

### مدل سازی فیزیکی نشست در خاک ماسه‌ای ناشی از تونل سازی مکانیزه

امین عبدلی فاضل<sup>۱</sup>؛ مهرداد امامی تبریزی<sup>۲</sup>؛ حسن افشین<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

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

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۰

#### چکیده

پیش‌بینی نشست‌های ناشی از حفر تونل در زمین‌های نرم از اهمیت بسزایی برخوردار است تا بتوان در صورت لزوم، اقدامات پیشگیرانه لازم را به منظور جلوگیری از آسیب دیدن سازه‌های سطحی موجود انجام داد. با توجه به رفتار پیچیده خاک، به خصوص خاک‌های دانه‌ای، روش‌های تجربی در پیش‌بینی این نشست‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. بدین منظور در این مقاله، ضمن معرفی مدل فیزیکی ساخته شده در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز از نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی فیزیکی استفاده شده و جایجایی‌های نمونه ماسه در دو تراکم نسبی متفاوت با استفاده از روش پردازش - تصویر اندازه‌گیری شده و منحنی‌های نشست سطحی و زیرسطحی با رابطه تجربی مقایسه شده است.

#### واژگان کلیدی

نشست  
تونل‌سازی مکانیزه  
مدل‌سازی فیزیکی  
ماسه  
تراکم نسبی  
پردازش تصاویر

#### ۱- مقدمه

با توسعه روز افزون محیط‌های شهری نیاز به استفاده از فضاهای زیر زمینی و احداث تونل بیش از گذشته احساس می‌شود. پیش‌بینی نشست‌های ناشی از حفر تونل که ممکن است باعث بروز آسیب به سازه‌های موجود سطحی و زیر سطحی شود، از موارد مهم در امر تونل‌سازی است. حفر تونل باعث آزاد شدن تنش‌های درجا می‌شود که تنها قسمتی از آن با اعمال تکیه‌گاه محدود می‌شود. بنابراین، مقداری تغییر شکل زمین در عمق تونل رخ داده و باعث به وجود آمدن زنجیره‌ای از حرکات تا سطح زمین می‌شود که این امر با کاهش عمق تونل اهمیت بیشتری خواهد داشت [1]. البته هنگام حفر تونل در زمین‌های سخت یا سنگی، غیر از حالت زمین‌های با خاصیت مچاله‌شوندگی (*squeezing*) حرکت‌های زمین عموماً مشکل‌ساز نیست و انتشار حرکت‌های زمین اطراف تونل جز در حالت‌های کم-

عمق و یا هنگامی که آب زیر زمینی موجود در لایه نرم بالایی تحت تاثیر قرار می‌گیرد، به سطح زمین نمی‌رسد [2]. ولی در مورد زمین‌های خاکی، حفر تونل ممکن است موجب نشست لایه‌های خاک بالای تونل شود. در عمل، پیش‌بینی جایجایی‌های زمین ناشی از حفر تونل عمدتاً بر اساس روابط تجربی است که پارامترهای ذاتی خاک را در نظر نمی‌گیرند و پیش‌بینی این حرکات با استفاده از مدل‌سازی عددی نتایج ضعیفی را در پی دارد، مگر این که از مدل‌های رفتاری پیچیده و یا پارامترهای غیرواقعی استفاده شود [3]. حرکات ایجاد شده در زمین به علت تونل‌سازی را می‌توان در دو قسمت حرکات آبی به دلیل افت‌زمین (*Ground Loss*) یا تغییرات تنش زمین و حرکات دراز مدت که عموماً مرتبط با تحکیم به علت تغییرات در تنش‌های موثر زمین است، در نظر گرفت [4]. از این رو در ماسه‌ها عمدتاً نشست‌های آبی در نظر گرفته شده است. البته داشتن یک معیار قضاوت جهت تفکیک زمانی نشست‌های آبی و دراز مدت مطلوب

در این رابطه  $K$  عددی ثابت بسته به نوع خاک و روش حفاری است. حجم منحنی نشست سطحی در طول واحد  $(V_S)$  را می‌توان با انتگرال‌گیری از معادله (۱) به صورت معادله (۳) نشان داد.

$$V_S = \int s_v(X).dX = \sqrt{2\pi}.i.S \quad (3)$$

اکنون با داشتن دو مؤلفه  $V_S$  و  $i$  می‌توان منحنی نشست سطحی را تعیین نمود. منحنی ارایه شده توسط پک پایه‌ای برای کارهای محققین بعد از وی شد و از آن برای نشان دادن نشست‌های زیر سطحی نیز استفاده کردند. البته در برخی موارد منحنی‌های دیگری نیز توسط بعضی از محققین پیشنهاد شده است. به عنوان نمونه جاکبز (*Jacobsz*) و همکارانش [9] معادله (۴) را که کمی متفاوت از منحنی پک است، ارایه دادند که همانند منحنی پک دارای دو مولفه است. سلستینو (*Celestino*) و همکارانش [10] و ورستر (*Vorster*) و همکارانش [11] منحنی‌هایی با سه مؤلفه جهت برازش ارایه دادند. با وجود این که افزایش مولفه‌های منحنی باعث افزایش انعطاف‌پذیری منحنی برازش شده می‌شود، ولی کار با آن‌ها به سهولت منحنی پک نیست.

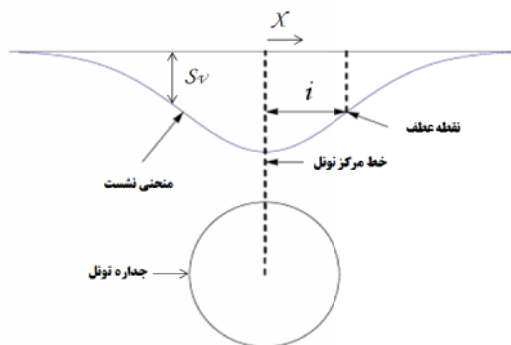
$$s_v = S \cdot \exp\left(-\frac{1}{3}\left(\frac{|X|}{i_j}\right)^{1.5}\right) \quad (4)$$

شکل منحنی پک، که مشابه نیم‌رخ‌های نشست متداول مشاهده شده است و سهولت برازش نتایج بر اساس آن که با مولفه‌های کمی تعریف می‌شود، مهمترین دلایل استفاده از منحنی پک است [12]. استفاده از این روش برای تخمین مقادیر و توزیع نشست‌ها در سطح زمین کاستی‌هایی نیز دارد. نخست این‌که مبنایی نظری جهت تعیین مقدار افت‌زمین ارایه نمی‌دهد و در نتیجه تخمین آن باید بر اساس تجربه انجام شود [13] و ثانیاً، جهت تعیین  $i$  روابط متعددی توسط محققین مختلف ارایه شده که این امر همان‌طور که لاگاناتان (*Loganathan*) با ارایه مثالی نشان داده ممکن است موجب تنوع نتایج به دست آمده شود [14]. بنابراین در به کارگیری از رابطه پک باید دقت لازم را نیز نمود.

فرض انتقال کامل افت‌زمین موجود در تراز تونل به سطح زمین که عموماً در روش پک برای تعیین  $V_S$  استفاده می‌شود، اگرچه ممکن است در مورد رس‌ها صحیح باشد،

