

بررسی اندرکنش تونل‌های دوقلو و شمع‌های مجاور

جاسم هاشمی طلب^۱؛ رامین دوست محمدی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن (مکانیک سنگ)، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

۲- دانشیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۱۱/۲۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2018.5290.1297

واژگان کلیدی	چکیده
تونل‌های دوقلو شمع خط دو متروی شیراز Flac 3D	حفاری تونل‌ها در زمین‌های ضعیف منجر به تغییر تنش و جابجایی زمین اطراف می‌گردد که تاثیر قابل ملاحظه‌ای در ایمنی سازه‌های مجاور از جمله پل‌های پر تردد خواهد داشت. بررسی این تاثیر در تعیین تغییرات تنش و جابجایی در شمع‌های پل‌های مجاور به عنوان اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی‌های آتی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این نوشتار، تاثیر حفاری تونل‌های دوقلو بر نشست زمین و رفتار شمع‌ها با استفاده از مدلسازی عددی در بکارگیری نرم افزار Flac3D و مقایسه با نشست‌های ثبت شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور، تونل‌های دوقلو خط ۲ مترو شیراز که از زیر پل کمربندی جنوبی عبور می‌کند، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده‌است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نیروی محوری و ممان خمشی در طول شمع، ابتدا افزایش یافته و در مجاورت محور تونل به مقدار بیشینه رسیده است و شمی که در فاصله کمتری از تونل قرار دارد، دارای نیروی محوری و ممان خمشی بیشتری است. تغییرات نیروی محوری و ممان خمشی شمع در سه نسبت مختلف ارتفاع روباره به قطر تونل نیز مورد بررسی گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در نسبت‌های کمتر، نیروی محوری شمع‌ها افزایش و ممان خمشی آنها کاهش یافته‌است.

۱- مقدمه
۲۰۰۵ روش‌های تحلیلی زیادی را به منظور بررسی و ارزیابی اندرکنش شمع‌های پی سازه‌ها و تونل مورد استفاده قرار دادند (Chen, L_T, et al., 1999). Loganathan, (Ng, et al., 2005) و N, et al., (2000) ایشان بیان نمودند که در طی تونل‌سازی در مناطق شهری اغلب تونل با شمع‌های پی ساختمان‌ها و پل‌ها مواجه خواهد شد که در چنین شرایطی، جابجایی‌های ایجاد شده در زمین در اثر تونل‌سازی ممکن است بر روی شمع‌ها تأثیر منفی داشته باشد (Chen, et al., 1999), (Loganathan, et al., 2000) و (Ng, et al., 2005) لنگانتان و همکاران در سال ۲۰۰۱، کیتیودوم و همکاران در سال ۲۰۰۵ و همچنین باسیل و همکاران در سال ۲۰۱۴ اثرات تونل‌سازی بر روی پی‌های شمی را بررسی کردند و با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به بررسی اثر

با پیشرفت فناوری و توسعه شهرها، احداث سازه‌های حمل-ونقل زیرزمینی از جمله تونل و مترو مورد نیاز است. تونل‌سازی در محیط‌های شهری خصوصاً در مجاورت سازه‌های سطحی با پی‌های عمیق شامل پل‌ها و ساختمان‌های بزرگ، با مشکلات خاصی همراه است که در صورت عدم کنترل آن ممکن است بر روی پی شمی سازه‌ها اثرات زیان‌باری وارد کند (Ng, et al., 2014).

از این رو مطالعه اثر حفر تونل بر شمع‌های پی سازه‌ها، برای طراحان و پیمانکاران پروژه از اهمیت زیادی برخوردار است که می‌بایست مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. (Ng, et al., 2005) چن و همکاران در سال ۱۹۹۹، لنگانتان و همکاران در سال ۲۰۰۰ و همچنین نگ و همکاران در سال

* زنجان؛ کیلومتر ۵ جاده قدیم تبریز؛ دانشگاه زنجان؛ دانشکده مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، شماره تلفن: ۰۲۴-۳۳۰۵۴۰۱۵؛ رایانامه: ramin.doostmohammadi@znu.ac.ir

پروژه انتخاب شده است تا پارامترهای انتخاب شده منطبق بر واقعیت باشد. به منظور اعتبار سنجی رفتار مدل، از داده‌های ثبت شده از پین‌های نشست‌سنج نصب شده بر روی زمین و شمع‌ها، استفاده شده است.

۲- زمین‌شناسی و مشخصات کلی محدوده

مورد مطالعه

دشت‌های منطقه مورد مطالعه، جایگاه نهشته‌ها و رسوبات جوان با واحدهای زمانی کوتاه‌تر را در بر می‌گیرد. خاستگاه این رسوبات از تخریب، فرسایش و حمل واحدهای قدیمی (کهن‌تر از کوتاه‌تر) متمرکز شده است. مطالعات ژئوتکنیکی مسیر نشان می‌دهد که تونل از محیط خاکی با جنس رس عبور می‌نماید. میان لایه‌های رس سیلتی و همچنین لایه‌های شن و ماسه نیز در حدفاصل برخی از گمانه‌های اکتشافی قابل تشخیص می‌باشد. در برخی از گمانه‌های ایجاد شده نیز لایه درشت‌دانه شن سیلتی رسی مشاهده شده است. در نزدیک‌ترین گمانه به محدوده مورد مطالعه، لایه نرم رسی گزارش نشده است و تا عمق ۱۰ متر لایه‌های متوسط تا سفت رسی با میان‌لایه‌های سیلتی رسی و در عمق ۱۰ متر تا انتهای گمانه لایه‌های بسیار سفت گزارش شده است. بافت غالب خاک تا بیشینه عمق شناسایی شده و شامل لایه‌های ریزدانه رسی به رنگ قهوه‌ای روشن با خواص خمیری کم با نماد CL است. در مجموع دو لایه مختلف خاک برای منطقه قابل شناسایی می‌باشد که مشخصات ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده در مدلسازی برای هر کدام از لایه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر خط ۲ مترو شیراز

