

### بررسی نشست ناشی از حفاری تونل های دوقلو در ماسه با تراکم های نسبی مختلف با استفاده از مدل آزمایشگاهی

مهرداد امامی تبریزی<sup>۱\*</sup>؛ سالار فرجی<sup>۲</sup>

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۱۸؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2018.4993.1289

واژگان کلیدی	چکیده
تونل دوقلو نشست تراکم نسبی ماسه پردازش تصویر	در این مقاله با استفاده از مدل فیزیکی ساخته شده در دانشگاه صنعتی سهند تبریز شامل دستگاه برای مدل سازی فرآیند حفاری تونل و دستگاه بارش ماسه برای ایجاد نمونه های یکنواخت با تراکم نسبی متفاوت، به بررسی مسئله نشست تونل های دوقلو در دو تراکم نسبی متفاوت پرداخته شده است. برای اندازه گیری جابه جایی از روش پردازش تصویر استفاده شده است. نتایج بررسی ها نشان داد میزان افت زمین برای تونل دوم در هر دو حالت شل و متراکم افزایش می یابد که این افزایش برای حالت شل بیشتر می باشد. همچنین در حالت متراکم منحنی پک برازش خوبی با نشست های ثبت شده از خود نشان داد ولی در حالت شل با توجه به باریک تر بودن منحنی های نشست، دقت منحنی پک نسبت به حالت متراکم کمتر می شود. در این تحقیق رابطه جدیدی برای حالت شل پیشنهاد گردید که برازش بهتری نسبت به منحنی گوسی پک برای تونل اول، دوم و مجموع دو تونل از خود نشان می دهد.

#### ۱- مقدمه

موارد تونل ها به صورت دوقلو و به موازات هم حفاری می شوند. روش حفاری تونل های دوقلو معمولاً به این صورت است که ابتدا یکی از تونل ها حفاری شده و با یک فاصله زمانی، تونل بعدی حفاری می شود. در بخش نخست این مقاله به بررسی نشست تونل تکی و پارامترهای آن پرداخته شده و سپس به بررسی تونل های دوقلو پرداخته خواهد شد. پک (Peck) توزیع گوسی را برای پیش بینی نشست عرضی (شکل ۱) به صورت زیر پیشنهاد داد (Peck, 1969):

$$S = S_{max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

که در آن  $S_{max}$  میزان نشست سطح زمین در روی محور طولی تونل،  $x$  فاصله افقی از محور تونل و  $i$  فاصله افقی از محور تونل تا نقطه عطف منحنی نشست می باشد. تعداد قابل توجهی از محققین به بررسی پارامترهای منحنی گوسی

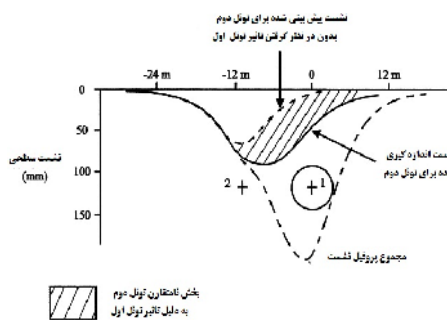
یکی از مباحث مهم تونل سازی در محیط های شهری، مساله نشست است. حفر تونل موجب آزاد شدن تنش های درجا میشود که تنها قسمتی از آن توسط دیواره تونل محدود می شود. در عمل، به این علت که حفاری و اعمال تکیه گاه کاملاً صلب همزمان صورت نمی گیرد، شاهد مقداری تغییر شکل در عمق تونل خواهیم بود که احتمالاً باعث به وجود آمدن زنجیره ای از حرکات تا سطح زمین می شود که این حرکات با کم عمق تر شدن تونل محسوس تر خواهد شد (Guglielmetti et al., 2008).

در مناطق پر تراکم شهری، عموماً به علت کمبود فضا تونل سازی در مجاورت سازه های موجود انجام می گیرد، بنابراین عدم پیش بینی درست از مسئله نشست ممکن است موجب بروز آسیب در سازه های مجاور تونل گردد. در بعضی

که میزان افزایش در مقدار افت زمین، با افزایش فاصله بین دو تونل کاهش می‌یابد. هانیا (Hanya, 1977) نیز با بررسی ۳۹ مورد مطالعه مربوط به تونل‌های دو قلو، حفاری شده در ژاپن در عمق‌ها، فاصله‌ها و خاک‌های مختلف، افزایش مقدار افت زمین بالای تونل دوم را گزارش داد. اریلی و همکاران (O'Reilly et al., 1991) با استفاده از روش جمع آثار و بدون در نظر گرفتن اندرکنش بین دو تونل رابطه زیر را برای پیش بینی نشست تونل‌های دو قلو ارائه کردند:

$$S_{Twin} = S_{max} \left[ \exp\left(-\frac{x_A^2}{2i^2}\right) + \exp\left(-\frac{(x_A - d)^2}{2i^2}\right) \right] \quad (3)$$

که در آن  $d$  فاصله جانبی بین مرکز دو تونل و  $x_A$  فاصله جانبی از مرکز تونل اول می‌باشد. این رابطه بر اساس فرض موازی بودن دو تونل و یکسان بودن قطر، افت و  $i$  مربوط به دو تونل ارائه گردید. نیو و باورز (New & Bowers, 1994) با انجام مشاهداتی بیان داشتند منحنی نشست کلی بعد از حفر تونل دوم از رابطه پک تبعیت می‌کند ولی در اکثر موارد نشست ماکزیمم دقیقاً در وسط دو تونل اتفاق نمی‌افتد بلکه به سمت تونل اول تمایل دارد.



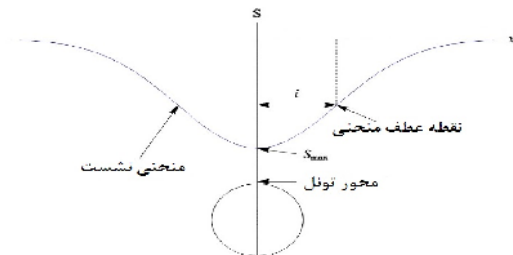
شکل ۲- پروفیل نشست مربوط به تونل دوقلوی مترو واشینگتن (Cording & Hansmire, 1975)

آدنبروک و پاتز (Addenbrooke & Potts, 2001) یک روش برای تصحیح منحنی نشست برای تونل دوم ارائه دادند. این مطالعه عددی نشان داد که شکل منحنی نشست ناشی از حفر تونل دوم خیلی متفاوت‌تر از شکل منحنی مربوط به تونل اول نبود. آنها نمودارهایی به منظور یافتن نامتقارنی در مکان بیشینه نشست و افزایش در افت زمین ناشی از حفر

پرداختند از جمله اریلی و نیو (O'Reilly & New, 1982) را به صورت زیر بر اساس تابعی از عمق تونل معرفی کردند که به صورت خطی با عمق افزایش می‌یابد.

$$i = KZ_0 \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $Z_0$  عمق تونل و  $K$  پارامتر ثابت است که مقدار آن ۰٫۴ برای رس سخت، ۰٫۷ برای رس نرم و سیلتی و ۰٫۳-۰٫۲ برای مصالح دانه‌ای متغییر است.



شکل ۱- منحنی نشست سطح زمین

مایر و تیلور (Mair & Taylor, 1997) با بررسی طیف وسیعی از مشاهده‌های صحرایی پارامتر  $K$  را صرف نظر از روش حفاری و اندازه تونل برای رس‌ها و مصالح دانه ای به ترتیب مقدار ۰٫۳۵ و ۰٫۵ تخمین زدند.

