

کنترل سلامت سازه جهت شناسایی خرابی‌ها در فضاهای زیرزمینی - مطالعه موردی

پژوهشی

هادی فتاحی^{۱*}؛ حسین قائدی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، h.fattahi@arakut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، hossein.ghaedi74@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

شماره صفحات: ۹۷ تا ۱۲۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11420.1438

واژگان کلیدی	چکیده
تبدیل موجک کنترل سلامت سازه زیرزمینی شناسایی آسیب نرم‌افزار <i>PLAXIS3D2020</i> نرم‌افزار <i>3DEC</i>	با توسعه و رشد جمعیت در شهرهای بزرگ؛ نیاز به استفاده از امکانات حمل‌ونقل همگانی مانند مترو رو به افزایش است. با توجه به اهمیت شبکه حمل‌ونقل شهری، توجه به کنترل سلامت سازه‌های زیرزمینی در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از آنجا که ایران یکی از کشورهای لرزه‌خیز جهان است در چند سال اخیر شاهد وقوع زلزله‌های مخرب و ویرانگری بوده و خسارت‌های سنگینی را به همراه داشته است. براساس مطالعات پیشین، سازه‌های زیرزمینی در برابر زلزله از ایمنی بیشتری برخوردار است. زیرا سازه‌های سطحی تنها در کف و سطح تحتانی به زمین متصل هستند. در صورتی که سازه‌های زیرزمینی درگیری کاملی با محیط دربرگیرنده داشته و در برابر بارهای زلزله مقاوم‌تر هستند. اما با این حال با توجه به اینکه اغلب متروها در خاک‌های کم عمق شهری احداث می‌شوند، گزارش‌هایی از خسارت‌های سنگین و آسیب به این فضاهای زیرزمینی در برابر بار زلزله وجود داشته است. به همین دلیل شناسایی آسیب و کنترل سلامت فضاهای زیرزمینی بخصوص متروها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این تحقیق، با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای زمین و همچنین عدم پیش‌بینی دقیق از مسیر حفاری از نرم‌افزار <i>3DEC</i> (در زمان برخورد با لایه‌های سنگی) در کنار نرم‌افزار <i>PLAXIS3D2020</i> برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی تونل خط ۲ مترو مشهد استفاده شده است. بعلاوه در این تحقیق به منظور کنترل سلامت سازه (خط ۲ مترو مشهد) از روش‌های تبدیل موجک (<i>WT</i>) استفاده شده است. به همین منظور سیگنال دریافتی توسط تحلیل‌های دینامیکی فراخوانی شده و با استفاده از جعبه ابزار تبدیل موجک در نرم‌افزار <i>MATLAB</i> ، محل‌های آسیب در مدل (اطراف پوشش بتنی و مرزهای کناری) شناسایی شد که بدیهی است پس از شناسایی محل آسیب می‌توان با استفاده از سیستم نگهداری مناسب از ریزش سازه زیرزمینی در محل‌های شناسایی شده جلوگیری کرد.

۱- پیش‌گفتار

عمرانی، نظامی و معدنی معطوف شده است. یکی از این سازه‌های زیرزمینی که در چند سال اخیر بسیار مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گرفته، تونل‌های شهری می‌باشد که با توجه به گسترش شهرها و همچنین افزایش جمعیت، جهت کاهش مشکلات زیست محیطی، کاهش بار ترافیکی، تسهیل در رفت‌وآمد مردم و کوتاه شدن مسیرها استفاده از

امروزه با افزایش دانش بشری در ساخت فضاهای زیرزمینی و همچنین به دلایل مسائل سیاسی، امنیتی، اقتصادی و راحتی مردم توجه بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به احداث سازه‌های زیرزمینی برای کارهای

متروها روزبه‌روز در حال گسترش است. به دلیل حساسیت و کاربرد مهم این نوع فضاها توجه به ایمنی و سلامت آنها یکی از دغدغه‌ها و چالش‌های اصلی در ساخت متروها می‌باشد. از آنجا که سازه‌های زیرزمینی از قبیل متروها در زیر سطح زمین قرار دارند، فشار طبقات بالایی (روباره) ممکن است منجر به خرابی و ریزش سازه‌های زیرزمینی شوند به همین دلیل تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تحلیل استاتیکی سازه‌های زیرزمینی انجام گرفته است. اما با توجه به زلزله‌خیز بودن کشور ایران، تاکنون زلزله‌های زیاد و خطرناکی رخ داده است که باعث شده علاوه بر تحلیل‌های استاتیکی بارهای اضافی ناشی از بار زلزله به سازه‌های زیرزمینی اعمال شوند که خطر ریزش و آسیب در سازه‌های زیرزمینی را چند برابر می‌کند. بنابراین یکی از مباحث مورد اهمیت در رفتار تونل‌ها، پاسخ دینامیکی در برابر بار زلزله می‌باشد. اما با توجه به اینکه سازه‌های زیرزمینی درگیری کاملی با محیط اطراف خود دارند ایمنی بیشتری نسبت به سازه‌های سطحی که تنها قسمت تحتانی آن با زمین درگیر هستند، دارند به طوری که قبل از زلزله سال ۱۹۹۵ ژاپن و زلزله‌های سال ۱۹۹۹ ترکیه و تایوان، باور مهندسين ژئوتکنیک و مکانیک سنگ بر این بوده که سازه‌های زیرزمینی در مقابل بارهای لرزه‌ای، حداقل ریسک را از خود نشان می‌دهند؛ اما در زلزله‌های دهه ۹۰ خسارت‌ها و آسیب‌های سنگینی ناشی از بار زلزله به تونل‌ها وارد شد. بنابراین مهندسان ناگزیر به تحلیل دینامیکی ناشی از بار زلزله در کنار تحلیل‌های استاتیکی شدند. تمامی تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته در مطالعات گذشته بصورت کلی پایداری و یا عدم‌پایداری سازه‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. در صورتی که شناسایی خرابی و پایش سلامت سازه (*Structural Health Monitoring*) یکی از موضوعات بسیار مهم در مهندسی سازه بوده است و عدم توجه به خرابی‌ها تبعات جبران‌ناپذیری را بر روی سازه‌ها خواهد گذاشت. معمولاً اکثر خرابی‌هایی که در سازه‌های زیرزمینی رخ می‌دهند محدود هستند و در یک المان یا در چند المان سازه اتفاق می‌افتد. ولی با گذشت زمان و استمرار بارهای استاتیکی و دینامیکی و عدم توجه به این موضوع، سبب می‌شود تا این خرابی و ترک‌ها در سازه گسترش یابد و در نهایت منجر به بالا رفتن احتمال شکست فضاهای

زیرزمینی، خرابی و حتی ریزش کلی سازه‌های زیرزمینی شود. بنابراین با توجه به هزینه بالا و اهمیت زیاد سازه‌های زیرزمینی باعث شده که تشخیص خرابی در سازه‌ها به عنوان یک موضوع بسیار مهم مطرح شود. در این صورت با تشخیص دقیق و درست المان‌های خراب در سازه‌ها و با تقویت آنها مانند شاتکریت، پیچ سنگ و ... می‌توان از ریزش آن‌ها جلوگیری کرده و خسارت‌های جانی و مالی را به حداقل و یا به صفر رساند. همچنین با شناسایی دقیق و سریع خرابی در سازه می‌توان از بروز آسیب‌های جدی و خطرناک در بلند مدت جلوگیری کرد. در سال‌های اخیر در زمینه کنترل و پایش سلامت سازه تاکنون تحقیقاتی انجام شده که در اینجا به مهمترین آنها اشاره می‌شود. استابز و همکاران در سال ۱۹۹۶ روشی بر مبنای کاهش انرژی کرنشی مودال با استفاده از اشکال مودی در یک پل آسیب‌دیده بیان کردند. آنها با محاسبه اشکال مودی سازه قبل و بعد از خرابی، موقعیت خرابی را تعیین کردند (*Stubbs & Kim, 1996*). ویرا و همکاران در سال ۱۹۹۹ با آزمایش بر روی یک سکوی دریایی مدل شده و ایجاد خرابی در آن، فرکانس‌های طبیعی مدل را با استفاده از تحریک اتفاقی و موجک به دست آوردند و متوجه شدند که در اثر خرابی، کاهش ۰ تا ۳۵ درصدی در سه فرکانس طبیعی اول سازه ایجاد می‌شود. آنها در مطالعه خود ارزیابی عملکرد برخی روسهای تشخیص خرابی را با استفاده از بردارهای ویژه بر روی مدول هیدروالاستیک کوچک مقیاس از سکوی دریایی ثابت که با تئوری مشابه طراحی و ساخته شده بود را انجام دادند (*Viero & Roitman, 1999*). لی و همکاران در سال ۲۰۰۲ دو شاخص خرابی با استفاده از انحنای شکل مودی دو بعدی بنام‌های شاخص ممان خمشی و شاخص شکل مودی کرنشی پسماند را ارائه کردند و از آنها برای تعیین خرابی در یک صفحه با انتهای آزاد استفاده کردند. نتایج نشان داد که شاخص خرابی می‌تواند موقعیت خرابی را بدرستی تشخیص دهد (*Li, et al., 2002*). اونسوا و همکاران در سال ۲۰۰۴، پایش سلامت یک تیر و قابک دهانه را تحت بار استاتیکی و دینامیکی، به کمک روش‌های مختلف تبدیل موجک مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که آسیب دیدگی سازه از داده‌های خام قابل تشخیص نیست ولی سبب اغتشاش در پاسخ سازه می‌شود. این عدم

یکنواختی را می‌توان به کمک ضرایب تبدیل موجک پیوسته یا سیگنال جزئی حاصل از تبدیل موجک گسسته مشخص کرد. نتایج بیانگر این است که موقعیت آسیب با دقت بالایی قابل تشخیص می‌باشد (Ovanesova & Suarez, 2004). ژو و همکاران در سال ۲۰۰۶ روشی بر مبنای تبدیل موجک جهت بررسی تاریخچه زمانی تغییر مکان یک تیر بار متحرک و تشخیص ترک خوردگی ارائه دادند. در این تحقیق مدل عددی و آزمایشگاهی یک تیر و تبدیل موجک پیوسته برای تعیین موقعیت آسیب بکار گرفته شد. علاوه بر این، شاخصی برای تخمین عمق ترک خوردگی ارائه شد (Zhu & Law, 2006). گوکداگ و همکاران در سال ۲۰۰۹، با ترکیب تبدیل موجک پیوسته و گسسته، به آشکارسازی آسیب در تیرها پرداختند. در این روش به کمک تبدیل موجک گسسته، یک تقریب مناسب بیانگر حالت سالم سازه استخراج می‌شود و می‌توان از اختلاف بین ضرایب تبدیل موجک پیوسته حالت آسیب دیده و تابع تقریبی متناظر با سازه سالم به عنوان شاخص مناسبی برای تخمین خسارت سازه استفاده نمود (Gökdağ & Kopmaz, 2009). ژونگ و اوپادیچی در سال ۲۰۱۱ تبدیل موجک پیوسته را برای تشخیص آسیب از داده‌های مودال در تیرهای با تکیه‌گاه ساده به کار بردند. آنها از اطلاعات جابه‌جایی‌های مودال برای تعریف و موقعیت‌یابی آسیب استفاده کردند. نتایج نشان داده که CWT از داده‌های مودال در تیرهای با تکیه‌گاه ساده نشانه‌های بهتری را نسبت به DWT فراهم می‌کند (Zhong & Oyadiji, 2011). فیاد و عبدالرازک در سال ۲۰۱۲ یک تست ارتعاشی برای تشخیص خرابی تکیه‌گاه‌های باربر الاستیک در شاه‌تیرهای پل بتن مسلح با تکیه‌گاه‌های ساده انجام دادند. آنها دریافتند که فرکانس‌های طبیعی برای تشخیص خرابی در تکیه‌گاه‌های باربر الاستیک بسیار حساس‌اند (Fayyadh & Razak, 2012). باقری و کورهلی در سال ۲۰۱۳ روشی برای شناسایی آسیب‌های رخ داده در اثر وقوع زمین‌لرزه با استفاده از تبدیل موجک گسسته (DWT) ارائه کردند (Bagheri & Kourehli, 2013). بائو و همکاران یک روش شناسایی خسارت چند مرحله‌ای معرفی کردند و تبدیل هیلبرت بهبود یافته برای محاسبات به کار گرفته شد. نتایج آنالیز نشان داد که فرکانس‌های آنی می‌توانند وقوع خسارت و فاز آنی می‌تواند

