Archive of SID

تاثیر سربار، هندسه استقرار و الگوی حفاری بر رفتار تونل‌های دوقلوی کم‌عمق

امیررضا گودرزی*، استادیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، همدان، ایران
محمد ملکی، دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
مهراد میرسپاهی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، همدان، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk
دریافت: ۹۳/۱۰/۲۵ – پذیرش: ۹٤/۰٤/۲۵

چکیده

تغییرشکل‌های ناشی از احداث تونل نقش موثری در بروز خسارت و ناپایداری سازه‌های سطحی دارد. براین اساس در پژوهش حاضر با استفاده از آنالیز اجزاءِ محدود، اثر الگوهای مختلف حفاری تونل‌های دوقلو کم‌عمق (مانند خطوط مترو) به روش جدید اتریشی (NATM)، با هدف امکان کاهش میزان نشست سطحی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی سه الگوی متداول حفاری مورد استفاده در NATM شامل Top heading (TH)، Central diaphragm wall (CDW) و Side wall drift (SWD) استفاده گردید. تاثیر شرایط مختلف بارگذاری، هندسه استقرار و اختلاف فاز در حفاری تونل‌ها، بر پایداری پوشش آنها و میزان نشست نیز بررسی شد. مقایسه نتایج بین سه الگوی مورد مطالعه نشان می‌دهد در شرایط یکسان بارگذاری و استفاده از الگوی حفاری SWD، میزان تغییرشکل‌ها کاهش و آستانه تحمل بار سطحی تا دو برابر افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، نتایج تحقیق حاضر بیانگر آنست که وضعیت و مقدار سربار، بطور قابل توجهی پاسخ سیستم زمین-تونل را تغییر داده بنحویکه عدم تقارن بارگذاری، سبب افزایش اندرکنش بین تونل‌ها خصوصاً در الگوی TH می‌شود. صرفه‌نظر از شرایط بارگذاری، کاهش فاصله افقی بین تونل‌ها نیز به دلیل افزایش اثر متقابل آنها بر یکدیگر، میزان جابجایی قائم را تشدید می‌کند. همچنین مشخص شد اختلاف فاز در عملیات حفاری، پایداری محیط پیرامون تونل‌ها را کاهش می‌دهد. بر اساس مجموع نتایج تحلیل‌های انجام شده در این مطالعه، استفاده از الگوی Side wall drift با حفاری هم‌فاز و استقرار تونل‌ها در فاصله سه برابری قطر آنها، تا حد زیادی اثرات نامطلوب ناشی از احداث تونل‌های دوقلوی کم‌عمق در زمین‌های نرم را مرتفع خواهد کرد. به طوری که دقت در پیش‌بینی رفتار این قبیل تونل‌ها به شدت تابعی از صحت مدل‌سازی شرایط بارگذاری سطحی است.

واژه‌های کلیدی: تونل دو قلو، روش اجزاء محدود، NATM، الگوی حفاری، نشست سطحی

۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از مناطق شهری، خصوصاً در نواحی با تراکم جمعیتی زیاد، کمبود فضاهای سطحی و همچنین نیاز به رفت و آمد سریع و آسان، باعث افزایش تقاضا برای ساخت تونل‌های کم‌عمق به منظور توسعه شبکه حمل و نقل به‌ویژه خطوط مترو شده است (پنجی و همکاران، ۱۳۹۲). از طرفی، محل استقرار این تونل‌ها به طور معمول در عمق کمتر از ۲۰ متر و در خاک‌های نرم سطحی است. این شرایط سبب شده که با وجود فواید و یا ضرورت برای احداث این قبیل سازه‌ها، ولی اجرای نامناسب آنها بعضاً با مشکلات فراوانی همراه باشد. به عنوان مثال، عدم توجه به ناهمسانی و تراکم‌پذیری زیاد مصالح آبرفتی و همچنین برهم خوردگی شدید میدان تنش در لایه‌های زیرسطحی بر اثر احداث تونل‌های کم‌عمق، می‌تواند باعث ایجاد نشست زیاد، خسارت به ساختمان‌ها و تاسیسات مجاور و حتی ناپایداری کامل جبهه حفاری شود (Kuo et al., 2011; Chu et al., 2007). بنابراین آگاهی از عوامل تاثیرگذار در ایجاد این مخاطرات، نه تنها برای طراحی اولیه صحیح و

www.SID.ir

Archive of SID

اجرای موفق پروژه، بلکه برای تصمیم‌گیری در مورد اقدامات اصلاحی برای سازه‌هایی که پس از احداث تونل دچار آسیب شده‌اند، نیز لازم است. در حال حاضر استفاده از روش‌های عددی به دلیل سرعت و دقت کافی آنها برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پاسخ زمین به حفاری تونل‌های زیرسطحی و پارامترهای موثر بر آن بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Chen et al., 2012; Möller and Vermeer, 2008). به نحوی که، علی‌رغم گستردگی تحقیقات انجام شده در زمینه تونل تک، رفتار تونل‌های دوقلو[1] با شرایط متفاوت بارگذاری و الگوی مختلف حفاری کمتر بررسی شده است (Sun et al., 2012; Kuo et al., 2011; Svoboda et al., 2010; Chen et al., 2009; Yoo and Kim, 2008; Ocak, 2008; Karakus et al., 2007; Farias et al., 2004). انتظار می‌رود ناشی از اندرکنش تونل‌های دوقلو با یکدیگر، نحوه پاسخ سیستم زمین تونل به فرآیند حفاری آنها متمایز از رفتار تونل تک باشد. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر تحلیل عددی تاثیر شرایط بارگذاری، هندسه استقرار، اختلاف فاز در عملیات حفاری و الگوی حفر تونل بر مقدار نشست سطحی، نحوه بازتوزیع نیرو و لنگر در پوشش و میزان تغییرشکل محیط پیرامون تونل‌های دوقلو است. علاوه براین، دقت نتایج استفاده از روش اجزاء محدود (FEM) در مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی تونل‌های دوقلو نیز مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- پیشینه تحقیق

نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد ضعف در شناسایی مشخصات لایه‌های زیرسطحی و اجرای غیرمهندسی عملیات حفاری می‌تواند سبب ایجاد تغییرشکل‌های بیش از حد مجاز ناشی از احداث تونل‌های کم‌عمق شده که در نهایت باعث بروز صدمات اقتصادی و حتی مشکلات زیست‌محیطی خواهد شد (Min et al., 2011; Guglielmetti et al., 2007; Mroueh and Shahrour, 2003). به نحوی که با توجه به محدودیت آزادی عمل در انتخاب مسیر و عمق این قبیل تونل‌ها خصوصاً در نواحی شهری، طراحی و اجرای آنها نیازمند شبیه‌سازی‌های دقیق عددی، ثبت مشاهدات حین حفاری و حفاظت آنها با هدف پیش‌بینی و پیشگیری از نشست‌های سطحی می‌باشد (Mirhabibi and Soroush, 2012; Xiang et al., 2008; No et al., 2006; Rodriguez-Roa, 2002). ازطرفی، روند تغییرشکل‌ها در حین عملیات حفاری سازه‌های زیرزمینی، وابسته به عوامل متعددی است. مقایسه نتایج در شرایط واقعی و مدل‌سازی‌های عددی بیانگر آنست که مقادیر نشست‌های سطحی و جابجایی‌های پیرامون تونل تابعی از روش، الگو و سرعت حفاری می‌باشد (Yoo, 2009; Möller, 2006; Ng et al., 2004). کاراکوس و فول نشان دادند که حفاری مرحله‌ای، نشست سطحی ناشی از احداث تونل‌های تک را تا چند برابر کاهش می‌دهد (Karakus and Fowell, 2003). همچنین وضعیت تغییرات تراز آب زیرزمینی و جهت جریان آب در خاک تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازده عملیات حفاری تونل و میزان تغییرشکل‌های محیطی دارد (Shin et al., 2011; Yoo and Kim, 2008). علاوه بر این، وزن سازه‌های سطحی نقش بسزایی در بازتوزیع تنش‌های زیرسطحی و پایداری سازه‌های پیرامون تونل ایفا می‌کند (Afifipour et al., 2011; Schuster et al., 2009). موقعیت هندسی قرارگیری تونل‌های دوقلو به صورت افقی و یا قائم و شرایط استقرار آنها نسبت به سازه‌های مجاور نیز به طور چشمگیری باعث تغییر پاسخ سیستم زمین-تونل خواهد شد (Ng et al., 2013; Chehade and Shahrour, 2008; Lee and Bassett, 2007). در واقع جمع‌بندی مجموع نتایج مطالعات بررسی شده نشان می‌دهد توانایی در مدل‌سازی صحیح شرایط ساختگاه و آگاهی از عوامل موثر بر فرآیند حفاری سازه‌های زیرزمینی سهم مهمی در ارایه راهکار و شرایط مناسب اجرا با هدف کاهش خسارات احتمالی ناشی از احداث آنها دارد. از سوی دیگر، پیچیدگی محیط پیرامون تونل‌های دوقلوی کم‌عمق (مانند خطوط مترو) از نظر زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (به دلیل سستی زمین و تنوع مصالح)، مجاورت این تونل‌ها با سازه‌های سطحی و شریان‌های حیاطی شهری (مانند شبکه آب و فاضلاب، خطوط توزیع برق و لوله‌های مدفون گاز) و همچنین نظر به تمایل بیشتر برای احداث این قبیل تونل‌ها بجای تونل تک، اهمیت مطالعه پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار آنها را دوچندان می‌کند. بر این اساس و با توجه به محدودیت تحقیقات گذشته در ارزیابی دقیق پاسخ زمین به حفاری تونل‌های دوقلو، انجام پژوهشی جامع در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