اولین مطالعه موردی مربوط به تونل دوقلو توسط ترزاچی (Terzaghi, 1942) انجام شد. او نشان داد نشست اندازه گیری شده برای تونل دوم بزرگ‌تر از مقدار آن برای تونل اول است. پک (Peck, 1969) نیز بر اساس مشاهده‌های خود در تونل دوقلوی شیکاگو که در ماسه متراکم حفاری شده بود دریافت که افت زمین (Ground loss) مربوط به تونل دوم بزرگ‌تر از تونل اول است بنابراین منحنی نشست تونل‌های دو قلو به صورت نامتقارن خواهد بود. مایر و تیلور (Mair & Taylor, 1997) نیز بیان داشتند که خاک در اثر ساخت تونل اول دچار کرنش‌هایی خواهد شد بنابراین انتظار می‌رود افت زمین بیشتری در خاک ناشی از تونل دوم به وجود آید. کردینگ و هنسمایر (Cording & Hansmire, 1975) نیز برای تونل دوقلوی واشینگتن که در ماسه سیلتی متراکم و شن حفاری شده بود افزایش ۵۰ درصدی میزان افت زمین برای تونل دوم و در نتیجه نشست نامتقارن (شکل ۲) را گزارش کردند. میزان افزایش مشابهی توسط آدنبروک (Addenbrooke, 1996) گزارش شد او همچنین نشان داد

کاهش می‌یابد. وی پارامتری به نام فاکتور دستخوردگی تعریف کرد و روابط ارائه شده توسط پک (رابطه ۱) و اریلی و نیو (رابطه ۳) را بهبود بخشید. از مطالعات پیشین مشخص می‌گردد، اکثر گزارش‌های مربوط به تونل‌های دوقلو به صورت مطالعه موردی یا نتایج تحلیل‌های عددی بوده است و کمبود نتایج آزمایشگاهی به ویژه در ماسه‌ها در مطالعات پیشین قابل ملاحظه است. پیش از این ژو و همکاران (Zho et al., 2014) در دانشگاه نانتینگهام و گروه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی سهند تبریز (Abdoli, Emami Tabrizi, & Afshin, 2015) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر درصد تراکم ماسه بر روی منحنی نشست در تونل‌های تکی پراخته اند. نتایج آنها نشان داد منحنی نشست در ماسه‌ها متاثر از درصد تراکم آن می‌باشد به نحوی که با افزایش درصد تراکم، نمودار نشست عریض تر شده و مقدار نشست کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به اهمیت این موضوع در این مقاله به بررسی تاثیر درصد تراکم ماسه بر منحنی نشست تونل‌های دوقلو پرداخته خواهد شد.

## ۲- تجهیزات آزمایش

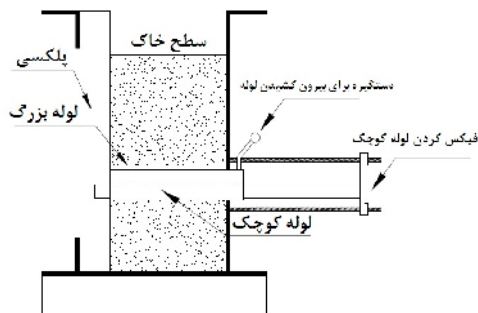
دستگاه ساخته شده در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز جهت بررسی نشست‌های ناشی از حفر تونل در تونل‌های تک و دو قلو به صورت کرنش مسطح، شامل یک محفظه فولادی به ابعاد داخلی  $15 \times 35 \times 85$  سانتی متری است که یکی از جداره‌های آن به منظور اندازه‌گیری جابجایی‌ها شفاف و از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۴ سانتی متری می‌باشد (شکل ۳). مرکز تونل‌ها تقریباً در فاصله ۲٫۵ برابر قطر از کف دستگاه قرار گرفته اند. در داخل دستگاه مکان لازم جهت جاسازی دو تونل تعبیه شده که امکان بررسی تونل‌های دو قلو را در فواصل مختلف از ۴ سانتی متر تا ۱۰ سانتی متر از هم فراهم می‌نماید. طراحی اولیه سازه محفظه به منظور تحمل فشار سربار با استفاده از روش المان محدود انجام گرفته است. برای به حداقل رساندن اصطکاک دیواره‌های محفظه، برچسبی از کاغذ روغنی بر روی دیواره‌ها چسبانده شده است.

برای مدل سازی فرآیند حفر تونل از سیستم لوله‌ها استفاده شده است. برای این منظور یک لوله کوچک در پایین‌ترین قسمت لوله بزرگ قرار می‌گیرد (شکل ۴) تا

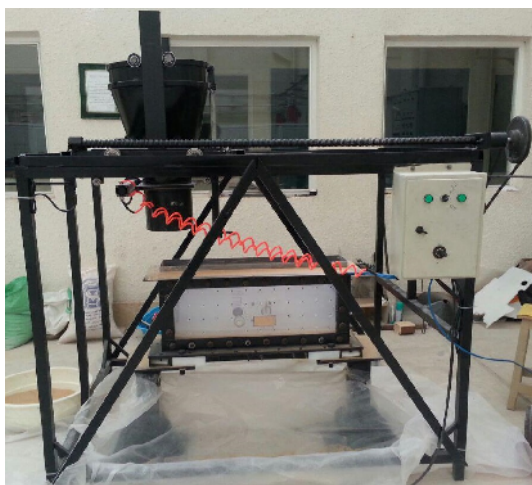
تونل دوم ارائه دادند که نشان می‌داد افت زمین ناشی از حفر تونل دوم با کاهش فاصله بین دو تونل افزایش می‌یابد. آنها ابتدا با اصلاح افت زمین، منحنی نشست مربوط به تونل دوم را تصحیح و سپس نتیجه حاصله را با منحنی به دست آمده از تونل اول جمع نمودند تا منحنی نشست کلی به دست آید. چاپمن و همکارانش (Chapman et al., 2003) ناحیه از قبل دچار کرنش شده را با نام ناحیه همپوشانی (*Overlapping Zone*) تعریف کردند که از اشتراک حاصل از مرزهای حرکت برای هر تونل به دست می‌آید. خاک این ناحیه به علت کرنش‌های قبلی مستعد دستخوردگی بوده و عامل تغییرات به وجود آمده در نشست خواهد بود. بر اساس مشاهدات موردی و همچنین نتایج مدل سازی عددی با المان محدود هانت (Hunt, 2005) روش بهینه شده‌ای برای پیش بینی نشست بر اساس اعمال فاکتور تصحیح برای جابه جایی بالای تونل دوم ارائه داد (ناحیه‌ای که فرض می‌شود خاک قبلاً در آن ناحیه دچار دستخوردگی شده است). ان جی (Ng et al., 2013) و همکاران با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ به بررسی تاثیر نشست تونل‌های دوقلو بر روی شمع‌ها پرداختند. آنها آزمایش‌های خود را در ماسه خشک با تراکم نسبی ۶۵ درصد انجام دادند نتایج آنها نشان داد نشست ماکزیمم اندازه گیری شده در روی محور تونل اول بعد از حفاری تونل اول و دوم تقریباً برابر  $0.24$ ٪ قطر تونل می‌باشد ولی برای مجموع دو تونل مقدار آن برابر  $0.34$ ٪ قطر تونل می‌باشد. با توجه به حضور شمع در مدل سازی، ممکن است نتایج آنها با نشست سطح زمین (*Green field*) متفاوت باشد. دیوال و همکاران (Divall et al., 2012) با انجام یک سری آزمایش‌های سانتریفیوژ در رس به مقایسه نتایج آن با روش‌های ارائه شده توسط اریلی و همکاران، آدنبروک و پاتز و هانت پرداختند. آنها نشان دادند نتایج منحنی‌های نشست در تونل‌های دو قلو برازش خوبی با روش ارائه شده توسط هانت، آدنبروک و پاتز دارد ولی روش آدنبروک و پاتز مقدار نشست را کمی دست بالا پیش بینی می‌کند. اُکاک (Ocak, 2014) با بررسی اندرکنش بین تونل‌های دو قلو حفاری شده در ماسه و رس، رابطه‌ای بهینه شده برای پیش بینی نشست ارائه داد. وی بیان کرد در اثر حفاری تونل اول خاک دچار دستخوردگی می‌شود که این دستخوردگی با افزایش قطر تونل، افزایش و با افزایش فاصله مرکز به مرکز دو تونل

بررسی نشست ناشی از حفاری تونل‌های دوقلو در ماسه با تراکم‌های نسبی مختلف با استفاده از مدل آزمایشگاهی: ص ۶۷-۸۰

گردید این دستگاه مزایای بسیاری از جمله نمونه سازی یکنواخت تک لایه و چند لایه، قابلیت تکرار پذیری بالا، نمونه سازی مکانیزه بدون دخالت دست و همچنین ساخت نمونه های بسیار سست تا بسیار متراکم را داراست (Emami Tabrizi, & Faraji, 2017). همچنین برای صاف کردن سطح ماسه از روش وکیوم (Vacuum) که در خاک دستخوردگی ایجاد نمی‌کند استفاده شده است.