خواهد بود که به عنوان مثال می‌توان از روش ارایه شده توسط ونگ (*Hwang*) و همکارانش استفاده نمود [5]. با وجود این که میزان نشست‌های زمین در هنگام حفر تونل متأثر از سازه‌های سطحی موجود هستند، اما درک این حرکت‌ها بدون در نظر گرفتن پیچیدگی تاثیر سازه‌های سطحی نیز حایز اهمیت است [1] و می‌توان از آن در تحلیل اولیه خطر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها استفاده کرد [6]. رایج‌ترین مدل برای پیش‌بینی نشست سطح زمین (*Greenfield*) به علت تونل‌سازی بر اساس یک توزیع گوسی است. پک (*Peck*) منحنی عرضی نشست به وجود آمده در سطح زمین به علت تونل‌سازی را با استفاده از یک تابع گوسی که در شکل ۱ نشان داده شده، به صورت معادله (۱) مدل کرد [7]:

$$s_v = S \cdot e^{-\frac{X^2}{2i^2}} \quad (1)$$



شکل ۱: منحنی نشست عرضی ارایه توسط پک

که در آن  $S$  میزان نشست سطح زمین در روی خط مرکز تونل،  $X$  فاصله افقی از محور تونل و  $i$  فاصله افقی از محور تونل تا نقطه عطف منحنی نشست می‌باشد. گرچه پک نموداری را برای تعیین مقدار  $i$  با استفاده از عمق و شعاع تونل در خاک‌های مختلف ارایه نمود [7]، ولی محققین زیادی از جمله اریلی (*O'Reilly*) و همکارانش با استفاده از یک ساده‌سازی  $i$  را به صورت یک تابع خطی از عمق تونل،  $Z_0$ ، به صورت معادله (۲) در نظر گرفته‌اند (به غیر از تونل‌های بسیار کم عمق) [8]:

$$i = K \cdot Z_0 \quad (2)$$

دریچه بر روی ماسه خشک و میله‌های آلومینیومی به منظور شبیه‌سازی پاسخ مصالح دانه‌ای به جابجایی دریچه تحت شرایط کرنش مسطح پرداختند. به عنوان مثال می‌توان به کار چوالیر (*Chevalier*) و همکاران اشاره نمود [18]. پارک (*Park*) و همکارانش با انجام یک سری آزمایش بر روی مدل دریچه به بررسی پاسخ لایه‌های شیب‌دار به حفر تونل پرداختند [19]. آزمایشات متقارن محوری مدل دریچه نیز توسط آداجی (*Adachi*) و همکارانش تحت شتاب گرانش و سانتریفیوژ انجام گرفت [20]. آن‌ها همچنین از دستگاه مشابهی، به منظور بررسی اثر سه‌بعدی سیستم دریچه بر روی فشار ایجاد شده و نشست سطح زمین تحت شرایط شتاب گرانش، استفاده نمودند [21]. کادرون (*Caudron*) و همکارانش نیز به منظور بررسی تأثیر حرکات زمین بر روی سازه‌های سطحی از یک مدل دریچه سه‌بعدی استفاده کرده‌اند [22]. یک روش دیگر به منظور شبیه‌سازی فرایند تونل‌سازی استفاده از حفاری با مته اگر است که چامپن (*Champan*) و همکارانش به منظور بررسی حرکت زمین حین تونل‌سازی در مجاورت تونل‌های از پیش ساخته شده در رس نرم، از این روش استفاده کردند [23]. آن‌ها همچنین از یک کیسه آب به عنوان سرباری برای شبیه‌سازی اعماق مختلف استفاده کردند. در روشی دیگر لی (*Lee*) و یو (*Yoo*) با استفاده از میله‌های آلومینیومی به منظور شبیه‌سازی مصالح خاک، به بررسی رفتار تونل حفر شده در مجاورت یک ردیف شمع بارگذاری شده پرداختند [24]. این آزمایش به صورت مدل دو بعدی و با استفاده از ترکیبی از لوله‌های آلومینیومی با قطرهای مختلف انجام گرفت و جهت اعمال افت‌زمین مورد نظر، قطر تونل به طور مکانیکی تنظیم شد.

از طرف دیگر محققین زیادی نیز از مدل‌های فیزیکی تحت تنش‌های افزایش یافته برای مدل‌سازی فیزیکی استفاده کرده‌اند. برای ایجاد سطح تنش‌های بالاتر در نمونه می‌توان از سانتریفیوژ [25]، مدل اصطکاک پایه [26] و ایجاد گرادیان هیدرولیکی [27] بهره برد که به عنوان نمونه می‌توان به کارهای تحقیقاتی اتکینسون و پاتز [28]، مایر (*Mair*) [29]، کیم (*Kim*) [30]، لی (*Lee*) و همکارانش [31]، مارشال (*Marshall*) و همکارانش [32] اشاره نمود. در هر یک از این دو گروه برای ایجاد افت‌زمین نیز از

ولی در خاک‌های زهکشی‌شده مانند ماسه به این علت که حجم خاک، حین تغییر شکل ثابت نمی‌ماند و تغییر شکل‌های برشی سبب بروز اتساع یا انقباض در توده خاک می‌شود، دقیق نخواهد بود و حجم افت‌زمین با عمق تغییر می‌کند. به عنوان مثال کرڈینگ (*Cording*) و هنسمایر (*Hansmire*) برای بیشتر موارد بررسی‌شده در رس نتیجه‌گیری کردند که  $V_S$  تقریباً برابر با  $V_I$  (میزان افت‌زمین در سطح تونل) است ولی در مورد خاک‌های دانه‌ای، تفاوت وجود دارد. نتایج چند مورد از بررسی‌های آن‌ها در خاک‌های دانه‌ای نشان می‌دهد که حجم نشست در سطح کمتر از افت‌زمین در عمق تونل است. آن‌ها همچنین بیان کردند که ممکن است در برخی موارد در خاک‌های دانه‌ای، منحنی نشست به شکل منحنی گوسی نباشد و پس از این که مقدار نشست در وسط زیاد شد، نشست‌ها در اطراف متناسب با نشست بیشینه در وسط، افزایش نیابند [15]. به عنوان مثالی دیگر، اتکینسون (*Atkinson*) و پاتز (*Potts*) رابطه‌ای را بین افت‌زمین در تراز تونل و سطح، با توجه به اتساع خاک ارائه دادند [16]. بنابراین پیش‌بینی نشست در ماسه‌ها نیاز به توجه بیشتری دارد.

اتساع و انقباض توده خاک، میزان افت‌زمین در اعماق مختلف را تحت تأثیر قرار داده و باعث پیچیده شدن حرکات ناشی از حفر تونل در محیط‌های دانه‌ای می‌شود. استفاده از مدل‌های فیزیکی همواره برای مطالعه و بررسی پدیده‌های پیچیده و یا کامل‌شناخته‌نشده، یک ابزار مناسب و کارآمد بوده است. به علاوه می‌توان از مدل‌سازی فیزیکی به منظور صحت‌سنجی نظریه‌های ارائه شده استفاده کرد. در بررسی مسایل مرتبط با تونل‌سازی محققین مختلفی از مدل‌سازی فیزیکی بهره برده‌اند. در یک تقسیم‌بندی می‌توان مدل‌های فیزیکی متداول را به دو گروه مدل‌های آزمایش‌شده تحت شتاب گرانش و مدل‌های آزمایش‌شده تحت تنش‌های افزایش‌یافته، تقسیم‌بندی نمود.

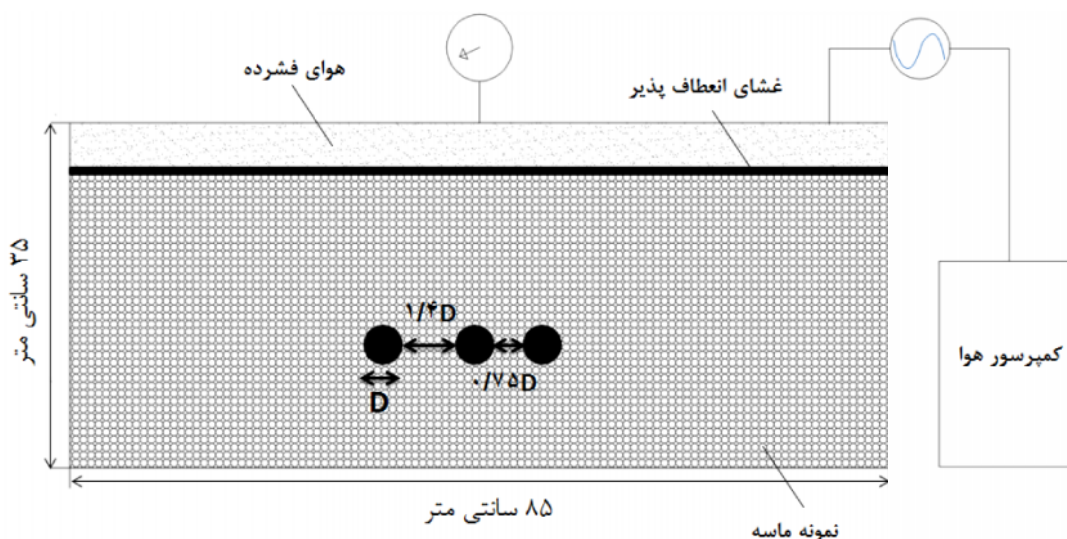
در مدل‌های فیزیکی تحت شتاب گرانش، دستگاه آزمایش تنها تحت شتاب گرانش قرار دارد. مدل دریچه (*Trap Door*) یک روش از این نوع، برای شبیه‌سازی تقریبی پاسخ زمین به حفر تونل است. ترزاقی (*Terzaghi*) با استفاده از این روش، پدیده قوس (*Arching*) را بررسی نمود [17]. به دنبال کار ترزاقی، چندین محقق از مدل