خسارت‌های جزئی را نشان دهد (Bao, et al., 2013). تاری‌نژاد و همکاران در با استفاده از مدل ساختمان سه طبقه به عنوان سیستم سه درجه آزادی به روش جدید ترکیب تبدیل موجک و تجزیه حوزه فرکانس، موفق به شناسایی سیستم شده‌اند به طوریکه تطابق خوبی بین جواب‌های تحلیلی و نتایج وجود دارد. هرچند که نتایج میرایی مود اول اختلاف ۱۷ درصد با مقدار دقیق دارند (Tarinejad & Damadipour, 2014). اندروس و کازینی در سال ۲۰۱۶ روشی برای شناسایی آسیب در تیرهای دارای ترک‌های باز و ناشی از پدیده خستگی با اعمال تبدیل موجک (WT) بر روی سیگنال‌های تغییر مکان ارائه نمودند. آنها علاوه بر آن شاخص آسیب جهت تعیین اندازه ترک معرفی کردند که مستقل از مشخصات مکانیکی تیر همگن، اندازه و محل ترک‌های دیگر در تیرهای دارای چندین ترک است (Andreus & Casini, 2016). سوق‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۵ تشخیص ترک‌های سطحی در قاب را با توجه با تغییر فرکانس طبیعی انجام دادند. آنها از روش اجزای محدود برای محاسبه فرکانس طبیعی سازه ترکدار استفاده کردند. سپس با توجه با اختلاف فرکانس‌های طبیعی در سازه سالم و آسیب دیده و با انجام عمل حل معکوس، محل و عمق خرابی را تعیین کردند (Mousavi Nejad Souq & Baradaran, 2015). تاری‌نژاد و دامادیپور در سال ۲۰۱۶ با استفاده از مدل ساختمان سه طبقه و سد پاکویما به روش جدید ترکیب تبدیل موجک و تجزیه حوزه فرکانس، موفق به شناسایی آسیب در سیستم شده‌اند (Tarinejad & Damadipour, 2016). عادل و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از تبدیل موجک تجربی و تبدیل هیلبرت، روشی برای تشخیص پارامترهای مودال در سازه ساختمانی پیشنهاد دادند. به منظور استخراج ویژگی مناسب ارتعاشی و تشخیص آسیب در پروژه ساختمانی از این روش استفاده کردند (Amezquita-Sanchez, et al., 2017). درویشیان در سال ۲۰۱۹ با استفاده از پردازش سیگنال دامنه زمان فرکانس به شناسایی آسیب در سازه پل کابلی پرداخت و ضمن مقایسه چند روش در این حوزه، روش تبدیل موجک تجربی را به عنوان روشی مؤثر در تشخیص خرابی پیشنهاد داد (Darvishan, 2019). شین و همکاران در سال ۲۰۱۹ روش اصلاحی تبدیل موجک تجربی را برای شناسایی

۲- مختصری از تئوری تبدیل موجک

بکارگیری تبدیلات ریاضی یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین روش در شناسایی خرابی‌ها و آسیب‌ها در سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. در یک نگاه کلی، هدف اصلی تبدیلات ریاضی بر روی یک سیگنال دریافتی، به دست آوردن یک سری اطلاعات اضافی (داده‌کاوی) می‌باشد که در ابتدا در یک سیگنال خام اولیه در حوزه زمان در دسترس نمی‌باشد. در همین راستا تبدیلات موجک یکی از قوی‌ترین تبدیلات ریاضی می‌باشند که قادر هستند اطلاعات سیگنال دریافتی را بخوبی داده‌کاوی کرده و آسیب‌ها و خرابی‌ها را در سازه‌های زیرزمینی شناسایی کنند. برای درک بهتر مفهوم تبدیل موجک لازم است ابتدا خلاصه‌ای از مفاهیم تبدیل فوریه (*Fourier Transform*) بیان شود.

تبدیل فوریه یک سیگنال تابعی توصیفی از توابع سینوسی است که با انتگرال‌گیری در کل بازه سیگنال، به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود (*Mertins & Mertins, 1999*).

$$X(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad \text{when } \omega = 2\pi f \quad (1)$$

در رابطه فوق، t زمان f فرکانس بر حسب هرتز و $X(f)$ تبدیل فوریه سیگنال $x(t)$ است. سیگنال اصلی $x(t)$ با استفاده از معکوس تبدیل فوریه مطابق رابطه زیر قابل بازسازی است (*Mertins & Mertins, 1999*):

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (2)$$

در سیگنال‌های ایستا تبدیل فوریه بخوبی می‌توان محتوای سیگنال را ارائه می‌دهد، اما در سیگنال‌های غیرثابت و گذرا به دلیل وجود فرکانس‌های زیاد و کم (تغییرات ناگهانی)، توابع سینوسی با فرکانس ثابت قادر به شناسایی این تغییرات نخواهد بود. به عبارت دیگر، ضعف تبدیل فوریه در سیگنال‌های ناپایستا این است که در حوزه فرکانس اطلاعات زمان به طور کامل از بین می‌رود و نمی‌توان با استفاده از آن، لحظه وقوع تغییر در سیگنال را مشاهده کرد. به همین دلیل برای رفع این محدودیت، تبدیل فوریه زمان-کوتاه (*Short-Time Fourier Transform*) ارائه شد. در این روش به جای اینکه بر روی کل سیگنال تبدیل فوریه گرفته شود، سیگنال را به پنجره‌هایی با ابعاد

پارامترهای مودال براساس پاسخ‌های اندازه‌گیری شده دینامیکی ارائه دادند (*Xin, et al., 2019*). مانگالاتو و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از تبدیل موجک پیوسته (*CWT*) و تکنیک‌های تحلیل تصویر به شناسایی آسیب و خرابی در یک قاب ساختمانی بتنی غیرقابل اتعطاق با ارتفاع کم و یک پل جعبه-تیر بتنی چهار دهانه در کالیفرنیا پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی، حالت‌های آسیب را با دقت بیش از ۷۵ درصد در هر دو مورد شناسایی می‌کند (*Mangalathu & Jeon, 2020*). سیلیک و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی انتخاب نوع موجک، که یکی از چالش‌های مهم و اساسی در پایش سلامت سازه هستند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که انتخاب نوع موجک در عملکرد شناسایی آسیب و خسارت در سازه‌ها بسیار تأثیر گذار می‌باشند و موجک‌های دابچیز و سیملت از بین سایر موجک‌ها بهترین نتایج را ارائه می‌دهد (*Silik, et al., 2021*). مطابق با تحقیقات انجام شده در بالا، تاکنون از روش‌های مختلف پایش سلامت سازه برای شناسایی و موقعیت ترک در حوزه‌های مختلفی همچون تیرها، سکوها، دریایی، سازه‌های فولادی، پل‌ها استفاده شده است اما هیچگونه مطالعاتی در مورد شناسایی و موقعیت آسیب در سازه‌های زیرزمینی انجام نگرفته است. به همین دلیل نیاز به بررسی و شناسایی ترک در سازه‌های زیرزمینی در برابر انواع بارها (استاتیکی و دینامیکی) یکی از روش‌های جدید و پرکاربرد در حوزه سازه‌های زیرزمینی است که می‌تواند منجر به افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌ها، کاهش خطرات ریزش تونل و خطرات جانی و مالی شوند.

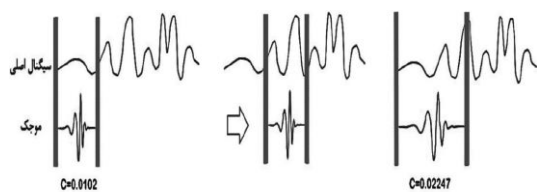
در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از روش‌های عددی به تحلیل استاتیکی و دینامیکی تونل خط ۲ مترو مشهد پرداخته شده است. سپس جابه‌جایی ناشی از بارهای دینامیکی در هر المان که منجر به تغییر در شکل مودی، سختی و خرابی در سازه‌های زیرزمینی می‌شود را بدست آورده و در نهایت جابه‌جایی بدست آمده در هر المان (روش‌های عددی) توسط نرم‌افزار *MATLAB* فراخوانی می‌شود. سپس با استفاده از روش تبدیل موجک گسسته (یکی از روش‌های کنترل سلامت سازه) شدت آسیب و خرابی و همچنین موقعیت آسیب در هر المان شناسایی می‌شود.

موجک به دو دسته موجک پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود. موجک پیوسته از لحاظ ریاضی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Chatterjee, 2015):

$$CWT(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (4)$$

مطابق با رابطه فوق، τ و s به ترتیب پارامترهای انتقال (Translation) و مقیاس (Scale) و $\psi(t)$ موجک مادر (Mother Wavelet) هستند. عبارت مادر به این علت بکار برده شده است که توابع (موجک‌های) متفاوت بوجود آمده براساس پارامترهای انتقال و مقیاس همگی از تابع پایه یا همان موجک مادر ناشی می‌شود. مطابق شکل ۱، برای انجام تبدیل موجک پیوسته بایستی پنج مرحله انجام گیرد، که به شکلی خلاصه بصورت زیر می‌توان ارائه کرد:

در مرحله اول مطابق با کاربرد و مسئله مورد نظر، موجک مادر (تابع موجک) را انتخاب کرده و با بخش ابتدایی سیگنال مقایسه می‌شود و میزان همبستگی بین سیگنال اصلی و تابع موجک است، محاسبه می‌شود. در مرحله دوم، تابع موجک به سمت راست انتقال یافته و ضریب همبستگی به دست می‌آید. عمل انتقال را آنقدر ادامه می‌یابد تا کل طول سیگنال در یکبار طی شده باشد. در مرحله سوم، با توجه به ویژگی مقیاس، تابع موجک را بازتر کرده و از ابتدای سیگنال، موجک را با سیگنال مقایسه کرده و ضریب همبستگی محاسبه می‌شود. این عمل را مطابق با دو مرحله قبلی آنقدر ادامه می‌دهیم تا به انتهای سیگنال برسیم.



شکل ۱- اعمال موجک با مقیاس مشخص و انتقال آن در طول سیگنال (Özaydın & Alak, 2019)

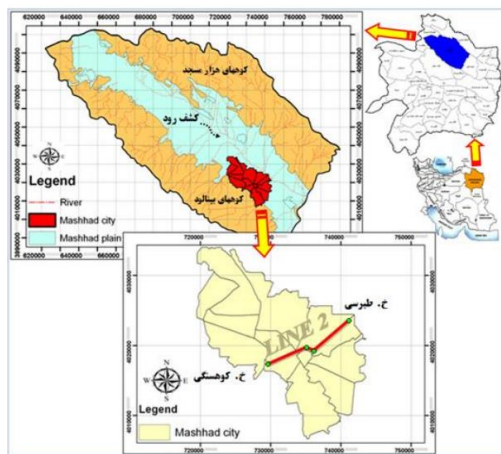
از آنجا که تبدیل موجک پیوسته دارای هم‌پوشانی هستند و محاسبه ضرایب موجک در همه مقیاس‌های ممکن رخ می‌دهد زمان بیشتری برای تحلیل سیگنال‌ها نیاز است و در برخی از رایانه‌ها این محاسبات عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد به همین دلیل تبدیل موجک گسسته جایگزین بسیار مناسبی برای تحلیل سیگنال‌ها می‌باشد. به منظور کاهش

مشخص تبدیل می‌کند و سپس در بازه‌های زمانی مشخص شده در حوزه زمان به وسیله پنجره تبدیل فوریه گرفته می‌شود. با استفاده از این روش حوزه تأثیر هر فرکانس و موقعیت آن در هر بازه زمانی بدست می‌آید. به همین منظور، تبدیل فوریه زمان-کوتاه سیگنال $x(t)$ با استفاده از پنجره زمانی $\omega(t)$ به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Spanos & Failla, 2005):

$$STFT_x^\omega(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega^*(t-\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

در رابطه فوق، f متغیر فرکانسی، ω تابع پنجره و τ متغیر زمانی است. استفاده از روش تبدیل فوریه زمان-کوتاه هم همانند تبدیل فوریه دارای یکسری مشکلات می‌باشد. ایرادی که در مورد این تبدیل وجود دارد، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ (Heisenberg's Uncertainty Principle) می‌باشد. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ به این صورت بیان می‌شود که آگاهی و شناخت از مقدار دقیق زمان و فرکانس یک سیگنال در یک نقطه مشخص از صفحه زمان-فرکانس غیرممکن است (Babapour Mofrad, et al., 2009). علاوه بر مشکل فوق، از آنجا که طول پنجره‌ها ثابت هستند در سیگنال‌هایی که از بخش‌های پرفرکانس و کم‌فرکانس تشکیل می‌شود دچار مشکل می‌شود زیرا در صورتی که ابعاد پنجره بزرگ در نظر گرفته شود محتوای فرکانسی بخش‌های پرفرکانس و گذرا (نشان‌دهنده آسیب) شناسایی نمی‌شوند در حالی که اگر ابعاد پنجره کوچک در نظر گرفته شود بخش‌های پرفرکانس بخوبی شناسایی اما بخش‌های کم‌فرکانس دچار مشکل می‌شود. تبدیل موجک روش جدید برای تحلیل سیگنال‌ها است که می‌تواند جنبه‌های مخفی اطلاعاتی که روش‌های دیگر تحلیل سیگنال در شناسایی آنها شکست خوردند، را آشکار کند. در واقع در این روش با متغیر در نظر گرفتن ابعاد پنجره قادر هستند که اطلاعات محتوای فرکانسی و زمانی را در هر لحظه از سیگنال بدست آورد. در روش تبدیل موجک به جای استفاده از واژه پنجره از اصطلاح موجک مادر استفاده می‌شود. موجک‌های مادر یکسری موجک‌ها با شکل و رابطه مشخص شده هستند که به دلیل دو ویژگی مهم انتقال و مقیاس، موجک‌های مادر با سیگنال اصلی ناشناخته مقایسه شده و موجب شناسایی اطلاعات نهفته در سیگنال می‌شود. به طور کلی توابع

نظر گرفتن فاصله حمل و جنس سنگ منشأ، که عمدتاً رسوبی است، رسوب‌های برجا مانده این روخانه به جز محدوده بستر اصلی رودخانه کشف‌رود، عمدتاً از نوع درشت‌دانه است و شامل شن و ماسه هستند. با توجه به اینکه مشهد در بخش جنوبی رودخانه کشف‌رود واقع است، رودخانه‌هایی که از بینالود سرچشمه گرفته‌اند، نقش بیشتری در شکل‌گیری آبرفت شهر مشهد داشته‌اند. بطور کلی در دشت مشهد از جنوب به جنوب غرب به طرف شمال شرق آن بافت خاک دانه‌ریزتر می‌شود. موقعیت دشت و شهر مشهد و همچنین مسیر خط ۲ قطار شهری در شکل ۳، نشان داده شده است.