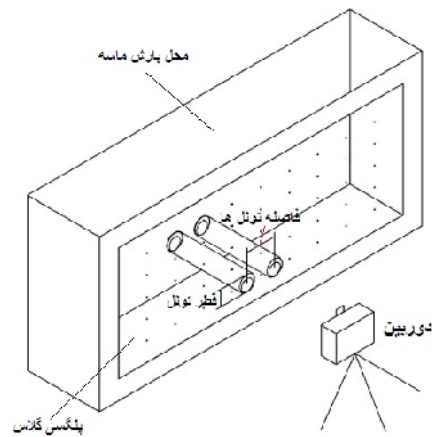
شکل ۵- مقطع عرضی دستگاه و نحوه جاگذاری و ثابت نگه داشتن لوله



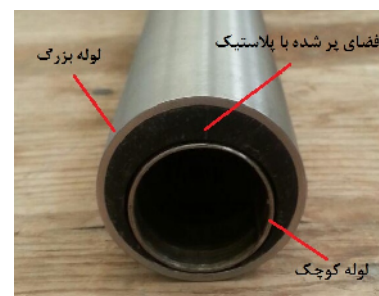
شکل ۶- دستگاه مکانیزه بارش ماسه

به منظور اندازه گیری جابجایی‌های خاک، از تکنیک پردازش تصویر بهره گرفته شد. نحوه کار به این صورت است که در حین انجام آزمایش با استفاده از یک دوربین دیجیتالی با فریم بالا، از جابجایی‌های خاک فیلم برداری شده و سپس فیلم به دست آمده به عکس‌های متوالی تبدیل می‌شود در مرحله بعد با استفاده از تکنیک *GeoPIV* ارائه شده توسط

هندس افت اعمالی به حالت افت واقعی تونل نزدیک باشد (Loganathan, & Poulos, 1998). سپس لوله بزرگ بیرون کشیده می‌شود تا جابه‌جایی در خاک رخ دهد. یک انتهای لوله کوچک در شیار که در پلکسی ایجاد شده است ثابت و انتهای دیگر آن در پشت دستگاه مهار می‌شود تا هنگام بیرون کشیدن لوله بزرگ هیچ گونه جابه‌جایی در لوله کوچک ایجاد نشود (شکل ۵). فضای خالی بین دو لوله توسط پلاستیکی که به صورت دقیق توسط برش لیزری برش داده شده است پر می‌شود تا از ورود خاک به این قسمت جلوگیری شود (شکل ۴).



شکل ۳- طرح کلی دستگاه ساخته شده



شکل ۴- موقعیت قرار گیری سیستم لوله‌ها

قطر لوله‌ها می‌تواند متفاوت باشد، بنابراین می‌توان قطر‌ها و افت‌های مختلف را مورد بررسی قرار داد. برای ایجاد نمونه‌های یکنواخت ماسه با درصد تراکم‌های مختلف از دستگاه بارش مکانیزه ساخته شده در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند (شکل ۶) که قبلاً برای هر کدام از ماسه‌ها و برای درصد تراکم‌های مورد نظر کالیبره شده بود استفاده

ابتدا آزمایش بر روی ماسه با تراکم نسبی حدود ۹۰ درصد انجام گردیده است. سپس نشست‌های مربوط به تونل اول، دوم و مجموع ثبت و با منحنی‌های پک و اریلی و نیو (رابطه ۳) برازش شده که در شکل‌های ۷ تا ۱۲ آورده شده است. همان گونه از نمودارها مشاهده می‌گردد، مقدار افت ایجاد شده در تونل دوم بیشتر از تونل اول می‌باشد و مقداری انحراف در تونل دوم به سمت تونل اول مشاهده می‌شود که این انحراف با نزدیک شدن به سطح بیشتر می‌شود. ملاحظه می‌شود که در نزدیکی‌های سطح، منحنی نشست کلی دارای یک تقعر است و این روند تا تراز ۰٫۲ عمق تونل ( $Z/Z_0=0.2$ ) ادامه دارد. در ترازهای پایین تر از ۰٫۲ برابر عمق تونل ( $Z/Z_0=0.2$ ) منحنی نشست دارای دو تقعر است به طوری که در تراز ۰٫۲ تا ۰٫۵ برابر عمق تونل، نقطه تقعر نزدیک به تونل اول دارای نشست بزرگ‌تری است. همچنین مشاهده می‌گردد در عمق‌های مختلف، منحنی پک برازش شده برای تونل‌های اول و دوم برازش خوبی با نتایج مشاهدات از خود نشان می‌دهد بنابراین در صورتی که برای هر یک از تونل‌ها منحنی پک متناظر با آن برازش شده و از اصل روی هم گذاری استفاده شود، منحنی پک پیش بینی قابل قبولی از نشست مجموع دو تونل خواهد داشت. درحالی که رابطه ارائه شده توسط اریلی و نیو (رابطه ۳) به دلیل یکسان فرض نمودن مقدار افت برای دو تونل پیش بینی مناسبی از نشست مجموع دو تونل ندارد.

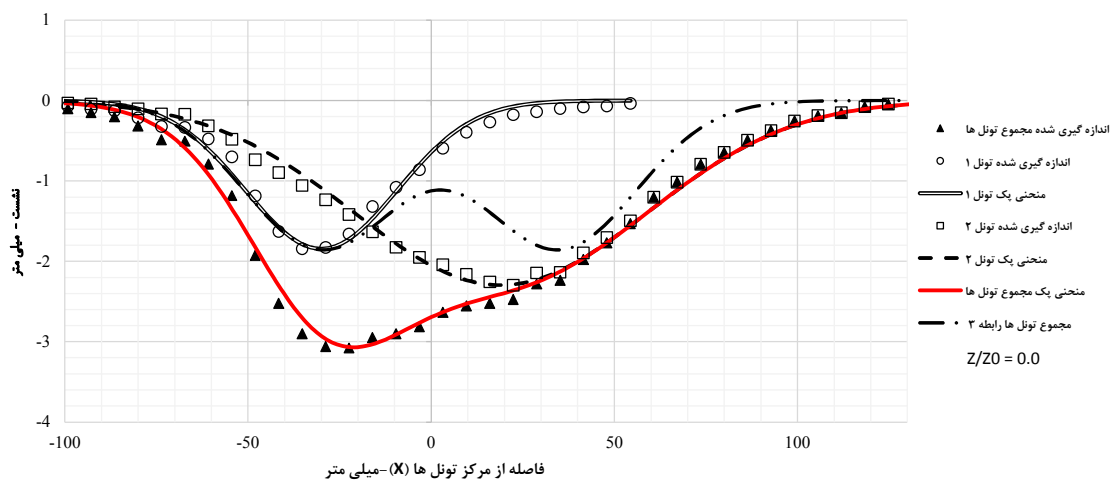
وایت و همکاران (White et al., 2003)، جابه‌جایی‌های خاک اندازه‌گیری و سپس با استفاده از کد نویسی انجام گرفته نمودار جابه‌جایی‌ها رسم و منحنی‌های تجربی برازش شده است.

### ۳- نتایج آزمایش‌ها و بحث

در این تحقیق آزمایش‌ها برای تونل‌های دوقلو در دو درصد تراکم متفاوت ۹۰ و ۵۰ درصد انجام شده است. در این آزمایش‌ها قطر لوله بزرگ حدوداً ۴۱ میلی‌متر و افت زمین اعمالی ( $V_1$ ) ۶۰ درصد است. همچنین فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها ۱٫۸ برابر قطر تونل در نظر گرفته شده است و نسبت عمق به قطر تونل برابر ۳ است. ماسه استفاده شده در این آزمایش ماسه ریزدانه سیلیسی با قطر متوسط ۰٫۳۴ میلی‌متر، چگالی ویژه ۲٫۶۲ و زاویه اصطکاک داخلی ۲۷ درجه است. نحوه آزمایش به این صورت است که ابتدا تونل اول حفاری شده و نشست آن اندازه‌گیری شده، سپس با یک فاصله زمانی تونل دوم حفاری شده و نشست مربوط به آن اندازه‌گیری و در نهایت با استفاده از جمع آثار، مجموع نشست مربوط به حفاری دو تونل محاسبه و با منحنی‌های مختلف برازش شده است. نتایج و بحث مربوط به هر آزمایش در بخش بعدی آورده شده است.

