

بررسی اندرکنش دینامیکی خاک - تونل - شمع بر سازه‌های سطحی به روش تاریخچه زمانی با استفاده از روش تفاضل محدود سه بعدی

مقاله پژوهشی

آرمان شعبان نژاد اشکلک، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی،
قزوین، ایران

محمد آزادی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Azadi.mhmm@gmail.com

دریافت: ۹۸/۰۳/۲۲ - پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۵

صفحه ۷۰-۵۹

چکیده

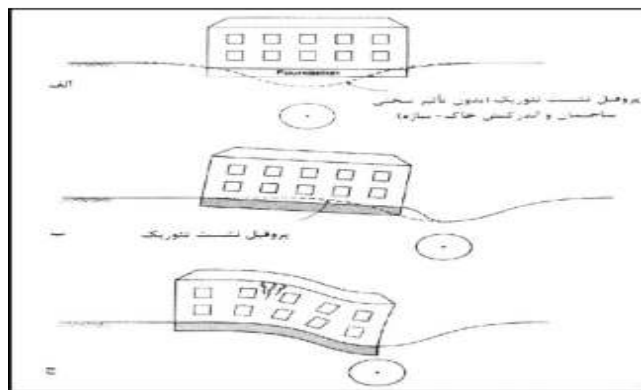
تونل به عنوان یکی از مهمترین عناصر ساخت دست بشر محسوب می‌شود که نقش حیاتی و مهمی را در بخش‌های مختلف حمل و نقل در زندگی انسان امروز ایفا می‌کند. حفر تونل در زمین‌های خاکی منجر به ایجاد جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در اطراف تونل می‌گردد که این جابه‌جایی‌ها می‌تواند به سطح زمین رسیده و در نواحی شهری، سازه‌های سطحی را دچار مشکل کند. در حقیقت با حفر تونل ساختمان خاک دچار دست خوردگی شده که این مسئله نشستی در سطح زمین و همچنین تغییر مکان جانبی در پی‌های عمیق (شمع‌ها) ایجاد می‌کند. در این پژوهش سه مدل سازه - شمع - تونل به صورت سه بعدی و با استفاده از روش‌های عددی و به کمک نرم افزار سه بعدی *Flac3D* مورد تحلیل قرار گرفته اند. هدف این مقاله بررسی اثرات ساخت تونل بر سازه‌های سطحی با حضور دیوار شمعی در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور دیوار شمعی در حد فاصل سازه و تونل در دو حالت استاتیکی و دینامیکی است. تحلیل دینامیکی به صورت تاریخچه زمانی با استفاده از سه زلزله کوبه-نورتریچ-لومپریتا صورت گرفته است. در این پژوهش قرار دادن شمع در حد فاصل سازه و تونل سبب بهبود عملکرد سازه سطحی شده و در نتیجه سبب کاهش نشست سازه سطحی می‌گردد، که این امر در حالت دینامیکی از تخریب کامل سازه جلوگیری می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تونل، شمع، سازه‌های سطحی، تاریخچه زمانی، *FLAC3D*

۱- مقدمه

(گرمودی، ۱۳۸۲). حفر تونل در اعماق کم و در زمین‌های خاکی منجر به ایجاد جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در اطراف تونل می‌گردد این جابه‌جایی‌ها می‌تواند به سطح زمین رسیده و موجب آسیب رساندن به سازه‌های موجود در سطح زمین شود. بنابراین، تخمین میزان نشست زمین در اثر حفر تونل در اعماق کم و به خصوص در محیط‌های شهری که مستقیماً با زندگی مردم در ارتباط می‌باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شکل (۱) اشکال سازه متأثر از پروفیل عرضی نشست نشان داده شده است.

حالات مختلفی وجود دارد که ساخت یک تونل جدید می‌تواند باعث تخریب سازه‌های مجاور گردد. این موارد شامل دو بخش است نخست اینکه سازه موجود تحت تأثیر جابه‌جایی‌های زمین قرار می‌گیرد و دوم اینکه تأثیر مراحل ساخت مانند لرزش و سرو صدا می‌باشد. جابه‌جایی زمین مولفه‌های مختلفی دارد که در تخریب سازه‌ها تاثیرگذار می‌باشد نشست یکنواخت بعید است که مخاطراتی برای ساختمان‌ها داشته باشد، اما می‌تواند خطرات جدی برای تجهیزات سرویس‌های عمومی داشته باشد



شکل ۱. سازه‌های متأثر از پروفیل نشست سطحی ناشی از تونل‌سازی (الف) نشست یکنواخت (ب) چرخش جسم صلب (ج) تغییر شکل همراه با نرخ‌های تغییر شکل و جابه‌جایی‌های افقی (گرمودی، ۱۳۸۲)

جدول ۱. انواع روابط تجربی برای محاسبه نشست ناشی از حفر تونل (Strokova, 2010)