شامل یک محفظه فولادی با ابعاد داخلی  $۸۵ \times ۳۵ \times ۱۵$  سانتی‌متری است که جدار جلویی آن به منظور اندازه‌گیری جابجایی‌ها شفاف و از جنس پلکسی‌گلاس است. در داخل دستگاه مکان لازم برای جاسازی سه تونل تعبیه شده که امکان بررسی تونل‌های دوقلو در سه فاصله متفاوت را می‌دهد. مرکز تونل‌ها تقریباً در فاصله ۳ برابر قطر از کف دستگاه قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ طرح کلی دستگاه نشان داده شده است. فرآیند ساخت تونل با اعمال افت‌زمین در تراز تونل شبیه‌سازی شده است که به این منظور از لوله‌های تو در تو استفاده شده که موقعیت آن‌ها نسبت به هم در شکل ۳ نشان داده شده است.

روش‌هایی مانند کاهش قطر به صورت مکانیکی، کاهش فشار داخلی تونل مدل، حلال ارگانیک، حفاری با آگر (در رس‌ها) و یا دستگاه حفاری کوچک استفاده شده است [33]. در مقاله حاضر نشست در نمونه ماسه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی تحت شتاب گرانش بررسی شده است.

## ۲- مدل‌سازی فیزیکی

در تحقیق حاضر از مدل فیزیکی که در آزمایشگاه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز به منظور بررسی نشست‌های ناشی از حفر تونل در تونل‌های تک و دوقلو در ماسه طراحی و ساخته شده، استفاده شده است. دستگاه



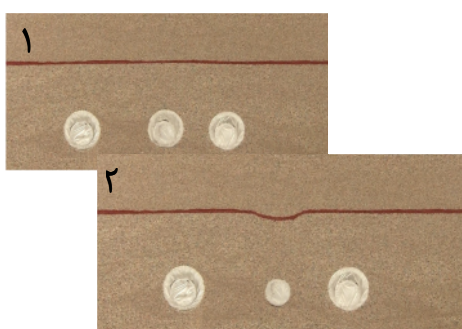
شکل ۲- طرح کلی دستگاه

قرار گرفته تا هندسه افت‌عملی به تونل، مشابه حالت واقعی باشد.

بنابراین همان‌طور که در شکل ۳ و شکل ۴ قابل مشاهده است، با تغییر قطر لوله‌ها که امکان افزایش تا ۴۰ میلی‌متر را دارد، علاوه بر تغییر در قطر تونل می‌توان میزان افت زمین‌عملی را نیز تغییر داد. به منظور ثابت کردن لوله‌های با قطر کوچک حین آزمایش یک تکیه‌گاه در پشت دستگاه تعبیه و فضای خالی بین دو لوله به منظور جلوگیری از ریزش ماسه به داخل حین آزمایش پوشیده شده است.

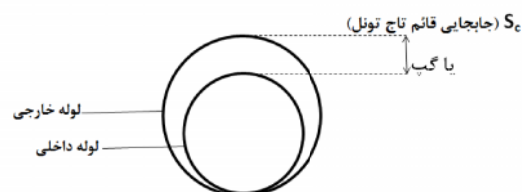
روش کار به این صورت است که نمونه خاک در لایه‌هایی تا تراز پایین تونل در داخل محفظه آماده‌سازی شده و سپس لوله‌های تو در تو در داخل محفظه جاسازی شده‌اند. در مرحله بعد لایه‌های خاک بالای تونل تا ارتفاع مورد نظر آماده‌سازی شده و لوله‌ها در داخل نمونه خاک دفن می‌شوند. پس از آماده‌سازی نمونه در داخل دستگاه آزمایش، طی فرآیند انجام آزمایش، لوله خارجی که دارای قطر بزرگ‌تری است، بیرون کشیده شده و باعث حرکت خاک اطراف خود می‌گردد. همان‌طور که در شکل نیز نشان داده شده، لوله داخلی یا تونل، تقریباً چسبیده به لوله بزرگ‌تر

با توجه به ماهیت مساله و سرعت بالای جابجایی اجزای خاک، به منظور اندازه‌گیری جابجایی‌های ذرات خاک در سطح و زیر سطح، از فیلم‌برداری و تکنیک پردازش تصویر بهره گرفته شده است. روش کار به این صورت است که ابتدا با یک دوربین دیجیتالی، جابجایی ذرات خاک را حین انجام آزمایش فیلم‌برداری کرده و فیلم به دست آمده از این طریق، با استفاده از کد نویسی صورت گرفته به فریم‌های متوالی جهت تحلیل‌های بعدی تبدیل شده است. کد نوشته شده بدین منظور، امکان جداسازی عکس‌های متوالی برای هر گام زمانی مشخص را فراهم نموده است. در شکل ۶ نمونه‌ای از یک فریم نشان داده شده است. در مرحله بعد با استفاده از کد *GeoPIV* مقادیر جابجایی خاک در سطح و زیر سطح تعیین شده است [34]. مراحل پردازش تصویر در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین با استفاده از کدنویسی‌های دیگری، ناحیه تحت تاثیر قرار گرفته، پارامترهای نشست و حجم نشست در سطح و اعماق مختلف تعیین و منحنی‌های مورد نظر برازش شده است. با توجه به این‌که در روش مورد استفاده، به منظور محاسبه جابجایی با ایجاد شبکه‌بندی ریز بر روی فریم‌های اخذ شده از نمونه ماسه هر یک از نقاط شبکه مستقلاً ردیابی می‌شوند، در این روش نیازی به استفاده از دانه‌های رنگی نیست. ولی به منظور ارتقای کیفیت تصویر مقداری از نمونه ماسه با استفاده از جوهر، رنگ‌آمیزی و با بقیه نمونه مخلوط شده است.



شکل ۶- نمونه‌ای از فریم تهیه شده

با توجه به این‌که نشست‌های ناشی از حفر تونل ماهیتی سه‌بعدی دارند و جابجایی‌های خاک در سینه‌کار باعث به وجود آمدن نشست‌هایی قبل از رسیدن تونل به