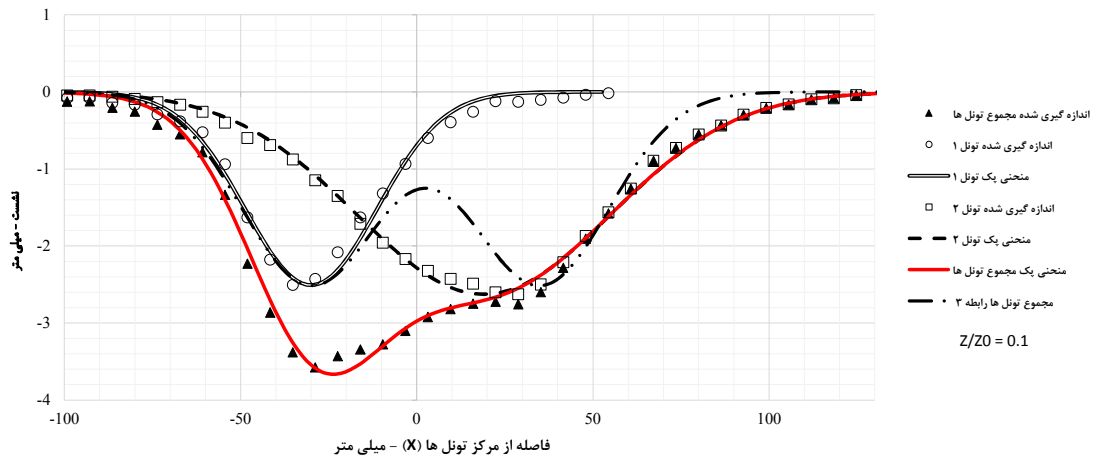
- آزمایش بر روی ماسه با تراکم نسبی ۹۰ درصد (حالت

متراکم)

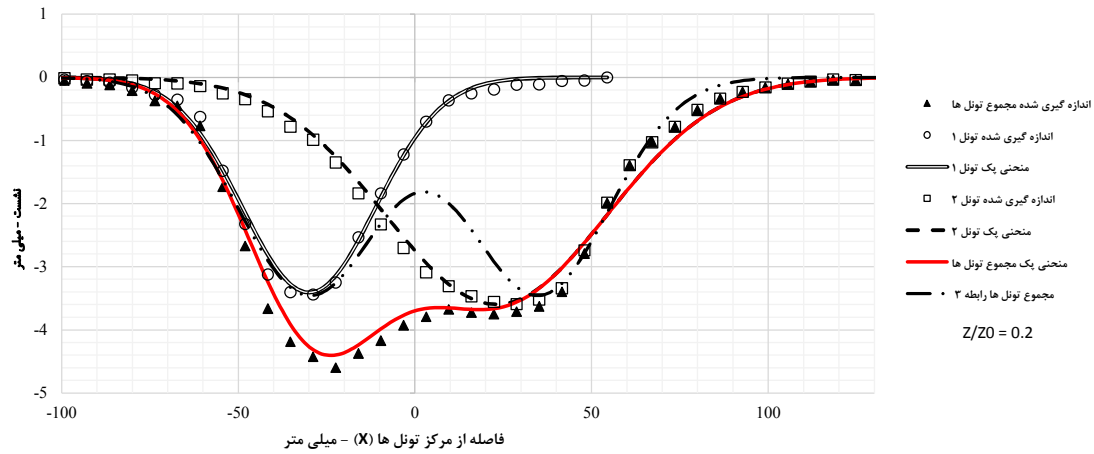


شکل ۷ - نشست‌های ثبت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل اول، دوم و مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0$

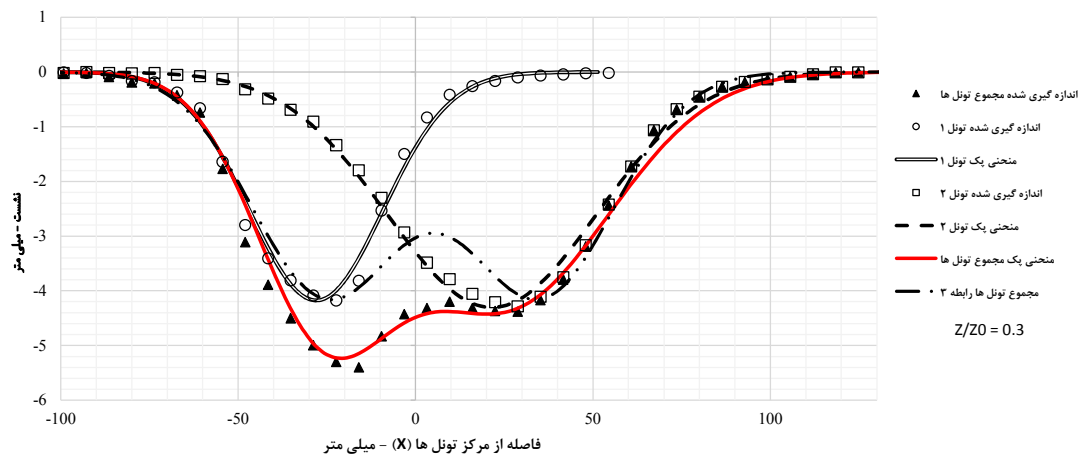
بررسی نشست ناشی از حفاری تونل‌های دوقلو در ماسه با تراکم‌های نسبی مختلف با استفاده از مدل آزمایشگاهی: ص ۶۷-۸۰



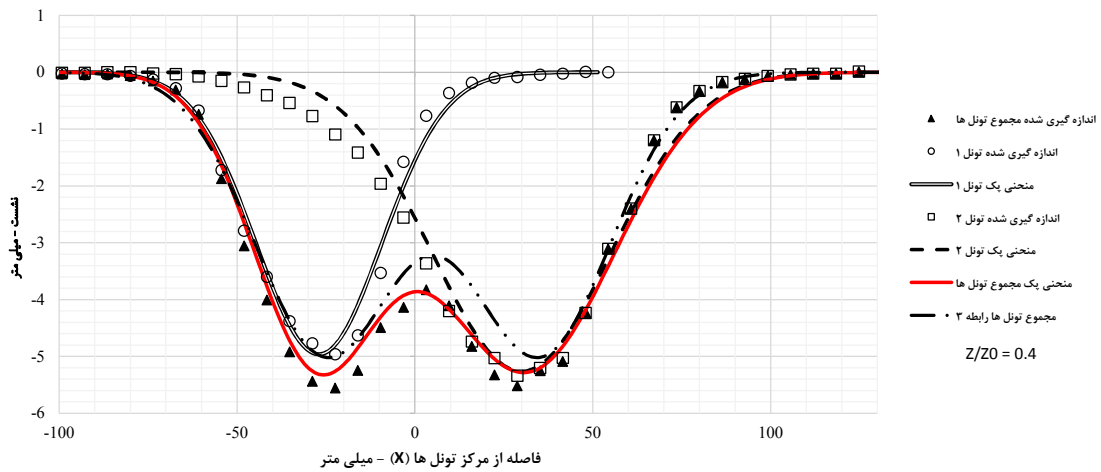
شکل ۸ - نشست‌های ثبت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل اول، دوم و مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.1$