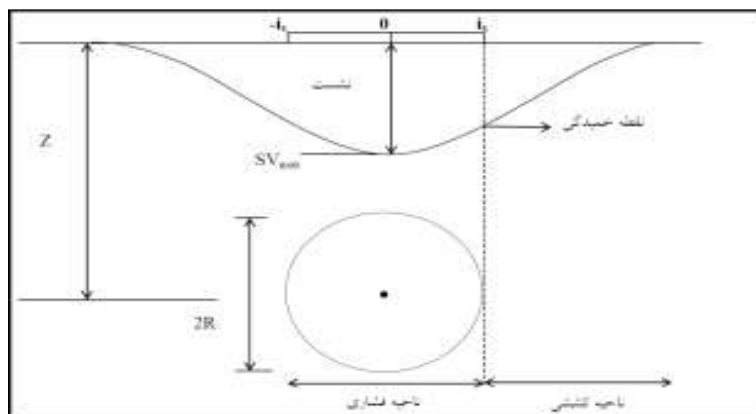
روش تحقیق	S_{max} (نشست حداکثر)	i (فاصله سطح تا نقطه عطف منحنی)	محقق
مشاهدات منطقه‌ای	$S_v(x) = S_{v,max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$ $S_{max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}}$	$i/R = (Z_0/2R)^n$ ($n = 0.8 - 1$)	پک (۱۹۶۹)
مشاهدات منطقه‌ای	$S_{max} = \frac{D}{1000} \left(\frac{KD}{H}\right)^{\frac{1}{n}}$	$i/R = a(Z_0/2R)^n$ ($a = 1, n = 1$)	آتول، فارمر (۱۹۷۴)
مشاهدات منطقه‌ای	$S_z = S_{max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right)$	خاکهای چسبنده: ($3 \leq z_0 \leq 34m$) خاکهای غیر چسبنده: ($6 \leq Z_0 \leq 10m$)	آرایلی، نیو (۱۹۸۲)
مشاهدات منطقه‌ای و نمونه‌های آزمایشی	$S_{max} = S_z \left(1 - K \frac{h}{D}\right)$	ماسه نرم: $i = 0.25(Z_0 + R)$ ماسه سفت و رس بسیار فشرده: $i = 0.25(1.5z_0 + 0.5R)$	اتکینسون، پاتس (۱۹۷۷)
مشاهدات منطقه‌ای و آزمایش‌های سانتیفریوژ	$S_{max} = 0.313 \frac{V_i D^2}{0.5H}$ $S_{max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}}$	$i = 0.5Z_0$	میر و همکاران (۱۹۸۳)

نشست ناشی از حفر تونل یا به عبارتی همان گودی نشست توسط پک در سال ۱۹۶۹ انجام گرفت. او در مقالات و کنفرانس‌های متعدد خود یک گزارش جامع و کلی در مورد مسائل اجرایی تونل از قبیل، تغییرات در نشست زمین ناشی از حفر تونل از نظر هندسه در

از سال ۱۹۵۶ محققین بسیاری مطالعاتی را هم به صورت تجربی و هم به صورت مدل‌سازی و شبیه سازی عددی تاکنون انجام داده‌اند که در جدول (۱) مشاهدات منطقه‌ای و آزمایشگاهی هر یک ذکر شده است. در این بین اولین مطالعات جامع در مورد مسئله

پارامترهای با اهمیت در تخمین نشست می باشد (نقطه i در شکل ۲) زیرا این نقطه محدوده نشست را به دو ناحیه فشاری و کششی تقسیم می کند. گفتنی است که اکثر آسیب‌هایی که در اثر نشست به سازه‌های سطحی وارد می‌شود، در اثر تنش‌های کششی و ممان‌های خمشی می باشد که این نکته اهمیت نقطه بدون انحنا را آشکار می‌کند. از طرف دیگر برای جلوگیری از آسیب رسیدن به ساختمان‌ها در اثر نشست، دو روش مطرح می‌شود. یکی جلوگیری از آسیب‌های ایجاد شده در اطراف تونل به سطح زمین و دیگری تقویت خود ساختمان است (Peek, 1969).

