، فشار منفذی، نشست سطح زیر محور تونل، و نسبت فشار منفذی به عنوان خروجی و شتاب‌های زلزله و برخی از ویژگی‌های لنز ماسه و خاک رس، از جمله مدول برشی، مدول بالک، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، وزن مخصوص خشک، نفوذپذیری و عمق لنز ماسه‌ای، ورودی‌های الگوریتم‌های یادگیری ماشین در نظر گرفته می‌شوند. قابلیت روش پیشنهادی سپس با مقایسه آن با تعدادی از داده‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار FLAC-3D نشان داده می‌شود. نتایج بیانگر دقت مناسب روش ارائه شده برای پیش‌بینی پدیده روانگرایی در پوشش تونل داخل لنز ماسه‌ای تحت شرایط مختلف تحریک لرزه‌ای است به گونه‌ای که در بدترین حالت خطای روش ارائه شده در پارامترهای مربوطه کمتر از ۶ درصد بوده است. این دقت با افزایش تعداد داده‌های آموزشی قابلیت ارتقا و بهبود بیشتر را نیز می‌تواند داشته باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که زمین‌لرزه‌های نزدیک به گسل نسبت به زمین‌لرزه‌های دورتر منجر به نشست و پدیده روانگرایی بیشتری می‌شوند. به عبارت دیگر، زلزله‌های میدان نزدیک، حتی با بزرگی کم، خطرناک‌تر از زمین‌لرزه‌های میدان دور با بزرگی قابل توجه هستند. حداکثر نشست در مکان‌های نزدیک به محور تونل رخ


شکل (۱۷): مقایسه نتایج روش پیشنهادی با خروجی نرم‌افزار FLAC-3D.

جدول (۸) و (۹)، قابلیت و کارایی روش ارائه شده را به لحاظ شاخص‌های عملکردی چه در فاز آموزش و چه در فاز آزمایش نشان می‌دهد. این شاخص‌های عملکردی شامل مقادیر R^2 ، r و $RMSE$ می‌باشند که نشان‌دهنده دقت مناسب روش پیشنهادی می‌باشند.

جدول (۸): اندیس عملکردی الگوریتم یادگیری کرانه‌ای در فاز آموزشی.

اندیس‌های عملکردی			الگوریتم
RMSE	r	R ²	
۷/۳۴۸۱	۰/۸۵۹۱	۰/۸۷۴۳	ELM

- برابر کمتر شده است.
- ۶- با افزایش عمق نیروهای وارد بر پوشش تونل افزایش می‌یابد.
- ۷- با اعمال نیروهای لرزه‌ای، فشار آب حفره‌ای با تغییرات چشم‌گیری روبه‌رو می‌گردد ولی به تدریج و مخصوصاً در انتهای تحلیل‌ها تغییرات فشار آب حفره‌ای کمتر می‌شود.
- ۸- در حضور لنز ماسه‌ای نسبت لنگر خمشی به حالت بدون لنز ماسه‌ای در برخی موارد بالای ۵۰ درصد است که مقدار بسیار چشمگیری می‌باشد.
- ۹- میزان نشست در لنز ماسه‌ای با عمق ۲۰ و ۱۰ متر تفاوت زیادی با لنز ماسه‌ای با عمق ۵ متر و حالت بدون لنز دارد همین مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش در راستای عمق لنز ماسه‌ای میزان تغییر مکان سطحی کاهش می‌یابد.

مراجع

- Andreotti, G., Calvi, GM., Soga, K., Gong, C., & Ding, W. (2020). Cyclic model with damage assessment of longitudinal joints in segmental tunnel linings. *Tunnelling Underground Space Technology*, 103, 103472.
- Azadi, M., & Mir Mohammad Hosseini, S.M. (2010). The uplifting behavior of shallow tunnels within the liquefiable soils under cyclic loadings. *Tunnelling Underground Space Technology*, 25, 158-67.
- Azadi, M., & Bryson, LS. (2018). Effect of width variation of liquefiable sand lens on surface settlement due to shallow tunneling. In: *International Congress of Exhibition Sustainable Civil Infrastructure: Innovative Infrastructure Geotechnology*, 155-163.
- Beheshti, K. (1998). *The Investigation of the Behavior of Saturated Sand Lenses within the Soil Deposits under Dynamic Loading*. Dissertation, Faculty of Amirkabir University of Technology.
- Cetin, K.O., Cakir, E., Ilgac, M., Can, G., Soylemez, B., Elsaid, A., & et al. (2021). Geotechnical aspects of reconnaissance findings after 2020 January 24th, M6.8 Sivrice-Elazığ-Turkey earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-45.
- Fattah, M.Y., Hamoo, M.J. & Dawood, S.H. (2015). Dynamic response of a lined tunnel with transmitting