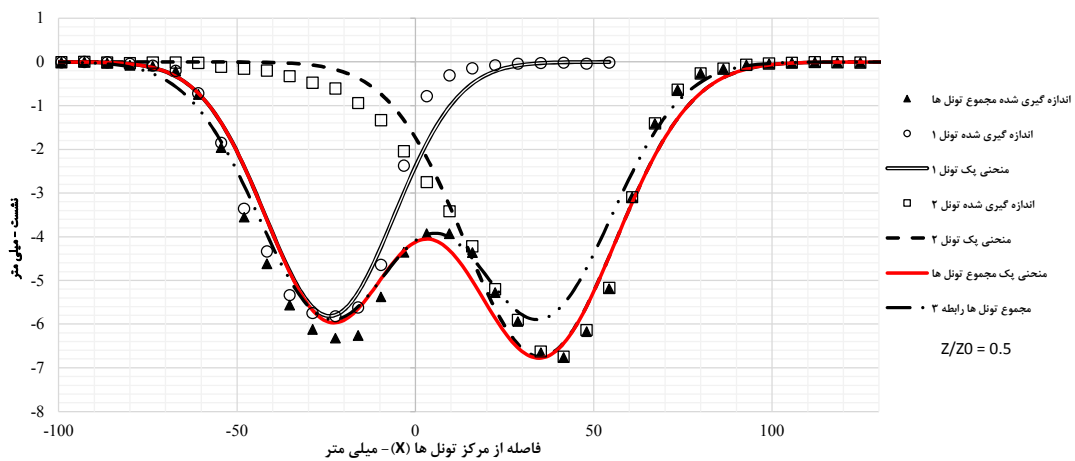
شکل ۹ - نشست‌های ثبت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل اول، دوم و مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.2$



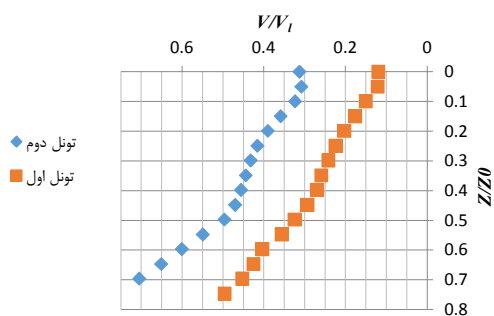
شکل ۱۰ - نشست‌های ثبت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل اول، دوم و مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.3$



شکل ۱۱ - نشست‌های ثابت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل اول، دوم و مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.4$



شکل ۱۲ - نشست‌های ثابت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل اول، دوم و مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.5$



شکل ۱۳ - مقایسه تغییرات افت زمین با عمق برای تونل اول و دوم

شکل ۱۳ میزان افت زمین ایجاد شده در اعماق مختلف را برای دو تونل اول و دوم مقایسه کرده است. در این منحنی میزان افت زمین در تراز مورد نظر ( $V$ ) بر حسب افت زمین اعمال شده در تراز تونل ( $V_1$ ) بی بعد شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود افت زمین برای تونل دوم در اعماق مختلف تقریباً به طور مساوی و در حدود ۰/۱۸ برابر افت اعمال شده به تونل، افزایش یافته است.

که در آن  $S_{max}$  میزان نشست سطح زمین در روی محور طولی تونل،  $x$  فاصله افقی از محور تونل و  $\bar{t}$  فاصله افقی از محور تونل تا نقطه عطف منحنی نشست می‌باشد. نمودارهای مربوط به تونل اول و برازش آن با رابطه پک و رابطه اصلاح شده (رابطه ۴) در شکل ۱۵ آمده است.

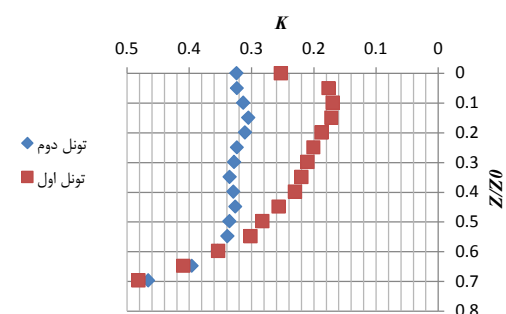
همان گونه که از مقایسه نمودارها در شکل ۱۵ مشخص می‌گردد رابطه اصلاح شده نتایج بهتری را برای تونل اول در عمق‌های مختلف ارائه می‌دهد. مقایسه مربوط به تونل دوم که در شکل ۱۶ آمده است نیز موید این ادعاست. در شکل‌های ۱۷ تا ۲۲ نشست‌های اندازه‌گیری شده و منحنی‌های برازش شده برای مجموع دو تونل در حالت شل برای تعدادی از عمق‌ها آورده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود در صورتی که برای هر یک از تونل‌ها، منحنی اصلاح شده متناظر با آن برازش شده و از اصل روی هم گذاری استفاده شود، پیش بینی مناسبی از نشست مجموع دو تونل را شاهد خواهیم بود. بنابر این می‌توان رابطه ۴ را به صورت زیر برای تونل‌های دوقلو در حالت شل به کار برد:

$$S_{Twin} = S_{1max} \exp \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{x + \frac{d}{2}}{i_1} \right)^3 \right] + S_{2max} \exp \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{|x - \frac{d}{2}|}{i_2} \right)^3 \right] \quad (۴)$$

که در آن  $S_{1max}$  و  $S_{2max}$  به ترتیب میزان نشست سطح زمین در روی محور طولی تونل اول و دوم،  $i_1$  و  $i_2$  به ترتیب فاصله افقی از محور تونل تا نقطه عطف منحنی نشست برای تونل اول و دوم،  $x$  فاصله افقی از مرکز دو تونل و  $d$  فاصله جانبی بین مرکز دو تونل می‌باشد. همانگونه که از نمودارها مشاهده می‌شود رابطه پک پیش بینی ضعیف‌تری از منحنی نشست مجموع دو تونل را نسبت به رابطه اصلاح شده (رابطه ۵) ارائه می‌دهد. همچنین رابطه ارائه شده توسط اریلی و نیو (رابطه ۳) به دلیل یکسان فرض نمودن مقدار افت برای دو تونل پیش بینی مناسبی از نشست مجموع دو تونل ارائه نمی‌دهد. برخلاف حالت متراکم بررسی شده در قسمت قبل، منحنی‌های مربوط به تونل دوم انحراف چندانی را به سمت تونل اول نشان نمی‌دهند.

شکل ۱۴ پارامتر عرض منحنی نشست ( $K$ ) را برای دو تونل مقایسه کرده است. نتایج نشان می‌دهد که  $K$  برای تونل دوم افزایش یافته است و این افزایش با دور شدن از سطح کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که برای تونل دوم میزان  $K$  از سطح تا تراز ۰٫۵ برابر عمق تونل ( $Z/Z_0=0.5$ ) تقریباً برابر است و در ترازهای پایینی، مقادیر  $K$  نزدیک نتایج تونل اول است. لازم به ذکر است که  $K$  به تنهایی نشان دهنده عرض منحنی نیست، بلکه شاخصی از عرض منحنی می‌باشد؛ بنابراین برابر بودن  $K$  به معنای برابر بودن عرض منحنی‌ها نیست.



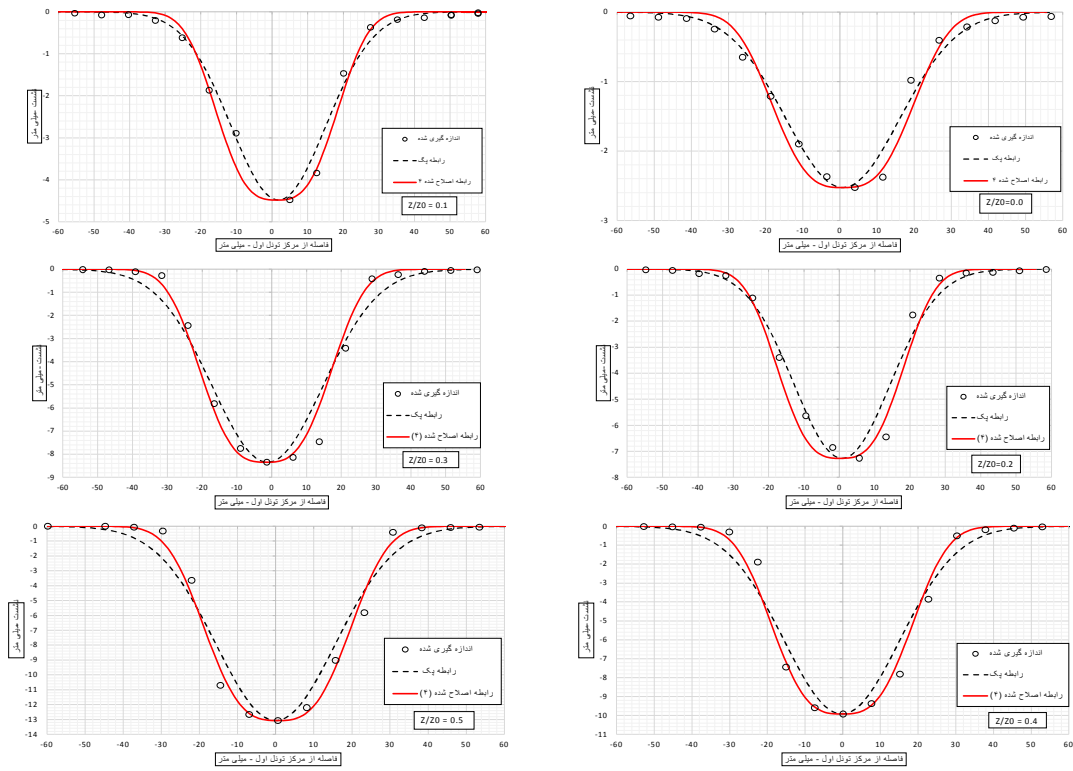
شکل ۱۴ - مقایسه تغییرات  $K$  با عمق برای تونل اول و دوم