لايه	۱	۲
نوع خاک	رس سفت	رس خیلی سفت
عمق (m)	۱۰-۰	۳۴-۱۰
وزن مخصوص خشک	۱۷	۱۸
چسبندگی (Kpa)	۱۵	۲۵
ϕ (deg)	۲۰	۲۵
مدول یانگ (Kpa)	۳۵	۴۵
ضریب پواسون	۰٫۳۵	۰٫۳۰

درصد افت حجم بر روی جابجایی، نیروی محوری و ممان خمشی گروه شمع پرداختند (Loganathan, et al., 2001)، (Basile, 2014) و (Kitiyodom, et al., 2005). همکاران در سال ۲۰۰۲ و همچنین سومرو و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک آنالیز سه‌بعدی با استفاده از روش‌های عددی المان محدود به منظور مطالعه اندرکنش تونل بر روی تک شمع‌ها و شمع‌های گروهی انجام دادند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که حفاری تونل تأثیر قابل توجهی بر روی نیروی محوری و ممان خمشی شمع می‌گذارد (Mroueh, et al., 2002) و (Soomro, et al., 2015). کیم و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر تونل‌سازی بر روی شمع پی سازه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که با پیشرفت روند حفاری، نیروی محوری در طول شمع در اثر افزایش اصطکاک جانبی در راستای دیواره شمع تحت تأثیر قرار می‌گیرد و باعث ایجاد تنش برشی در بدنه شمع می‌شود که ناشی از جابجایی‌های انجام‌شده در خاک می‌باشد (Kim, et al., 2013). نگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل سانتریفیوژ سه‌بعدی به‌منظور بررسی پاسخ شمع‌های تکی به‌طور جداگانه نگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک مدل سه‌بعدی سانتریفیوژ به‌منظور بررسی پاسخ گروه شمع ارائه کردند (Ng, et al., 2013) و (Ng, et al., 2014). نگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر تونل‌های دوقلویی که بر روی محور قائم قرار گرفته‌اند را بر روی شمع‌های گروهی با روش‌های عددی المان محدود و آزمایشگاهی مطالعه کردند (Ng, et al., 2015). مارشال و همکاران در سال ۲۰۱۵ در یک تحقیق جداگانه با استفاده از روش‌های تحلیلی به نتایج مشابهی با کیم و همکاران در سال ۲۰۱۳ دست یافتند و نشان دادند میزان جابجایی‌ها در پای شمع به محل قرارگیری تونل و شمع نسبت به یکدیگر بستگی دارد (Marshall, et al., 2015). در این مقاله اندرکنش تونل و پی شمعی پل کمربندی جنوبی پروژه خط ۲ مترو شیراز با نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC3D$ مدلسازی و بررسی می‌شود. در مدل ساخته شده مشخصات هندسی تونل‌ها و پی پل (از قبیل قطر و مشخصات پوشش تونل‌ها و طول، قطر شمع‌ها)، پارامترهای مختلف دستگاه حفاری EPB (از قبیل قطر حفاری، میزان اضافه حفاری و مشخصات شیلد)، مشخصات ژئوتکنیکی خاک محدوده پل و تونل‌ها و همچنین مشخصات دوغاب تزریقی برابر با مشخصات

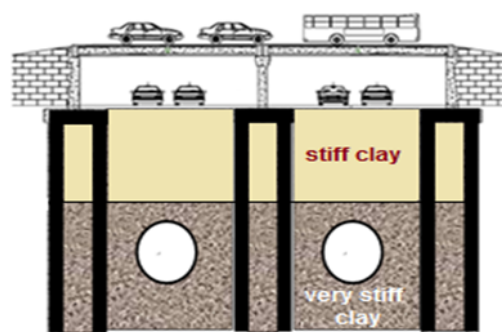
به‌صورت دوقلو و با روباره حدود ۱۵ متر، در فواصل زمانی متفاوت انجام می‌شود و با پل کمربندی جنوبی (شهید غلامعلی بالادست)، بین ایستگاه قهرمانان و عادل‌آباد تقاطع دارد و از زیر پی آن عبور می‌کند که محل قرارگیری پل و تونل‌ها در شکل ۲ آمده است. پل کمربندی از نوع بتنی پیش‌ساخته می‌باشد که به وسیله سه گروه شمع اصطکاکی نگهداری می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱- ارائه شده است، مترو شیراز شامل شش خط می‌باشد. خط دو قطار شهری شیراز به طول ۱۳ کیلومتر با دو تونل شامل ۱۳ ایستگاه (۱۲ ایستگاه به‌صورت زیرزمینی و یک ایستگاه به‌صورت روزمینی) از میدان کلبه‌سعدی در شمال شرق شیراز آغاز و تا شهرک میانرود در جنوب غربی شهر ادامه می‌یابد. حفاری تونل‌ها توسط دو دستگاه سپر تعادلی زمین



شکل ۱- پلان موقعیت متروی شیراز

صورت محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود و تحلیل‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار *FLAC 3D* و با در نظرگیری مدل رفتاری موهر-کلمب برای محیط دربرگیرنده تونل، انجام شده است. هندسه سپر به طول ۹٫۸ متر با استفاده از المان ساختاری پوسته (*Shell*) و با خواص فولاد مدل‌سازی شد و برای مدل‌سازی دوغاب تزریق شده در پشت سگمنت نیز از المان‌های حجمی با خواص دوغاب استفاده گردید. یکی از معیارهای لازم برای انتخاب خواص دوغاب، در نظرگیری مقاومت برشی بالا برای دوغاب است تا از حرکت سگمنت جلوگیری کند. برای مدل‌سازی سگمنت نیز از المان حجمی با خواص بتن مسلح استفاده شد. طول گام حفاری معادل با عرض سگمنت‌ها و برابر با ۱٫۴ متر می‌باشد. فشار سینه کار با استفاده از روش‌های تحلیلی تعیین گردید به طوری‌که این