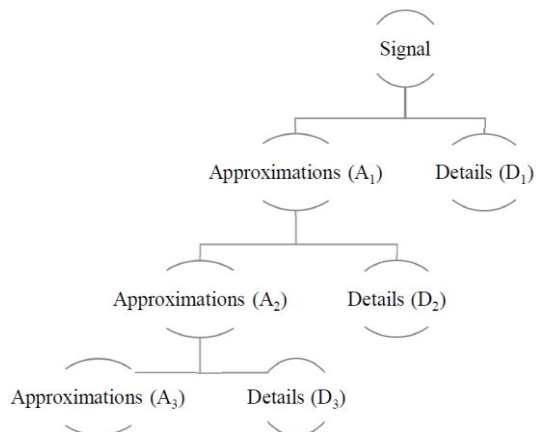
شکل ۳- موقعیت شهر مشهد در حوضه آبریز کشف‌رود و مسیر خط ۲ قطار شهری
(Rajabzadeh Women, et al., 1388)

تمامی خصوصیات زمین‌شناسی، وضعیت زیرسطحی و پارامترهای مهندسی در مسیر حفاری تونل، از ۶۰ گمانه و ۹ چاهک دستی با مغزه‌گیری ممتد به اعماق ۴۴ تا ۴۵ متر، استفاده شده است. تمامی مطالعات انجام شده در مسیر تونل توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش‌های طبقه‌بندی، تک‌محوری، سه‌محوری، برش مستقیم، نفوذپذیری و همچنین آزمایش‌های برجا شامل آزمایش‌های پرسیمتری (Pressuremeter Test)، بارگذاری صفحه‌ای (Plate Load Test)، نفوذ استاندارد (Standard Penetration Test) و آزمایش‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای صورت گرفته است. با توجه به مطالعات انجام شده، سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز کف تونل در مقطع مورد

میزان داده‌های حاصل از آنالیز و سرعت بخشی به فرآیند آنالیز، پارامترهای مقیاس و انتقال را دو برابر کرده و بر مبنای سیستم دودویی به صورت شمارنده 2^j برای پارامتر مقیاس و $2^j k$ برای پارامتر انتقال انتخاب می‌شود و سپس از آن بصورت رابطه ۵ انتگرال‌گیری می‌شود (Mallat, 1999).

$$DWT_{\psi}^x(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi \left(\frac{t - 2^j k}{2^j} \right) dt \quad (5)$$

در حقیقت در این روش سیگنال اصلی از دو نوع فیلتر عبور می‌کنند، فیلتر نوع اول تقریب و کلیاتی از سیگنال را نتیجه می‌دهد که در واقع سیگنال با فرکانس‌های پایین هستند و دیگر جزئیات سیگنال را بخوبی نشان می‌دهند و نتیجه آن سیگنال با محتوای فرکانس بالا می‌باشد. سپس از بخش پر فرکانس دوباره سیگنال انقدر شکسته می‌شود تا بتوان تمامی اطلاعات و محتوای فرکانسی شامل آسیب و خرابی را شناسایی کرد. شکل ۲، عملکرد موجک گسسته در تجزیه داده‌های سیگنال را نشان می‌دهد.



شکل ۲- دیاگرام درختی تجزیه چند مرحله‌ای تبدیل موجک گسسته (Burrus, 1997)

۳- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل مشهد

دشت مشهد دشتی سیلابی متأثر از دو سیستم رسوب‌گذاری است. سیستم اول، رسوب‌گذاری به وسیله کشف‌رود است که زهکشی اصلی دشت است. سیستم دوم، رسوب‌گذاری در این دشت به وسیله آبراهه‌های فرعی ناشی از ارتفاعات هزار مسجد در شمال و ارتفاعات بینالود در جنوب است. رودخانه کشف‌رود از ارتفاعات رادکان در شمال غرب و در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری شهر مشهد سرچشمه می‌گیرد. با در

پارامترهای ژئوتکنیکی خاک درونگیر تونل بصورت جدول ۱، ارائه شده است. همچنین پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی در دوغاب و پوشش بتنی در جدول ۲، گزارش شده است.

مطالعه می‌باشد. به همین دلیل، در تمامی تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی انجام شده از وجود آب زیرزمینی و اثر آن بر سازه تونل چشم‌پوشی شده است. با توجه به مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در مسیر حفاری مترو مشهد

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های خاک درونگیر مقطع مورد نظر (Rajabzadeh Women, et al., 1388)

شماره لایه	ضخامت	نوع خاک	C(KPa)	φ°	E(MPa)	U	γ_d (KN/m ³)	K0
۱	۰-۸	CL-ML	۳۰	۲۳	۱۲	۰/۳۴	۱۷/۵	۰/۵۶
۲	۸-۱۵	SC-SM	۰	۳۵	۷۰	۰/۳	۱۸	۰/۴۳
۳	۱۵-۲۰/۳	CL-SM	۳۰	۲۵	۱۲/۵	۰/۳۴	۱۷	۰/۵۳
۴	۲۸-۲۰/۳	SC-SM	۰	۳۶	۸۰	۰/۳	۱۹	۰/۳۶
۵	۲۸-۳۰	CL-ML	۴۰	۲۵	۳۰	۰/۳۲	۱۸	۰/۵۳

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی المان‌های دوغاب و پوشش بتنی

(Lelovic & Vasovic, 2020; Rajabzadeh Women, et al., 1388)

نوع المان	ضخامت	C(KPa)	φ°	U	E(MPa)	ضخامت (cm)
دوغاب	۱۵۰۰	۶۰۰	۳۵	۰/۲۵	۴۰	۱۲
پوشش بتنی	۲۶۰۰	۵۵۰۰	۴۸/۶	۰/۲	۳۰۰۰	۳۵

جلوتر حفاری، از نرم‌افزار 3DEC در کنار نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020 استفاده شده است و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. با توجه به توضیحات فوق، در کدنویسی صورت گرفته در نرم‌افزار 3DEC هیچگونه درزه و دسته‌درزه‌ای تعریف نشده و به عبارتی در کدنویسی این بخش پنهان (Hidden) شده است و به محض اینکه در هنگام حفاری به یک لایه سنگ برخورد کنیم این بخش را می‌توان فعال (Active) کرد تا بتوان تحلیل درستی از مدل انجام داد. لازم به ذکر است از آنجا که روش حل دو نرم‌افزار با یکدیگر متفاوت هستند، متفاوت بودن جزئی تحلیل‌ها توسط دو نرم‌افزار منطقی می‌باشد. در ادامه به تحلیل استاتیکی تونل خط ۲ مترو مشهد پرداخته می‌شود.

۴-۱- هندسه، شرایط مرزی

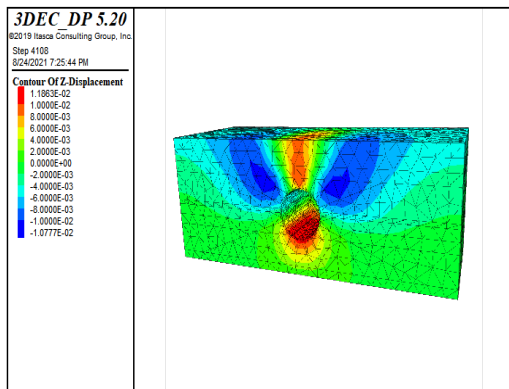
اولین قدم در اجرای یک مدل هندسی در نرم‌افزارهای عددی ساخت هندسه مدل می‌باشد. برای ایجاد مدل هندسی ابعاد مدل بایستی به اندازه‌های بزرگ باشند تا تأثیر مرزها بر روی رفتار مدل، به حداقل و یا به صفر برسد تا مدل‌سازی به درستی انجام گیرد. با توجه به راهنمای نرم‌افزارهای 3DEC و PLAXIS^{3D}2020 مرزهای مدل در

از آنجا که عدم قطعیت در خاک و سنگ بسیار بالا می‌باشد و مشخصات هر نقطه با نقطه بعدی متفاوت است، ممکن است در مسیر حفاری به خاک‌های با مقاومت بالا که تقریباً رفتاری همچون سنگ دارند برخورد کرد. بنابراین پیش‌بینی این موضوع بسیار مهم بوده و بایستی در تحلیل‌ها این مورد رعایت شود. به همین دلیل نقشه‌های بافت شهری ارائه شده بصورت کلی بوده و جزئیات نقطه به نقطه در مسیر حفاری را نشان نمی‌دهد.

۴-۲ تحلیل استاتیکی خط ۲ مترو مشهد

عدم قطعیت در پارامترهای زمین و همچنین پیش‌بینی رفتار زمین در هنگام حفاری یکی از چالش‌های مهم و اساسی در بحث حفاری مکانیزه می‌باشد. از آنجا که تونل در محیط شهری حفاری شده و از نظر زمین‌شناسی جنس مصالح بصورت خاک می‌باشد و هیچ‌گونه دسته درزه و یا درزه‌ای در خاک معنا ندارد از نرم‌افزار قدرتمند PLAXIS^{3D}2020 استفاده شده است. اما با توجه به متفاوت بودن نقطه به نقطه خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح، پیش‌بینی گام‌های

به نشست‌های سطح زمین و خرابی سازه‌های سطحی می‌شوند. به همین دلیل، محاسبه جابه‌جایی‌های قائم در تحلیل استاتیکی سازه‌های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت می‌باشند. شکل ۵، جابه‌جایی قائم پس از حفر ۲۰ متر تونل ابتدایی، توسط نرم‌افزار 3DEC را نشان می‌دهد.

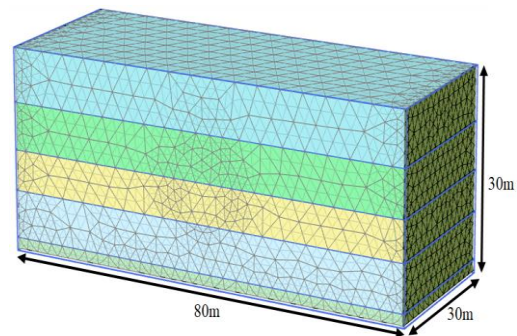


شکل ۵- کانتور تغییرات جابه‌جایی قائم تونل در نرم‌افزار 3DEC

پس از محاسبه جابه‌جایی قائم تونل، یکی دیگر از ناحیه‌های مهم در تحلیل‌های استاتیکی فضاهای زیرزمینی محاسبه جابه‌جایی‌های سینه‌کار حفاری می‌باشد. در صورتی که جابه‌جایی‌ها سینه‌کار زیاد باشند مطابق با روش همگرایی، نشست‌های زیادی در سطح زمین رخ می‌دهد که منجر به نابودی پوشش بتنی، خرابی و اعوجاج سازه‌های سطحی و همچنین گیر کردن سپر ماشین حفاری می‌شود (Lunardi, 2008). با توجه به توضیحات فوق، شکل ۶، جابه‌جایی در راستای محور حفاری (محور y) توسط نرم‌افزار 3DEC را نشان می‌دهد

همانطور که از شکل مشخص است، از آنجا که جابه‌جایی در راستای محور حفاری مدنظر است جابه‌جایی در راستای محور x و z که با رنگ نارنجی مشخص شده است، صفر می‌باشد و ماکزیمم جابه‌جایی در راستای محور y که با رنگ آبی مشخص شده است ۰/۱۰۶ متر می‌باشد که در هنگام حفاری با ماشین مکانیزه بایستی فشار کله برش را با جابه‌جایی سینه‌کار تنظیم کرد.

صورتی که در فاصله ۵ تا ۸ برابری شعاع تونل قرار بگیرند درصد خطا به حداقل مقدار خود می‌رسد. مطابق شکل ۴، با توجه به قطر ۱۲ متری تونل، مدلی با ابعاد $۸۰ \times ۳۰ \times ۳۰$ در نظر گرفته شده است (Basarir, 2006). به منظور افزایش دقت و سرعت در محاسبات، چگالی مش‌بندی با دور شدن از اطراف تونل افزایش یافته است. تونل مذکور در بالای سطح ایستابی قرار دارد و تمامی محاسبات در شرایط بدون آب زیرزمینی انجام شده است.