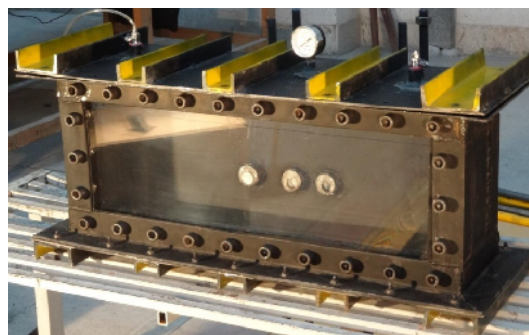


شکل ۳- موقعیت گپ و لوله‌های داخلی و خارجی



شکل ۴- لوله با اندازه‌های مختلف به منظور ایجاد مقادیر متفاوت قطر و افت‌زمین

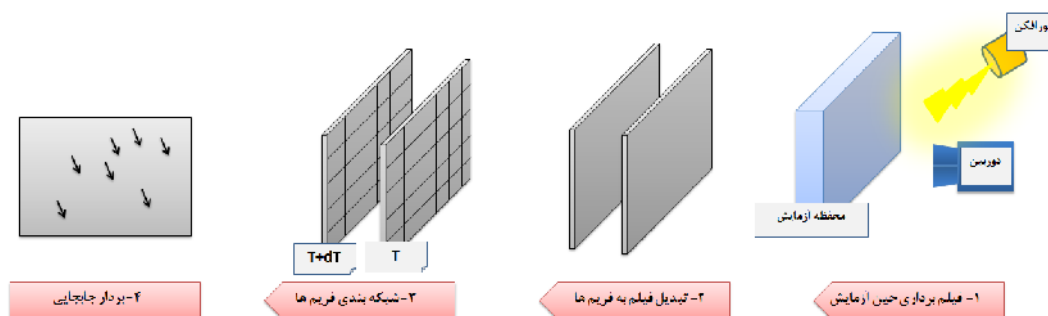
همچنین، در این دستگاه امکان اعمال سرباری انعطاف‌پذیر به نمونه خاک وجود دارد که در صورت نیاز می‌تواند برای بررسی میزان انتقال افت‌حجم اعمالی از عمق نمونه به سطح آن، تحت تنش‌های بالاتر مورد استفاده قرار گیرد. بارگذاری انعطاف‌پذیر با استفاده از هوای فشرده که توسط یک کمپرسور هوا تامین می‌شود، انجام می‌گیرد. در این روش یک غشای انعطاف‌پذیر بر روی نمونه خاک قرار داده می‌شود تا مانع ورود هوا به داخل خاک گردد. علت استفاده از این روش برای بارگذاری، اجازه دادن به تغییر شکل هم‌زمان سربار با سطح خاک است. طراحی اولیه سازه دستگاه به منظور تحمل فشار سربار، با تعیین خواص مقاومتی پلکسی و استفاده از روش المان محدود انجام گرفته است. دستگاه ساخته شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- دستگاه ساخته شده

متفاوت بودن رفتار خاک در تماس با پلکسی‌گلاس و اصطکاک دیواره‌ها، می‌تواند مانع از تحقق کامل حالت دوبعدی در دستگاه باشد. همچنین، همانند آزمایش‌های انجام گرفته در سانتریفیوژ، متناسب نبودن اندازه دانه‌ها نسبت به ابعاد تونل، یک چالش است که می‌توان تاثیر آن را با تغییر دادن اندازه دانه‌ها، بررسی نمود.

مقطع مورد نظر می‌شود، استفاده از روش دو بعدی برای محاسبه جابجایی‌ها در خاک با این فرض انجام شده است که در محاسبه افت‌زمین موجود در تراز تونل کلیه اثرات از جمله تغییر شکل‌های سه‌بعدی خاک در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال می‌توان از روش گپ‌پارامتر استفاده نمود [35]. با این وجود، برخی از عوامل همانند وجود اصطکاک بین لوله و خاک هنگام بیرون کشیدن لوله،



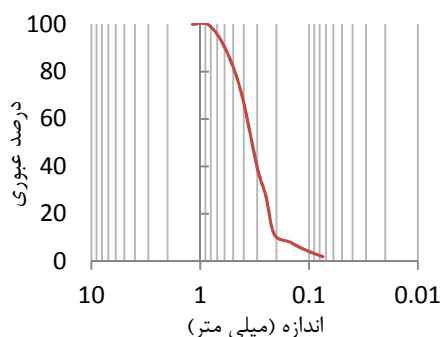
شکل ۷- مراحل پردازش تصویر جهت تعیین جابجایی‌ها

نتایج نزدیک و قابل قبولی را پیش‌بینی می‌کند که علت این امر استفاده از حجم نشست و بیشینه جابجایی ثبت شده در تراز مورد نظر است. عدم تقارن جزئی مشاهده شده در نمودارهای مربوط به نتایج اندازه‌گیری شده می‌تواند ناشی از برخی خطاهای جزئی، مانند عدم قرارگیری دقیق لوله‌ها در حالت متقارن و یا تراز نبودن کامل سطح ماسه باشد. منحنی‌های به دست آمده از روش جاکبز و پک تقریباً مشابه هم هستند ولی در ادامه جهت بررسی پارامترهای مؤثر از منحنی پک که رایج‌تر است، استفاده خواهد شد.

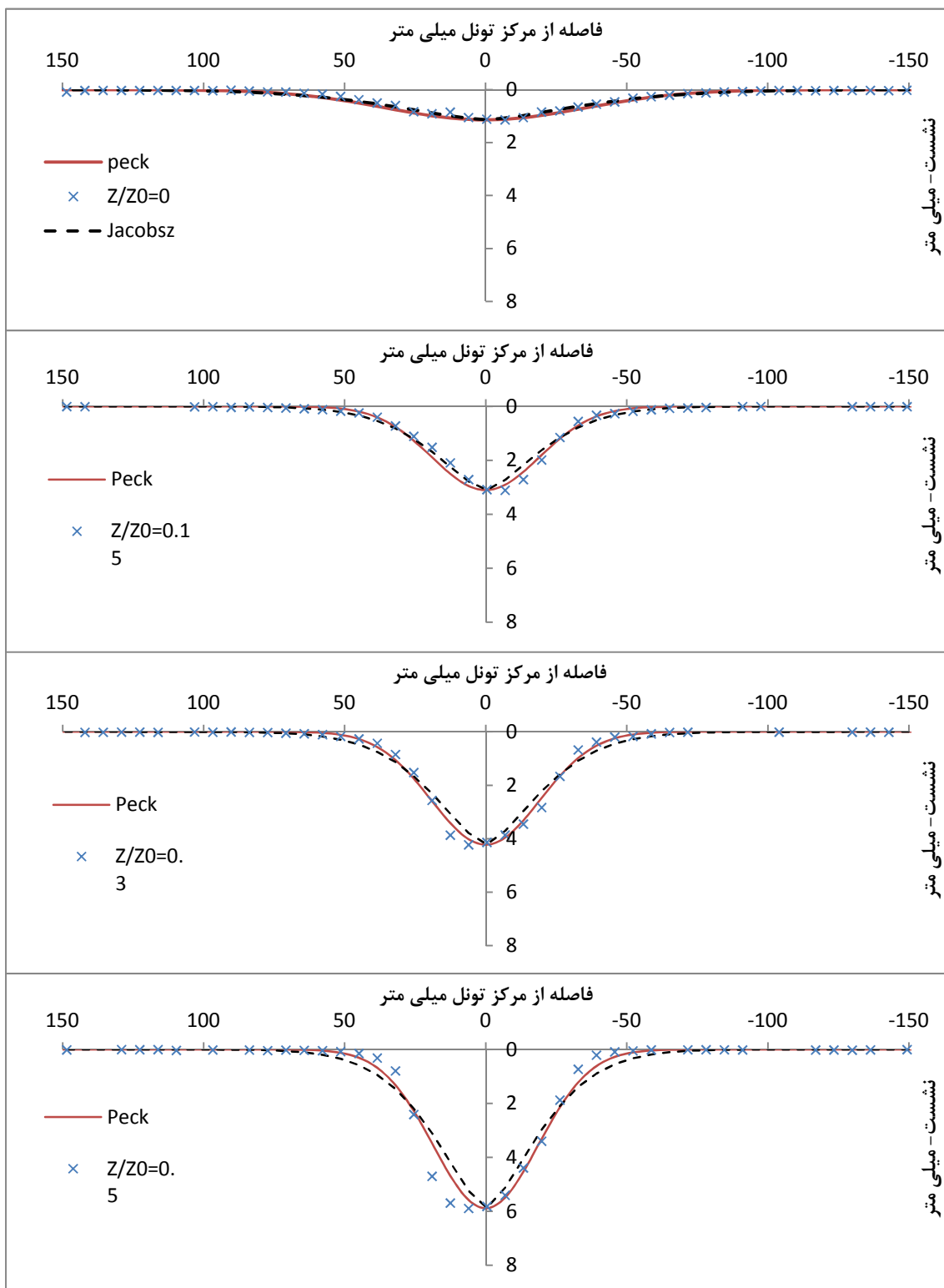
### ۳- نتایج آزمایش و بحث

آزمایش‌هایی که در این مقاله به شرح آن پرداخته شده است، بر روی ماسه ریزدانه سیلیسی فاقد چسبندگی با اندازه متوسط دانه‌ها ( $D_{50}$ ) برابر با ۰٫۳۴ میلی‌متر، چگالی ویژه ( $G_s$ ) برابر با ۲٫۶۲ و زاویه اصطکاک داخلی ۲۷ درجه انجام شده است. دانه‌بندی ماسه، در شکل ۸ نشان داده شده است. در آزمایش اول که در حالت متراکم انجام شده، برای ایجاد تراکم یکنواخت، نمونه در لایه‌هایی با وزن برابر به داخل محفظه منتقل و به روش مکانیکی به طور کامل متراکم شده است. قطر تقریبی لوله‌های خارجی و داخلی به ترتیب ۴۲ و ۲۷ میلی‌متر است و افت حجمی حدوداً برابر با ۶۰٪ مساحت لوله بزرگ‌تر، به خاک اعمال شده است. سطح زمین نیز در ارتفاع تقریبی ۱۳۰ میلی‌متری از مرکز تونل قرار داده شده است.