آن سالها ارائه کرد. پک، شکل گودی نشست عرضی (در بالای مقطع تونل) را در سطح زمین در اثر حفر تونل به صورت منحنی توزیع آماری نرمال (گاوسی) در نظر گرفت. با گذشت زمان و اندازه‌گیری‌های مربوط به نشست، شکل پیشنهادی پک برای زمین‌هایی که بر روی آنها ساخت و ساز صورت نمی‌گیرد تغییر کرد، اما شکل این منحنی برای شرایطی که زمین‌ها یکی نبودند و بر روی آنها ساخت و ساز صورت گرفته است متفاوت می‌باشد. دو پارامتر عمق و عرض در تخمین گودی نشست به عنوان پارامترهای تعیین کننده معرفی شدند. همچنین نقطه‌ای که بر روی منحنی نشست دارای انحنای صفر می باشد از دیگر



شکل ۲. نشست ناشی از ساخت تونل (Franzius, 2003)

می‌شود. در حالی که تنوع سفتی در خاک سطحی تأثیر زیادی بر روی پاسخ شمع خرابایی ناشی از تونل زنی ندارد (Mu&et al,2012). آقای یساو و همکاران عملکرد تأثیر عمیق ستون‌های شمعی را برای جلوگیری از جابه‌جایی لایه‌های خاک و کاهش تغییر شکل و نشست ناشی از حفاری تونل مورد بررسی قرار دادند (Yao&et al,2012). در سال ۲۰۱۳ عبدالله و طاه‌ها اندرکنش تونل - شمع-خاک را با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که حفر تونل در اطراف شمع‌ها سبب ایجاد تنش و جابه‌جایی در اطراف شمع‌ها می‌شود و نتایج را

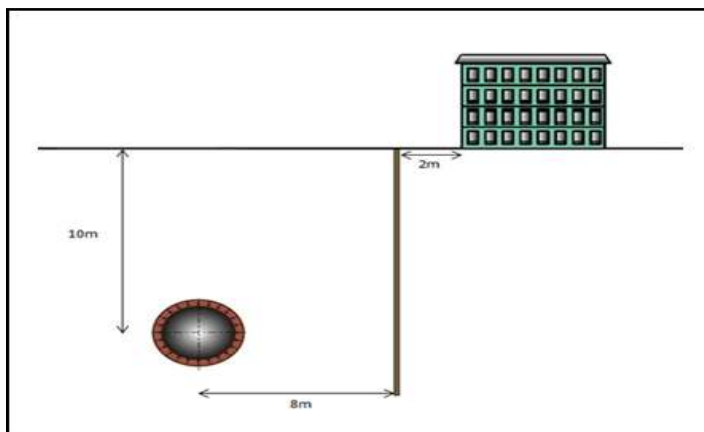
آرنکیومار و آیرتیرمن در سال ۲۰۱۰ با استفاده از یک مدل سازی سه بعدی به برآورد تنوع تنش‌های تولید شده در خطوط تونلی ناشی از بارگذاری شمع در خاک چسبنده و همچنین میزان اثر بارگذاری شمع بر روی تونل پرداختند (Arunkumar& Ayothiraman,2010). در سال ۲۰۱۲ نیز آقای مو و همکارانش، متد تحلیلی ساده شده‌ای برای تحلیل پاسخ طولی شمع خرابایی که در معرض حرکات زمین است ارائه دادند. بر اساس این مطالعات، تغییر شکل طولی بیشتر و ممان خمشی زمانی که سفتی خاک بستر افزایش می‌یابد، بیشتر

محاسباتی لاگرانژی استوار است و هم قادر به محاسبات برای تغییر شکل های کوچک است و هم برای تغییر شکل های بزرگ مناسب است. هدف این پژوهش بررسی رفتار سازه سطحی در اثر ساخت تونل در حضور دیوار شمعی و بدون حضور دیوار شمعی به صورت مقایسه ای به دو صورت استاتیکی و دینامیکی (تاریخچه زمانی) است. یک تونل دایره ای در خاک رسی که فاصله مرکز تونل از سطح زمین ۱۰ متر است طراحی شده است که در فاصله هشت متری از مرکز تونل یک گروه شمعی به شکل دیواری در راستای Y (بعد درون صفحه) به طول ۱۵ متر به فاصله دو متری از هم بین سازه و تونل قرار گرفته و در فاصله دو متری از این دیوار شمعی یک سازه ۴ طبقه مدل سازی شده است. در شکل (۳) ابعاد و نحوه ی قرارگیری تونل-شمع-سازه سطحی نشان داده شده است. هدف این پژوهش بررسی اثرات ساخت تونل بر سازه های سطحی با حضور دیوار شمعی در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور دیوار شمعی در حد فاصل سازه و تونل است. در شکل (۴) و (۵) یک نمونه از مدل سازی سه بعدی با استفاده از Flac3D از نحوی قرارگیری تونل، دیوار شمعی (در راستای Y بعد درون صفحه) و سازه سطحی در دو حالت نشان داده شده است.