شکل ۲-نمایی از موقعیت تونل و پل

۳- روند مدل‌سازی

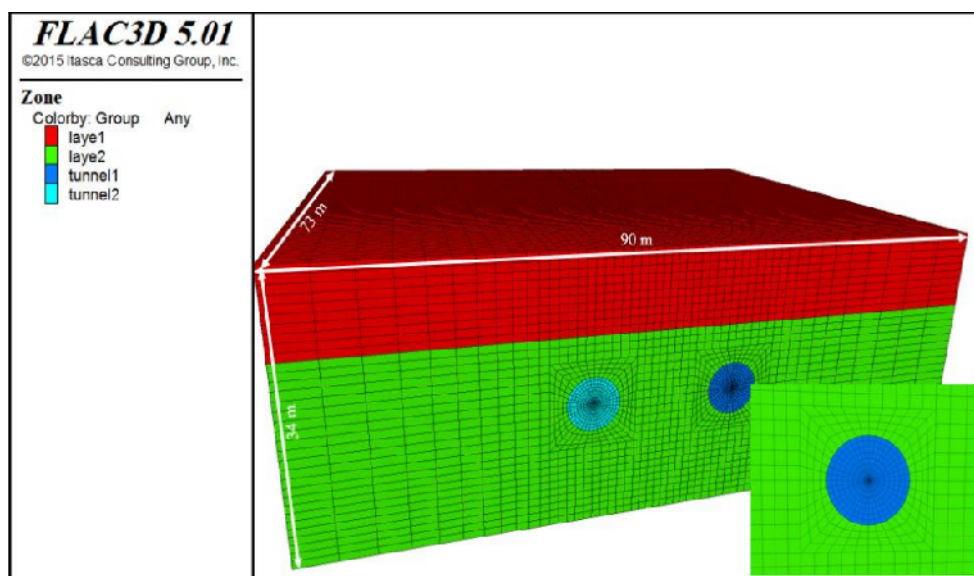
با توجه به اینکه تونل‌های خط ۲ متروی شیراز در محل مورد مطالعه در محیطی خاکی قرار دارند، محیط اطراف تونل به

به‌منظور به حداقل رساندن تأثیر مرزها در محاسبات شبکه تفاضل محدود، موقعیت مرزهای جانبی در فاصله پنج برابر قطر تونل (Itasca Consulting Group, Inc., 2015) از مرکز تونل انتخاب شده است تا تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی میدان تنش کرنش به وجود آمده در اثر حفاری نداشته باشند. مش بندی مدل به میزان تقریباً دو برابر قطر تونل پایین تر از کف تونل امتداد یافته و در جوانب به میزان تقریباً پنج برابر قطر تونل نسبت به مرکز تونل امتداد داده شده است. طول مدل نیز تقریباً ۱۰ برابر قطر تونل انتخاب شده است. مدل ساخته شده به ترتیب دارای طول، عرض و عمقی برابر ۷۳، ۹۰ و ۳۴ متر می‌باشد. در شکل ۳ نمونه ای از مدل سه بعدی ساخته شده به همراه مش بندی مورد استفاده، نشان داده شده است.

فشار در مرکز تونل برابر ۱۲۸٫۵ کیلوپاسکال و بار سطحی (بار خیابان) نیز در بالای مدل برابر با ۲۰ کیلوپاسکال است. بعد از حفاری تا راستای طولی ۹٫۸ متر، پس از هر گام حفاری المان‌های حجمی دوغاب و سگمنت در فاصله ۹٫۸ متری از سینه کار فعال می‌گردد. شمع‌های پی پل در سه ردیف ۴*۲ و با المان ساختاریشمع (Pile) و با خواص بتن مسلح استفاده شد که تونل‌های دوقلو از بین ردیف شمع‌های ذکر شده عبور می‌کنند. تونل دوم نیز مشابه تونل اول و پس از اتمام آن، حفاری شد و تأثیر آن بر نشست زمین و عملکرد شمع‌های میانی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۱- ابعاد مدل و مشخصات سیستم نگهداری

تونل‌های دوقلو دارای فاصله مرکز به مرکز تقریباً ۱۹ متر بوده و محور آن‌ها در عمق ۱۸٫۵ متری از سطح زمین قرار دارد.



شکل ۳- ابعاد هندسی مدل

آلمان استفاده شده که اندکی بیشتر از فشار جانبی محرک خاک است و از رابطه *Error! Reference source not found.* (Broere, et al., 2001) زیر تعیین می‌شود.

$$\sigma_T = k_a \sigma_v' - \sqrt{k_a} + k_a q + u \quad (1)$$

که σ_v' تنش قائم موثر، C چسبندگی، q میزان سربار سطحی، u فشار منفذی و k_a ضریب فشار جانبی