در شکل ۹ جابجایی‌های قائم اندازه‌گیری شده با استفاده از روش پردازش تصویر و منحنی‌های پک و جاکبز برازش شده متناظر با بیشینه جابجایی در ۴ عمق مختلف از سطح زمین ( $Z$ ) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود منحنی پک و جاکبز به دست آمده از این طریق،

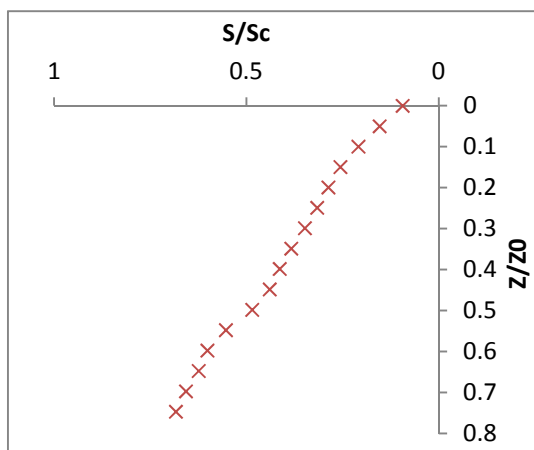


شکل ۸- دانه بندی ماسه سیلیسی



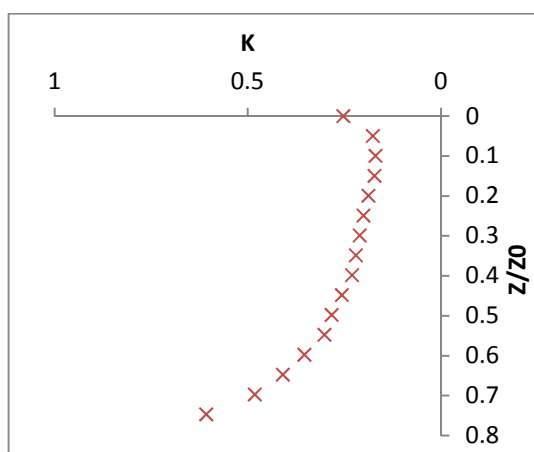
شکل ۹ - نشست‌های ثبت شده و منحنی پک برازش شده برای اعماق مختلف

(۲) برای تخمین منحنی نشست زیرسطحی توصیه نمی‌شود و در عوض می‌توان از معادلاتی که تغییرات  $K$  با عمق را در نظر می‌گیرند، مشابه معادله ارایه شده توسط مایر (Mair) و تیلور (Taylor) برای خاک‌های رسی، استفاده نمود [36].



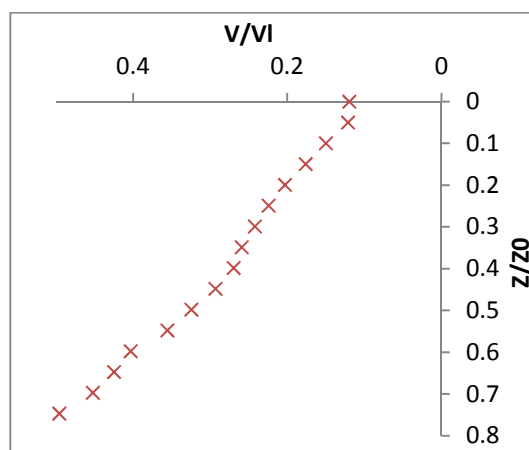
شکل ۱۱ - تغییرات بیشینه نشست نرمال با عمق نرمال

همان‌طور که اشاره شد علت حصول نتایج قابل قبول از منحنی پک، استفاده از افت‌زمین و بیشینه نشست مشاهده شده، است. استفاده از افت‌زمین موجود در عمق تونل برای برازش منحنی پک در سطح ممکن است منجر به نتایج دور از واقعیت گردد. این موضوع در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در برازش این منحنی‌ها از حجم افت‌زمین در تراز تونل ( $V_I$ ) استفاده شده است.



شکل ۱۲ - تغییرات  $K$  با عمق نرمال

شکل ۱۰ تغییرات نسبت افت‌زمین در ترازهای مختلف (بی بعد شده بر حسب عمق تونل) را نشان می‌دهد. در این منحنی میزان افت‌زمین در تراز مورد نظر ( $V$ ) بر حسب افت‌زمین در تراز تونل ( $V_I$ ) بی‌بعد شده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل ملاحظه میزان افت‌زمین با نزدیک شدن به سطح زمین است که این روند تقریباً خطی است. در واقع نمونه خاک از خود یک رفتار اتساعی نشان داده و افت ایجاد شده را تا حدی جبران می‌کند. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از افت‌زمین در تراز تونل منجر به حصول نتایج غیر دقیق برای پیش‌بینی نشست‌ها شود که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.



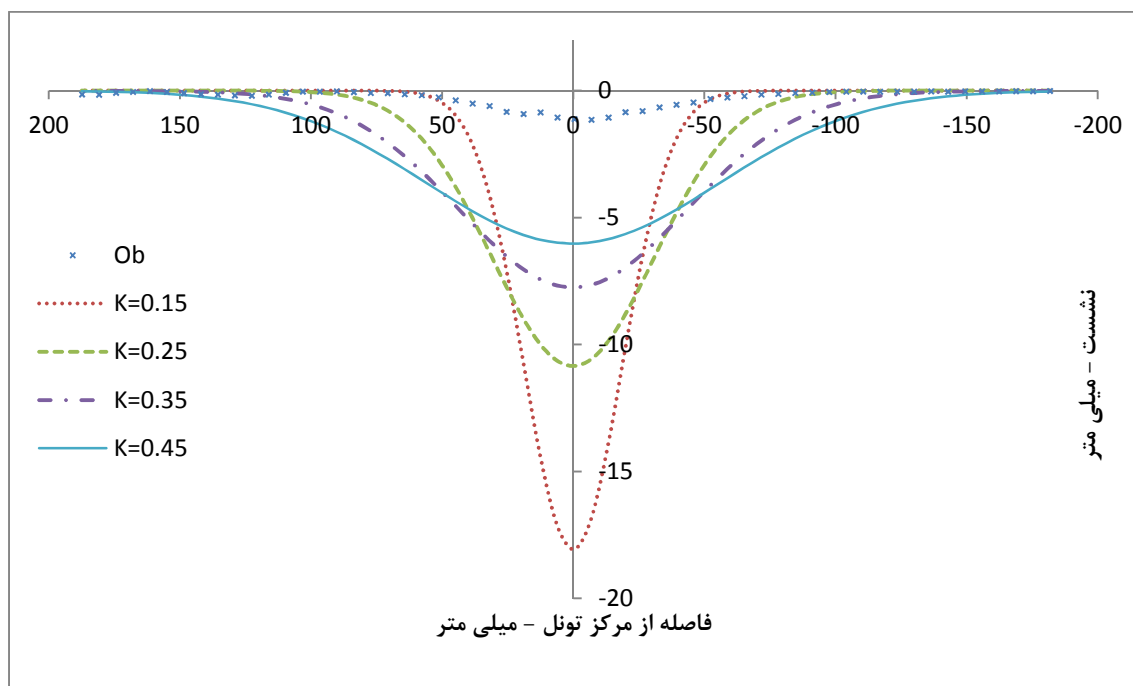
شکل ۱۰ - تغییرات افت‌زمین نرمال با عمق نرمال

در شکل ۱۱ تغییرات بیشینه نشست قائم ( $S$ ) در اعماق مختلف نشان داده شده است. این نمودار بر حسب جایجایی قائم تاج تونل ( $S_c$ ) که در این آزمایش برابر ۱۲/۱۴ میلی‌متر می‌باشد، بی‌بعد شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نشست بیشینه نیز با نزدیک شدن به سطح کاهش یافته و همانند انتظار، میزان نشست‌های زیرسطحی بیشتر از نشست ظاهر شده در سطح است. روند این تغییرات نیز تقریباً به صورت خطی است.