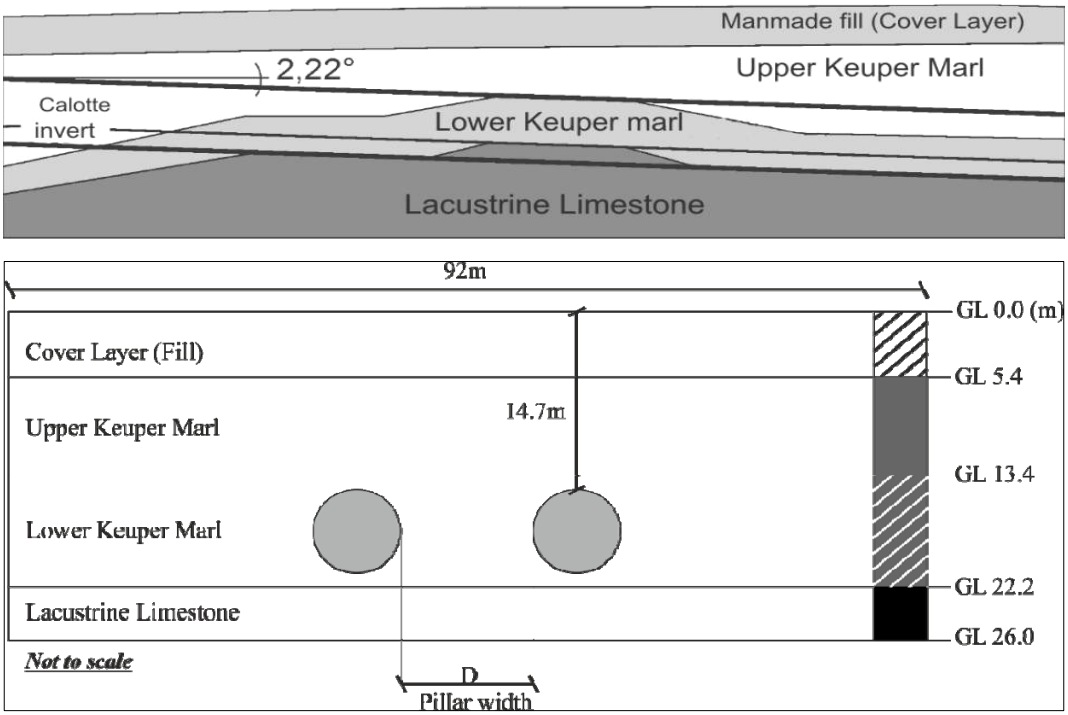
www.SID.ir

Archive of SID

۳- ساختار زمین و محل قرارگیری تونل

به دلیل دسترسی به مشاهدات حین حفاری و مشخصات کامل ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی مربوط به ساختگاه احداث تونل اشتین هالدن فلد در آلمان، ساختار زمین و محل قرارگیری تونل دوقلوی مورد مطالعه در این پژوهش همانند این پروژه انتخاب شد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود لایه فوقانی زمین به صورت خاکریز دستی و دولایه میانی از جنس مارل بوده و مصالح بستر از جنس سنگ آهک نرم است. مقطع تونل تقریباً دایره‌ای و به قطر ٦/٢ متر و فاصله تاج آنها تا سطح زمین ١٤/٧ متر می‌باشد. ضخامت بتن پوشش تونل‌ها ۰/۲۵ متر و حداکثر مدول یانگ آن ۷/۵ GPa در نظر گرفته شده است.

سطح تراز آب زیرزمینی به طور قابل توجهی پایین‌تر از تراز تونل‌ها قرار دارد. بنابراین از اثر فشار آب حفره‌ای و تغییرات آن در حین حفاری صرفه‌نظر و پارامترهای مقاومتی مصالح به صورت زهکشی شده فرض شده‌اند. در جدول ۱ خصوصیات ژئومکانیکی لایه‌های مختلف ارایه شده است.



شکل ۱. نیمرخ زمین و محل استقرار تونل اشتین هالدن فلد (Möller and Vermeer, 2008; Möller, 2006)

جدول۱. خصوصیات ژئومکانیکی ساختگاه محل احداث تونل مورد بررسی در این مطالعه (Möller, 2006)

مشخصه لایه	لایه سطحی (Fill)	لایه دوم (Upper keuper marl)	لایه سوم (Lower keuper marl)	سنگ بستر (Limestone)
وزن مخصوص (γ, kN/m^3)	۲۰	۲٤	۲۳	۲۳
مدول یانگ، (E, MPa)	۱۵	۱۰۰	٦۰	۷۵۰
ضریب پواسون، (υ)	۰/۳۷	۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۲۰
زاویه اصطکاک داخلی، (φ'°)	۲۰	۲۵	۲۵	۳۵
ضریب چسبندگی، (c′, kPa)	۱۰	۲۵	۲۵	۲۰۰
ضریب فشار افقی، (k_0)	۰/۵۷	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/٦۰