می‌دهد. در مواردی که عمق لنز ماسه‌ای ۱۰ متر باشد، نشست نسبت به سایر ابعاد بیشتر اتفاق می‌افتد و در لنز ماسه‌ای با عمق ۲۰ متر، کمترین مقدار نشست تجربه می‌شود. با استفاده از انواع الگوریتم‌هایی که در این مطالعه استفاده شد مشخص می‌گردد که استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های مربوط به بهینه‌سازی در به دست آوردن سریع نتایج و همچنین دقیق بودن به چه اندازه مفید می‌باشد. هرچقدر که مقدار ضریب همبستگی پیرسون نزدیک به ۱ باشد بهترین و دقیق‌ترین حالت را بیان می‌کند که به همان نتایج دست یافته شده است. از طرفی میزان خطای داده شده در آخرین روش از تمامی روش‌ها کمتر است که نشان از دقیق بودن نتایج و همچنین نزدیک به نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار Flac در کمترین زمان ممکن می‌باشد. نمودارهای نرمالیزه شده نیز از نزدیک بودن نتایج به‌دست آمده از انواع الگوریتم‌ها با داده‌های نرم‌افزار Flac خبر می‌دهد.

۱- روش ارائه شده و استفاده از شبکه عصبی و یادگیری ماشین نشان از دقت بالای تحلیل می‌باشد به گونه‌ای که در بدترین حالت خطای روش ارائه شده در پارامترهای مربوطه کمتر از ۶ درصد بوده است.

۲- حداکثر نشست در مکان‌های نزدیک به محور تونل رخ داده است.

۳- با توجه به نتایج مدلی را که در آن لنز ماسه‌ای با ابعاد ۱۰ متر مدل مرجع در نظر گرفته شود، مقدار تغییرات لنگر خمشی نسبت مدل با ابعاد ۵ متر ۲/۱ درصد و نسبت به مدل با ابعاد ۲۰ متر ۵/۵۱ درصد است؛ که همین نسبت به مدل بدون لنز ماسه‌ای ۵۹/۳۷ درصد نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تأثیر بسیار بالای لنز ماسه‌ای در میزان تغییر پارامترهای سازه دارد. لازم به ذکر هست که نتایج مربوط به نشست در لحظه اتمام زمین‌لرزه می‌باشد.

۴- مقدار ضریب همبستگی پیرسون در یادگیری ماشین نزدیک به ۱ می‌باشد که نشان از دقیق و بهترین حالت ممکن است.

۵- استفاده از شبکه‌های عصبی در به دست آوردن سریع و دقیق نتایج نقش بسیار زیادی داشته است و مدت‌زمان تحلیل چند

efficiency in multifamily residential buildings. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 26(2), 04020074.

Shokri, M. (1996). *Evaluation of the Liquefaction Potential of Sand Lenses*. Dissertation, Amirkabir University of Technology.

Taylor, E.J., & Madabhushi, S.P.G. (2020). Remediation of liquefaction-induced floatation of non-circular tunnels. *Tunnelling Underground Space Technology*, 98, 103301.

Tsinidis, G., de Silva, F., Anastasopoulos, I., Bilotta, E., Bobet, A., Hashash, Y.M.A., & et al. (2020). Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis. *Tunnelling Underground Space Technol*, 99, 103334.

Vallejo, LE. (1998). *Liquefaction of Sand Lenses During an Earthquake*. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II—Recent Advances in Ground-Motion Evaluation. *Geotech. Spec. Publ.*, 493-507.

Zhao, K., Wang, Q., Wu, Q., Chen, S., Zhuang, H., & Chen, G. (2020). Stability of immersed tunnel in liquefiable seabed under wave loadings. *Tunnelling Underground Space Technol*, 102, 103449.

boundaries. *Earthquakes and Structures*, 8(1), 275-304.

Holchin, J., & Vallejo, L. (1995). *The Liquefaction of Sand Lenses Due to Cyclic Loading*.

Huang, G.B., Zhu, Q.Y., & Siew, C.K. (2004). Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks. In: *IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No. 04CH37541)*, 2, 985-990.

Jafarnia, M., & Varzaghani, M.I. (2016). Effect of near field earthquake on the monuments adjacent to underground tunnels using hybrid FEA-ANN technique. *Earthquakes and Structures*, 10(4), 757-768.

Kim, S., Tom, TH., Takeda, M., & Mase, H. (2021). A framework for transformation to nearshore wave from global wave data using machine-learning techniques: Validation at the Port of Hitachinaka, Japan. *Ocean Engineering*, 221, 108516.