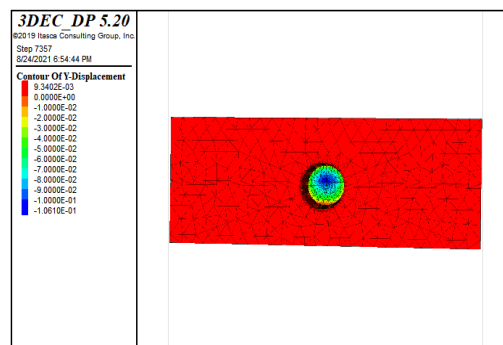
شکل ۴- نمایش ابعاد و هندسه تونل

۴-۲- حفاری تونل با نگهداری پوشش بتنی

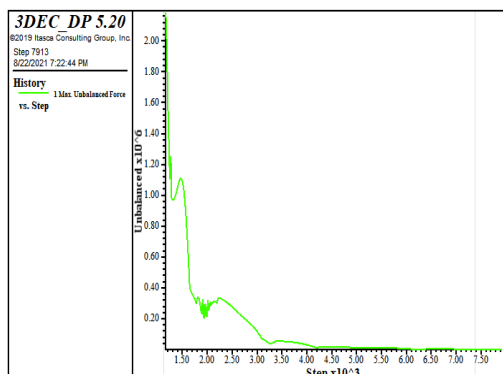
تونل در محدوده مورد مطالعه بصورت مکانیزه و توسط دستگاه حفاری *TBM* از نوع *EPB* حفر شده است از آنجا که حفاری توسط دستگاه *EPB-TBM* یک پروسه پیوسته است و تمام مراحل حفاری از قبیل پیشروی تونل، تزریق دوغاب و پوشش بتنی بصورت همزمان انجام می‌گیرد. در چند سال اخیر برای شبیه‌سازی این فرآیند استفاده از روش‌های گام‌به‌گام متداول شده و بسیاری از محققان از این روش استفاده می‌کنند. در مدل‌سازی مدنظر گام حفاری ۲ متر در نظر گرفته شده است و پس از هر ۲ متر حفاری عملیات نصب پوشش بتنی و تزریق دوغاب صورت می‌گیرد. بنابراین از آنجا که محور y در راستای حفاری قرار دارد و ۲۰ متر از ۳۰ متر آن حفاری شده است پس از ۱۰ مرحله حفاری، لاینینگ و تزریق دوغاب می‌توان نتایج ناشی از حفاری را تحلیل کرد.

از آنجایی که تونل در نزدیکی سطح زمین قرار دارد جابه‌جایی‌های قائم تا سطح زمین کشیده می‌شود که منجر

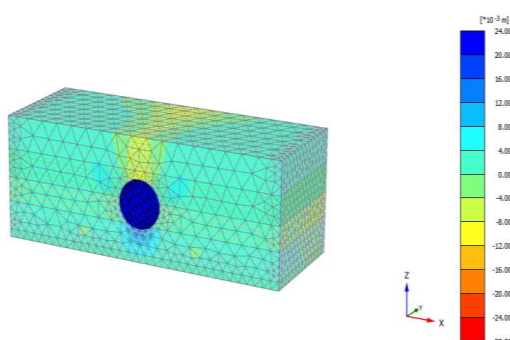
شکل ۶- کانتور تغییرات جابه‌جایی در راستای محور حفاری



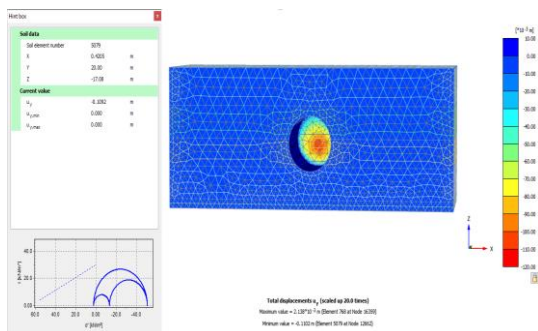
شکل ۶- کانتور تغییرات جابه‌جایی در راستای محور حفاری
تونل در نرم‌افزار 3DEC



شکل ۷- نیروی نامتعادل کننده بعد از حفاری



شکل ۸- کانتور تغییرات جابه‌جایی قائم تونل در نرم‌افزار
PLAXIS^{3D2020}



شکل ۹- کانتور تغییرات جابه‌جایی در راستای محور حفاری تونل
در نرم‌افزار PLAXIS^{3D2020}

مطابق با خروجی نرم‌افزار PLAXIS^{3D2020} از آنجا که جابه‌جایی در راستای محور y ملاک است تمامی جابه‌جایی‌ها در راستای محور x و z که به رنگ آبی

از آنجا که نرم‌افزار 3DEC یک برنامه صریح می‌باشد، حل مسئله نیاز به تعدادی گام محاسباتی دارد. در زمان اجرای گام‌های محاسباتی، اطلاعات پدیده مورد بررسی به بلوک‌های درون مدل داده می‌شود. تعداد گام مشخصی برای رسیدن به حالت تعادل برای یک تحلیل استاتیکی لازم است. 3DEC بطور پیشفرض یک تحلیل استاتیک را از طریق الگوریتم میراشوندگی مکانیکی (*Mechanical Damping Algorithm*) موسوم به میراشوندگی سراسری انطباقی (*Adaptive Global Damping*) انجام می‌دهد. بنابراین نرم‌افزار 3DEC قادر است که به منظور درستی مدل، نیروهای نامتعادل کننده را در برابر گام‌های تعیین شده بصورت پیشفرض رسم کند. لازم به ذکر است در حالت تعادل، در صورتی که نسبت نیروهای نامتعادل کننده کمتر از ۰/۰۰۱ باشند و به سمت صفر میل کند، تعادل بدرستی صورت گرفته است. شکل ۷، روند تغییرات حداکثر نیروی نامتعادل کننده، بعد از حفاری را نشان می‌دهد.

پس از تحلیل استاتیکی تونل مذکور با استفاده از نرم‌افزار 3DEC به منظور مقایسه نتایج با نرم‌افزار PLAXIS^{3D2020} روند مدل‌سازی که با نرم‌افزار 3DEC انجام شد تکرار می‌شود. به همین منظور، شکل ۸، جابه‌جایی قائم پس از حفر ۲۰ متر تونل ابتدایی، توسط نرم‌افزار PLAXIS^{3D2020} را نشان می‌دهد.

با مقایسه دو نرم‌افزار با یکدیگر می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار جابه‌جایی قائم تقریباً مشابه یکدیگر هستند اما با توجه به متفاوت بودن روش حل دو نرم‌افزار طبیعی است که مقداری تفاوت وجود داشته باشند. شکل ۹، جابه‌جایی در راستای محور حفاری (محور y) توسط نرم‌افزار

زلزله، مجدد مورد بررسی قرار بگیرد تا از اعوجاج موج زلزله در مدل جلوگیری شود.

لایسمر و کالمیر نشان دادند که برای اطمینان پیدا کردن انتقال صحیح امواج در یک مدل مش‌بندی شده، باید بزرگترین ابعاد المان (ΔL) کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بزرگترین فرکانس موج ورودی باشد. به عبارت دیگر بصورت زیر تعریف می‌شود (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973):

$$\Delta L \leq (1/8 - 1/10)\lambda_{\max} \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{C_s}{f_{\max}} \quad (7)$$

که در آن λ_{\max} طول موج ایجاد شده، C_s تنش برشی و f_{\max} فرکانس غالب زلزله می‌باشد. همانطور که گفته شد مقدار f_{\max} مطابق شکل ۱۱ توسط نرم‌افزار *SeismoSignal* و مقدار C_s توسط نرم‌افزارهای عددی و مطابق رابطه ۸ قابل محاسبه است (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973):

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (8)$$

که در آن G مدول برشی و ρ چگالی خاک منطقه می‌باشد. ماکزیمم ابعاد مش با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

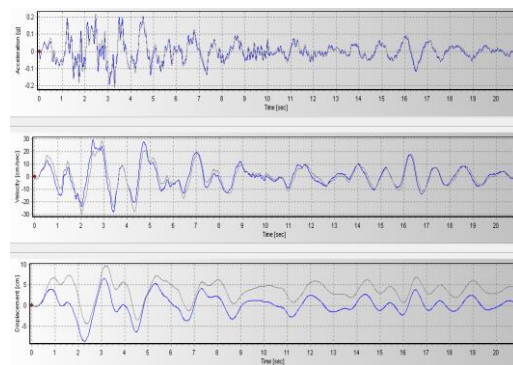
$$L_{\max} = \frac{C_s}{10f_{\max}} \quad (9)$$

با استفاده از فرکانس غالب و سرعت موج برشی که با توجه به خصوصیات محیط و براساس طبقه‌بندی موجود در آیین‌نامه ساختمان ۲۸۰۰ تعیین می‌شود، از رابطه ۶ بزرگترین بعد المان جهت انتقال صحیح موج مورد مطالعه در هر مدل، محاسبه شده است. با توجه به مطالب فوق، حداکثر ابعاد مش‌بندی برای تونل مذکور جهت انتقال صحیح موج مورد مطالعه، طبق محاسبات باید کمتر از ۵ متر باشد. بزرگترین بعد المان مجاز محاسبه شده در این تحقیق ۴/۵ متر می‌باشد.

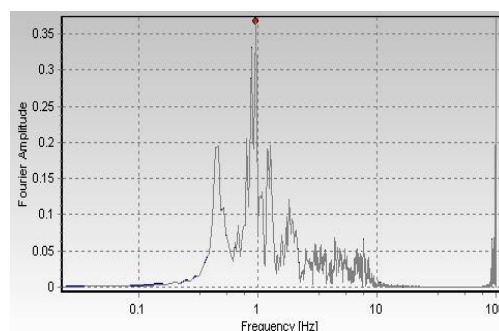
۵-۳- تعیین مرزهای دینامیکی

در یک مدل دینامیکی صحیح، امواج ورودی به مدل باید میرا گشته و از بین بروند تا بتوان شرایط واقعی مدل را مدل‌سازی نمود. بنابراین تعریف شرایط مرزی برای مدل ضروری می‌باشد. به طور کلی دو نوع مرز برای هر مدلی

تصحیحات انجام شده بر روی شتاب‌نگاست، مطابق شکل ۱۱، توسط نرم‌افزار *SeismoSignal* قابل محاسبه می‌باشد.



شکل ۱۰- تاریخچه زمانی مؤلفه‌های افقی شتاب، سرعت و جابه‌جایی قبل و بعد از تصحیح



شکل ۱۱- تعیین فرکانس غالب توسط نرم‌افزار *SeismoSignal*

۵-۲- انتخاب اندازه المان‌ها

مشابه روش‌های تحلیل استاتیکی، یکی از مسائل بسیار مهم و تأثیرگذار در آنالیزهای دینامیکی بحث مش‌بندی مدل می‌باشد. زیرا در صورتی که ابعاد مش‌ها خیلی کوچک باشد، زمان اجرای محاسبات برنامه بسیار زمان‌بر بوده و در بسیاری از موارد در سیستم‌های ضعیف اجرای برنامه با مشکل سخت‌افزاری برخورد می‌کند. همچنین زمانی که ابعاد مش‌ها بزرگ در نظر گرفته شود، سبب کاهش تعداد گره‌ها در مدل شده و در این حالت دقت تحلیل‌ها پایین می‌آیند (Gupta, et al., 2010). همین مسئله در مورد تحلیل‌های استاتیکی هم پابرجاست که قبلاً به آن پرداخته شده است. از آنجا که مش‌بندی در مرحله مدل‌سازی استاتیکی صورت گرفته است، نیاز است تا اندازه المان‌ها جهت انتقال صحیح موج

مدل (سطح زمین) به سمت پایین منعکس می‌شوند. این امواج پس از برخورد با پایه مدل توسط میراگرها جذب شده و از انعکاس مجدد آن ممانعت به عمل می‌آید (Zhu et al., 2010).

۴-۵- میرایی مصالح

برای اجرای تحلیل دینامیکی در هر برنامه‌ای معمولاً به حساب آوردن افت‌های انرژی و میرایی در سیستم واقعی که در الگوریتم‌های عددی مدنظر قرار نمی‌گیرند، لازم است به طور کلی برای سیستم‌های بسیار الاستیک از میراشوندگی بسیار کمی استفاده می‌شوند و بیشتر برای مواد ژئومکانیکی مخصوصاً خاک به کار می‌رود. در صورتی که میراشوندگی در مصالحی مانند خاک در نظر گرفته نشود، سیستم در مقابل بار دینامیکی، تا ابد ارتعاش می‌کند و هیچ‌گاه آثار لرزش از سیستم از بین نمی‌رود و برای همیشه سیستم در حال لرزش می‌باشد که چنین اتفاقی به هیچ عنوان در واقعیت رخ نخواهد داد. به همین دلیل بایستی میراشوندگی در مصالحی همچون خاک در مدل‌سازی مدنظر قرار بگیرد.