www.SID.ir

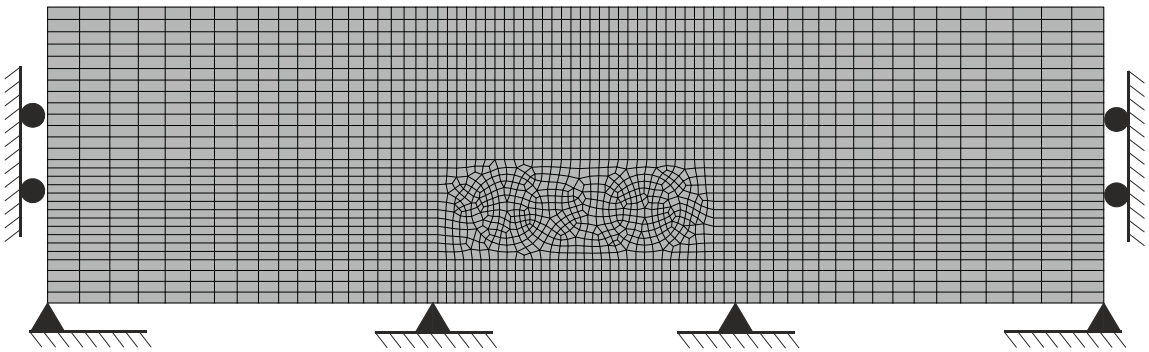
Archive of SID

٤- مدل‌سازی عددی

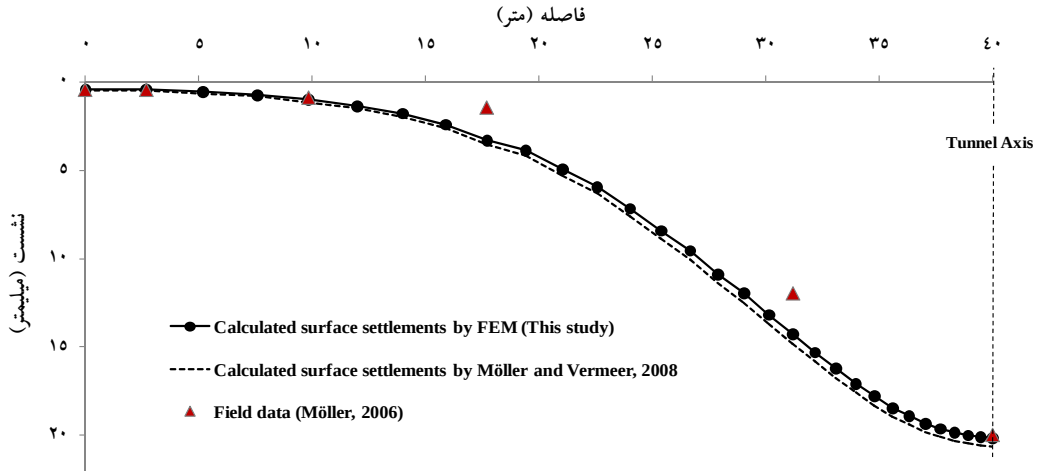
با استفاده از روش اجزاء محدود و توسط نرم‌افزار ABAQUS 6.9 شرایط ساختگاه و مشخصات تونل مدل‌سازی و تاثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ زمین و بازتوزیع نیرو و لنگر در پوشش تونل‌ها تجزیه و تحلیل شد. لازم به ذکر است نرم‌افزار آباکوس از توانایی ویژه‌ای برای بررسی رفتار تونل برخوردار می‌باشد (Mirhabibi and Soroush, 2012; Helwany, 2007). فرض کرنش مسطح به دلیل شرایط و نوع سازه تونل، مدنظر قرار گرفت. برای شبیه‌سازی خاک از المان پوسته‌ای (CPE4R) و از مدل رفتاری مور-کولمب استفاده شد. رفتار بتن پوشش به صورت الاستیک خطی و با المان تیر (B21) مدل شد. با درنظر گرفتن المان‌های خاص تماسی مابین خاک و بتن پوشش، لغزش مابین آنها صفر فرض گردید. روش کاهش سختی پوشش[۲] با δ برابر ۰/۰۵، برای مدل‌سازی دوبعدی روند حفاری مدنظر قرار گرفت (Möller, 2006).

ابعاد مدل به نحوی انتخاب شده که اثرات صلبیت شرایط مرزی بر نتایج، حداقل ممکن باشد. با قراردادن تکیه‌گاه‌های غلتکی در صفحات قائم جانبی، مدل فقط در راستای عمودی اجازه حرکت دارد. در مرز انتهایی نیز مدل در دو جهت افقی و قائم بسته شده و اجازه تغییر مکان نخواهد داشت. شکل ۲ نحوه اعمال شرایط مرزی و مش‌بندی مدل برای تحلیل‌های دوبعدی را نشان می‌دهد.

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس، نتایج نشست‌های سطحی محاسبه شده از روش اجزاء محدود با مقادیر واقعی ثبت شده از محل پروژه و نتایج مطالعات قبلی با یکدیگر مقایسه و در شکل ۳ ارایه گردیده است. مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق و فرضیات آن از اعتبار و دقت کافی برخوردار می‌باشد.



شکل۲. نحوه اعمال شرایط مرزی ومش‌بندی مدل دوبعدی در نرم‌افزار آباکوس



شکل۳. مقایسه بین نتایج حاصل از روش اجزاء محدود و پاسخ واقعی زمین به حفاری تونل اشتین هالدن فلد

www.SID.ir

Archive of SID

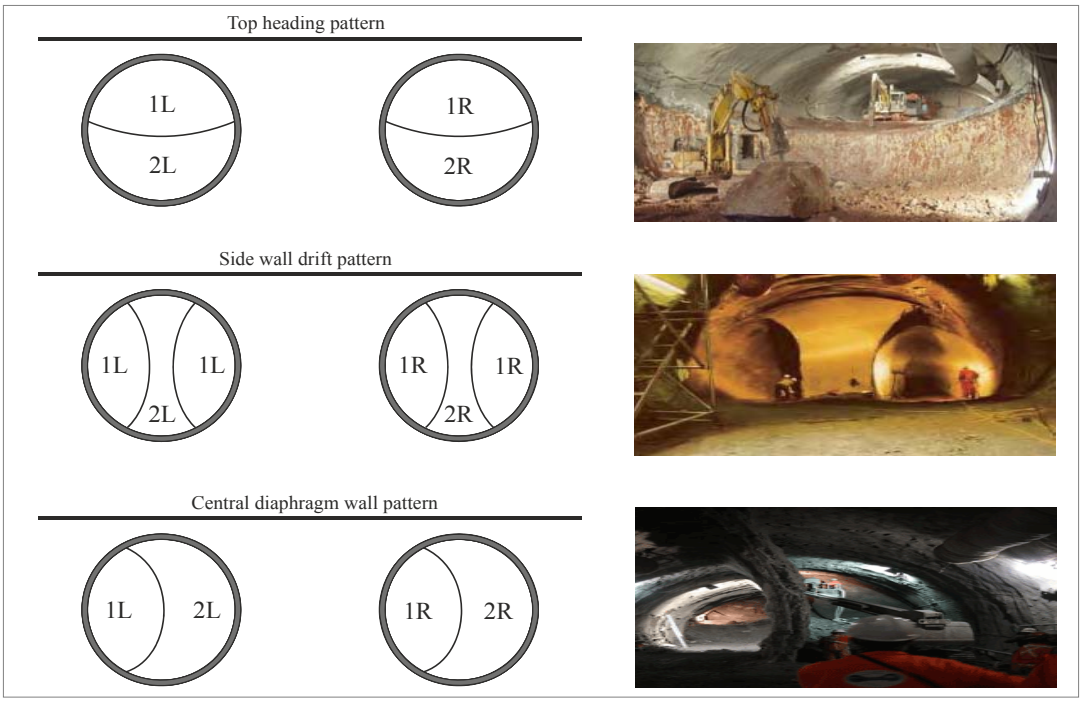
۵- مطالعه پارامتریک

۵-۱- الگوی حفاری

روش تونل‌زنی جدید اتریشی (NATM)[۳] یکی از روش‌های متداول دستی برای حفر تونل‌های کم‌عمق بوده که از انعطاف‌پذیری زیادی در مواجهه با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت برخوردار است (Chen et al., 2012; Yoo and Kim, 2008; Ng et al., 2004). تونل‌زنی به روش جدید اتریشی، معمولاً از طریق الگوهای مختلفی انجام می‌شود. در این تحقیق تاثیر سه الگوی متداول این روش شامل Top heading، Side wall drift و Central diaphragm wall با هدف امکان افزایش بازده عملیات حفاری تونل‌های دوقلوی کم‌عمق مورد بررسی قرار گرفت. شکل ٤ جزئیات الگوهای مورد بررسی را بطور ساده نشان می‌دهد. در این شکل، منظور از L تونل سمت چپ، R تونل سمت راست، عدد ۱ فاز نخست حفاری و عدد ۲ فاز دوم حفاری است.

۵-۲- شرایط مختلف بارگذاری

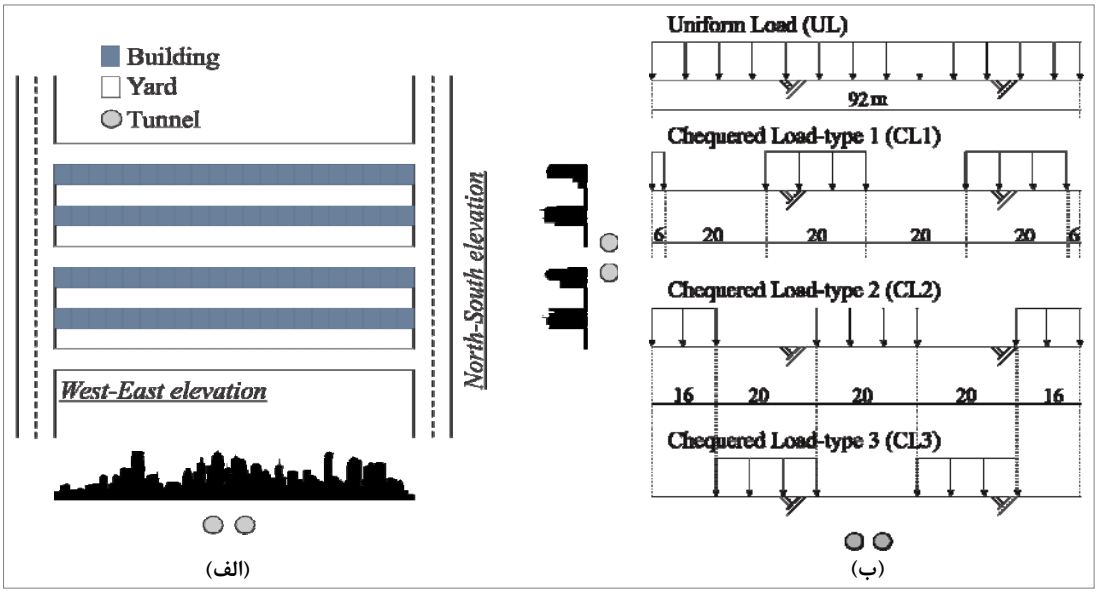
تونل‌های زیرسطحی شبکه حمل و نقل شهری معمولاً از زیر ساختمان‌ها و تاسیسات و یا از مجاورت آنها عبور می‌کنند. از طرفی، در مطالعات قبلی رفتار تونل‌های دوقلو با شرایط متفاوت سربار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو در پژوهش حاضر، تاثیر آرایش متفاوت سازه‌های سطحی و اثر ترکیب توأم آن با سایر متغیرهای حفاری بررسی شد. بدین منظور شرایط قرارگیری سازه‌ها بر روی زمین مطابق با بافت شهری مرسوم در ایران مدنظر قرار گرفت (شکل ۵-الف). به نحوی که با توجه به موقعیت تونل نسبت به محل سازه‌ها، چهار وضعیت مختلف بارگذاری سطحی شامل UL (باریکنواخت)، CL1، CL2 و CL3 مطابق شکل (۵-ب) و شرایط بدون سربار (GF)[٤] در نرم‌افزار مدل شد. میزان تنش سطحی ناشی از ساختمان‌ها برابر با ۹۰ کیلوپاسکال، سختی و ضریب پواسون پی آنها به ترتیب ۲۰ GPa و ۰/۲۵ و ضخامت کلیه پی‌ها برابر ۸۰ سانتیمتر اعمال گردید.