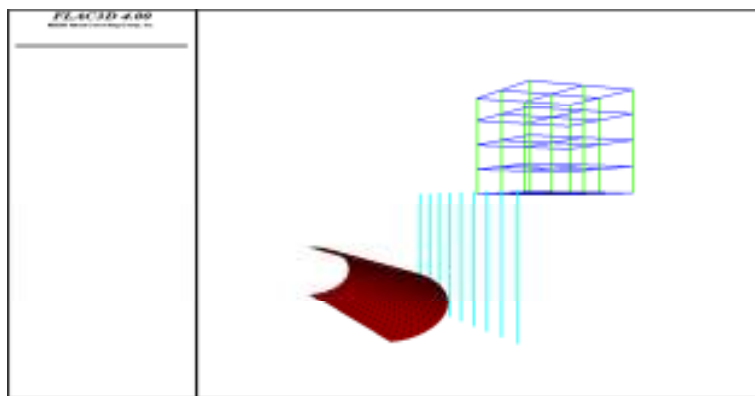
با آزمایش سائترفیوژی مورد مقایسه قرار دادند (Abdullah&Taha,2013). مارشال و حاجی، اثرات ساخت و حفاری تونل در زیر یک سازه شمع دار را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که در زمان حفاری تونل، وجود شمع ها سبب کاهش جابجایی و نشست سازه حین حفاری تونل می شود (Marshall&Haji,2015). فرانزا و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی اندرکنش بین تونل و شمع و اثرات حفاری و ساخت تونل روی شمع ها در عمق های متفاوت پرداختند و نتایج هریک را با یکدیگر مقایسه کرده اند (Franza&et al,2017). جاردینا و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی اندرکنش بین تونل و سازه سطحی در خاک ماسه ای به صورت مدل سازی عددی پرداخته و نتایج آنها را با نتایج آزمایش سائترفیوژی مورد مقایسه قرار دادند (Giardina&et al,2015).

۲- معرفی پروژه و فرآیند مدل سازی

در این پژوهش سه مدل سازه-شمع-تونل با استفاده از نرم افزار Flac3D مدل سازی شده اند. Flac3D براساس روش تفاضل محدود بر آنالیز



شکل ۳. نحوی قرارگیری تونل-شمع-سازه سطحی با فواصل مشخص از یکدیگر



شکل ۴. نحوی قرارگیری تونل - شمع - سازه سطحی در نرم افزار FLAC3D



شکل ۵. نحوی قرارگیری تونل - سازه سطحی در نرم افزار FLAC3D

۳- مشخصات مصالح (المان‌های ساختاری)

مشخصات خاک مورد استفاده در این پژوهش خاک رسی است که اطلاعات مورد نیاز خاک از پروژه مترو اصفهان گرفته شده است. در جداول (۲) تا (۵) مشخصات و پارامترهای خاک، سازه، شمع و پوشش تونل برای مدل سازی ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات پارامترهای مربوط به خاک برای مدل‌سازی

ضریب پواسون	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (کیلوپاسکال)	مدول برشی (مگاپاسکال)	مدول بالک (مگاپاسکال)	مدول الایسیسته (مگاپاسکال)	
۰/۳۵	۱۸۰۰	۳۰	۲۰	۱۸	۵۵	۵۰	رس

جدول ۳. مشخصات پارامترهای مربوط به سازه برای مدل‌سازی

ابعاد تیر (سانتی‌متر)	ابعاد ستون (سانتی‌متر)	ضخامت فونداسیون (سانتی‌متر)	تعداد طبقات	
۳۰×۳۰	۴۰×۴۰	۶۰	۴	سازه

جدول ۴. مشخصات پارامترهای مربوط به شمع برای مدل سازی

ضریب پواسون	طول (سانتی متر)	قطر (سانتی متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول برشی (مگاپاسکال)	مدول بالک (مگاپاسکال)	مدول الایستیته (مگاپاسکال)	
۰/۲	۱۵۰۰	۱۰۰	۲۵۰۰	۱۰۴۲۱	۱۳۹۰۰	۲۵۰۰۰	شمع

جدول ۵. مشخصات پارامترهای مربوط به تونل برای مدل سازی

ضریب پواسون	قطر (سانتی متر)	ضخامت (سانتی متر)	مدل برشی (مگاپاسکال)	مدول بالک (مگاپاسکال)	مدول الایستیته (مگاپاسکال)	
۰/۲۵	۶۰۰	۳۰	۱۴۰۰۰	۲۳۳۳۳/۳	۳۵۰۰۰	تونل

۴-ارزیابی نتایج آنالیز به صورت استاتیکی

می دهد، این نکته قابل ذکر است که با برداشتن شمع از حد فاصل سازه و تونل نشست سازه نزدیک به دو برابر افزایش یافته است.

با توجه به جدول (۶) که بررسی عملکرد سازه با حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل را نشان

جدول ۶. بررسی رفتار سازه سطحی با حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل

برش پایه با و بدون حضور شمع (تن)	جابجایی بدون حضور شمع (سانتی متر)	جابجایی با حضور شمع (سانتی متر)	
۳۰	۱۰/۸	۵/۷	سازه

بررسی رفتار شمع در مدل سازی را نشان می دهد که بیشترین جابجایی وارد شده به شمع ۰/۰۳ سانتی متر است.