تغییرات  $K$  (ضریب ثابت در معادله (۲))، با عمق در نمودار

شکل ۱۲ نشان داده شده است. با مراجعه به شکل می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقدار  $K$  تابعی از عمق است و با افزایش عمق افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از معادله





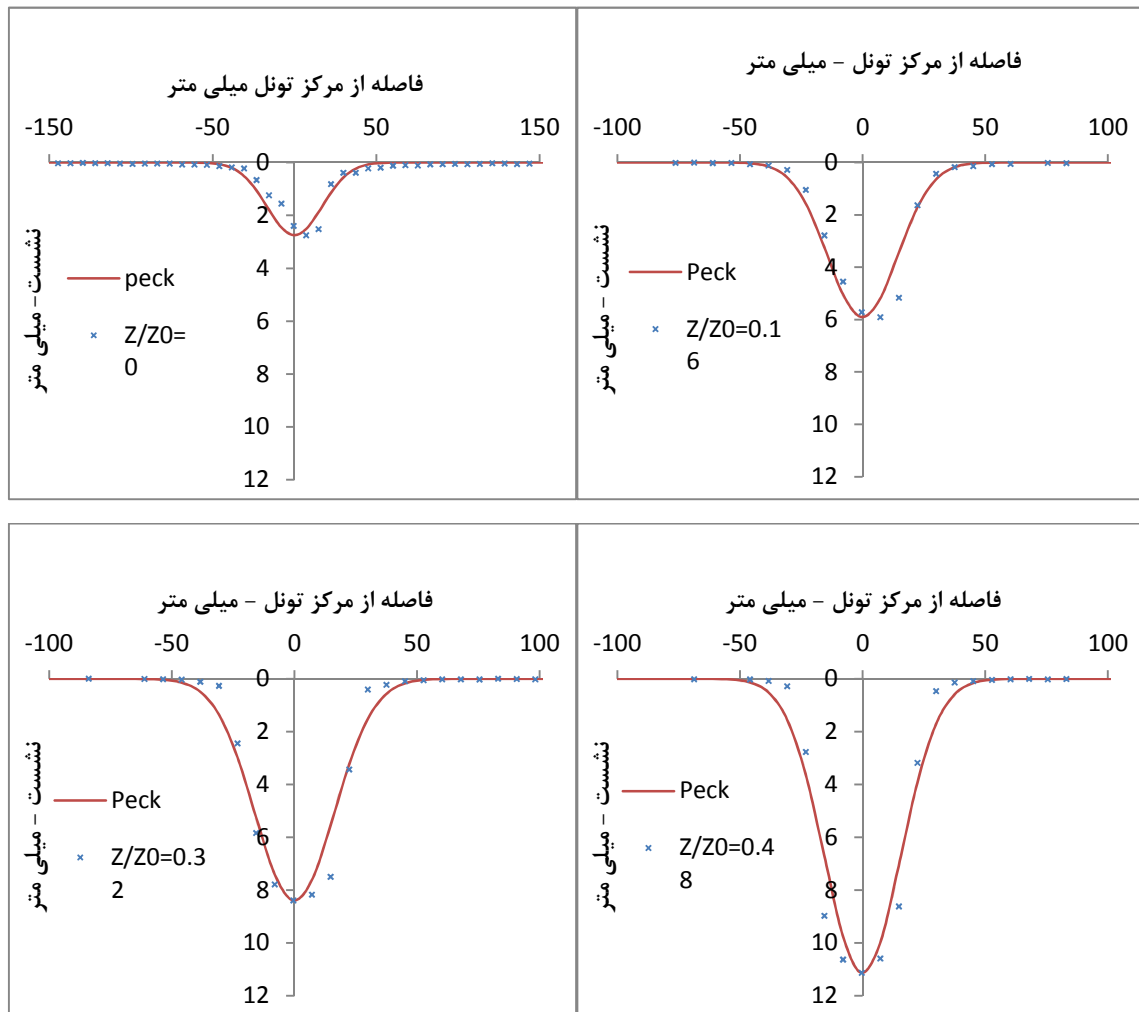
شکل ۱۳ - مقایسه منحنی پک برازش شده با  $K$  های مختلف با نشست مشاهده شده

در شکل ۱۴ مقادیر مشاهده شده نشست و همچنین منحنی پک برازش شده برای ۴ عمق مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این حالت نیز نتایج مشاهده شده با دقت قابل قبولی از الگوی منحنی پک تبعیت می‌کنند که در ادامه به ویژگی‌های منحنی پک پرداخته خواهد شد. با توجه به این نکته که در هر دو آزمایش، فرض بر اعمال شرایط مرزی یکسان است، بر روی مولفه‌های هر دو آزمایش بی‌بعدسازی انجام گرفته تا امکان مقایسه نتایج فراهم شود. میزان افت‌زمین در ترازهای مختلف هر آزمایش، بر حسب افت‌زمین در تراز تونل در همان آزمایش، بی‌بعد شده و همین روند در مورد جابجایی بیشینه در هر تراز، نیز به کار گرفته شده است.

میزان افت‌زمین در اعماق مختلف، برای دو آزمایش حالت سست و متراکم در شکل ۱۵ مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در آزمایش در حالت سست حجم بیشتری از افت‌زمین به ترازهای بالاتر از تونل منتقل شده و در واقع اتساع خاک کمتر است. بنابراین در پیش‌بینی نشست‌ها باید به نقش اتساع توجه ویژه داشت که آن نیز به نوبه خود وابسته به تراکم نسبی خواهد بود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود به ازای مقادیر  $K$  بین ۰٫۴۵ تا هیچ یک از منحنی‌ها، نتایج قابل قبولی ارایه نمی‌دهند. بنابراین با فرض مشخص بودن  $K$ ، توصیه می‌شود مقدار نشست بیشینه و یا میزان افت‌زمین در سطح برآورد شده و سپس بر مبنای آن مقادیر جابجایی با منحنی پک برازش شوند.

آزمایش دوم بر روی همان ماسه در حالت سست انجام گرفته است. برای به دست آوردن حالت سست در ماسه، از روش بارش یا ریختن ماسه با استفاده از الک استفاده شده است. برای ماسه استفاده شده ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) تقریباً برابر ۲ و ضریب دانه‌بندی ( $C_c$ ) در حدود ۱ است که نشانگر ماسه بد دانه‌بندی شده است. با توجه به این که ماسه بد دانه‌بندی شده مورد استفاده قرار گرفته، ممکن است تراکم نسبی در این حالت نیز بالا باشد. به هر حال منظور از حالت سست، بیشتر متوجه نحوه آماده‌سازی ماسه به شرحی که گذشت، است. در این آزمایش قطر تقریبی لوله‌های خارجی و داخلی به ترتیب ۴۱ و ۲۶ میلی‌متر است و افت حجمی حدوداً برابر با ۶۰٪ مساحت لوله بزرگ‌تر، به خاک اعمال شده است. سطح زمین نیز در ارتفاع تقریبی ۱۴۰ میلی‌متری از مرکز تونل قرار داشته است.



شکل ۱۴ - نشست های ثبت شده و منحنی پک برازش شده برای اعماق مختلف

بالتر از تاج تونل پر شده که این امر سبب ایجاد جابجایی- های بزرگ در لایه میانی شده است. به طور کلی در ماسه متراکم به علت اتساع، فضای ناشی از حرکت این خاک‌ها تا حدی جبران شده، ولی در ماسه سست به علت کم و یا نبودن اتساع، این فضای خالی سبب به وجود آمدن نشست- های بزرگ‌تر از تاج تونل در لایه‌های بالاتر شده است. با استفاده از آشکارسازی ناحیه تحت تاثیر قرار گرفته در فریم- های متوالی توسط کد نوشته شده، بهتر می‌توان حرکت ذرات ماسه را بررسی نمود.