- آزمایش بر روی ماسه با تراکم نسبی ۵۰ درصد (حالت شل)

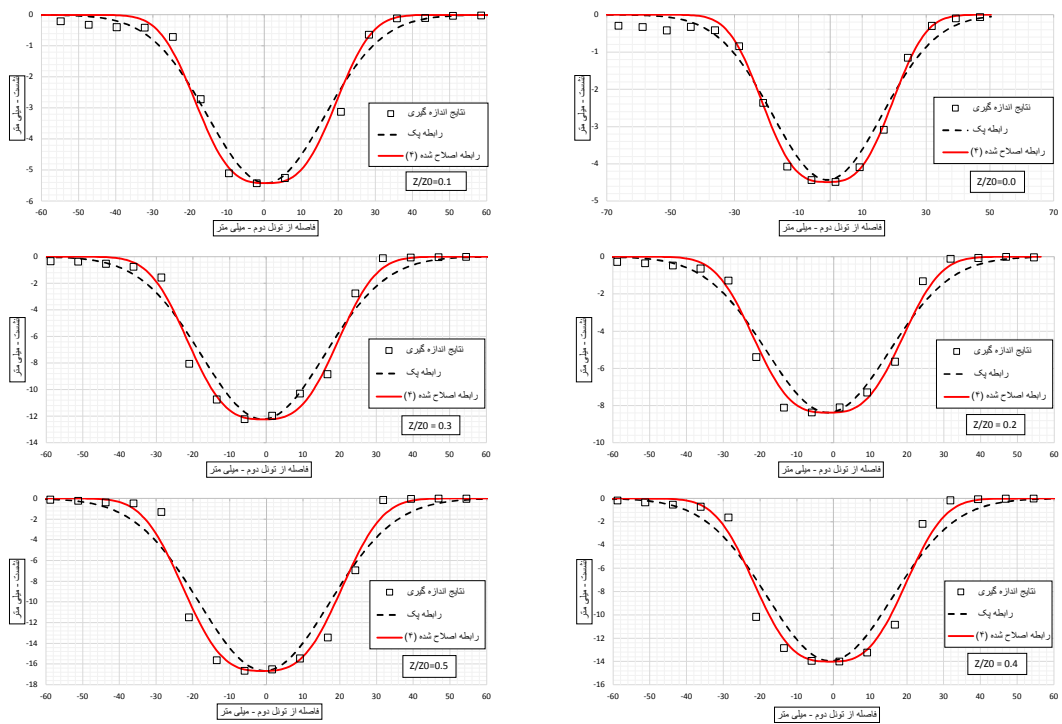
سپس این آزمایش در ماسه با تراکم حدود ۵۰ درصد انجام گرفته و نتایج نشست‌ها برای تونل اول و دوم و مجموع دو تونل برای عمق‌های مختلف ثبت شده است. بررسی‌های قبلی برای تونل تکی نشان داده بود منحنی نشست در حالت شل نسبت به حالت متراکم باریکتر است (Zho et al., 2014). بررسی نتایج این آزمایش‌ها نیز نشان داد برای تونل اول و دوم منحنی نشست نسبت به حالت متراکم باریکتر می‌شود. همچنین با برازش منحنی پک برای تونل‌های اول و دوم، مشخص گردید به دلیل باریک بودن منحنی نشست در این حالت، منحنی پک برازش ضعیف‌تری بر خلاف حالت متراکم از خود نشان می‌دهد. برای این منظور رابطه ۵ اصلاح شده‌ای به صورت زیر برای حالت شل ارائه گردید:

$$S = S_{max} \exp \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{|x|}{i} \right)^3 \right] \quad (۴)$$



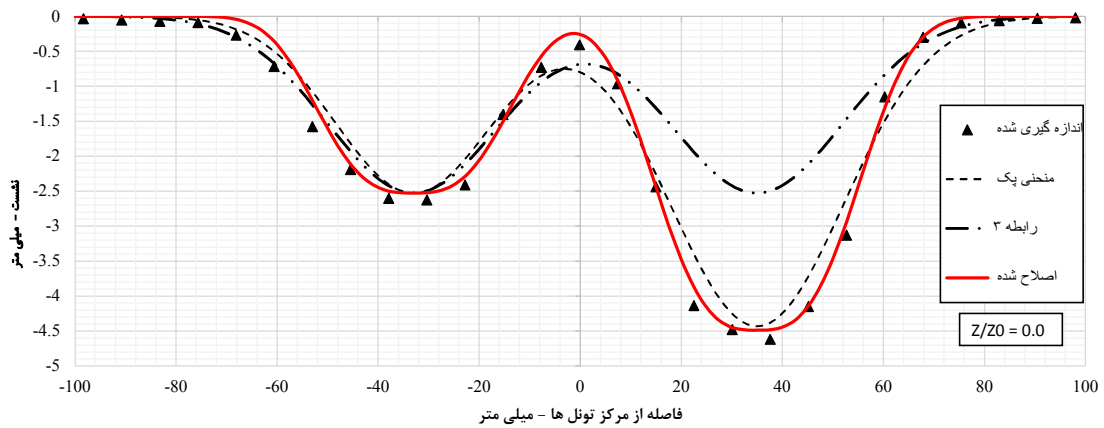


شکل ۱۵ - نشست‌های ثابت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل اول در عمق‌های مختلف