شکل٤. الگوهای متداول حفاری تونل به روش جدید اتریشی و شرایط شبیه‌سازی آنها در تحقیق حاضر

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۵. وضعیت‌های مختلف بارگذاری سطحی درنظر گرفته شده برحسب بافت شهری مرسوم در ایران

۵-۳- زمان تأخیر در حفاری (اختلاف فاز در حفاری)

منظور از زمان تأخیر در عملیات حفاری، فاصله زمانی مابین حفاری تونل سمت چپ و راست است. که از آن با عنوان step-lag یاد می‌شود. در این تحقیق تاثیر سه نوع اختلاف فاز شامل 0-step-lag، 1-step-lag و 2-step-lag مورد بررسی قرار گرفت. در حالت 0-step-lag، فرض شده که روند حفاری هر دو تونل همزمان باشد. بنابراین در شبیه‌سازی عددی، ابتدا ناحیه‌های 1L و 1R و سپس ناحیه‌های 2L و 2R برداشته می‌شوند. در حالت 1-step-lag، ابتدا ناحیه 1L برداشته شده سپس 2L با 1R و در مرحله آخر ناحیه 2R حفاری می‌شود. منظور از 2-step-lag، حفاری کامل تونل سمت چپ و سپس حفاری تونل سمت راست است. لذا در تحلیل عددی، ابتدا ناحیه 1L، سپس ناحیه 2L، در مرحله سوم ناحیه 1R و در آخر ناحیه 2R برداشته شده‌اند.

۵-۴- موقعیت هندسی تونل‌ها نسبت به یکدیگر

با توجه به محدودیت آزادی عمل در انتخاب مسیر تونل‌های زیرسطحی خصوصاً در نواحی شهری، تاثیر فاصله افقی تونل‌های دوقلو نسبت به یکدیگر به عنوان یک متغیر مستقل در این پژوهش مورد توجه قرار گرفت. با توجه به شکل ۱، فاصله بین تونل‌ها که با عنوان Pillar-width نامیده شده از یک برابر قطر تونل‌ها (تقریباً ٦ متر) تا چهار برابر قطر آنها تغییر و اثرات آن بر نتایج تجزیه و تحلیل گردید.

٦- ارایه نتایج و تحلیل آنها

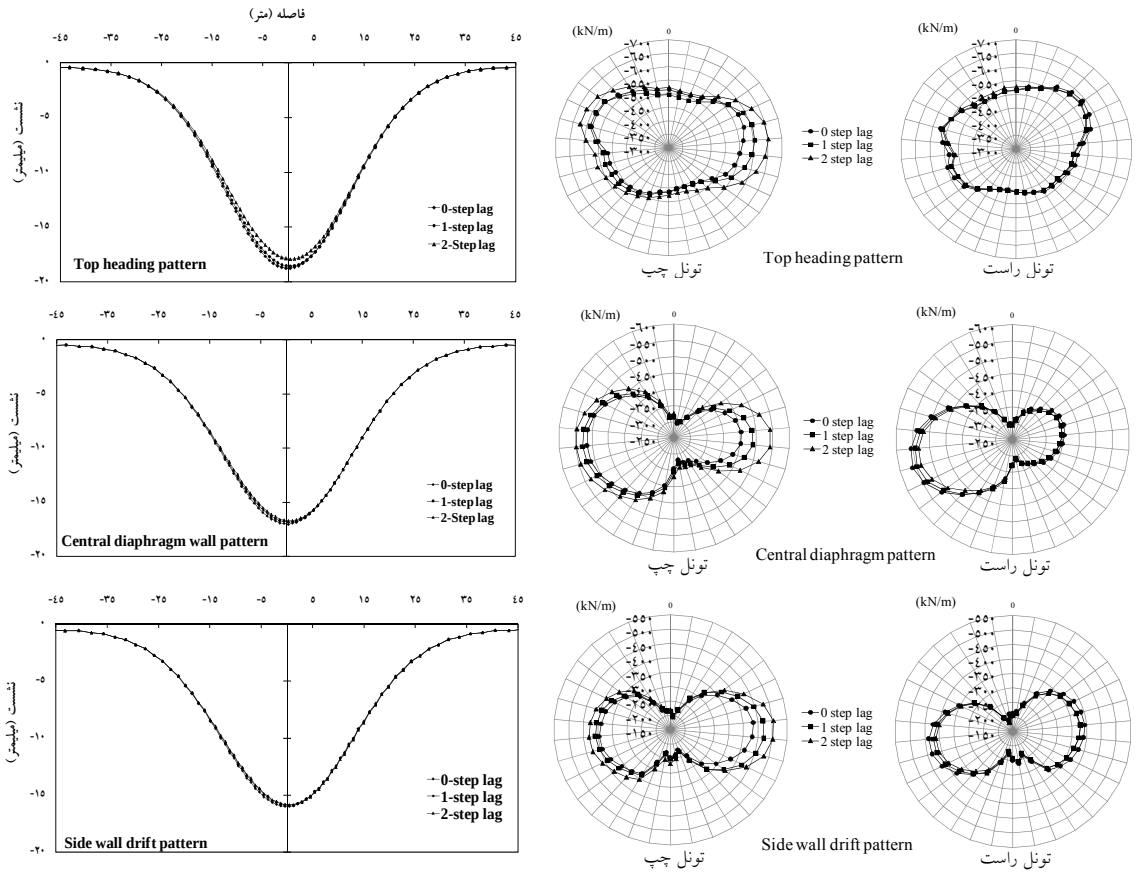
٦-١- ارزیابی تاثیر الگو و اختلاف فاز حفاری بر میزان نشست سطحی

یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر بررسی عوامل موثر در کاهش تغییرشکل‌ها ناشی از احداث تونل‌های زیرسطحی، به‌منظور جلوگیری از بروز خسارت به سازه‌های مجاور آنها است. بدین منظور ابتدا، تاثیر توأم الگو و اختلاف فاز حفاری در شرایط بدون سربار بر میزان نشست سطحی (شکل ٦-الف) و بازتوزیع نیرو در پوشش تونل‌ها (شکل ٦-ب) بررسی شد.

نتایج مربوط به سه الگوی حفاری مورد مطالعه در شکل ٦ نشان می‌دهد اختلاف فاز در عملیات حفاری تاثیر چندانی بر میزان نشست سطحی ندارد. از طرفی مقایسه مقدار میانگین نشست سطحی (با فازهای مختلف حفاری) در هر روش و ارایه آن در شکل ۷، موید کاهش ۱۵ درصدی مقادیر نشست برای روش Side wall drift نسبت به روش Top heading است.