عموماً در تحلیل پیوسته‌ی سازه‌ها از میراشوندگی رایلی نسبی برای میرا کردن موده‌های نوسانات طبیعی سیستم استفاده می‌شود. در تحلیل المان محدود دینامیک یک ماتریس میراشوندگی C تشکیل داده می‌شود که مؤلفه‌های آن متناسب با ماتریس‌های جرم M و سفتی K است (Gupta, et al., 2010).

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (10)$$

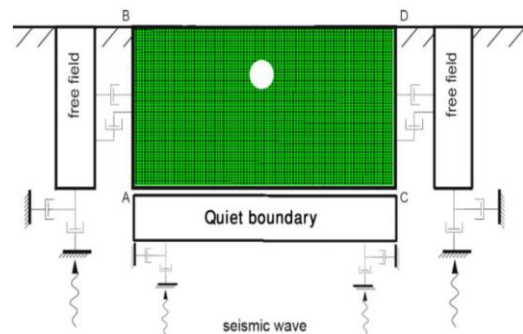
که در آن α ثابت میراشوندگی جرم متناسب و β ثابت میراشوندگی سفتی متناسب است. ضرایب عنوان شده توسط روابط ۱۱ و ۱۲ قابل محاسبه هستند (Verdion 4 Users Manual, 2020):

$$\alpha = \frac{\zeta}{\pi \cdot f_m + \pi \cdot f_n} \cdot (4\pi^2 \cdot f_m \cdot f_n) \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\zeta}{\pi \cdot f_m + \pi \cdot f_n} \cdot (1) \quad (12)$$

(مرز آزاد و مرز ویسکوز) می‌توان تعریف کرد. در مدل‌سازی دینامیکی لازم است که ابعاد مدل با مرزهای مصنوعی محدود شود. وجود این نوع مرزها باعث می‌شود موج پس از برخورد به آنها منعکس شود و دوباره به مدل برشود. در نتیجه، نتایج صحیحی از تحلیل در مدل بدست نمی‌آید. با توجه به اینکه امواج میرا می‌شوند، می‌توان از مدل‌های بزرگ استفاده کرد ولی این کار زمان و حافظه مورد نیاز برای تحلیل را افزایش می‌دهد ضمن اینکه با بزرگ کردن مدل، نمایش درستی از حفاری تونل ایجاد نمی‌شود. در نتیجه برای رهایی از این مشکلات از مرزهای ویسکوز که در واقع جاذب انرژی هستند استفاده می‌شود و از بازتاب آن به داخل مدل جلوگیری می‌کند.

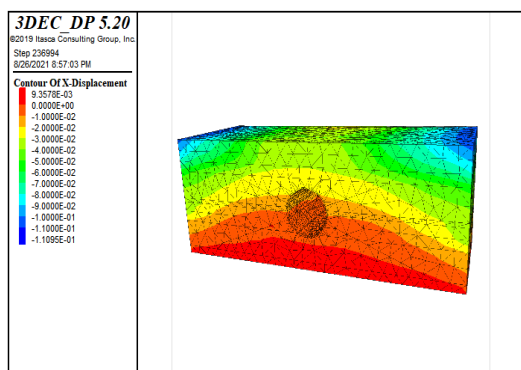
در مدل‌سازی سازه‌های سطحی مانند سدها و یا سازه‌های زیرزمینی نزدیک به سطح مانند متروها، شرایط مرزی در اطراف مدل بایستی قابلیت حرکت میدان آزاد زمین را بوجود آورد. حرکت میدان آزاد به این مفهوم است که موج عبوری از نزدیک مرزها تحت تأثیر پاسخ سازه قرار نگرفته و شکل دامنه موج مشابه موج ورودی باشد. مرز میدان آزاد در تحلیل‌های دینامیکی را می‌توان معادل مرز جابه‌جایی یا تنش در تحلیل‌های استاتیک دانست. شکل ۱۲، در طرفین مدل مرزهای آزاد تعبیه شده که با استفاده از میراگرهای افقی و قائم به مدل متصل می‌شوند.



شکل ۱۲- شکل نمایی از مرزهای آزاد برای تحلیل دینامیکی (Gupta, et al., 2010)

به منظور جلوگیری از انعکاس موج به داخل مدل از مرزهای ویسکوز در پایه مدل استفاده شده است. همچنین این مرزها در پایه مرزهای میدان آزاد نیز اعمال شده است. به این ترتیب امواج زلزله پس از برخورد با مرزهای بالای

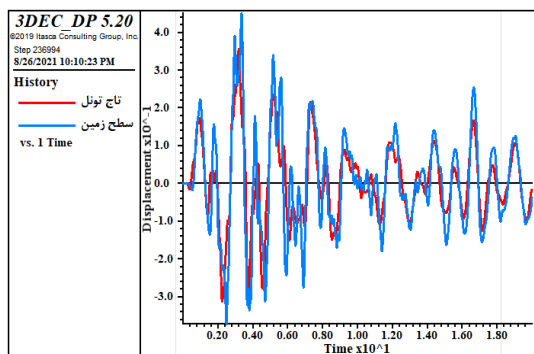
را به خطر می‌اندازد. به همین دلیل شکل ۱۳، جابه‌جایی‌های حاصل از بار زلزله در راستای محور x در نرم‌افزار 3DEC را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- جابه‌جایی ناشی از بار زلزله در راستای مؤلفه افقی در نرم‌افزار 3DEC

همچنین شکل ۱۴، جابه‌جایی تونل را در نقاط مهم سطح زمین و تاج تونل (روی سقف پوشش بتنی) در راستای محور x در زمان‌های مختلف بارگذاری (۲۰ ثانیه) در نرم‌افزار 3DEC نشان می‌دهد.

شکل ۱۵، جابه‌جایی‌های حاصل از بار زلزله در راستای محور x در نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020 را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- نمودار جابه‌جایی حاصل از بار زلزله در تاج تونل و سطح زمین

شکل ۱۶، جابه‌جایی تونل را در نقاط مهم سطح زمین و تاج تونل (روی سقف پوشش بتنی) در راستای محور x در زمان‌های مختلف بارگذاری (۲۰ ثانیه) در نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020 را نشان می‌دهد.

در روابط فوق، f_m و f_n درصد میرایی رایلی، f_m و f_n فرکانس‌های طبیعی موده‌های ارتعاشی متناظر از رابطه زیر بدست می‌آیند (" PLAXIS^{3D} Verdition 4 Users Manual," 2020):

$$f_n = \frac{V_s}{4H} \cdot (2n - 1) \quad (13)$$

در این رابطه، V_s سرعت موج برشی خاک، H ضخامت لایه خاک و n مود ارتعاشی است. لازم به ذکر است که نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020 تنها دو مود ارتعاشی ابتدایی را در نظر می‌گیرد.

برای سیستمی با درجات آزادی چندتایی، می‌توان در هر فرکانس زاویه‌ای سیستم از رابطه زیر نسبت میراشوندگی بحرانی ξ_i را از دو رابطه (۱۴) و (۱۵) پیدا کرد ("Verdition 5.20 Users Manual," 2019):

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\xi_i \quad (14)$$

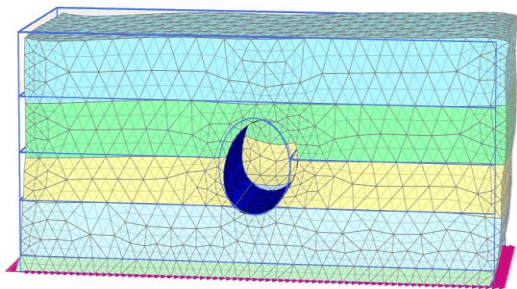
$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta\omega_i \right) \quad (15)$$

در مصالح ژئوتکنیکی که با مصالح خاک و سنگ روبه‌رو هستند میرایی مصالح معمولاً بین ۲ تا ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. به همین خاطر در مطالعه فوق میراشوندگی برابر ۵ در نظر گرفته شده است.

۵-۵- خروجی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی

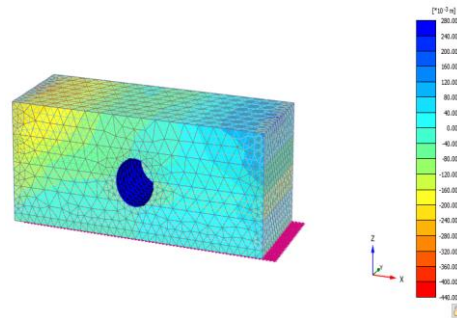
پس از تحلیل استاتیکی و همچنین تعیین مش‌بندی، شرایط مرزی، اعمال بار لرزه و میرایی در خاک، می‌توان نتایج تحلیل دینامیکی تونل مذکور با استفاده از نرم‌افزارهای 3DEC و PLAXIS^{3D}2020 با یکدیگر مقایسه و آنالیز کرد. همانطور که گفته شد، از آنجا که داده‌های شتاب‌نگاشت‌های افقی (محور x) زلزله مشهد به مدل اعمال شد، بررسی جابه‌جایی‌های افقی که منجر به تنش برشی در تونل می‌شود از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در صورتی که شتاب‌نگاشت‌های قائم به مدل اعمال می‌شد در این حالت جابه‌جایی‌های قائم ملاک کار قرار می‌گرفت. اما بایستی این نکته را متذکر شد که در مدل‌سازی تحلیل‌های دینامیکی تمامی‌سازه‌ها معمولاً تنش‌های برشی در نظر گرفته می‌شود. زیرا از آنجا که زلزله‌ها بصورت رفت و برگشتی در جهت افقی می‌باشند سبب برش در سازه می‌شوند و پایداری سازه

حالت اولیه خود می‌شوند لذا یک شکل خاصی در تونل ناشی از تحریک بار زلزله ایجاد می‌شود. این شکل خاص را اصطلاحاً اشکال مودی ارتعاش سازه می‌گویند که در سازه‌های چند طبقه یا به عبارت دیگر سازه‌های چند درجه آزادی بیشتر قابل مشاهده می‌باشد. این تغییر شکل ممکن است در لحظات مختلف بار زلزله شکل‌های مختلفی را از خود نشان دهد که این تغییر شکل‌ها در سازه‌های زیرزمینی منجر به تغییر در پارامترهایی از قبیل جرم و ماتریس سختی سازه شده و منجر به ترک و یا شکستگی در سازه زیرزمینی یا سازه‌های سطحی می‌شود و در نتیجه می‌توان از تغییرات در پارامترهای مودال با استفاده از تبدیلات موجک برای شناسایی آسیب در سازه‌ها استفاده نمود. به همین دلیل نمایش شکل مودی برای شناسایی سازه بسیار مؤثر می‌باشد. حالت ارتعاش اول (مود اول) که ساده‌ترین حالت ارتعاش می‌باشد معمولاً در اکثر سازه‌ها ارتعاش غالبی هستند. یعنی بیش از ۸۰ تا ۹۰ درصد پاسخ سیگنال در مود اول نفهته شده است و بقیه پاسخ‌های سیگنال در موده‌های دوم، سوم و ... واقع شده است. بنابراین مود اول ارتعاش مهمترین و ساده‌ترین حالت ارتعاش سازه زیرزمینی مدنظر می‌باشد. شکل ۱۷، مود اول ارتعاش سازه زیرزمینی در زمان ۱۰ ثانیه ابتدایی تونل را نشان می‌دهد.

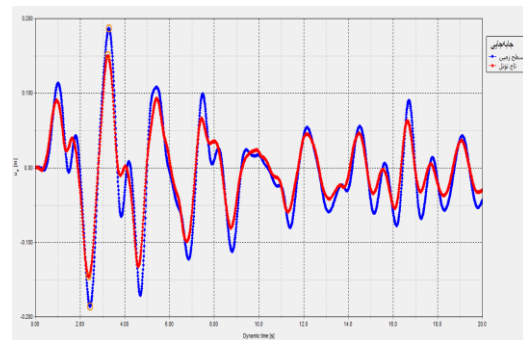


شکل ۱۷- شکل مودی اول ارتعاش سازه در ۱۰ ثانیه ابتدایی زلزله

همانطور که از شکل ۱۷، مشخص است، تونل در ۱۰ ثانیه ابتدای زلزله منجر به تغییر شکل‌های زیادی در راستای مؤلفه افقی نسبت به حالت اولیه خود شده است که ممکن است به دلیل کاهش سختی سازه، منجر به ترک و گسیختگی در تونل شود. همین روال را می‌توان در لحظات مختلف بار زلزله نشان داد. به همین ترتیب، شکل ۱۸،



شکل ۱۵- جابه‌جایی ناشی از بار زلزله در راستای مؤلفه افقی در نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020*



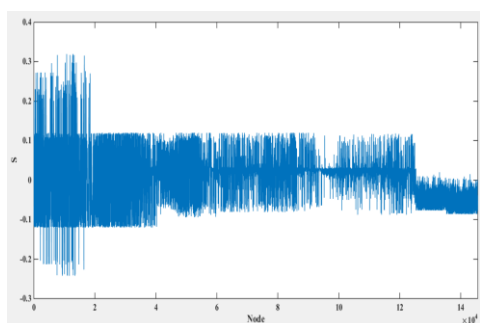
شکل ۱۶- نمودار جابه‌جایی حاصل از بار زلزله در تاج تونل و سطح زمین

با مقایسه نتایج جابه‌جایی تونل در برابر بار زلزله و همچنین نمودارهای جابه‌جایی در تاج تونل و سطح زمین در دو نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020* و *3DEC* می‌توان دریافت که نتایج همانند تحلیل استاتیکی نزدیک به یکدیگر می‌باشند و تفاوت‌های جزئی به دلیل روش‌های حل دو نرم‌افزار می‌باشند. بنابراین در زمانی که تونل در محیط شهری و آبرفتی (خاکی) در حال حفاری است به دلیل عدم قطعیت در نقطه به نقطه زمین و همچنین احتمال برخورد با لایه‌های سنگی می‌توان از دو نرم‌افزار در کنار یکدیگر استفاده کرد تا به محض برخورد با لایه‌های مختلف بتوان از آن‌ها استفاده کرد.