جدول ۷. بررسی رفتار شمع در حد فاصل سازه و تونل

نیروی محوری (تن)	برش (تن)	جابجایی (سانتی متر)	
۳۷/۵	۳/۷	۰/۰۳	شمع

سازه و تونل به صورت تقریبی افزایش ۶ تنی را نشان می دهد.

در بررسی رفتار تونل با توجه به جدول (۸) اعداد مربوط به جابه جایی و لنگر وارد به تونل مورد محاسبه قرار گرفته که میزان لنگر وارد به تونل با برداشتن شمعها از حد فاصل

جدول ۸. بررسی رفتار تونل با حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل

لنگر بدون حضور شمع (تن متر)	لنگر با حضور شمع (تن متر)	جابجایی بدون حضور شمع (سانتی متر)	جابجایی با حضور شمع (سانتی متر)	تونل
۱۳/۹	۸/۲	۱۰/۸	۵/۷	

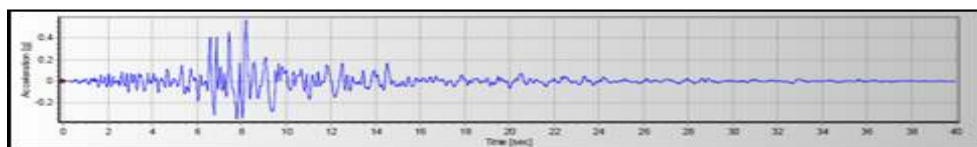
۵- آنالیز دینامیکی

قبل از اعمال یک رکورد باید عمل تصحیح خط مبنا بر روی آن صورت گیرد. بطوری که مقدار سرعت یا جابجایی به دست آمده در انتهای زمان در نمودار رکورد سرعت یا جابجایی صفر شود. برای اصلاح رکوردهای زلزله می توان از برنامه ها و نرم افزارهایی مانند ماژول **Signal Processing** برنامۀ **Matlab**، **DaDisp2002**، **Seismosignal** بهره گرفت. گفتنی است که نرم افزار **Seismosignal** که از محصولات شرکت **Seimosof** می باشد، با فضایی مناسب و ساده است که از آن می توان برای اصلاح رکوردها استفاده نمود در این پژوهش در حالت دینامیکی از سه زلزله کوبه- نورتریج- لوماپریتا که با استفاده از **Seimosignal** اصلاح شده اند در حالت حوزه نزدیک بهره گرفته شده است که در جدول (۹) مشخصات هریک از رکوردهای زلزله قرار داده شده و اشکال (۶) و (۷) و (۸) هر کدام به ترتیب شتابنگاشت های زلزله کوبه- نورتریج- لوماپریتا هستند.

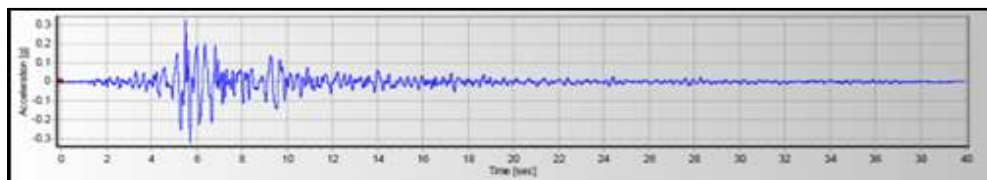
بارهای وارده به سازه ممکن است از نظر مقدار، راستا و موقعیت، تغییراتی نسبت به زمان داشته باشد که به این بارها اصطلاحاً بارهای دینامیکی گفته می شود. پاسخ یک سازه در مقابل بار اعمالی دینامیکی اساساً برحسب جابجایی های آن سازه بیان می شود به طور تقریبی هر نوع سیستم سازه ای در طول عمر مفید خود ممکن است تحت یک نوع بارگذاری دینامیکی یا نوعی از آن قرار گیرد. در این پژوهش سعی شده که اندرکنش دینامیکی خاک- تونل- شمع بر سازه سطحی به روش تاریخچه زمانی با استفاده از سه زلزله کوبه- نورتریج- لوماپریتا به دو صورت با حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل مورد بررسی قرار گیرد. هدف از یک تحلیل لرزه ای مشابه هر تحلیل لرزه ای مهندسی عمران این است که سازه ای طراحی شود که مقاومت و گنجایش کافی در برابر بارها یا جابه جایی های وارده را داشته باشند فلسفه طراحی دینامیکی (لرزه ای) با دیگر طراحی ها متفاوت است.