www.SID.ir

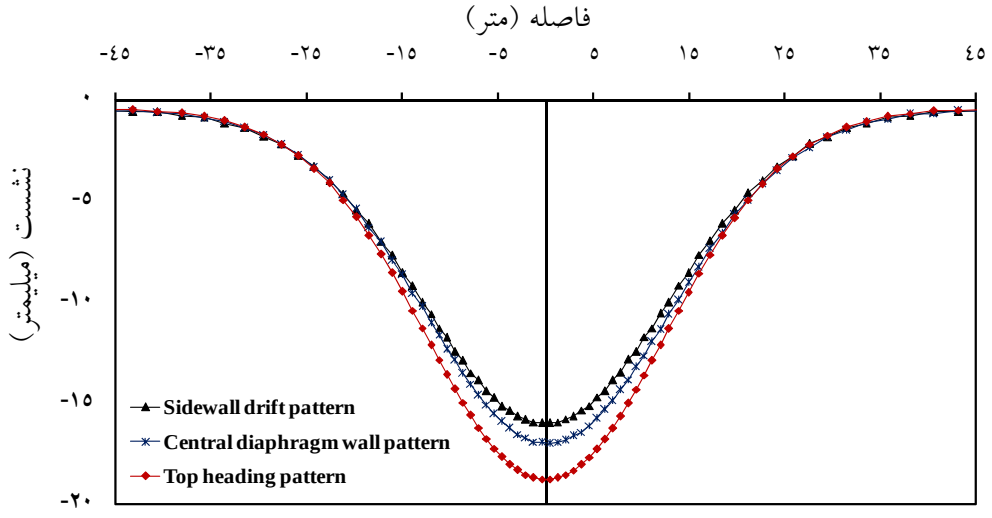
Archive of SID



(الف) (ب)

شکل٦. الف. تغییرات نشست سطحی زمین برحسب الگو و فازهای مختلف حفاری تونل‌های دوقلو

ب- تغییرات بازتوزیع نیروهای سطحی در پوشش تونل‌های سمت چپ و راست برحسب الگو و فازهای مختلف حفاری



شکل۷. مقایسه تاثیر الگوهای مختلف حفاری تونل‌های دوقلو بر میزان نشست سطحی زمین در شرایط بدون سربار

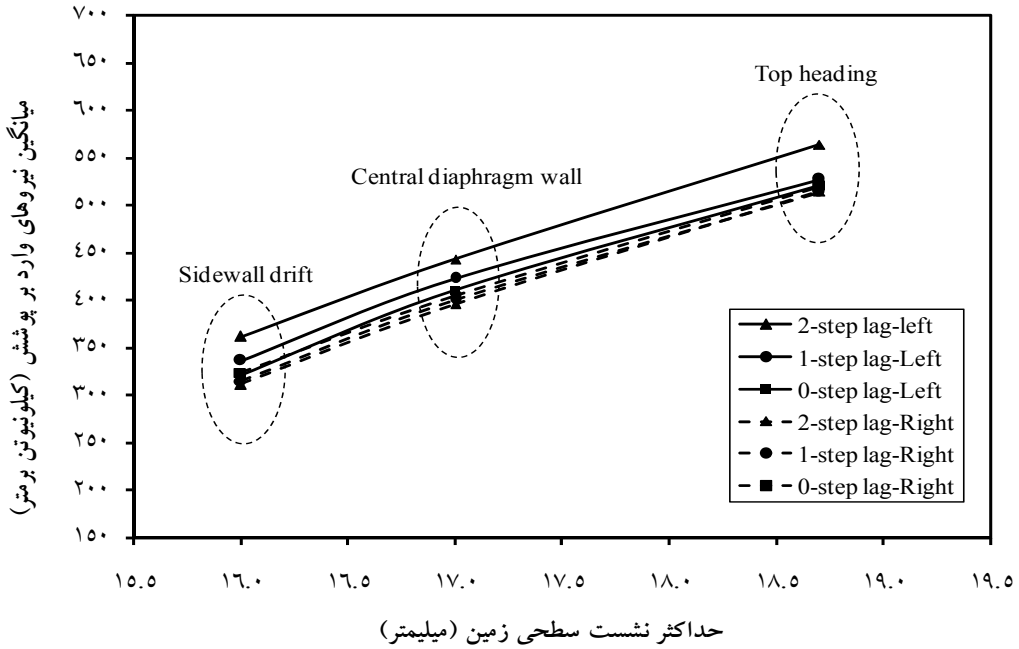
www.SID.ir

Archive of SID

با ترسیم میانگین بازتوزیع نیروها در جداره هر دو تونل بر حسب حداکثر نشست در شکل ۸ علت بازده بهتر تونل‌زنی در الگوی SWD را می‌توان به جذب بیشتر انرژی در جداره تونل‌ها ارزیابی کرد. از سوی دیگر، نتایج شکل ۸ نشان دهنده آنست که علی‌رغم تاثیر محدود اختلاف فاز در میزان نشست سطحی، ولی برای یک الگوی مشخص حفاری، احداث تونل‌ها در حالت حفاری هم‌فاز (0-step-lag) سبب افزایش بیشتر پایداری جداره تونل (کاهش میزان نیروها) خواهد شد. در واقع می‌توان گفت اختلاف فاز در حین حفاری، بر نحوه اندرکنش تونل‌ها تاثیر داشته بطوریکه حفاری تونل‌ها به صورت هم‌فاز باعث کاهش فشار برکنش آنها بر یکدیگر می‌گردد (Yoo, 2009; Ng et al., 2004). اگرچه اثر اختلاف فاز در حفاری بر پاسخ کلی زمین و برآیند تغییرشکل‌های بوجود آمده برروی سطح ناچیز است.

۶-۲- تاثیر شرایط سربار سطحی بر پاسخ زمین-تونل

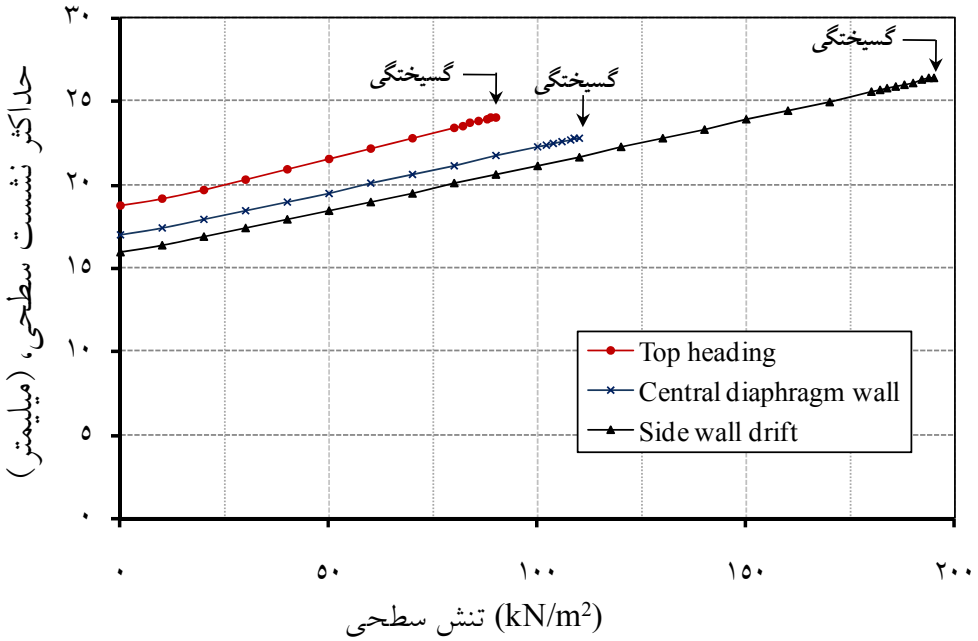
همانطور که قبلاً مطرح شد عبور تونل‌های زیرسطحی شبکه حمل و نقل شهری از زیر و یا مجاورت ساختمان‌ها و تاسیسات تقریباً اجتناب‌ناپذیر است. از اینرو و با توجه به محدودیت مطالعات گذشته در رابطه با تاثیر مشخصات سربار بر رفتار تونل‌های دوقلو، در این پژوهش روند تغییرات میزان نشست زمین و اندرکنش بین تونل‌ها تحت حالت‌های مختلف بارگذاری سطحی تجزیه و تحلیل شد. نتایج شکل ۹ موید آنست که با افزایش سربار مقدار نشست‌های سطحی افزایش می‌یابد. از طرفی ملاحظه می‌شود استفاده از الگوی حفاری Side wall drift در شرایط حضور سربار نیز باعث کاهش نشست در مقایسه با سایر روش‌ها خواهد شد. همچنین آستانه تحمل مقدار بار سطحی در حالت استفاده از الگوی SWD در حدود دو برابر بیشتر بوده که علت آنرا می‌توان به شرایط خاص این الگو در جذب بهتر انرژی در جبهه حفاری نسبت داد.