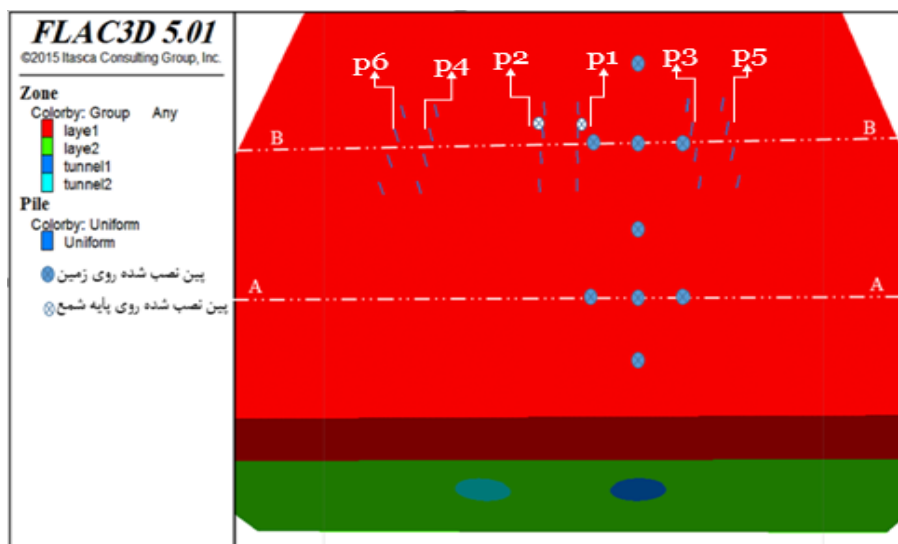
سپر ماشین حفار با استفاده از المان‌های ساختاری پوسته ای با رفتار الاستیک خطی و با خواص فولاد تعریف شده است. به منظور ساده‌سازی هندسه مدل، سپر مخروطی شکل به صورت یک استوانه با قطر ثابت و برابر با ۶٫۸۸ متر مدل‌سازی شده است. برای تامین صلبیت سپر و در نظر گرفتن وزن آن، ضخامت المان‌های متناظر سپر ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شده است. جهت تعیین فشار مورد نیاز برای تامین پایداری سینه‌کار از روش پیشنهادی مرکز ساخت و ساز زیرزمینی

مقطع مختلف A و B با فاصله حدود ۲۰ متر در شرایطی که مقطع A ، بدون حضور شمع و مقطع B در مجاورت شمع‌های نگهدارنده پل، در نظر گرفته شدند. جهت بررسی صحت نتایج به دست آمده از مدل‌سازی، از داده‌های ثبت شده از پین‌های نشست سنجی که در سطح زمین و بر روی شمع‌ها نصب شده‌اند، استفاده شد. پین‌های نشست سنج در سطح زمین، با فاصله پنج متر از هم قرار گرفته‌اند. شکل ۴ مقطع A و B به همراه پین‌های نشست سنج را نشان می‌دهد. همچنین به منظور بررسی اثر حفر تونل بر شمع‌های پل، از شمع‌هایی که با شماره نشان داده شده است، استفاده گردید.

خاک می‌باشد. مقدار فشار سینه کار به دست آمده از روش فوق، ۱/۲۸۵ بار بدست آمد. میزان فشار تزریق پشت سگمنت معمولاً ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار اعمال می‌شود تا هم بتواند بر فشار لایه‌های بالایی غلبه کند و هم مانع بازگشت فوم شود. برای مدلسازی پوشش تونل و دوغاب تزریقی پشت آن از المان حجمی با رفتار الاستیک خطی و با خواص بتن مسلح و دوغاب استفاده شده است.

۳-۲- بررسی نشست زمین

به منظور بررسی اثر وجود شمع در کنترل نشست زمین، دو



شکل ۴- موقعیت قرارگیری پین‌های نشست سنج

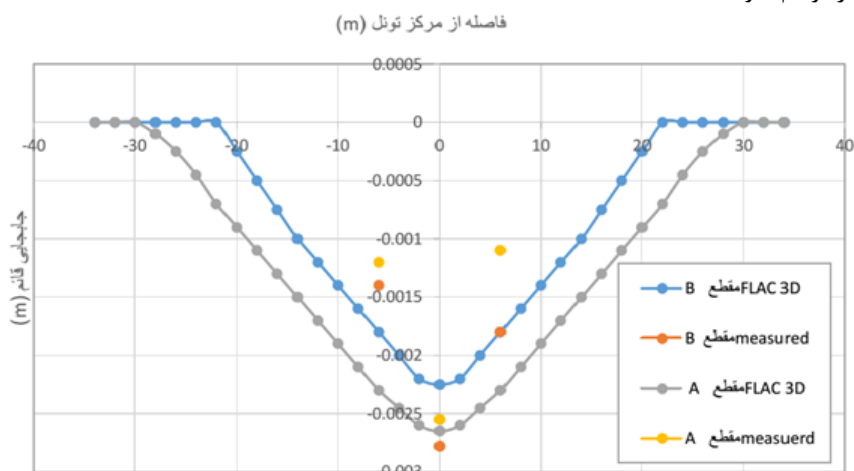
برای موقعیت‌های مختلف جبهه کار نسبت به آن نقاط می‌باشد. در راستای محور تونل نقاط شاهده‌ی در نظر گرفته می‌شود و جابجایی‌های قائم آن در اثر پیشروی تونل به دست می‌آید و در نهایت با داده‌های ثبت شده از ابزار دقیق مورد اعتبار سنجی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج ثبت شده از ابزار دقیق با نتایج حاصل از مدل‌سازی مطابقت خوبی دارند. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی‌ها به فاصله تقریباً سه برابر قطر تونل در جلوی جبهه کار شروع شده و پس از ۲ برابر قطر آن در پشت جبهه کار ثابت می‌شود. با استفاده از پروفیل نشست طولی می‌توان جابجایی زمین در جلوی جبهه کار را بررسی کرد و تمهیدات لازم برای مواجهه با هرگونه خطر احتمالی و اجرای به‌موقع سیستم پیش‌نگهداری

در شکل ۵ نتایج به دست آمده از نشست زمین در مدلسازی دو مقطع A و B ، به همراه مقادیر ثبت شده از نشست سنج‌هایی که در سطح زمین نصب شده‌اند، ارائه شده است.