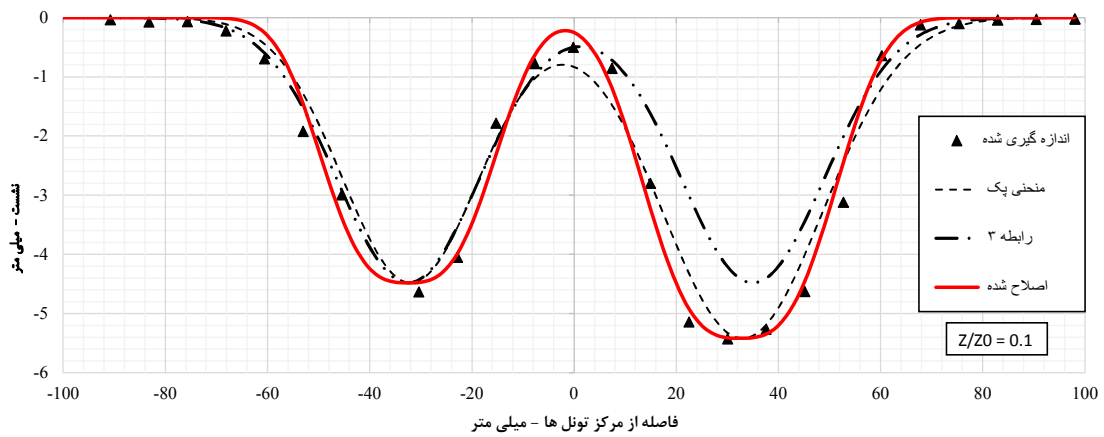


شکل ۱۶ - نشست‌های ثابت شده و منحنی‌های برازش شده برای تونل دوم در عمق‌های مختلف

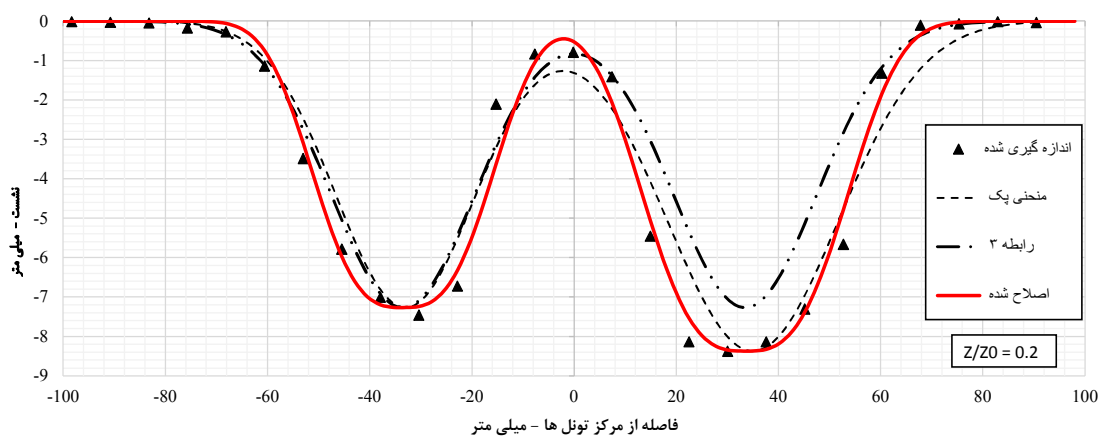
بررسی نشست ناشی از حفاری تونل‌های دوقلو در ماسه با تراکم‌های نسبی مختلف با استفاده از مدل آزمایشگاهی: ص ۶۷-۸۰



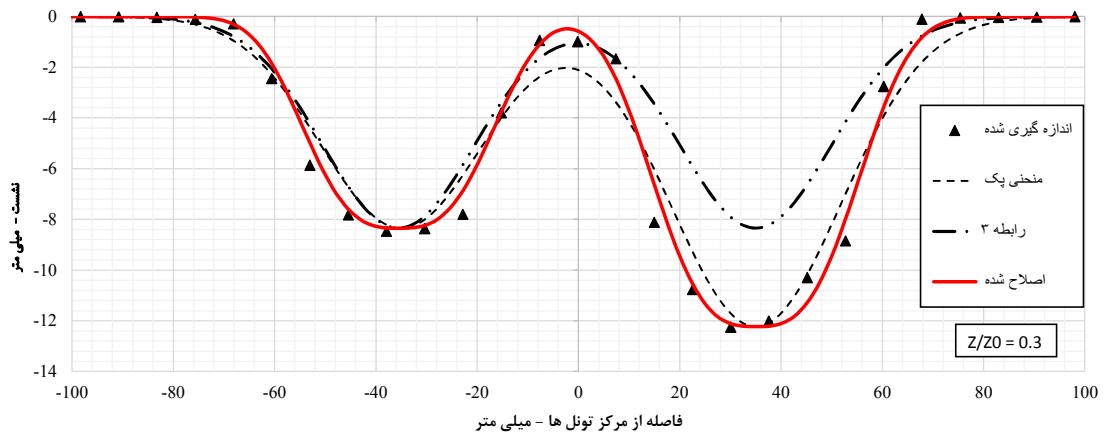
شکل ۱۷ - نشست های ثبت شده و منحنی‌های برازش شده برای مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0$



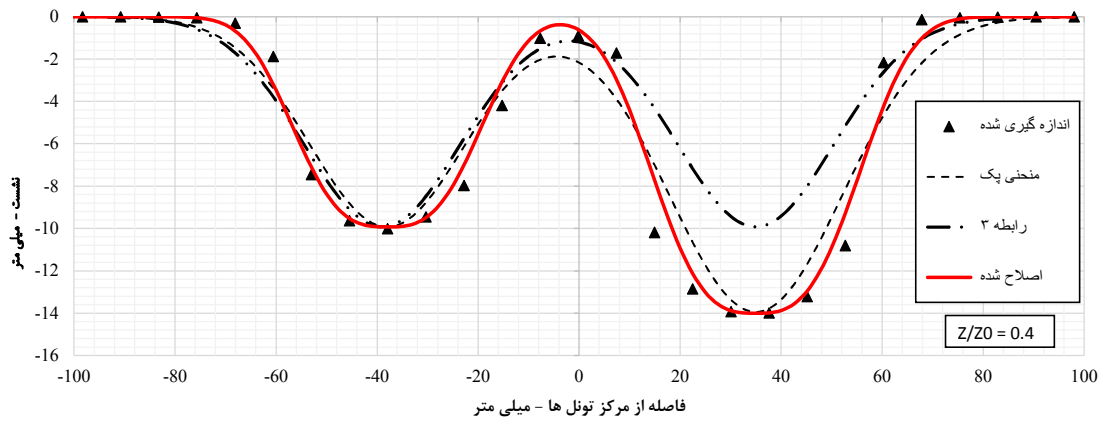
شکل ۱۸ - نشست های ثبت شده و منحنی‌های برازش شده برای مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.1$



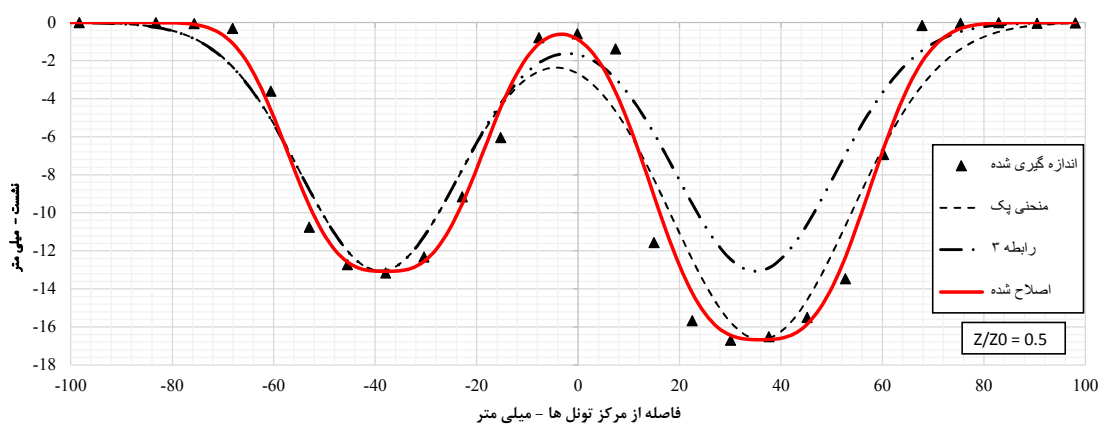
شکل ۱۹ - نشست های ثبت شده و منحنی‌های برازش شده برای مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.2$



شکل ۲۰ - نشست های ثبت شده و منحنی های برازش شده برای مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.3$



شکل ۲۱ - نشست های ثبت شده و منحنی های برازش شده برای مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.4$



شکل ۲۲ - نشست های ثبت شده و منحنی های برازش شده برای مجموع دو تونل در  $Z/Z_0=0.5$

#### ۴- نتیجه‌گیری

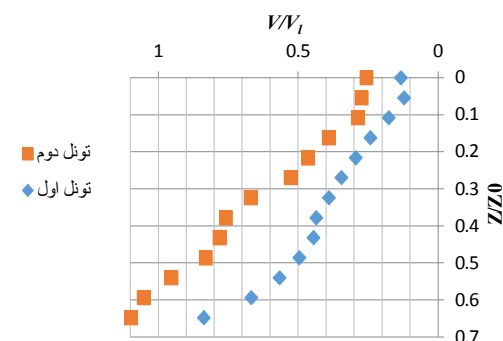
در این مقاله تاثیر درصد تراکم بر منحنی نشست مربوط به تونل‌های دو قلو مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور آزمایش‌ها در دو تراکم نسبی مختلف انجام و نتایج به دست آمده مقایسه شده است. رابطه‌ی جدیدی برای پیش بینی نشست تونل‌های تکی و دوقلو در حالت شل ارائه گردیده است. بخشی از نتایج مربوط به این تحقیق در زیر آورده شده است:

- در حالت متراکم منحنی پک برازش خوبی با نتایج ثبت شده برای تونل اول، دوم و مجموع از خود نشان می‌دهد. در حالی که در حالت شل رابطه پیشنهادی در این تحقیق برازش بهتری نسبت به منحنی پک ارائه می‌نماید.
- در حالت شل منحنی‌های نشست تونل اول و دوم نسبت به حالت متراکم باریکتر بوده و مقدار نشست بیشتری مشاهده گردید.
- میزان افت زمین برای تونل دوم در هر دو حالت شل و متراکم افزایش یافته بود که این افزایش برای حالت شل بیشتر بود.
- پارامتر عرضی منحنی نشست ( $K$ ) برای تونل دوم در هر دو حالت شل و متراکم افزایش یافت.
- در حالت شل، عرض منحنی به دست آمده برای تونل دوم تقریباً برابر تونل اول بود و تنها افزایش جزئی داشت.
- با توجه به باریک بودن منحنی نشست برای دو تونل در حالت شل، منحنی‌های نشست کلی در سطح و زیر سطح دارای دو نقطه تقعر می‌باشند که به علت افزایش جابجایی‌ها برای تونل دوم میزان نشست نقطه تقعر نزدیک به تونل دوم، بزرگتر بود. در حالی که برای حالت متراکم، منحنی نشست در نزدیکی‌های سطح دارای یک نقطه تقعر می‌باشد.