شکل۸ مقایسه تاثیر اختلاف فاز در حفاری بر مقدار میانگین بازتوزیع نیرو در پوشش تونل‌ها در شرایط بدون سربار

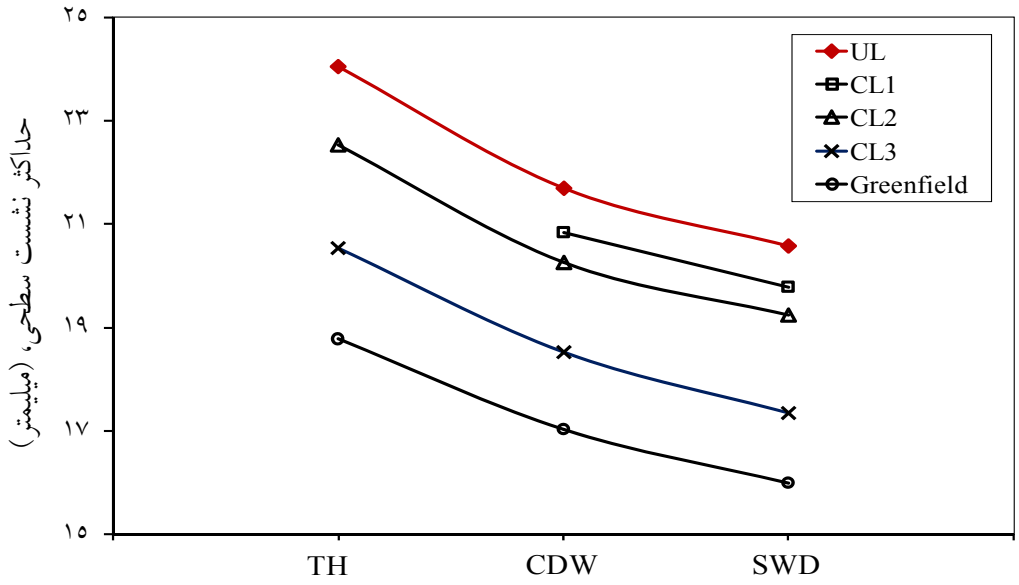
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹. تاثیر توأم الگوی حفاری و سربار بر مقدار نشست سطحی ناشی از احداث تونل‌های دوقلو

نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد علاوه بر مقدار سربار، موقعیت آن نسبت به تونل‌های زیرسطحی نیز بطور قابل توجهی پاسخ زمین را تغییر خواهد داد. مشاهده می‌شود علی‌رغم یکسان بودن میزان بار، ولی تفاوت در موقعیت بارگذاری‌های CL1، CL2 و CL3، باعث تغییر قابل ملاحظه مقدار نشست حداکثر سطحی خصوصاً در حالت بارگذاری نامتقارن (CL1) شده است. بنحویکه جبهه حفاری در حالت استفاده از الگوی Top heading ناشی از عدم تقارن سربار، کاملاً گسیخته گردید.



شکل ۱۰. تغییرات حداکثر نشست سطحی ناشی از وضعیت مختلف بارگذاری و تفاوت الگوی حفاری

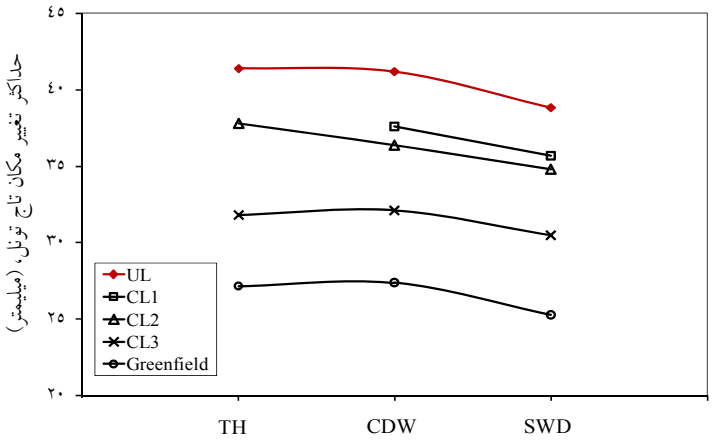
www.SID.ir

Archive of SID

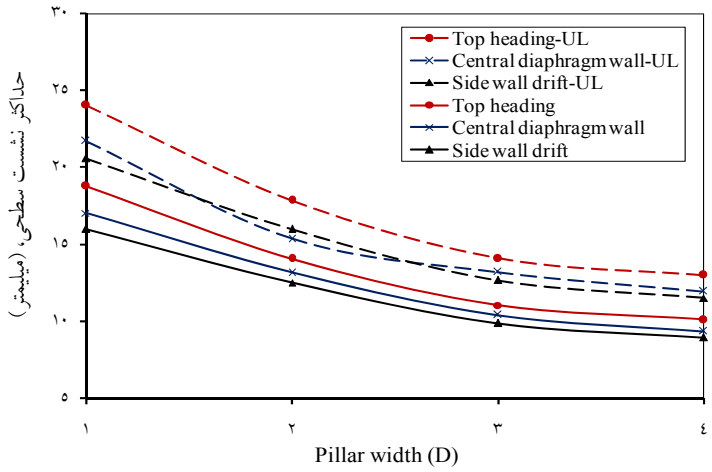
نتایج شکل ۱۱ نیز بیانگر آنست که مقدار و موقعیت سربار واقع بر روی زمین سبب تفاوت در مقدار تغییرمکان‌های قائم تاج تونل خواهد شد. مشاهده می‌شود افزایش بار به دلیل تغییر شرایط میدان اولیه تنش در داخل زمین (Afifipour et al., 2011) منتج به نشست‌های سطحی بیشتر و تشدید قابل ملاحظه تغییرمکان در جداره تونل‌ها شده است. به عبارت دیگر، با توجه به مجموع نتایج شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که آگاهی از مقدار و موقعیت سربار و مدلسازی صحیح آن، نقش حائز اهمیتی در پیش‌بینی درست اثرات ناشی از حفر تونل‌های دوقلو و کاهش ریسک عملیات حفاری در زمان احداث آنها ایفا می‌کند. لازم به ذکر است نتایج ارایه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، عملکرد بهتر حفاری با استفاده از الگوی Side wall drift در شرایط وجود سربار و در حالت‌های مختلف بارگذاری را نیز تائید می‌نمایند.

۶-۳- تاثیر فاصله افقی بین تونل‌ها بر بازده عملیات حفاری

در شکل ۱۲ تغییرات مقدار حداکثر نشست سطحی به ازای افزایش فاصله افقی بین تونل‌ها برای الگوی‌های مختلف حفاری و دو حالت بدون سربار (GF) و سربار یکنواخت (UL) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود با افزایش Pillar-width مقدار نشست، در کلیه الگوی‌های مختلف حفاری مورد مطالعه و شرایط متفاوت بارگذاری کاهش می‌یابد. بنحویکه نتایج بدست آمده انطباق مناسبی با تحقیقات قبلی دارد (Chen et al., 2009; Chehade and Shahrour, 2008).



شکل ۱۱. تاثیر شرایط بارگذاری و الگوی حفاری بر حداکثر تغییرمکان‌های قائم تاج تونل



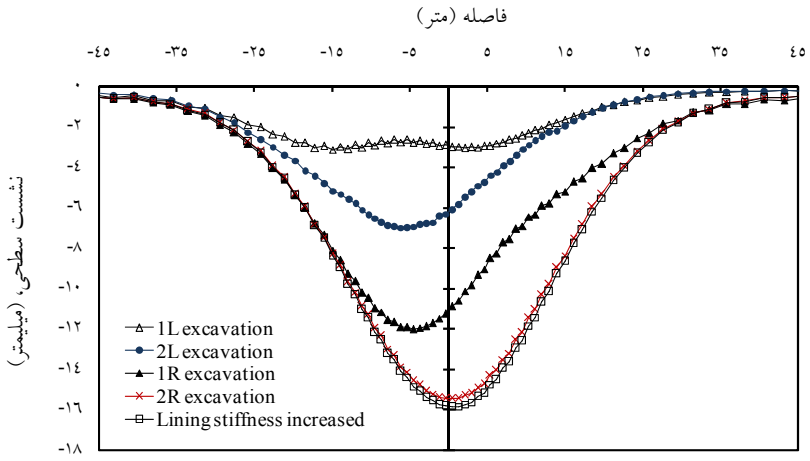
شکل۱۲. تغییرات نشست سطحی با افزایش فاصله افقی بین تونل‌ها برای الگوی‌های مختلف حفاری و شرایط متفاوت بارگذاری