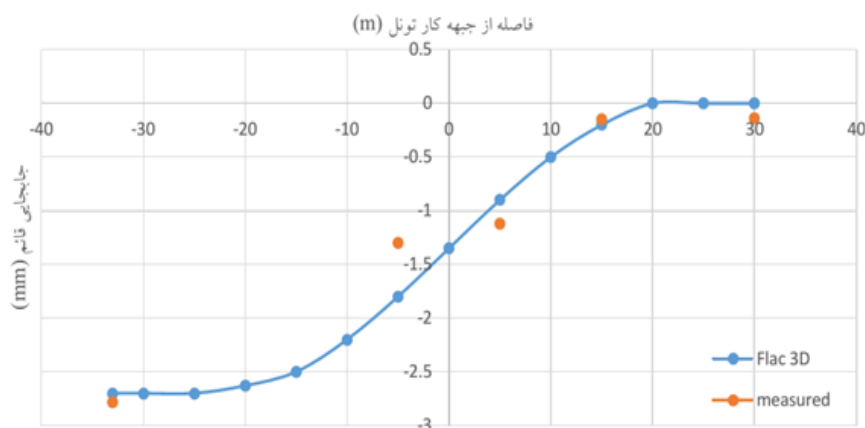
نتایج مدلسازی نشان می‌دهند که استفاده از شمع، جابجایی زمین را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد. اگر چه اختلافی بین جابجایی ثبت شده توسط نشست سنج‌ها و نتایج مدلسازی عددی ملاحظه می‌شود، ولی روند افزایش نشست زمین در مرکز و کاهش آن در اطراف، هم در مدلسازی عددی و هم در جابجایی‌های ثبت شده توسط نشست سنج‌ها تایید می‌شود.

پروفیل طولی نشست تاریخچه‌ی جابجایی نقاط خاص

در جلوی جبهه کار فراهم نمود.



شکل ۵- مقایسه نشست مقاطع A و B



شکل ۶- پروفیل طولی نشست

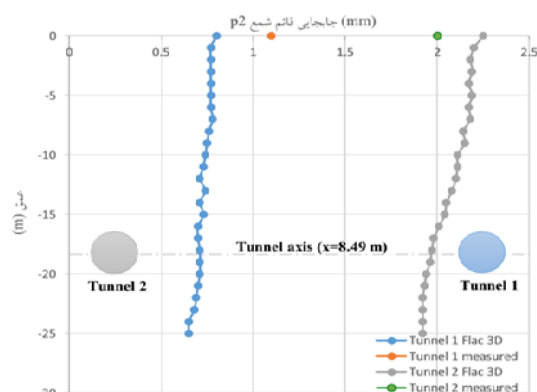
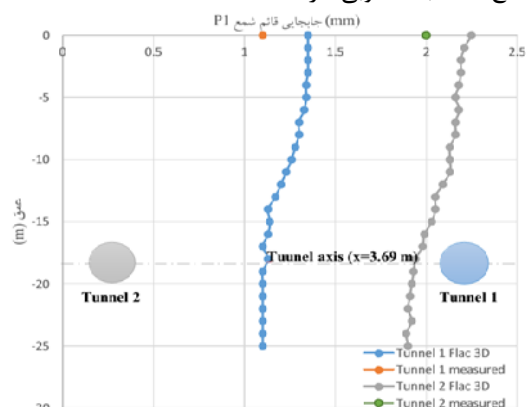
کاهش ظرفیت باربری شمع می‌گردد. بنابراین شمع در جهت قائم جابجا می‌شود. شکل ۷ میزان جابجایی‌های قائم ایجاد شده در مقابل عمق (طول شمع) را نشان می‌دهد. جابجایی‌های قائم ایجاد شده در شمع‌های میانی نشان می‌دهند که نشست شمع در تمام طول آن تقریباً ثابت می‌باشد که بیانگر سختی زیاد شمع در راستای محور آن است. تغییرات جابجایی قائم در شمع $P1$ به دلیل فاصله نزدیک تر به تونل بیشتر از شمع $p2$ می‌باشد. پس از حفاری تونل دوم، بدلیل آزاد شدن بیشتر تنش‌ها، جابجایی بیشتر خاک و کاهش ظرفیت باربری شمع‌ها، شمع‌ها در راستای قائم بیشتر جابجا می‌شوند. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های ثبت شده از نشست

۳-۳- اثر حفر تونل بر رفتار شمع

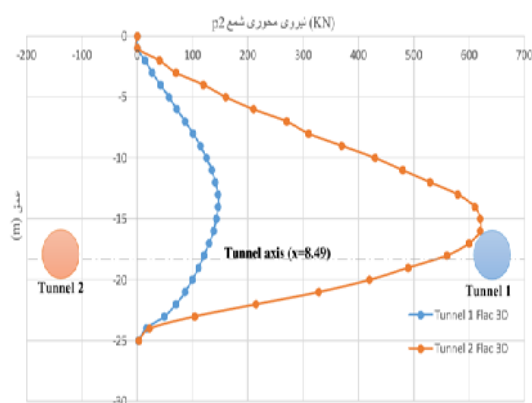
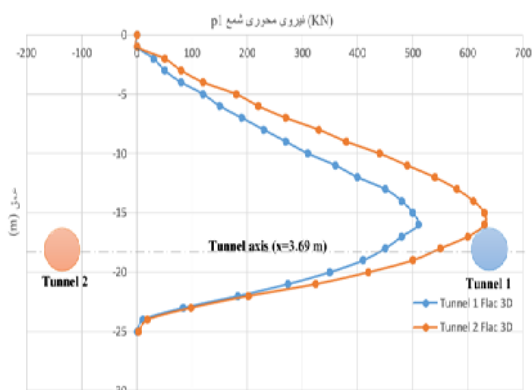
در این بخش، اثر حفر تونل بر رفتار شمع مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تحلیل و بررسی شمع‌هایی که بخش زیادی از بار سازه را تحمل می‌کنند، اهمیت بیشتری دارد. به همین منظور در این بخش شمع‌های میانی $P1$ و $P2$ بررسی می‌شوند. شمع‌ها با استفاده از المان ساختاری شمع ($Pile$) با خواص بتن مسلح و با مدول الاستیسیته ۲۵ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ با رفتار الاستیک خطی مدل‌سازی شدند و بار ناشی از وزن پل به نوک شمع‌ها وارد شده است. عبور تونل از مجاورت شمع‌ها باعث آزاد شدن تنش‌ها، سست شدن و جابجایی خاک می‌شود که این عامل باعث