جدول ۹. شتاب نگاشت های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی

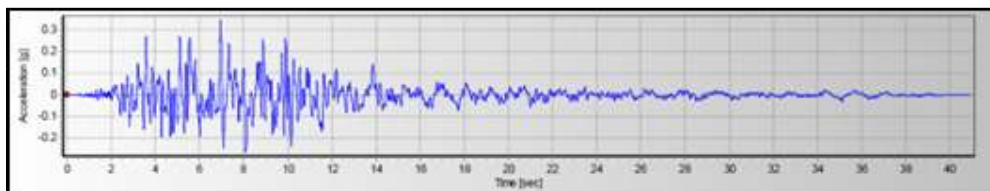
Rcord ID	Name	Occurrence Data	Mw	Station	PGA(G)	R(km)
۱	Kobe	۱۹۹۵/۰۱/۱۶	۶/۹	Kakogava	۰/۳۴۵	۲۶/۴
۲	Northridge	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	۶/۷	Castaic old Ridge	۰/۵۶۸	۲۲/۶
۳	Loma_perieta	۱۹۸۹/۱۰/۱۸	۶/۹	Gilroy Array	۰/۳۲۳	۲۴/۲



شکل ۶. شتاب نگاشت زلزله (Kobe)



شکل ۷. شتاب نگاشت زلزله (Northridge)



شکل ۸. شتاب نگاشت زلزله (Loma Perietta)

۶- ارزیابی نتایج آنالیز دینامیکی

جابه‌جایی وارد به سازه در این حالت از ۸ به ۱۷/۴ رسیده است. پارامترهای جابجایی و برش پایه را در دو حالت با حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل در زلزله لوماپریتا را به صورت مقایسه‌ای مورد بررسی قرار داده و نشان داده که با برداشتن شمع میزان جابه‌جایی سازه به صورت تقریبی ۹ سانتی‌متر افزایش یافته است.

با توجه به جدول (۱۰) که بررسی رفتار سازه در سه زلزله کوبه-نورثریج-لوماپریتا را نشان می‌دهد، کاملاً واضح است که در زلزله کوبه با برداشتن شمع از مجاورت سازه میزان جابه‌جایی سازه به بیش از دو برابر افزایش یافته است و در بررسی عملکرد سازه در زلزله نورثریج در دو حالت با حضور شمع در مجاورت سازه و بدون حضور شمع در مجاورت سازه میزان جابه‌جایی و برش پایه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. میزان

جدول ۱۰. بررسی رفتار سازه در زلزله کوبه، نورثریج، لوماپریتا

برش پایه بدون حضور شمع (تن)	برش پایه با حضور شمع (تن)	جابه‌جایی بدون حضور شمع (سانتی متر)	جابه‌جایی با حضور شمع (سانتی متر)	
۴۶۶	۴۵۲	۱۸/۵	۸/۵	سازه در کوبه
۴۵۶	۴۴۳	۱۷/۴	۸	سازه در نورثریج
۴۴۹	۴۳۷	۱۵	۶/۵	سازه در لوماپریتا

می‌دهد و در زلزله نورث‌ریج بیشترین جابه‌جایی وارد شده به شمع ۱۷/۲ سانتی‌متر است. در بررسی عملکرد شمع در زلزله لوماپریتا با توجه به جدول (۱۱) میزان برش ۷۴/۶ تن و میزان نیروی محوری ۴۱ تن است.

جدول (۱۱) بررسی عملکرد شمع‌ها را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای جابه‌جایی، برش پایه، نیروی محوری در زلزله کوبه، نورث‌ریج، لوماپریتا مورد محاسبه قرار گرفته است. در زلزله کوبه میزان نیروی محوری نسبت به حالت استاتیکی افزایش ۱۲/۴ تنی را نشان

جدول ۱۱. بررسی رفتار شمع در زلزله کوبه، نورث‌ریج، لوماپریتا

جابه‌جایی (سانتی‌متر)	برش (تن)	نیروی محوری (تن)	
۱۸/۲	۸۲/۶	۴۹/۹	شمع در کوبه
۱۷/۲	۷۸/۵	۴۵	شمع در نورث‌ریج
۱۴/۱	۷۴/۶	۴۱	شمع در لوماپریتا

جابجایی و لنگر تونل مورد محاسبه قرار گرفته و اعداد مربوط به هرکدام در دو حالت با حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل در جدول (۱۲) ذکر گردیده است. با توجه به بررسی رفتار تونل در زلزله لوماپریتا در جدول (۱۲) از لنگر بدست آمده این نکته قابل ذکر است که لنگر وارد به تونل در حالت با شمع نسبت به حالت استاتیکی با شمع تقریباً ۱۰ برابر شده است.