www.SID.ir

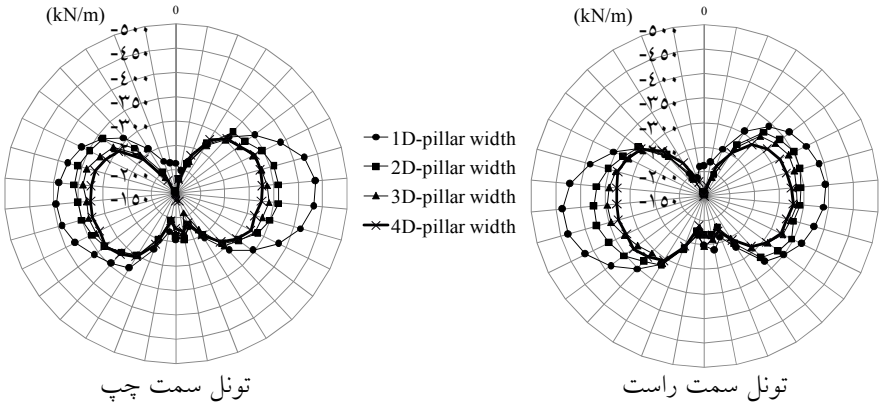
Archive of SID

با توجه به نتایج شکل ۱۲، علت کاهش میزان تغییرشکل زمین با افزایش فاصله افقی بین تونل‌ها را می‌توان ناشی از کاهش اندرکنش بین تونل‌ها ارزیابی کرد. بنحویکه انتظار می‌رود ناشی از حضور توأم دو تونل و اندرکنش بین آنها، میزان نشست سطحی افزایش یافته که با بیشتر شدن فاصله بین تونل‌ها، شدت بخشی تاثیر آن بر پاسخ زمین تقلیل خواهد یافت. بر این اساس و با هدف بررسی استدلال ارایه شده، روند تدریجی نشست سطحی در حالت 2-step-lag برای الگوی حفاری Side wall drift تحلیل و نتایج آن در شکل ۱۳ ارایه شد. ملاحظه می‌شود پس از احداث کامل تونل سمت چپ (حفاری مرحله 2L)، مقدار حداکثر نشست در حدود ۷ میلیمتر بوده که پس از احداث کامل تونل سمت راست، مقدار آن به حدود ۱۶ میلیمتر افزایش یافته است. به عبارت دیگر میزان نشست حداکثر ناشی از احداث تونل دوم حدود ۳۰ درصد بیشتر بوده که علت آنرا می‌توان ناشی از وجود تونل اول و در واقع متاثر از شرایط اندرکنش بین تونل‌ها ارزیابی کرد.

با هدف تفسیر دقیق‌تر تاثیر اندرکنش بین تونل‌های دوقلو در تشدید پاسخ زمین–تونل، تغییرات بازتوزیع نیرو در پوشش جداره تونل‌ها برای الگوهای مختلف حفاری و شرایط متفاوت سربار بر حسب افزایش Pillar width محاسبه گردید. با توجه به شباهت روند تغییرات، صرفاً نتایج مربوط به حفاری هم‌فاز و الگوی Side wall drift با شرایط بدون سربار در شکل ۱۴ ارایه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده، کاهش مقدار نیرو در پوشش با افزایش Pillar width و در واقع فرض کاهش اندرکنش بین تونل‌های دوقلو ناشی از افزایش فاصله افقی بین آنها را تایید می‌کند. در این حالت ناشی از کاهش جابجایی پیرامون تونل‌ها و با توجه به نتایج شکل ۱۲، مقدار حداکثر نشست سطحی در حدود ۴۰ درصد کاهش نشان می‌دهد.



شکل۱۳. روند تدریجی نشست‌های سطحی برای الگوی حفاری Side wall drift



شکل۱۴. تاثیر افزایش Pillar width بر توزیع نیروی وارد بر پوشش تونل‌ها در حالت حفاری همفاز و الگوی Side wall drift

www.SID.ir

Archive of SID

مجموع نتایج تحلیل‌های انجام شده در حالت‌های مختلف بارگذاری و الگوهای متفاوت حفاری بیانگر آنست که روند کاهش نشست سطحی و افزایش پایداری جداره‌ها ناشی از افزایش Pillar width، حداکثر تا فاصله سه برابر قطر تونل‌ها قابل توجه بوده و افزایش بیشتر فاصله تاثیر محدودی بر نتایج دارد. بنابراین در پروژه‌های واقعی و در صورت عدم وجود موانع اجرایی، افزایش فاصله افقی بین تونل‌های دوقلو تا سه برابر قطر به عنوان یک راهکار مهندسی مناسب برای کاهش اندرکنش بین آنها و جلوگیری از بروز خسارات احتمالی ناشی از حفاری این قبیل تونل‌ها پیشنهاد می‌شود.

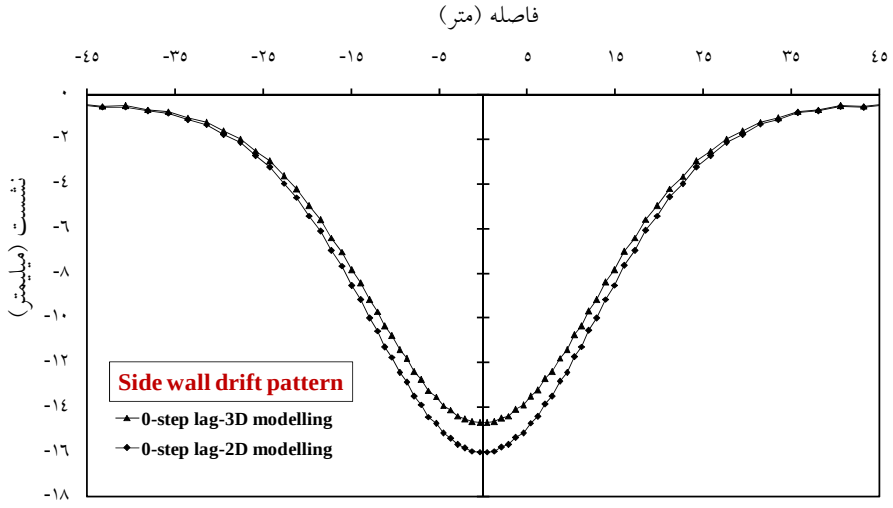
٦-٤- مقایسه نتایج تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی بایکدیگر

نظر به تعدد پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش و با توجه به پیچیدگی و طولانی بودن مدت زمان تحلیل مدل‌های سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس، مطالعه پارامتریک ارایه شده در حالت دوبعدی یعنی فرض پذیرش کرنش مسطح انجام شد، که البته دور از واقعیت نیست (Chen et al. 2012; Karakus and Fowell, 2005). از طرفی، همگرایی مصالح در راستای طولی تونل ممکن است نتایج تحلیل‌های دوبعدی را تحت تاثیر قرار دهد (Svoboda et al., 2010). بنابراین با هدف اطمینان از میزان دقت و صحت نتایج به دست آمده، به عنوان مثال مدل‌سازی مربوط به الگوی حفاری Side wall drift در شرایط بدون سربار و حفاری هم‌فاز تونل‌های دوقلو، در حالت سه‌بعدی (3D) نیز انجام و نتایج مربوط به نشست سطحی باحالت دوبعدی (2D) مقایسه و در شکل ١٥ ارایه شد. ملاحظه می‌شود مدل‌سازی 2D و 3D تاثیر محدودی بر پاسخ زمین داشته که علت آنرا می‌توان به برقراری صحت فرض کرنش مسطح در این پروژه نسبت داد.

٧- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر سربار، هندسه استقرار، اختلاف فاز و الگوی حفاری تونل‌های دوقلوی کم‌عمق (مانند خطوط مترو شهری) بر مقدار نشست سطحی و پایداری جداره تونل‌ها به روش اجزاء محدود مورد بررسی و نتایج ذیل به دست آمد:

- مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی برای سه الگوی متداول تونل‌زنی به روش جدید اتریشی شامل Top heading (TH)، Side wall drift (SWD) و Central diaphragm wall (CDW) نشان می‌دهد در شرایط یکسان بارگذاری و استفاده از الگوی حفاری SWD، میزان تغییرشکل‌ها تا حدود ١٥ درصد کاهش و آستانه تحمل بار سطحی تا دو برابر افزایش می‌یابد. عملکرد مناسب الگوی حفاری Side wall drift به دلیل جذب بهتر انرژی، کاهش بازتوزیع نیرو در پوشش و درنتیجه تغییرشکل کمتر جداره تونل‌ها ارزیابی می‌شود.



شکل١٥. مقایسه نشست‌های سطحی در حالت تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی با فرض الگوی حفاری Side wall drift

www.SID.ir

Archive of SID

- نتایج تحقیق حاضر بیانگر آنست که وضعیت و مقدار سربار، بطور قابل توجهی پاسخ سیستم زمین-تونل را تغییر می‌دهد. مشخص شد افزایش بار سطحی، به دلیل تغییر شرایط میدان اولیه تنش در داخل زمین منتج به نشست سطحی بیشتر و تشدید تغییرمکان در جداره تونل‌ها خواهد شد. بنابراین دقت در پیش‌بینی رفتار تونل‌های زیرسطحی به شدت تابعی از صحت مدل‌سازی شرایط بارگذاری سطحی است.