در شکل ۱۶ میزان بیشینه نشست بی‌بعد شده برحسب جابجایی قائم تاج تونل ( $\delta_c$ ) که در آزمایش حالت سست برابر ۱۱/۸۵ میلی‌متر است، در ترازهای مختلف برای هر دو حالت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر این که میزان بیشینه نشست در حالت سست بیشتر از حالت متراکم است، در حالت سست میزان بیشینه نشست در ترازهای میانی تونل بیشتر از تاج تونل است و سپس با نزدیک شدن به سطح دوباره کاهش یافته است. این رفتار را در این حالت می‌توان این‌طور تفسیر نمود که قسمت‌های تحتانی فضای بین دو لوله توسط خاک‌های

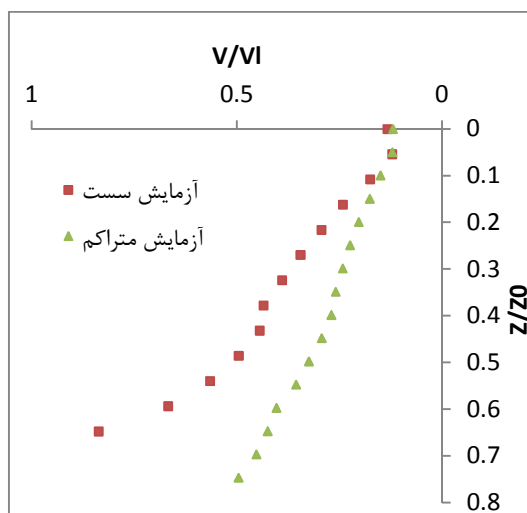
است. بنابراین در مصالح ماسه‌ای باید تا حد توان از وقوع ریزش جلوگیری کرد. همچنین نتایج آزمایشات حاکی از این است که میزان  $K$  در اعماق مختلف برای حالت ماسه سست کمتر از ماسه متراکم است (شکل ۱۸) و در نتیجه منحنی-های عرضی نشست برای ماسه سست دارای شکل باریک‌تری در مقایسه با ماسه متراکم است.

مشاهده اخیر موافق با نتیجه‌گیری ژو (Zhou) و همکارانش است که با استفاده از مدل‌سازی در سانتی‌متر نشان دادند که عرض منحنی نشست در ماسه با کاهش درصد تراکم نسبی کاهش می‌یابد [3].

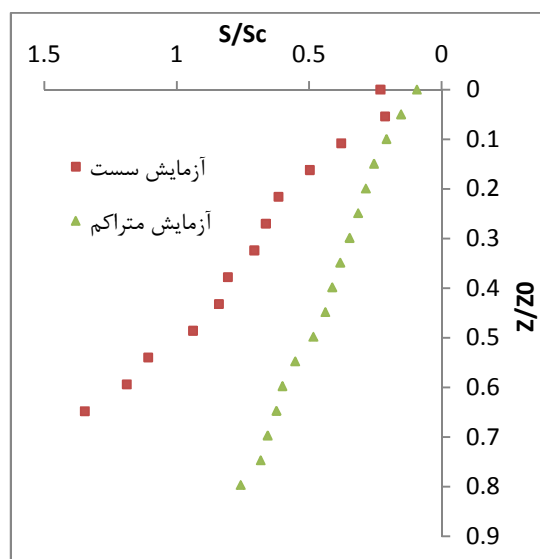
#### ۴- نتیجه و جمع‌بندی

در این مقاله نشست‌های ناشی از حفر تونل در ماسه، با استفاده از مدل فیزیکی ساخته شده در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز بررسی شده است. فرآیند ساخت تونل با اعمال افت زمین در تراز تونل شبیه-سازی و نشست‌های سطحی و زیر سطحی با استفاده از روش پردازش تصویر اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده از آزمایشات حاکی از این است که:

- الگوی نشست قائم سطحی و زیرسطحی ثبت شده در نمونه ماسه خشک به طور قابل قبولی از منحنی گوسی پیروی می‌کند ولی در انتخاب پارامترهای آن مانند مقدار افت زمین باید دقت لازم را نمود زیرا در غیر این صورت ممکن است نتایج غیرقابل قبولی حاصل شود.
- هنگام حفاری در ماسه زهکشی شده، با توجه به تغییر حجم ماسه هنگام تغییر شکل، حجم افت-زمین در اعماق مختلف ممکن است با افت زمین موجود در عمق تونل برابر نباشد. بنابراین استفاده از افت زمین موجود در عمق تونل برای برآزش منحنی نشست در ترازهای بالاتر و همچنین استفاده از افت زمین ثبت شده در سطح زمین برای برآزش نشست در اعماق، ممکن است منجر به نتایج دور از واقع گردد.
- میزان افت زمین و همچنین بیشینه نشست قائم با نزدیک شدن به سطح زمین کاهش می‌یابد.
- مولفه  $K$  (ضریب ثابت در معادله (۲))، مورد



شکل ۱۵- مقایسه افت زمین در اعماق مختلف برای آزمایش حالت سست و متراکم



شکل ۱۶- مقایسه نشست بیشینه در اعماق مختلف برای آزمایش حالت سست و متراکم

شکل ۱۷ مراحل انتقال جابجایی خاک از عمق تونل تا سطح را نشان داده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خاک زیر تونل جابجایی چندانی از خود نشان نداده و قسمت‌های تحتانی گپ بین دو لوله نیز توسط خاک‌های بالایی اطراف تونل پر شده است. بنابراین، به نظر می‌رسد میزان گپ در قسمت‌های پایینی تاثیر بیشتری نسبت به گپ قسمت‌های بالایی در ایجاد جابجایی‌های بزرگ داشته

### ۵- سپاس‌گزاری

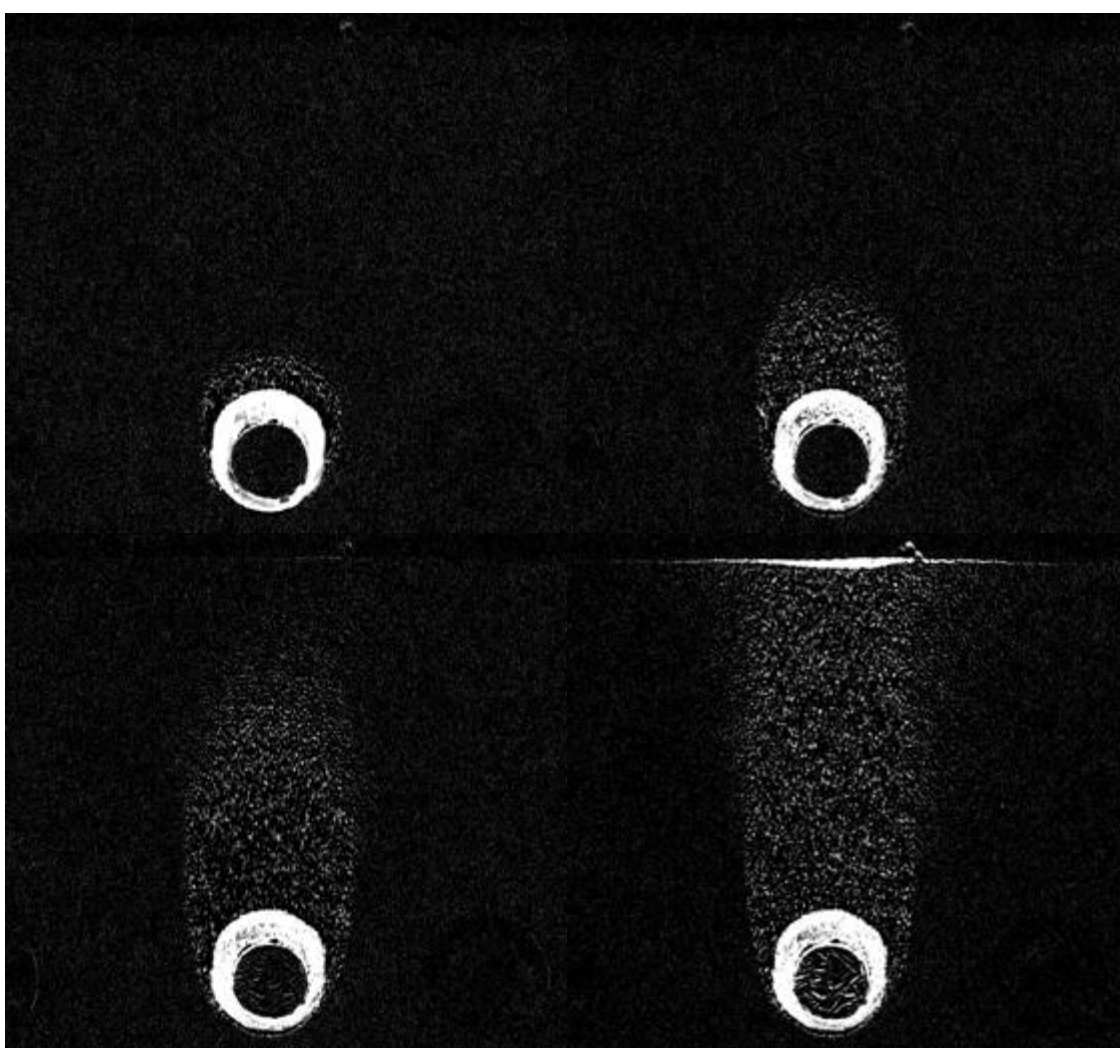
نویسندگان در این‌جا مناسب می‌دانند سپاس و قدردانی خود را از فن‌ورزان آزمایشگاه مکانیک خاک و سنگ دانشکده عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز اعلام نمایند.