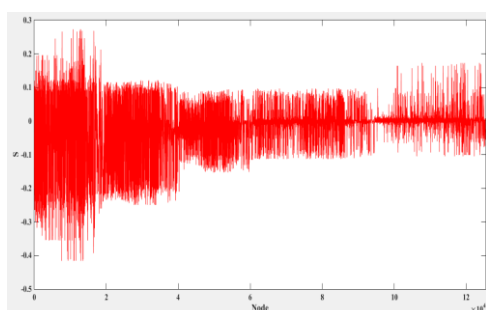
۶- شکل مودی تونل ناشی از ارتعاش سازه زیرزمینی

با توجه به بار زلزله اعمالی به تونل سبب تغییر شکل تونل از

MATLAB را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- سیگنال پاسخ دینامیکی تونل با استفاده از نرم‌افزار 3DEC



شکل ۲۰- سیگنال پاسخ دینامیکی تونل با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D2020

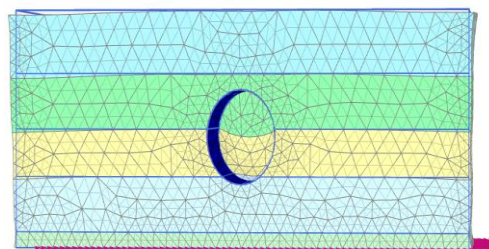
همچنین سیگنال پاسخ دینامیکی به دست آمده توسط نرم‌افزار *PLAXIS3D2020* بصورت شکل ۲۰، می‌باشد.

از آنجا که نتایج تحلیل‌های دینامیکی در دو نرم‌افزار تقریباً مشابه یکدیگر شدند بنابراین سیگنال پاسخ دینامیکی هم تقریباً یکسان خواهد شد. اما همانطور که از شکل مشخص است تعداد گره‌ها در نرم‌افزار *3DEC* بیشتر از *PLAXIS3D2020* می‌باشد که در این حالت سیگنال پیچیده‌تر خواهد شد.

۷-۱- نوفه‌زدایی (*De-Noise*) سیگنال پاسخ دینامیکی

به منظور اعمال بار زلزله در مدل، همانطور که گفته شد از دو روش رکورد زلزله‌های مصنوعی و یا مراجعه به رکوردهای زلزله قبلی می‌توان اینکار را انجام داد. مطابق شکل ۲۱، در هنگام دریافت سیگنال توسط شتاب‌نگاشت‌ها ممکن است یکسری سیگنال‌های ناخواسته، نامطلوب و تصادفی وارد سیگنال اصلی شده و با آن جمع شود و سیگنال را از شکل

مودی اول ارتعاش را در پایان زلزله (۲۰ ثانیه) نشان می‌دهد. به این صورت می‌توان اشکال مودی ارتعاش سازه را در تمامی زمان‌های اعمال بار زلزله مشخص کرد.

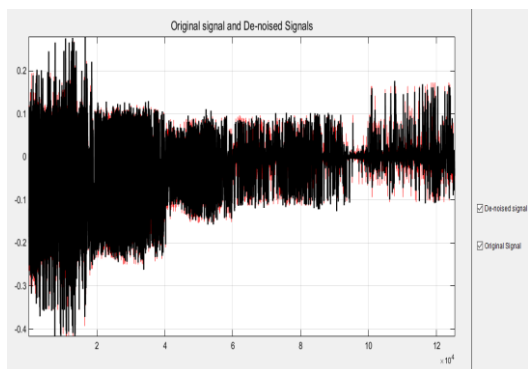


شکل ۱۸- شکل مودی اول ارتعاش سازه در پایان زلزله (۲۰ ثانیه)

همان‌طور که از شکل ۱۸، مشخص است شکل مودی اول ارتعاش سازه در ۲۰ ثانیه یعنی پایان زمان زلزله سبب جابه‌جایی و تغییر شکل‌هایی در گوشه‌های بالای سمت چپ و راست تونل شده است که این تغییر شکل‌ها ممکن است سبب آسیب در سازه شوند.

۷- سیگنال پاسخ دینامیکی تونل

در این بخش پس از مدل‌سازی تونل و همچنین جابه‌جایی در هر گره در مود ارتعاشی اول در ۲۰ ثانیه بار زلزله، باید آسیب در سازه شناسایی شود. برای شناسایی خرابی در تونل ابتدا باید خروجی سیگنال پاسخ دینامیکی توسط نرم‌افزار *PLAXIS3D2020* و *3DEC* در نرم‌افزار *MATLAB* فراخوانی شود. مطابق با شکل ۱۹، از آنجا که سیگنال پاسخ دینامیکی فراخوانی شده بسیار پیچیده، پرفرکانس و گذرا می‌باشد شناسایی آسیب در این مرحله بسیار دشوار و حتی غیرممکن می‌باشد. همانطور که گفته شد با توجه به گذرا بودن بسیار شدید این سیگنال و در نظر گرفتن پنجره‌های یکسان در تبدیل فوریه زمان-کوتاه، اعمال این تبدیل بر روی سیگنال از دقت بالایی برخوردار نبوده و ممکن است بخش گذرای سیگنال که مشخص کننده آسیب در سازه باشد، حذف شود که در این حالت سازه را سلامت نشان می‌دهد. به همین دلیل بایستی با استفاده از تبدیل موجک گسسته، سیگنال پاسخ دینامیکی تونل را در برابر بار زلزله مورد تحلیل قرار داد. شکل ۲۰، سیگنال پاسخ دینامیکی تونل خط ۲ مترو مشهد توسط نرم‌افزار *3DEC* و



شکل ۲۳- نوفه‌زدایی از سیگنال‌های دریافتی توسط نرم‌افزار *PLAXIS3D2020*

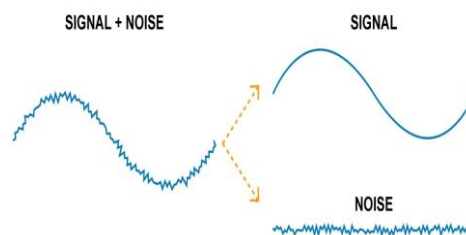
مطابق با شکل‌ها، سیگنال اصلی به رنگ قرمز و سیگنال‌هایی که نوفه از آن‌ها حذف شده است به رنگ مشکی نمایش داده شده است. از خروجی‌های *MATLAB* می‌توان به این نتیجه رسید که سیگنال اصلی با سیگنال نوفه‌زدا بسیار به یکدیگر نزدیک هستند که نشان‌دهنده این موضوع است که در منطقه نوفه کمی وجود داشته است.

۸- شناسایی آسیب در تونل خط ۲ مترو مشهد

در این مرحله از ابزار تبدیل موجک گسسته برای شناسایی آسیب در سازه زیرزمینی استفاده می‌شود. به عبارت دیگر پاسخ دینامیکی تونل را یک سیگنال فرض کرده و با بهره‌گیری از جعبه ابزار موجک در نرم‌افزار *MATLAB*، سیگنال مورد پردازش قرار داده می‌شود. از آنجا که با توجه به تعداد گره‌ها و ابعاد مدل، سیگنال پاسخ دینامیکی دریافتی بسیار پیچیده و گذرا می‌باشند سیگنال توسط تبدیل موجک گسسته به ۹ سطح شکسته می‌شود که بخش کلیات روند کلی سیگنال و بخش جزئیات سیگنال‌های پرفرکانس و آسیب در گره‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به ویژگی‌های بیان شده در مورد تبدیل موجک، محل‌هایی که بیشینه قدر مطلق ضرایب موجک مشاهده می‌شود ناپیوستگی‌های سیگنال مشخص خواهند شد. تغییرات زیاد (وجود چند پیک) در نمودار ضرایب موجک نشانگر وجود اختلال و آسیب در آن ناحیه از سازه زیرزمینی می‌باشد.

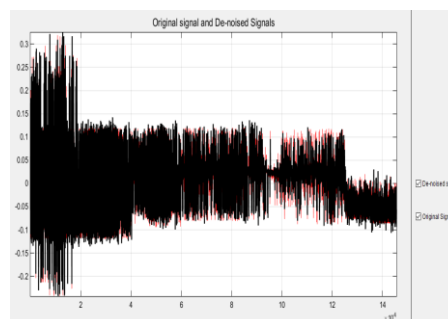
شکل ۲۴ تا شکل ۲۷، به ترتیب نتایج تحلیل توسط تبدیل موجک آنالیز *sym9*، *cofi9*، *haar9* و *bior9* را با

اصلی خارج می‌کند در این حالت تحلیل و شناسایی آسیب در سازه زیرزمینی با خطا مواجه می‌شود به منظور شناسایی دقیق و درست آسیب، باید نوفه از سیگنال حذف شود. برای تشخیص نوفه در سیگنال در صورتی که یک بخش از سیگنال مقدار فرکانس آن بدون آنکه تکرار شود ناگهانی و به یکباره مقدار آن زیاد شود معمولاً نشان‌دهنده نوفه می‌باشد اما در صورت تکرار این فرکانس احتمال نوفه بودن آن بسیار کم است. در سیگنال‌های پیچیده شناسایی اینگونه نوفه بسیار سخت و در برخی از موارد غیرقابل شناسایی هستند و باید از روش‌های هوشمند استفاده کرد. باید این نکته را متذکر شد، در صورتیکه نوفه‌زدایی از سیگنال زیاد انجام گیرد ممکن است بخش‌های اصلی سیگنال که نشان‌دهنده آسیب در سازه هستند حذف شود و هنگامی که نوفه‌زدایی کم انجام گیرد نوفه از سیگنال حذف نمی‌شود بنابراین نحوه نوفه‌زدایی در سیگنال بسیار مهم می‌باشد.



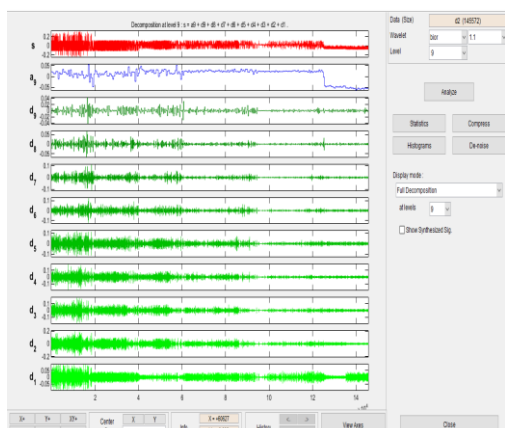
شکل ۲۱- نمایشی از سیگنال نویزدار

مطابق با توضیحات گفته شده، شکل ۲۲ و شکل ۲۳، به ترتیب نوفه‌زدایی توسط نرم‌افزار *MATLAB* با استفاده از سیگنال‌های دریافتی از نرم‌افزارهای *3DEC* و *PLAXIS3D2020* را نشان می‌دهد.

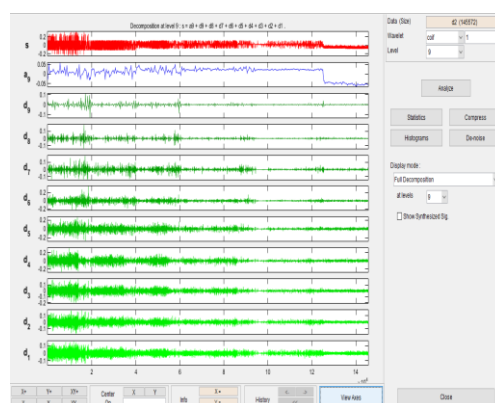


شکل ۲۲- نوفه‌زدایی از سیگنال‌های دریافتی توسط نرم‌افزار *3DEC*

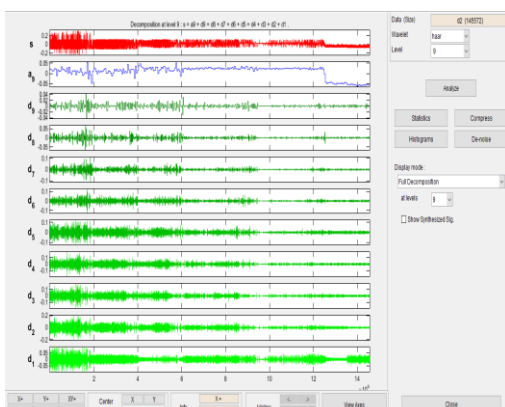
توجه به خروجی مدل نرم‌افزار 3DEC نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود روش تبدیل موجک گسسته به دلیل بالا بودن سرعت آنالیز و دقت آن، به خوبی محل آسیب را در $d9$ (بخش جزئیات و پرفرکانس) نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در ابتدای گره و تقریباً در وسط گره یک پیک در سیگنال نشان می‌دهد که بیان‌کننده آسیب در سازه زیرزمینی می‌باشد.