گرفته است و تغییرات نیروی محوری در آن بیشتر از شمع $p2$ می‌باشد. در اثر حفر تونل دوم تغییرات نیروی محوری شمع‌ها افزایش می‌یابد، با توجه به اینکه تونل دوم در مجاورت شمع $p2$ قرار دارد و از شمع $p1$ فاصله بیشتری دارد بنابراین تغییرات نیروی محوری در شمع $p2$ بیشتر از شمع $p1$ است. نیروی محوری شمع $p1$ در اثر حفر تونل دوم به میزان ۲۰٪ افزایش یافته است که البته این تغییر در زمین‌های شنی ۲۷٪ بوده است (Ng, et al., 2014) اما در مجموع به دلیل موقعیت قرار گیری مشابه نسبت به تونل‌ها تغییرات نیروی محوری در شمع‌ها تقریباً مشابه می‌باشد.

سنج‌ها مطابقت خوبی دارند.



شکل ۷-جابجایی قائم شمع



شکل ۸- نیروی محوری شمع

حفاری تونل باعث بوجود آمدن جابجایی افقی و قائم خاک می‌شود. جابجایی افقی خاک باعث بوجود آمدن نیروی افقی می‌شود و به دلیل کمتر بودن سختی شمع در راستای افقی باعث ایجاد ممان خمشی در شمع می‌شود. افزایش جابجایی جانبی در خاک سبب افزایش ممان خمشی در شمع می‌شود (Basil, F., 2014).

حفر تونل در مجاورت شمع‌ها باعث حرکت خاک به سمت ناحیه حفاری شده، می‌شود. از این رو این جابجایی‌های بوجود آمده در خاک، چسبندگی بین شمع و خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد و سبب ایجاد تغییراتی در نیروی محوری آن می‌شود (Lee, C. J, et al., 2006). بیشینه نشست زمین بعد از حفر تونل دوم در زمین در مجاورت شمع‌ها ۴ میلی‌متر و نشست حاصل از شمع‌های میانی حدود ۲ میلی‌متر می‌باشد. این اختلاف نشست بین شمع‌ها و خاک مجاور آن باعث بوجود آمدن اصطکاک جداری می‌شود. در اثر بوجود آمدن اصطکاک جداری، نیروی محوری در طول شمع القا می‌شود (Basile, F., 2014). شکل ۸ تغییرات نیروی محوری شمع‌های میانی را در اثر حفر تونل‌های دوقلو نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نیروی محوری در زیر محور تونل و از انتهای شمع به تدریج تا رسیدن به محور تونل افزایش و پس از آن تا رسیدن به نوک شمع کاهش یافته و شمع $p1$ که در فاصله نزدیک‌تری از تونل قرار دارد، بیشتر از شمع $p2$ تحت تاثیر حفاری قرار

و نیروی افقی خاک قرار می‌گیرد و تنها بخشی از این خمش جبران می‌شود، پس می‌توان نتیجه گرفت که تونل دوم، بعلاوه تغییر جهت نیرو و جابجایی افقی، باعث کاهش ممان خمشی در شمع $p1$ و افزایش آن در شمع $p2$ می‌شود؛ اما تغییرات نهایی ممان خمشی هر دو شمع با توجه به بوجود آمدن یک حالت پایدار تقریباً مشابه هم می‌باشند.

۳-۴- واکنش شمع در مقابل تغییر نسبت روباره به قطر تونل

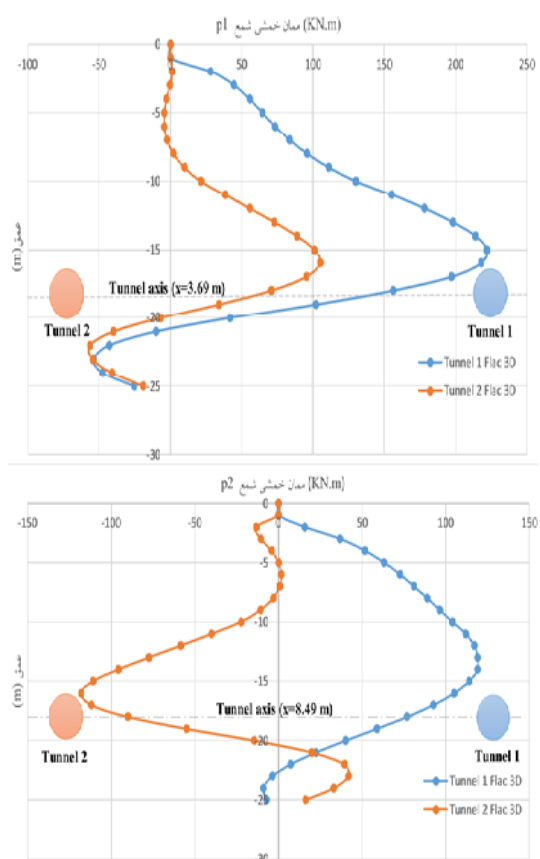
در این پژوهش، با بررسی تاثیر تونل‌های دوقلو بر روی نیروی محوری، ممان خمشی و جابجایی قائم شمع و همچنین سازه پل، مشاهده شد که تونل دوم باعث افزایش نیروی محوری و جابجایی قائم شمع شده و همچنین ممان خمشی شمع نیز دارای این تغییرات است. به منظور تحلیل موقیت قرارگیری قائم تونل‌ها و از آنجایی که نسبت ارتفاع روباره به قطر تونل در تغییر نیروهای القایی مؤثر است، در این پژوهش، وضعیت شمع (با طول ثابت و پای شمع در زیر راستای کف تونل قرار دارد) در سه نسبت متفاوت روباره به قطر تونل (۱، ۱،۶ و ۲،۲) بررسی گردید که به دلیل اهمیت بیشتر شمع‌های میانی فقط شمع‌های $P1$ و $P2$ بررسی شدند.