- اندرکنش بین تونل‌های دوقلو، تاثیر بسزایی در رفتار آنها دارد. عدم تقارن در بارگذاری، اثر متقابل تونل‌ها بر یکدیگر خصوصاً در الگوی Top heading را افزایش داده و درنتیجه نشست سطحی بیشتری رخ می‌دهد. بر این اساس، در شرایط یکسان سربار، متقارن بودن موقعیت تونل‌ها نسبت به بارگذاری سطحی نقش موثری در تقلیل اثرات نامطلوب ناشی از احداث تونل‌های دوقلوی کم‌عمق در زمین‌های نرم ایفا می‌کند.

- صرفه‌نظر از شرایط بارگذاری، کاهش فاصله افقی بین تونل‌ها به دلیل افزایش اثر متقابل بین آنها سبب ایجاد تغییرشکل‌های بیشتر می‌شود. بطوریکه با افزایش این فاصله تا حدود سه برابر قطر، اثرات ناشی از اندرکنش تونل‌ها به حداقل ممکن می‌رسد. حفاری هم‌فاز نیز با کاهش اثر متقابل بین تونل‌ها، باعث کاهش میزان نیروهای وارد بر پوشش آنها شده که در نهایت سبب پایداری بیشتر محیط پیرامون تونل خواهد شد. اگرچه اختلاف فاز در عملیات حفاری، تاثیر محدودی بر میزان نشست زمین دارد.

۸- سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را بابت حمایت مالی انجام شده از این پژوهش توسط معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان اعلام می‌دارند.

۹- پی نوشت‌ها

1. Twin Tunnels (parallel tunnels)
2. Lining Reduction Method or δ method
3. New Austrian Tunneling Method (NATM)
4. Green-Field

۱۰- مراجع

—پنجی، م.، عسگری مارنانی، ج.، علی‌الهی، ح.، کوهساری، ح.، آدم‌پیرا، م.، (۱۳۹۲)، "بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار تنشی تونل‌های کم عمق دوبعدی با استفاده از روش اجزای مرزی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دهم، شماره ۱، ص ۱۷-۲۸.

— Afifipour, M., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., and Jamshidi, h., (2011), "Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass, Shiraz, metro, Iran", Tunnelling and Underground Space technology, Vol. 26, pp. 356-363.

— Chehade, F.H., and Shahrour, I., (2008), "Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 210-214.

— Chen, S.L., Lee, S.C., and Gui, M.W., (2009), "Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 148-154.

— Chen, S.L., Meen-Wah Gui, M.W., and Yang, M.C., (2012), "Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin- and quadruple-tube tunnels", Tunnelling and Underground Space technology, Vol. 28, pp. 135-149.

— Chu, B.L., Hsu, S.C., Chang, Y.L., and Lin, Y.S., (2007), "Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations", Tunnelling and Underground Space technology, Vol. 22, pp. 351-362.

— Farias, M.M., Junior, A.H., and Assis, A.P., (2004), "Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp. 283-293.

— Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., and Xu, S. (Eds.), (2007), "Mechanized tunnelling in urban areas", Taylor & Francis, pp. 528.

— Helwany, S., (2007), "Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp. 400.

www.SID.ir

Archive of SID

effects of twin tunneling on an existing pile", Tunnelling and Underground Space technology, Vol. 35, pp. 189-199.

- No, S.L., Noh, S.H., Lee, S.P., and Seo, J.W., (2006), "Construction of long and large twin tube tunnel in Korea-Sapaesan tunnel", Tunnelling and Underground Space technology, Vol. 21, pp. 393-403.

- Ocak, I., (2008), "Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 674-681.

- Rodriguez-Roa, F., (2002), "Ground settlement due to a shallow tunnel in dense sandy gravel", J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE, Vol. 128, pp. 426-434.

- Schuster, M., Kung, G.T., Juang, C.H., and Hashash,Y., (2009), "Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation", J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE, Vol. 135, pp. 1823-1835.

- Shin, Y.J., Kim, B.M., Shin, J.H., and Lee, I.m., (2011), "The ground reaction curve of under water tunnels considering seepage", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, pp. 315-324.

- Sun, Y., Xu, Y.S., Shen, S.L., and Sun, W.j., (2012), "Field performance of underground structures during shield tunnel construction", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 28, pp. 272-277.

- Svoboda, T., Mašín, D., and Bohác, J., (2010), "Class A predictions of a NATM tunnel in stiff clay", Computers and Geotechnics, Vol. 37, pp. 817-825.

- Xiang, Y., Jiang, z., He, H., (2008), "Assessment and control of metro-construction induced settlement of a pile-supported urban overpass", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 300-307.

- Yoo, C., and Kim, S.B., (2008), "Three-dimensional numerical investigation of multifaced tunneling in water-bearing soft ground", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, pp. 1467-1486.

- Yoo, C., (2009), "Performance of multi-faced tunneling-A 3D numerical investigation", Tunnelling and Underground Space Technology", Vol. 24, pp. 562-573.

- Karakus, M., and Fowell, R.J., (2003), "Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp. 513-523.

- Karakus, M., Ozsan, A., and Basarir, H., (2007), "Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay, Turkey", Bull. Eng. Geol Environ., Vol. 66, pp. 71-79.

- Kuo, K.A., Hunt, H.E.M., and Hussein, M.F.M., (2011), "The effect of a twin tunnel on the propagation of ground-borne vibration from an underground railway", Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, pp. 6203-6222.

- Lee, Y.J., and Bassett, R.H., (2007), "Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 325-342.

- Min, Y., Qing, S., Chao, L.W., and Kang, M., (2011), "Three-dimensional finite element analysis on effects of tunnel construction on nearby pile foundation", Journal of Central South University and Technology, Vol. 18, pp. 909-916.

- Mirhabibi, A., and Soroush, A., (2012), "Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 29, pp. 40-52.

- Möller, S.C., (2006), "Tunnel induced settlements and structural forces in linings", PhD thesis, Institute of Geotechnical Engineering, university of Stuttgart.

- Möller, S.C., and Vermeer, P.A., (2008), "On numerical simulation of tunnel installation", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 461-475.

- Mroueh, H., and Shahrour, I., (2003), "A full 3-D finite element analysis of tunneling- adjacent structures interaction", Computers and Geotechnics, Vol. 30, pp. 245-253.

- Ng, C.W.W., Lee, K.M., and Tang, D.K.W., (2004), "Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, pp. 523-539.

- Ng, C.W.W., Lu, H., and Peng, S.Y., (2013), "Three-dimensional centrifuge modeling of the

www.SID.ir

Archive of SID

Effect of Surcharge, Pillar Width and Excavation Pattern on the Behavior of Shallow Twin Tunnels

A.R. Goodarzi, Assistant Prof., Faculty of Eng., Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.
M. Malki, Associate Prof., Faculty of Eng., Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran.
M. Mirsepahi, M.Sc. stud., Faculty of Eng., Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.
Email: Amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk

ABSTRACT

Realizing influencing factors in reducing tunneling-induced settlement, especially in urban and industrial environment, is important to underground construction because excessive ground displacements could trigger potential damage to existing structures. In this research, the impacts of different NATM patterns on the magnitude of induced surface settlements due to excavation of shallow twin-tunnel (such as urban metro tunnels) are investigated. To this aim, finite element method using ABAQUS commercial application was implemented to simulate NATM excavation famous patterns including top heading (TH), central diaphragm wall (CDW) and side wall drift (SWD). The effects of further parameters like excavation lagging, pillar width (horizontal distance between the tunnels) and various loading patterns on the lining stability and surface settlements were also investigated. Comparison of the results show that in the same conditions of loading and using SWD pattern, the deformations is decreased and the threshold of load-bearing can be increased up to two times. On the other hand, the response of ground-tunnel system and the interaction between tunnels are significantly affected by the status and amount of surcharge. In addition, the finite element analysis confirmed that the reduction of the pillar width tends to increase the ground settlements and cause more subsurface deformations due to increasing the tunnels interaction, regardless of surcharge condition. It is demonstrated that although the increase of excavation lagging does not have considerable influence on the surface settlements, it decreases the lining stability. Generally, it can be concluded that by using SWD pattern with zero step lag of excavation and when the pillar width is higher than three times the radii of the tunnel, the unfavorable impacts resulting from the construction of shallow twin tunnel in soft ground would be limited. Accuracy in the prediction of such tunnels behavior is strictly a function of the proper modeling of surface loading conditions.

Keywords: Twin Tunnel, Finite Element Method, NATM, Excavation Pattern, Surface Settlement

www.SID.ir