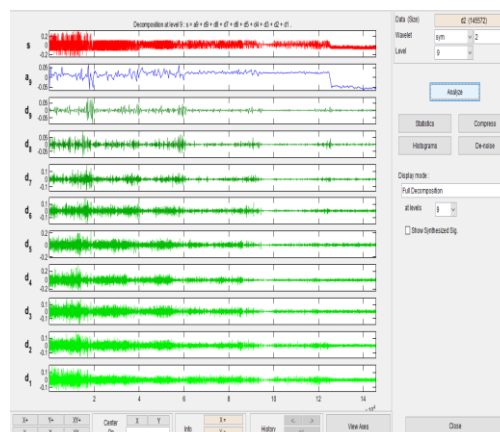
شکل ۲۶- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر $bior9$ بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار 3DEC



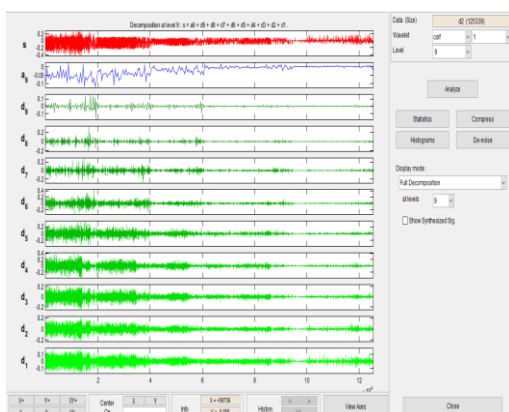
شکل ۲۴- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر $coif9$ بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار 3DEC



شکل ۲۷- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر $haar9$ بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار 3DEC



شکل ۲۵- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر $sym9$ بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار 3DEC



شکل ۲۸- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر $coif9$ بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار $PLAXIS^{3D}2020$

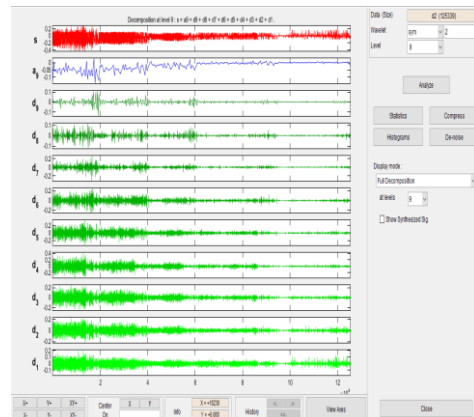
به همین ترتیب شکل ۲۸ تا شکل ۳۱، به ترتیب نتایج تحلیل توسط تبدیل موجک آنالایزر $bior9$ ، $sym9$ ، $coif9$ و $haar9$ را با توجه به خروجی مدل نرم‌افزار $PLAXIS^{3D}2020$ نشان می‌دهد.

تمامی گره‌های نشان داده شده در جدول ۳، بخش‌هایی هستند که مقادیر قدرمطلق ضرایب تبدیل موجک از بقیه بیشتر یا به اصطلاح در پیک یا قله قرار دارند.

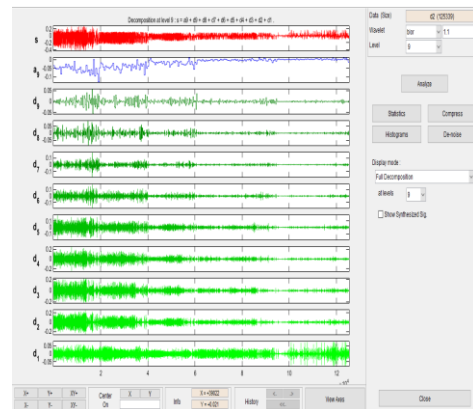
جدول ۳- نتایج محل آسیب با استفاده از تبدیل موجک گسسته

شماره	محل آسیب (گره) در مدل سازی 3DEC	محل آسیب (گره) در مدل سازی PLAXIS ^{3D} 2020
۱	۱۷۰۳۴	۱۹۲۴۵
۲	۱۸۰۳۱	۱۷۰۹۹
۳	۱۸۸۶۲	۱۵۰۹۵
۴	۳۹۸۰۰	۵۹۷۳۶
۵	۱۹۱۳۲	۱۹۱۰۹
۶	۱۷۰۹۱	۱۷۲۰۵
۷	۵۹۶۰۶	۱۸۲۳۰
۸	۱۶۵۸۱	۱۶۴۷۳
۹	۶۰۶۲۷	۶۰۶۹۳
۱۰	۱۶۴۱۱	۱۴۲۷۷
۱۱	۶۰۷۹۷	۱۸۶۶۹
۱۲	۱۷۰۷۴	۳۹۰۲۲
۱۳	۱۹۰۳۴	۱۶۶۱۹
۱۴	۱۸۲۱۷	۶۰۶۹۳
۱۵	۵۹۲۲۶	۱۳۹۸۴
۱۶	۱۸۷۹۹	۱۸۸۱۶
۱۷	۱۶۹۴۷	۲۴۸۳۴
۱۸	۵۹۳۰۷	۳۶۱۵۲
۱۹	۱۵۱۱۳	۲۷۴۹۲
۲۰	۹۳۹۵	۳۱۵۱۵
۲۱	۱۸۷۹۹	۳۴۰۹۱
۲۲	۲۰۷۶۳	۲۶۷۲۱

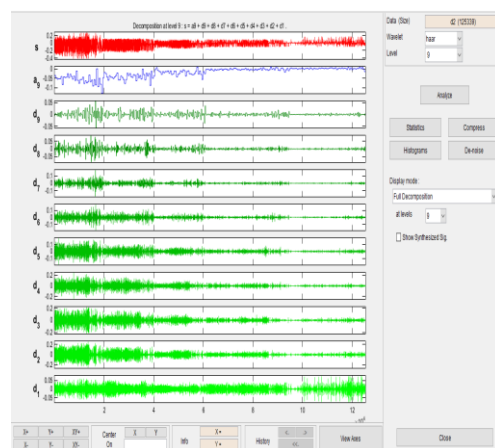
این نکته را باید متذکر شد که هرچقدر مقادیر قدر مطلق ضرایب موجک بیشتر باشد نشان‌دهنده آسیب بیشتر در سازه زیرزمینی می‌باشد و اولویت با همان بخش از آن گره می‌باشد. در این صورت با مراجعه به نرم‌افزارهای عددی که مدل‌سازی با آنها صورت گرفته می‌توان محل گره‌ها را بخوبی شناسایی کرده و محل آسیب نشان داده شده در تبدیل موجک گسسته را با استفاده از سیستم نگهداری در



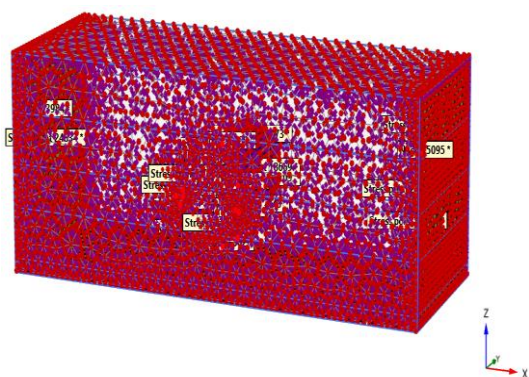
شکل ۲۹- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر sym9 بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020



شکل ۳۰- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر bior9 بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020



شکل ۳۱- اعمال تبدیل موجک گسسته توسط موجک آنالایزر haar9 بر روی مدل‌سازی نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020



شکل ۳۳- نقاط آسیب بر روی مدل در نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020*

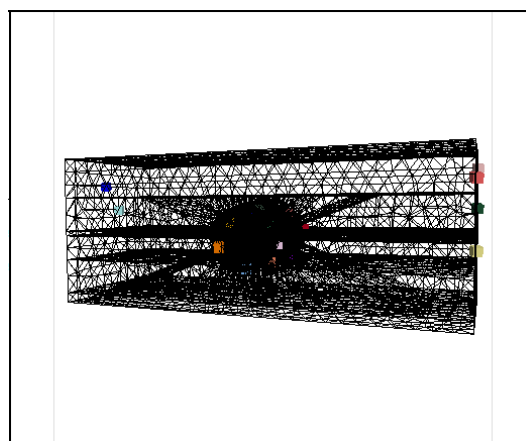
۱۰- نتیجه‌گیری

با توجه به گسترش سازه‌های زیرزمینی و همچنین حساسیت بالای این سازه‌ها توجه به سلامت سازه‌های زیرزمینی امری بسیار ضروری می‌باشد. از آنجا که متروها در نزدیکی سطح زمین قرار دارند علاوه بر بارهای استاتیکی ناشی از وزن طبقات بالایی، بارهای دینامیکی تأثیر بسزایی در سلامتی سازه‌ی زیرزمینی دارند و پایداری این نوع سازه‌های زیرزمینی را دچار مشکل می‌کند. اعمال بارهای استاتیکی و دینامیکی در سازه‌های زیرزمینی ممکن است سبب آسیب در سازه شود که در اثر خرابی و آسیب در سازه زیرزمینی، ماتریس سختی تغییر خواهد کرد و این تغییر نیز در مکان‌یابی المان‌های آسیب دیده مؤثر خواهد بود. با تغییر در ماتریس سختی سازه و نرم‌تر شدن سازه، میزان تغییر مکان‌های گره‌ای افزایش یافته و در نتیجه شکل مودهای سازه نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین از این نسبت افزایش شکل مودها می‌توان جهت تشخیص مکان و شدت المان‌های آسیب دیده استفاده نمود. مطالعات زیادی در مورد پایداری و ایمنی سازه‌های زیرزمینی با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی صورت گرفته است اما همانطور که در این تحقیق بیان شد، شناسایی آسیب در المان‌ها در فضاهای زیرزمینی تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است و یک روش نو و جدید در حوزه مهندسی معدن و مکانیک سنگ می‌باشد. در این تحقیق سعی بر آن شد که ابتدا با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی جابه‌جایی‌های ناشی از این بارها را بدست آورده و با فراخوانی کردن سیگنال مدنظر در محیط *MATLAB* روشی جدید برای بررسی و شناسایی

مدل، دوباره با ترمیم محل آسیب مدل‌سازی را انجام داد در این حالت احتمال ریزش و شکست تونل کمتر خواهد شد. علاوه بر آن می‌توان به این نتیجه رسید که با توجه به تعداد گره‌ها و المان‌های بالای مدل‌سازی و همچنین تحلیل دینامیکی (جابه‌جایی افقی) صورت گرفته، تعداد گره‌هایی که خرابی در آن صورت گرفته بسیار کم بوده و در شرایط تقریباً مطلوبی قرار دارند. اما با گذر زمان و افزایش خدمت‌دهی مترو ممکن است گره‌های آسیب دیده در سازه رشد و گسترش پیدا کرده و کل سازه را در بر بگیرد و سبب ریزش کلی تونل شود.

۹- محل آسیب در تونل خط ۲ مترو مشهد

با توجه به جدول ۳ پس از شناسایی خرابی‌ها با استفاده از تبدیل موجک، می‌توان محل آسیب را در مدل‌سازی‌ها نمایش داد. به همین منظور شکل ۳۲ و شکل ۳۳، به ترتیب محل آسیب را در تونل خط ۲ مترو مشهد توسط نرم‌افزارهای *PLAXIS^{3D}2020* و *3DEC* نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌ها مشخص است بیشتر خرابی‌ها در اطراف تونل و لاینینگ بتنی رخ می‌دهد علاوه بر آن تعدادی از گره‌ها در مرزهای کناری مدل دچار آسیب می‌شوند که عدم توجه به آنها در بلندمدت و استمرار بارهای استاتیکی و دینامیکی منجر به فروریختن تونل مذکور خواهد شد. در این حالت می‌توان سگمنت‌هایی که برای آن ترک رخ می‌دهد با مقاومت بالاتری ساخت.



شکل ۳۲- نقاط آسیب بر روی مدل در نرم‌افزار *3DEC*

شناسایی و از روش‌های محافظتی و مقاومتی محل آسیب را تقویت کرد تا منجر به ریزش کلی سازه نشود. همانطور که در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی در این مقاله مشخص شد جابه‌جایی‌های ناشی از بارهای استاتیکی و دینامیکی در شرایط تقریباً مطلوبی قرار داشتند و تونل‌زنی در این منطقه منجر به ریزش نخواهد شد اما با اعمال تبدیل موجک گسسته بر روی سیگنال‌های دریافتی مشاهده شد که در برخی از مناطق (اطراف تونل و مرزهای کناری) ترک‌ها و آسیب‌های زیادی رخ داده است در صورتی که به آنها توجهی نشوند جابه‌جایی‌هایی عنوان شده بیشتر خواهند شد و سرانجام آن، ریزش کلی تونل خواهد بود.