Lin, SS., Shen, SL., Zhou, A., & Xu, YS. (2021). Risk assessment and management of excavation system based on fuzzy set theory and machine learning methods. *Automation in Construction*, 122, 103490.

Marcelino, P., de Lurdes Antunes, M., Fortunato, E., & Gomes, MC. (2021). Machine learning approach for pavement performance prediction. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(3), 341-354.

Miranda, L., Caldeira, L., Serra, J., & Gomes, RC. (2020). Dynamic behaviour of Tagus River sand including liquefaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(10), 4581-4604.

Mir Mohammad Hosseini, SM., & Azadi, M. (2012). Effect of the location of liquefiable sand lenses on shallow tunnels during earthquake loading. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 37, 575-586.

Nguyen, H., Vu, T., Vo, TP., & Thai, HT. (2021). Efficient machine learning models for prediction of concrete strengths. *Construction and Building Materials*, 266, 120950.

Pashangpishe, Y. (2004). *Mechanism of Soil Deformation due to Double Lenses Liquefaction and Critical Depth Determination*. Dissertation, Amirkabir University of Technology.

Seyrfar, A., Ataei, H., Movahedi, A., & Derrible, S. (2021). Data-driven approach for evaluating the energy

واژه‌نامه

Nonlinear Inelastic Structural Analysis (NISA)	۱- تجزیه و تحلیل سازه‌ای غیر خطی
Mohr-Coulomb	۲- موهر-کولمب
Finn	۳- فین
Artificial Neural Network (ANN)	۴- شبکه عصبی مصنوعی
Extreme Learning Machine	۵- ماشین یادگیری کرانه‌ای
Single Layer Feed-Forward Neural Network	۶- شبکه عصبی پیشخور تک لایه
Moore-Penrose	۷- مور-پنروز

Estimating the Seismic Behavior of Tunnel inside Sand Lens by the Extreme Machine Learning

Payam Shafiei¹, Mohammad Azadi^{2*} and Mehran Seyed Razzaghi³

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran,
*Corresponding Author, email: Azadi.mhmm@gmail.com
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

The presence of liquefaction in the soil has a great impact on the condition of the structures built in that area; therefore, studying and evaluating liquefaction is of great importance. Liquefaction of the sand lens can cause changes in the force and shape of the tunnel lining. These issues have been evaluated and investigated in this article. Asymmetric deformations and distortions in the tunnel lining lead to an increase in the ratio of dynamic torque to static torque and distance to diameter. The presence of this phenomenon causes changes in the state of effective stresses, pore water pressure, and settlement. In this thesis, the effect of the sand lens around the tunnel is investigated. Soil-structure interaction is also considered between the tunnel and the sand lens. To put it more simply, a sand lens is a piece of soil in the environment that has high liquefaction properties, so its investigation and evaluation is an important matter that has not been extensively studied so far. Estimation of peripheral and structural soil parameters in tunnel lining always requires software simulation and bulky and time-consuming studies. Providing a method to be able to present these parameters with appropriate accuracy and small computational effort in the fastest possible time has always been an engineering challenge. Therefore, the present study aims to present a machine learning-based method to predict some important properties such as liquefaction event, maximum bending stress of tunnel cover, settlement of subsurface tunnel, and pore water pressure under near- and far-field earthquakes. Hence, first, the three-dimensional finite-difference software with parameters such as soil-structure interaction between tunnel cover and sand lens has been used to simulate the tunnel cover model exposed to ground stimuli. Mohr-Coulomb and Finn models have also been used to consider clay sediment and sand lens liquefaction evaluation, respectively. Then, an extreme learning machine (ELM) is used to predict and estimate the quantities mentioned. The main purpose of this study is to introduce a new method using extreme learning machine to predict some important characteristics such as liquefaction event, maximum bending stress, settlement, and pore water pressure. The results of the studies indicate the proper performance and accuracy of the proposed method in estimating the mentioned parameters so that in the worst case, the estimation error was less than 6%. Also in this study, the effect of a liquefiable sand lens in a non-fluidic environment with different seismic waves and the results of the high influence of bending moment in the tunnel lining, effective stress, pore water pressure and the settlement along the axis of the tunnel in the presence of sand lens has been evaluated. The results demonstrate the great influence of the presence of the sand lens in bending moment parameters in the tunnel lining, effective stress, pore water pressure, and settlement along the tunnel axis. In the final part of the study, all the results obtained from the software are compared with the machine learning outcomes. Also, in the presence of a sand lens, the ratio of bending moment to the state without of sand lens in some cases is over 50%, which is a very significant value, and the maximum settlement occurred in places close to the tunnel axis.

Keywords: FLAC-3D, Machine Learning, Liquefaction, Tunnel Lining, Near- and Far-Field Earthquake, Soil-Structure Interaction, Sand Lens.