شکل ۱۰ تغییرات نیروی محوری شمع‌های $P1$ و $P2$ را در راستای طول شمع (عمق) با نسبت‌های مختلف روباره به قطر $\left(\frac{H}{D}\right)$ نشان می‌دهند. نیروی محوری شمع‌ها در هر سه نسبت از زیر محور افزایش می‌یابد و به بیشینه مقدار خود در مجاورت محور تونل می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد.

در شمع‌های اصطکاکی بخشی از نیروی محوری توسط نیروی اصطکاک برشی در راستای شمع خنثی می‌شود. در این پژوهش، با توجه به کاهش نیروی محوری، با افزایش عمق و همچنین بدلیل افزایش جابجایی قائم زمین نسبت به شمع و بوجود آمدن اصطکاک جداره وارد شده به شمع، نیروی محوری شمع‌های $P1$ و $P2$ با افزایش نسبت روباره به قطر کاهش پیدا کرده است و تغییرات آن‌ها به دلیل موقعیت قرارگیری یکسان نسبت به تونل‌ها تقریباً مشابه می‌باشند. این موضوع در مطالعات (Poulos, et al., 1989) نیز تایید می‌شود.

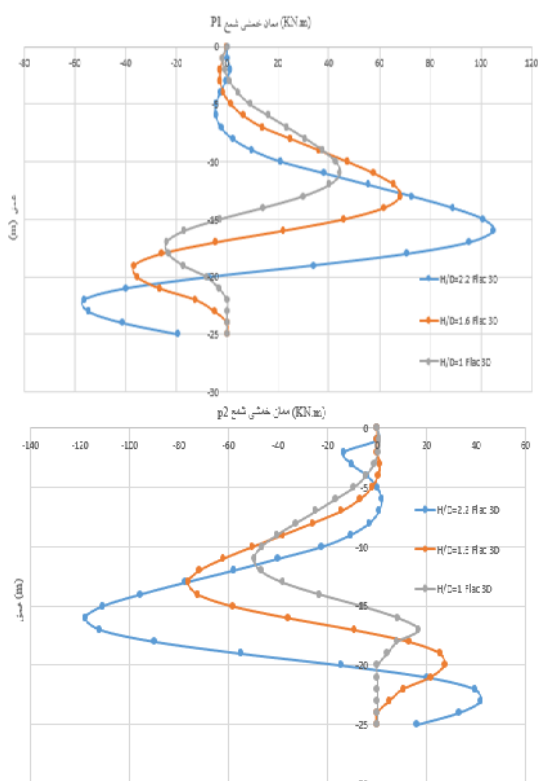
تأثیر نسبت‌های مختلف روباره به قطر تونل بر روی ممان خمشی شمع‌های میانی بررسی شد. شکل ۱۱ تغییرات

تغییرات ممان خمشی ایجاد شده در مقابل عمق (طول شمع) در اثر حفر تونل، در شکل ۹ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ممان خمشی در شمع $p1$ که در فاصله کمتری از تونل قرار دارد به علت نیرو و جابجایی جانبی بیشتری است که به آن اعمال می‌شود، تقریباً دو برابر شمع $p2$ می‌باشد. نمودار ممان خمشی دارای انحنایی می‌باشد که در مجاورت محور تونل اتفاق می‌افتد و خمیدگی شمع همیشه به سمتی می‌باشد که تونل قرار دارد.



شکل ۹- ممان خمشی شمع

ممان خمشی شمع‌های $p1$ و $p2$ در اثر حفر تونل دوم تحت تاثیر بیشتر نیرو و جابجایی جانبی قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه شمع $p2$ در فاصله نزدیکتری نسبت به شمع $p1$ از تونل دوم دارد، بنابراین اثر جابجایی جانبی خاک بر روی شمع $p2$ بیشتر از شمع $p1$ می‌باشد. تغییرات ممان خمشی در شمع $p2$ بیشتر است اما بدلیل اینکه شمع $p1$ در فاصله بیشتری از تونل دوم قرار دارد کمتر تحت تاثیر جابجایی



شکل ۱۱- تغییرات ممان خمشی با نسبت روباره به قطر مختلف

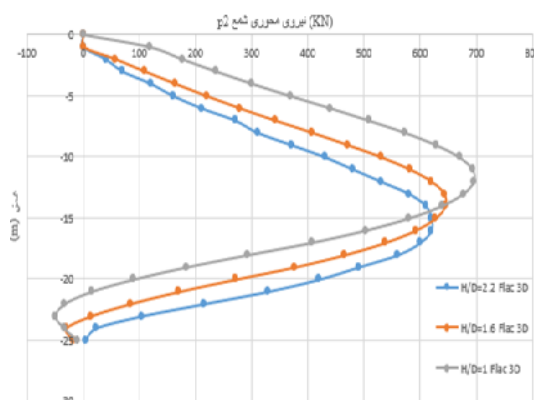
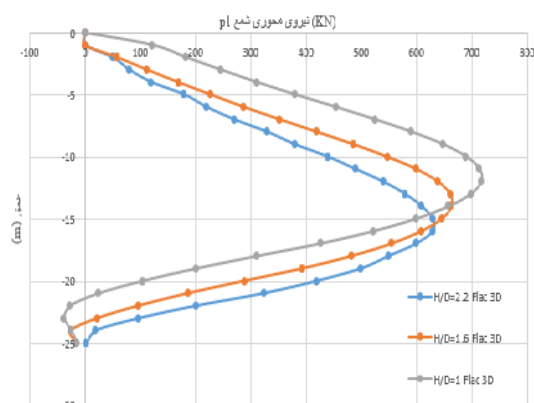
۴- نتیجه‌گیری

حفر تونل در محیط‌های شهری باعث وارد آمدن خسارات جدی به سازه‌های مجاور (مانند پلها) می‌شود. در این مقاله تاثیر حفاری تونل خط ۲ متروی شیراز بر شمع‌های پل کمربندی جنوبی با استفاده از مدلسازی عددی و بررسی نشست‌های ثبت شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج زیر حاصل گردیده است:

- نشست از فاصله حدود سه برابر قطر تونل از جلوی جبهه کار شروع شده و تا دو برابر قطر تونل در پشت‌جبهه کار به مقدار ثابتی می‌رسد.
- استفاده از شمع می‌تواند نشست زمین را تا ۲۰ درصد کاهش دهد.
- جابجایی قائم شمع‌ها در تمام طول آن تقریباً ثابت و کمتر از نشست زمین می‌باشد که بیانگر سختی موثر شمع در راستای محور آن است و تغییرات جابجایی قائم در شمع‌هایی که در فاصله نزدیکتری از تونل قرار دارد بیشتر است.