آسیب در خط ۲ مترو مشهد ارائه شود. به همین دلیل، همانطور که گفته شد یکی از ابزارهای مهم، دقیق و سریع در شناسایی آسیب در سازه استفاده از روش‌های تبدیل موجک گسسته می‌باشد که از جعبه‌ابزار درون محیط *MATLAB* اینکار انجام گرفت. پس از اعمال تبدیل موجک گسسته در خروجی سیگنال‌های نرم‌افزار *3DEC* و *PLAXIS^{3D2020}* محل‌های آسیب با توجه به پیچیدگی‌های سیگنال در ۹ سطح توسط موجک‌های *haar9*، *bior9*، *sym9*، *cofi9* و شناسایی شد و در آخر تمامی‌گره‌های مدنظر که آسیب در آنها وجود دارد در یک جدول خلاصه شد. در این حالت، می‌توان با مراجعه به مدل‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزارهای عددی محل گره را

۱۱-منابع

- 3DEC Verdion 5.20 Users Manual. (2019). *Itasca Consulting Group, Inc.*
- Amezquita-Sanchez, J. P., Park, H. S., & Adeli, H. (2017). A novel methodology for modal parameters identification of large smart structures using MUSIC, empirical wavelet transform, and Hilbert transform. *Engineering Structures*, 147, 148-159.
- Andreus, U., & Casini, P. (2016). Identification of multiple open and fatigue cracks in beam-like structures using wavelets on deflection signals. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 28(1-2), 361-378.
- Babapour Mofrad, F., Abbaspour Tehrani-Fard, A., Ebrahimi, B., & Sardari, D. (2009). De-Noising SPECT Images from a Typical Collimator Using Wavelet Transform. *Iranian Journal of Medical Physics*, 6(3, 4), 1-12.
- Bagheri, A., & Kourehli, S. (2013). Damage detection of structures under earthquake excitation using discrete wavelet analysis.
- Bao, C., Hao, H., & Li, Z.-X. (2013). Multi-stage identification scheme for detecting damage in structures under ambient excitations. *Smart materials and structures*, 22(4), 045006.
- Basarir, H. (2006). Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey. *Engineering geology*, 86(4), 225-237.
- Burrus, C. S. (1997). Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer. *Englewood Cliffs*.
- Chatterjee, P. (2015). *Wavelet analysis in civil engineering*. CRC Press Boca Raton, FL 33487-2742, USA.
- Darvishan, E. (2019). Damage detection of cable-stayed bridges using frequency domain analysis and clustering. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(4), 767-780.
- Fayyadh, M. M., & Razak, H. A. (2012). Condition assessment of elastic bearing supports using vibration data. *Construction and Building Materials*, 30, 616-628.

- Gökdağ, H., & Kopmaz, O. (2009). A new damage detection approach for beam-type structures based on the combination of continuous and discrete wavelet transforms. *Journal of sound and vibration*, 324(3-5), 1158-1180.
- Gupta, S., Van den Berghe, H., Lombaert, G., & Degrande, G. (2010). Numerical modelling of vibrations from a Thalys high speed train in the Groene Hart tunnel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(3), 82-97.
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5), 421-427.
- Lelovic, S., & Vasovic, D. (2020). Determination of Mohr-coulomb parameters for modelling of concrete. *Crystals*, 10(9), 808.
- Li, Y., Cheng, L., Yam, L., & Wong, W. O. (2002). Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach. *Computers & structures*, 80(25), 1881-1894.
- Lunardi, P. (2008). *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media.
- Mallat, S. (1999). *A wavelet tour of signal processing*. Elsevier.
- Mangalathu, S., & Jeon, J.-S. (2020). Ground motion-dependent rapid damage assessment of structures based on wavelet transform and image analysis techniques. *Journal of structural engineering*, 146(11), 04020230.
- Mertins, A., & Mertins, D. A. (1999). *Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- Mousavi Nejad Souq, S. S., & Baradaran, G. H. (2015). Crack detection in frame Structures with regard to changes in natural frequencies by using finite element method and ACOR. *Modares Mechanical Engineering*, 15(8), 51-58.
- Ovanesova, A., & Suarez, L. E. (2004). Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Engineering Structures*, 26(1), 39-49.
- Özaydın, S., & Alak, İ. K. (2019). Speech Enhancement using Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform Method.
- PLAXIS^{3D} Verdion 4 Users Manual. (2020). *Itasca Consulting Group, Inc.*
- Rajabzadeh Women, M., Nikkhah, M., & zare, s. (1388). Analytical evaluation of Mashhad Metro Line 2 tunnel against seismic loads and investigation of various factors affecting it. In *Consulting Engineers Hope for Sustainable Life*.
- Silik, A., Noori, M., Altabey, W. A., Dang, J., Ghiasi, R., & Wu, Z. (2021). Optimum wavelet selection for nonparametric analysis toward structural health monitoring for processing big data from sensor network: A comparative study. *Structural Health Monitoring*, 14759217211010261.
- Spanos, P. D., & Failla, G. (2005). Wavelets: Theoretical concepts and vibrations related applications. *The Shock and Vibration Digest*, 37(5), 359-376.

- Stubbs, N., & Kim, J.-T. (1996). Damage localization in structures without baseline modal parameters. *AIAA journal*, 34(8), 1644-1649.
- Tarinejad, R., & Damadipour, M. (2014). Modal identification of structures by a novel approach based on FDD-wavelet method. *Journal of sound and vibration*, 333(3), 1024-1045.
- Tarinejad, R., & Damadipour, M. (2016). Extended FDD-WT method based on correcting the errors due to non-synchronous sensing of sensors. *Mechanical systems and signal processing*, 72, 547-566.
- Viero, P. F., & Roitman, N. (1999). Application of some damage identification methods in offshore platforms. *Marine Structures*, 12(2), 107-126.
- Xin, Y., Hao, H., & Li, J. (2019). Operational modal identification of structures based on improved empirical wavelet transform. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2323.
- Zhong, S., & Oyadiji, S. O. (2011). Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data. *Computers & structures*, 89(1-2), 127-148.
- Zhu, W., Li, Z., Zhu, L.-k., & Tang, C. (2010). Numerical simulation on rockburst of underground opening triggered by dynamic disturbance. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(5), 587-599.
- Zhu, X., & Law, S. (2006). Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history. *International journal of solids and structures*, 43(7-8), 2299-2317.

Structural health control to identify damages in underground spaces - A case study

H.Fattahi¹; H.Ghaedi²

1- Associate Professor; Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, h.fattahi@arakut.ac.ir

2- Student; Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, hossein.ghaedi74@yahoo.com

Received: 6 Nov 2021; Accepted: 11 Apr 2022

DOI: 10.22044/TUSE.2022.11420.1438

Keywords

Wavelet transform
Damage detection
PLAXIS3D2020 software
3DEC software
Health control of underground spaces

Extended Abstract

Summary

With the development and growth of the population in large cities, the need to use public transportation facilities such as the metro is growing. Given the importance of the urban transportation network, it is very important to pay attention to the health control of underground structures against static and dynamic loads. As Iran is one of the countries located in the world's seismic risk zones, in recent years, it has witnessed devastating earthquakes caused heavy damages. According to previous studies, underground structures, compared to surface structures, are safer against earthquakes because surface structures are connected to the ground only on the floor while underground structures are in full contact with the surrounding environment and are more resistant to earthquake loads. However, given that most subways are built on shallow urban soils, there have been reports of severe damages to these underground spaces from earthquake loads. For this reason, identifying damage and controlling the health of underground spaces, especially subways, are very important. In this research, due to the uncertainty in the ground parameters, and also, the lack of accurate forecast of the drilling route, 3DEC software (when dealing with rock layers) along with PLAXIS^{3D}2020 software has been used for static and dynamic analysis of Mashhad Metro Line 2 Tunnel. In addition, in order to control the health of the tunnel structure, wavelet transform (WT) method has been used. For this purpose, the received signal was called by dynamic analysis and using the wavelet conversion toolbox in MATLAB software, and damaged areas were identified in the model (around the concrete cover and side borders) that can obviously be identified using the maintenance system. The collapse of the underground structure in the identified areas was properly prevented.

Introduction

Today, with the increase of human knowledge in the construction of underground spaces, as well as due to political, security, economic and public issues, the attention of many developed and developing countries has turned to the construction of underground structures for civil, military and mining work. One of these underground structures that has been widely used in recent years is urban tunnels. These tunnels, due to the expansion of cities, and also, population growth, are employed to reduce environmental problems, reduce traffic load, facilitate the movement of people and shorten routes. The use of subways is expanding day by day. Due to the sensitivity and important use of this type of spaces, paying attention to their safety and health is one of the main concerns and challenges in the construction of subways. Because underground structures such as subways are located below ground level, the pressure of the upper floors (overburden) may lead to the collapse of underground structures, thus many studies have been carried out on the static analysis of underground structures. However, due to the seismicity of Iran, many dangerous earthquakes have occurred so far. The earthquake load can be applied to underground structures that can increase the risk of collapse and damage to the underground structures. Therefore, one of the important issues in the behavior of tunnels is the dynamic response to earthquake load. However, due to the fact that underground structures are in complete conflict with their surroundings, they are safer than surface structures which only their lower part is

involved with the ground. Before the 1995 earthquake in Japan and the 1999 earthquakes in Turkey and Taiwan, engineers believe that underground structures show the least risk against seismic loads; however, as a result of these earthquakes occurred in 1990s, the tunnels were severely damaged by the earthquakes. Therefore, engineers had to undergo dynamic analysis of earthquake load along with static analysis. All static and dynamic analyses performed in previous studies generally show the stability or instability of underground structures. If the issue of damage identification and monitoring the health of the structure has been one of the most important issues in structural engineering, not paying attention to the damage will have irreparable consequences on the structures. Most failures that occur in underground structures are usually limited and occur in one or more structural elements. However, with the passage of time and the continuation of static and dynamic loads and not paying attention to this issue, it causes these failures and cracks to spread in the structure, and ultimately, leads to increased probability of failure of underground spaces, breakdown, and even, total collapse of underground structures. Therefore, due to the high cost and importance of underground structures, the diagnosis of damage in structures is a very important issue. In this case, by accurately and correctly identifying the damaged elements in the structures and by strengthening them, such as shotcrete, stone screws, etc., they can be prevented from falling, and therefore, the human and financial damages can be minimized or reduced to zero. Moreover, by accurately and quickly identifying damage to the structures, serious and dangerous damage can be prevented in the long run. In recent years, research has been conducted in the field of structural health control and monitoring.

Methodology and Approaches

In the present study, static and dynamic analysis of Mashhad Metro Line 2 Tunnel has been performed using numerical methods. Then, the displacement due to dynamic loads in each element that leads to modal deformation, stiffness and failure in underground structures, is obtained, and finally, the displacement obtained in each element by using numerical methods in MATLAB software is called. Then, using the discrete wavelet transform method, which is one of the methods of controlling the health of the structure, the severity of damage and failure as well as the location of damage in each element are identified.

Results and Conclusions

Due to the expansion of underground structures, and also, the high sensitivity of these structures, it is very important to pay attention to the health of these structures. Because subways are located near the ground, in addition to the static loads due to the weight of the upper floors, dynamic loads have a significant impact on the health of the underground structures. Applying static and dynamic loads to underground structures may cause damage to the structures that will change the stiffness matrix due to failure and damage to the underground structures, and this change will also be effective in locating the damaged elements. By changing the stiffness matrix of the structure and softening the structure, the rate of change of node locations will increase and as a result, the shape of the structural modes will also increase. Therefore, this ratio of increasing the shape of the modes can be used to identify the location and severity of the damaged elements. Many studies on the stability and safety of underground structures have been performed using dynamic and static analyses, but as stated in this study, damage detection in the elements of underground spaces has not been studied so far. In this research, it has been tried to first obtain the displacements caused by loads using dynamic and static analyses and by calling the desired signal in MATLAB environment, a new method for investigating and identifying damage in Mashhad Metro Line 2 is presented. For this reason, one of the most important, accurate and fast tools in identifying structural damage is the use of discrete wavelet transform method, which has been applied using the toolbox within the MATLAB environment. After applying discrete wavelet transform at the output of 3DEC and PLAXIS^{3D}2020 software, the damage loci have been identified by *cofi*, *sym*, *bior* and *haar* wavelets according to the signal complexity at 9 levels. Using numerical modeling, the locations of the damage can be identified and the site of damage can be strengthened by protective and resistance methods so that not to lead to the overall collapse of the structures.

As a result of the static and dynamic analyses carried out in this paper, it was found that the displacements due to static and dynamic loads were in almost favorable conditions and tunneling in this area would not lead to collapse, but by applying discrete wavelet transform on the received signals, it was observed that in some areas, there were many cracks and damages from the areas around the tunnel and the side borders. If these factors are not taken into account, the mentioned displacements will increase and as a result, the tunnel will collapse completely.