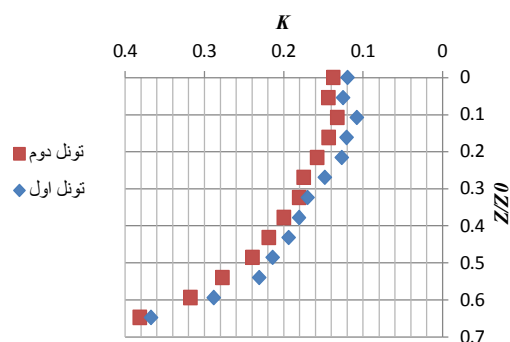
#### ۵- سیاهه‌ی نمادها

تمامی نمادهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۲۳ میزان افت زمین ایجاد شده در اعماق مختلف را برای دو تونل اول و دوم مقایسه کرده است. ملاحظه می‌شود که میزان افت زمین برای تونل دوم افزایش یافته که این افزایش در نزدیکی‌های سطح کمتر بوده و سپس افزایش یافته است. میانگین افزایش افت زمین ( $V$ ) تا تراز  $0.65$  عمق تونل حدود  $0.25$  برابر افت در تراز تونل ( $V_1$ ) می‌باشد که نسبت به عدد  $0.18$  مربوط به حالت متراکم عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. در شکل ۲۴ پارامتر عرضی منحنی نشست مربوط به دو تونل مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که  $K$  برای تونل دوم مقداری افزایش یافته است ولی با این حال نتایج نزدیک تونل اول می‌باشد و بر خلاف حالت متراکم در اعماق نزدیک سطح مقداری ثابت ندارد.



شکل ۲۳- مقایسه تغییرات افت زمین با عمق برای تونل اول و دوم



شکل ۲۴- مقایسه تغییرات  $K$  با عمق برای تونل اول و دوم

جدول ۱- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
نشست در سطح زمین	$Mm$	$S$
بیشینه نشست	$Mm$	$S_{max}$
بیشینه نشست تونل اول	$Mm$	$S_{1max}$
بیشینه نشست تونل دوم	$Mm$	$S_{2max}$
نشست تونل دو قلو	$Mm$	$S_{Twin}$
فاصله افقی از محور تونل	$Mm$	$x$
فاصله افقی محور تونل تا نقطه عطف	$Mm$	$i$
فاصله افقی محور تونل تا نقطه عطف تونل اول	$Mm$	$i_1$
فاصله افقی محور تونل تا نقطه عطف تونل دوم	$Mm$	$i_2$
ثابتی بر حسب خاک	بدون بعد	$K$
عمق مرکز تونل از سطح	$Mm$	$Z_0$
عمق مورد نظر از سطح	$Mm$	$Z$
فاصله جانبی از مرکز تونل اول	$Mm$	$x_A$
فاصله مرکز به مرکز دو تونل	$Mm$	$d$
افت زمین در تراز تونل (افت اعمالی)	%	$V_l$
افت در تراز مورد نظر	%	$V$

## ۶- مراجع

- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (Eds.). (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. CRC Press.
- Peck, R. B. (1969). Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. State of the art report. *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics*, Mexico, 225-290.
- O'Reilly, M. P., & New, B. M. (1982). Settlements above Tunnels in the United Kingdom, Their magnitude and prediction. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Tunnelling*, Brighton, 173-181.
- Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1997). Bored Tunnelling in The Urban Environment. *Proceedings of 14th International Conference on Soil Mecaanics and Founation Engineering*, 4, 2353-2385.
- Terzaghi, H. (1942). Liner-plate Tunnels on The Chicago Subway. *proc. ASCE*. 68(6), 862-899.
- Cording, E. J., & Hansmire, W. H. (1975). Displacement around Soft Ground Tunnels. *Proceedings of 5th Pan-Am Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering*, Buenos Aires, 4, 571-633.
- Addenbrooke, T. I. (1996). Numerical Analysis of Tunneling in stiff clay. *PhD Thesis, Imperial College*, London, UK.
- Hanya, T. (1977). Ground Movements due to Construction of Shield-driven Tunnel. *Proc. 9th International Conference on Soil Mechanic & Foundation Engineering*, Tokyo, 759-90.
- O'Reilly, M. P., Mair, R. J., & Alderman, G. H. (1991). Long-Term Settlements over Tunnels; an eleven-year study at Grimsby, *Tunneling '91, Instn. Mining and Metallurgy*, London, 55-64.

بررسی نشست ناشی از حفاری تونل‌های دوقلو در ماسه با تراکم‌های نسبی مختلف با استفاده از مدل آزمایشگاهی: ص ۶۷-۸۰

- New, B. M., & Bowers, K. H. (1994). Ground Movement Model Validation at the Heathrow Express Trial Tunnel. *Tunneling '94, Proc. 7th Int. Symp. of Inst. of Mining and Metallurgy and British Tunneling Society*, London, 310-329.
- Addenbrooke, T. I., & Potts, D. M. (2001). Twin Tunnel Interaction: Surface and Subsurface Effects. *International Journal of Geomechanics*, 12(1), 249-271.
- Chapman, D.N., Rogers, C.D.F., & Hunt, D.V.L. (2003). Investigating the Settlement above Closely Spaced Multiple Tunnel Constructions in Soft Ground. *Proceeding of the ITA World Tunnel Congress, Amsterdam*, 2, 629-635.
- Hunt, D.V.L. (2005). Predicting the Ground Movements above Twin Tunnels Constructed in London Clay. *PhD Thesis, University of Birmingham*, Birmingham, UK.
- Ng, C.W.W., Lu, H., & Peng, S.Y. (2013a). Three-Dimensional Centrifuge Modelling of Effects of Twin Tunneling on an Existing Pile. *Tunneling & Underground Space Technology*, 35, 189-199.
- Divall S., Goodey R.J., & Taylor R.N. (2012). Ground Movements Generated by Sequential Twin Tunneling in over Consolidated Clay. *Proceedings of the 2nd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Delft, online publication by TU Delft Library.
- Ocak, I. (2014). A New Approach for Estimating the Transverse Surface Settlement Curve for Twin Tunnels in Shallow and Soft Soils. *Environmental Earth Sciences*, (72)7, 2357-2367.
- Zhou, B., Marshall, A., & Yu, H. (2014). Effect of Relative Density on Settlements above Tunnels in Sands. *Tunneling and Underground Construction*, 96-105.
- Abdoli Fazel, A., Emami Tabrizi, M., & Afshin, H. (2015). Physical Modeling of Settlement in Sandy Soil due to Mechanized Tunneling. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, (4)1, 69-84.
- Loganathan, N., & Poulos, H. G. (1998). Analytical Prediction for Tunneling-induced Ground Movements in Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (124)9, 846-856.
- Emami Tabrizi, M., & Faraji, S. (2017). Development of a Device to Reconstitute Specimens of Loose and Dense Sands, Patent no. 92993, EO2F 00/5.
- White, D. J., Take, W. A., & Bolton, M. D. (2003). Soil Deformation Measurement using Particle Image Velocimetry (PIV) and Photogrammetry. *Geotechnique*, (53)7, 619-631.