جدول (۱۲) بررسی عملکرد تونل در زلزله‌های کوبه، نورث‌ریج، لوماپریتا را دو حالت مقایسه‌ای جابجایی و لنگر وارد به تونل با حضور شمع در مجاورت سازه و بدون حضور شمع در مجاورت سازه را نشان می‌دهد. در بررسی رفتار تونل در زلزله کوبه میزان جابه‌جایی وارد به تونل در صورت نبود شمع در حد فاصل سازه سطحی و تونل به میزان دو برابر افزایش را نشان می‌دهد و در زلزله نورث‌ریج میزان

جدول ۱۲. بررسی رفتار تونل در زلزله‌های کوبه، نورث‌ریج، لوماپریتا

جابجایی با حضور شمع (سانتی‌متر)	جابجایی بدون حضور شمع (سانتی‌متر)	لنگر بدون حضور شمع (تن متر)	لنگر با حضور شمع (تن متر)	
۳۸/۵	۶۷	۹۸	۸۷/۶	تونل در کوبه
۳۶/۷	۶۲	۹۲/۴	۸۲	تونل در نورث‌ریج
۳۳	۵۷	۸۷/۴	۷۶/۶	تونل در لوماپریتا

۷- نتیجه گیری

تحلیل‌ها به دو صورت با حضور شمع در حد فاصل سازه و تونل و بدون حضور شمع مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شده است:

- در حالت استاتیکی، در صورت نبود شمع در حد فاصل سازه و تونل میزان جابجایی سازه در راستای قائم (نشست) به ۱۰/۸ سانتیمتر رسیده است و این در حالی است که مقدار این جابجایی در سایر محورها مقدارش ناچیز است و در صورت وجود شمع میزان جابجایی سازه در راستای قائم (نشست) نسبت به حالت استاتیکی بدون شمع کاهش پنج سانتیمتری را نشان می‌دهد و به عدد ۵/۷ سانتیمتر می‌رسد. با توجه به این مطلب لازم به ذکر است که جابجایی در سایر محورها مقدار آن ناچیز بوده و میزان بهبودی وضعیت سازه با قرارگیری شمع در مجاورت سازه به ۴۷٪ رسیده است.

- در حالت استاتیکی، در صورت نبود شمع در حد فاصل سازه و تونل میزان لنگر وارد به تونل به ۱۳/۹ تن متر رسیده است و با قرار دادن شمع در این ناحیه در این حالت میزان لنگر وارد به تونل عدد ۸/۲ تن متر را نشان می‌دهد که این مطلب افزایش تقریبی شش تنی لنگر با برداشتن شمع از حد فاصل سازه و تونل را در این حالت نشان می‌دهد.

- در حالت دینامیکی، در صورت نبود شمع در حد فاصل سازه و تونل در این حالت به شکل کاملاً واضح اهمیت وجود شمع نشان داده می‌شود چون در هر سه زلزله در تحلیل دینامیکی با مقادیر متفاوت جابه‌جایی سازه به سمت تونل منحرف شده و در نهایت سازه (خم) و تخریب می‌شود، درحالی که با قرارگیری شمع در حد فاصل سازه و تونل بیشترین جابه‌جایی سازه در راستای محور Xها در راستای افق در سه زلزله کوبه، نورث‌ریچ و لوماپریتا به ترتیب هرکدام ۸/۵ سانتی‌متر ۸ سانتی‌متر ۶/۵ سانتی‌متر است. لازم به ذکر است که با برداشتن شمع‌ها از این ناحیه میزان جابه‌جایی سازه به طور تقریبی به بیش از دو برابر افزایش می‌یابد و در صورت حضور شمع در این ناحیه میزان بهبودی وضعیت جابه‌جایی سازه به طور میانگین از سه زلزله به ۵۴٪ می‌رسد.

- در حالت دینامیکی، در صورت نبود شمع در حد فاصل سازه و تونل میزان لنگر وارد به تونل در سه زلزله کوبه، نورث‌ریچ و لوماپریتا به ترتیب هرکدام مقادیر ۹۸ تن متر و

۹۲/۴ تن متر و ۸۷/۴ تن متر را نشان می‌دهند و با قرار دادن شمع در این ناحیه (حد فاصل سازه و تونل) لنگر وارد به تونل در زلزله کوبه ۱۰/۴ تن متر و زلزله نورث‌ریچ ۱۰/۴ تن متر و در نهایت در زلزله لوماپریتا ۱۰/۸ تن متر کاهش را نسبت به حالتی که شمع حضور ندارد، نشان می‌دهد. همچنین، در صورت نبود شمع در حد فاصل سازه و تونل میزان نیروی محوری مورد محاسبه در سه زلزله کوبه نورث‌ریچ و لوماپریتا به ترتیب ۶۰ تن، ۵۵/۳ تن و ۵۰ تن می‌باشد در حالی که با قرار دادن شمع در این ناحیه (حد فاصل سازه و تونل) مقدار نیروی محوری وارد به سازه در زلزله کوبه ۱۷٪ در زلزله نورث‌ریچ ۱۷/۷٪ و در نهایت در زلزله لوماپریتا ۱۷/۲٪ کاهش را نسبت به حالت بدون شمع نشان می‌دهد.