ممان خمشی در راستای طول شمع با نسبت‌های مختلف روباره به قطر تونل را نشان می‌دهد. ممان خمشی شمع‌ها در نزدیکی محور تونل با توجه به جابجایی بیشتر خاک در این ناحیه دارای بیشینه مقدار خود می‌باشند.

در صورتی‌که پای شمع در زیر محور تونل قرار گیرد، با افزایش نسبت روباره به قطر تونل $(\frac{H}{D})$ ، به دلیل افزایش جابجایی و نیروی افقی وارد شده به شمع‌ها ممان خمشی افزایش می‌یابد و شمع‌ها بیشتر تحت خمش قرار می‌گیرند و بیشینه خمش در مجاورت محور تونل اتفاق می‌افتد. در نمودارهای ممان خمشی شمع، همیشه جهت خمش به سمت تونل می‌باشد. با توجه به موقعیت قرارگیری شمع‌های میانی $p1$ و $p2$ نمودار ممان خمشی برای هر سه حالت روباره به قطر تقریباً مشابه می‌باشد و اختلاف در جهت آن است.



شکل ۱۰- تغییرات نیروی محوری با نسبت روباره به قطر مختلف

- اختلاف نشست بین زمین و شمع‌ها باعث بوجود آمدن اصطکاک جداری در بخش بالایی شمع شده که این عامل سبب القای نیروی محوری فشاری در شمع می‌شود که این نیرو از مقدار صفر در نوک شمع افزایش یافته و در مجاورت تونل به مقدار بیشینه رسیده و پس از آن کاهش می‌یابد.
- ممان خمشی در شمع میانی که در فاصله کمتری از تونل قرار دارد به علت نیرو و جابجایی جانبی بیشتری که به آن اعمال می‌شود، تقریباً ۲ برابر شمع است که در فاصله بیشتری قرار دارد. پس از حفر تونل دوم، به دلیل تغییر جهت نیرو و جابجایی افقی خاک، ممان خمشی در شمع $p1$ کاهش و ممان خمشی شمع $p2$ افزایش می‌یابد.
- تغییرات نیروی محوری شمع‌ها در سه نسبت روباره به قطر تونل $(\frac{H}{D})$ ، نشان دادند که در نسبت های کمتر، نیروی محوری شمع‌ها بدلیل افزایش جابجایی قائم زمین نسبت به شمع و بوجود آمدن اصطکاک جداری، افزایش می‌یابد.
- تغییرات ممان خمشی شمع‌ها در سه نسبت روباره به قطر تونل $(\frac{H}{D})$ ، نشان دادند که در نسبت های کمتر، ممان خمشی شمع‌ها بدلیل کاهش جابجایی و نیروی افقی وارد شده از طرف زمین به شمع، کاهش می‌یابد.

۵- منابع و مراجع

- Goh, A. T. C., Wong, K. S., Chen, L. T., Poulos, H. G., & Loganathan, N. (2000). Pile Responses Caused by Tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 580-581.
- Kim, T. J., & Yoo, C. S. (2013). A Numerical Investigation on End Bearing Capacity of Single Pile Installed in Fractured Rock Mass. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 29(1), 61-70.
- Kitiyodom, P., Matsumoto, T., & Kawaguchi, K. (2005). A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunnelling. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 29(15), 1485-1507.
- Lee, C. J., & Jacobsz, S. W. (2006). The influence of tunnelling on adjacent piled foundations. *Tunnelling and underground space technology*, 21(3-4).
- Loganathan, N., Poulos, H. G., & Stewart, D. P. (2000). Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations. *Geotechnique*, 50(3), 283-294.
- Ng, C. W. W., Hong, Y., & Soomro, M. A. (2015). Effects of piggyback twin tunnelling on a pile group: 3D centrifuge tests and numerical modelling. *Géotechnique*, 65(1), 38-51.
- Ng, C. W. W., Soomro, M. A., & Hong, Y. (2014). Three-dimensional centrifuge modelling of pile group responses to side-by-side twin tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 350-361.
- Ng, C. W. W., Lu, H., & Peng, S. Y. (2013). Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on an existing pile. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 189-199.
- Ng, C. W., & Lee, G. T. (2005). Three-dimensional ground settlements and stress-transfer mechanisms due to open-face tunnelling. *Canadian geotechnical journal*, 42(4), 1015-1029.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2015), *FLAC 3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions. User's Manual*.

- Poulos, H. G. (1989). Pile behaviour—theory and application. *Geotechnique*, 39(3), 365-415.
- Soomro, M. A., Hong, Y., Ng, C. W. W., Lu, H., & Peng, S. (2015). Load transfer mechanism in pile group due to single tunnel advancement in stiff clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 63-72.
- Mroueh, H., & Shahrour, I. (2002). Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26(3), 217-230.
- Xu, Q., Zhu, H., Ma, X., Ma, Z., Li, X., Tang, Z., & Zhuo, K. (2015). A case history of shield tunnel crossing through group pile foundation of a road bridge with pile underpinning technologies in Shanghai. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 20-33.