- در حالت مقایسه‌ای بین تحلیل استاتیکی و دینامیکی می‌توان گفت با حضور شمع در مجاورت سازه (حدفاصل سازه و تونل) میزان لنگر وارد به تونل در شرایط دینامیکی نسبت به استاتیکی به صورت تقریبی ۱۰ برابر شده است و همچنین با برداشتن شمع‌ها از مجاورت سازه (حد فاصل تونل و سازه) لنگر وارد به تونل در حالت دینامیکی بدون شمع نسبت به حالت استاتیکی بدون شمع، افزایش تقریبی ۱۰ برابری را نشان می‌دهد، لازم به ذکر است که میزان نیروی محوری وارد به شمع در حالت دینامیکی در زلزله کوبه ۱۲/۴ تن، در زلزله نورث‌ریچ ۷/۵ تن و در نهایت در زلزله لوماپریتا چهار تن افزایش را نسبت به حالت استاتیکی نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات ارائه شده از نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی لازم به ذکر است که وجود شمع در حد فاصل سازه و تونل در حالت استاتیکی موجب کاهش نشست سازه سطحی می‌شود و در حالت دینامیکی (زلزله) از تخریب سازه سطحی جلوگیری می‌کند.

۸- مراجع

- سید گرمودی، م. م.، (۱۳۸۲)، "تعیین نشست خاک در اثر حفاری تونل مترو اصفهان در مقاطع مربوط به خیابان چهار باغ عباسی با توجه به روش حفاری انتخابی و طراحی پوشش تونل"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- Marshall, A. M., & Haji, T., (2015), "An analytical study of tunnel–pile interaction". *Tunneling and Underground Space Technology*, No.45, pp.43-51.
- Mu, L. Huang, M., Finn, R.J., (2012), "tunnelling effects on lateral behavior of pile rafts in layered soil". *Journal of tunneling and underground space technology* 28. pp.192-211.
- Peck, R. B., (1969), "Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground" Proc. of The 7th int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. State of the art Volume. *Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos. A.C.*
- Strokova, L.A., (2010), "Methods of Estimating Surface Settlement During Driving of Urban Tunnels". *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 47. No.3.
- Yao, A., Yang, X., Dong, L., (2012), "Numerical Analysis of the Influence of Isolation Piles in Metro Tunnel Construction of Adjacent Buildings". *Procedia Earth and Planetary Science* 5, pp.150-154.
- Abdullah, M.H, Taha, M.R. (2013), "A Review of the Effects of Tunneling on Adjacent Piles", *Electronic journal of Geotechnical Engineering*, Vol.18., pp. 2739-2769.
- Arunkumar, S., Ayothiraman, R., (2010), "Effect of Vertically Loaded Pile on Existing Urban Tunnel in Clay". *Indian Geotechnical Conference, Geotrendz*. pp.751-754.
- Franza, A., Marshall, A. M., Haji, T., Abdelatif, A. O., Carbonari, S., & Morici, M., (2017), "A simplified elastic analysis of tunnel-piled structure interaction. *Tunneling and Underground Space Technology*", No.61, pp.104-112.
- Franzius, J. N., (2003), "Behavior of Buildings Due to Tunnel Induced Subsidence Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College of Science", *Technology and Medicine*. London. SW72BU.
- Giardina, G., DeJong, M. J., & Mair, R. J. (2015), "Interaction between surface structures and tunneling in sand: centrifuge and computational modeling", *Tunneling and Underground Space Technology*, No.50, PP.465-478.

Investigation of Soil-Tunnel-Pile Interaction on Surface Structures Using Time Histories Method by 3D Finite Difference Method

A. Shaban Nezhad Eshkalak, M.Sc. Grad., Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

M. Azadi, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

E-mail: Azadi.mhmm@gmail.com

Received: August 2019- Accepted: December 2019

ABSTRACT

The tunnel is considered as one of the most important elements of man-made construction, which plays a vital role in the various transport sectors in human life today. The excavation of the tunnel on the earth's grounds leads to horizontal and vertical displacements around the tunnel. It turns out that these displacements can reach the surface of the earth and cause problems in the urban areas. In fact, the excavation of the soil has affected the soil structure, which affects the ground level as well as the lateral displacement of the deep pile. In this study, three models of structure-piles-tunnels in three-dimensional model have been analyzed using numerical methods. The purpose of this paper is to investigate the effects of tunnel construction on surface structures with the presence of a wall between the structures and tunnels without the presence of a wall at the interface between the structure and the tunnel in both static and dynamic conditions. Dynamic analysis has been carried out in the form of a time history using three earthquakes. In this research, the placement of the pile at the interface between the structure and the tunnel improves the performance of the surface structure and, as a result, reduces the formation of the surface structure, which prevents the complete destruction of the structure in the dynamic state.

Keywords: Tunnel, Pile, FLAC3D