### ۶- فهرست نمادها

در جدول ۱ فهرست نمادها آورده شده است.

استفاده جهت پیش‌بینی نشست‌های زیر سطحی، مقداری ثابت نبوده و با عمق تغییر می‌یابد.

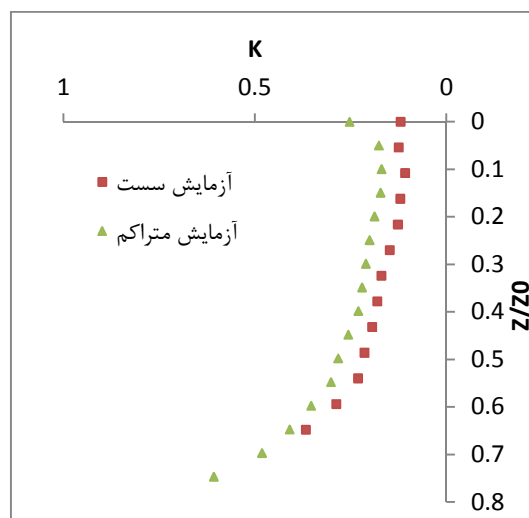
- منحنی نشست عرضی در حالت سست نسبت به حالت متراکم باریک‌تر و مقادیر جابجایی آن بزرگ‌تر است.
- با توجه به رفتار حجمی پیچیده در ماسه که تابعی از تراکم نیز خواهد بود، توصیه می‌شود از مدل‌سازی فیزیکی استفاده شود.



شکل ۱۷ - ناحیه تحت تأثیر قرار گرفته در فرم‌های متوالی در حین آزمایش

جدول ۱- فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد
نشست در سطح زمین	mm	s
بیشینه نشست در تراز مورد نظر	mm	Δ
فاصله افقی از محور تونل	mm	Δ
عمق تراز مورد نظر	mm	Δ
افت زمین در تراز مورد نظر		Δ
افت تونل		Δ
افت زمین در سطح زمین		Δ
نقطه عطف در منحنی پک	mm	e
نقطه عطف در منحنی جاکبز	mm	i
ثابتی بر حسب خاک	-	l
عمق تونل	mm	2
جابجایی در تاج تونل	mm	s



شکل ۱۸- مقایسه K برای آزمایش حالت سست و متراکم

## ۷- منابع‌ها

- [1] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. & Xu, Sh. (2008). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. London: Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-0-415-42010-5.
- [2] Chapman, D., Metje, N. & Stärk, A. (2010). *Introduction to Tunnel Construction*. Taylor & Francis e-Library, ISBN-13: 978-0-203-89515-3.
- [3] Zhou, B., Marshall, A. & Yu, H. (2014). Effect of Relative Density on Settlements above Tunnels in Sands. *Tunneling and Underground Construction*, 96-105. DOI: 10.1061/9780784413449.010.
- [4] Wood, A. M. (2002). *Tunnelling Management by Design*, Taylor & Francis e-Library. ISBN: 0-203-78590-8.
- [5] Hwang, R., Fan, C. & Yang, G. (1995). *Consolidation Settlements due to Tunnelling*, Proceedings of South East Asian Symposium on Tunnelling & Underground Space Development, Bangkok, Thailand, 79-86.
- [6] Franzius, J. N. (2003). *Behaviour of Buildings due to Tunnel Induced Subsidence*, Ph.D. thesis, Imperial College of Science, University of London.
- [7] Peck, R. B. (1969). Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. State of the art report. Mexico: *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics*, 225-290.
- [8] O'Reilly, M. P. & New, B. M. (1982). Settlements above Tunnels in the United Kingdom Their magnitude and prediction. Brighton: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Tunnelling*, 173-181.

- [9] Jacobsz, S. W., Standing, J. R., Mair, R. J., Hagiwara, T. & Sugiyama, T. (2004). Centrifuge Modelling of Tunnelling Near Driven Piles. *Soils Found.* 44, No. 1, 49-56.
- [10] Celestino, T.B. & Ruiz, A.P.T. (1998). Shape of Settlement Troughs due to Tunneling through Different Types of Soft Ground. *Felsbau* 16(2), 118-121.
- [11] Vorster, T.E.B., Klar, A., Soga, K. & Mair, R.J. (2005). Estimating the Effects of Tunneling on Existing Pipelines. *Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131, No. 11, 1399-1410. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241.
- [12] Loganathan, N. & Poulos, H. (1998). Analytical Prediction for Tunneling-induced Ground Movements in Clays. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(9), 846-856, DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241.
- [13] Beadle, M. (1998). *Settlement induced by Tunnelling in Cohesive-Frictional Soils*, M.Sc. thesis, University of Western Ontario London.
- [14] Loganathan, N. (2011). *An Innovative Method for Assessing Tunnelling-induced Risks to Adjacent Structures*, New York, Parsons Brinckerhoff Inc.
- [15] Cording, E. J., & Hansmire, W. H. (1975). Displacements around of Soft Ground Tunnels. *Proceedings Fifth Panamerican Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (4), 571-633.
- [16] Atkinson, J. H. & Potts, D. M. (1977). Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground, *Proceedings, ASCE*, 103(4), 307-375.
- [17] Terzaghi, K. (1936). Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand above a Yielding Trap-Door. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics*, (1), 307-311, Cambridge, MA.
- [18] Chevalier, B., Combe, G. & Villard, P. (2007). *Experimental and Numerical Studies of Load Transfers and Arching Effect in the Trap-Door Problem*, Laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques, Grenoble, France.
- [19] Park, S.H., Adachi, T., Kimura, M. & Kishida, K. (1999). Trap Door Test Using Aluminum Blocks, *Proceedings of the 29th Symposium of Rock Mechanics*. J.S.C.E., 106-111.
- [20] Adachi, T., Tamura, T., Kimura, K. & Nishimura, T. (1995). Axial Symmetric Trap Door Tests on Sand and Cohesion Soil. *Proceedings of the 30th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 1973-1976 (in Japanese).
- [21] Adachi, T., Kimura, M. & Kishida, K. (2003). Experimental Study on the Distribution of Earth Pressure and Surface Settlement through Three Dimensional Trapdoor Tests. *Tunneling and Underground Space Technology* 18 (2), 171-183.

- [22] Caudron, M., Hor, B., Emeriault, F. & Al Heib, M. (2010). A Large 3D Physical Model: a tool to investigate the consequences of ground movements on the surface structures. *EPJ Web of Conferences* 6, 22001, 1-8.
- [23] Champan, D.N., Ahn, S.K., Hunt, D.V.L. & Chan, H.C. (2006). The Use of Model Tests to Investigate the Ground Displacement Associated with Multiple Tunnel Construction in Soil. *Tunnels & Tunneling* 21 (3), 413.
- [24] Lee, Y. & Yoo, C., (2006). Behavior of a bored tunnel adjacent to a line of load piles. *Tunneling and Underground Space Technology* 21 (3), 370.
- [25] Pokrovsky, G.I. & Fedorov, I.S. (1936). Studies of Soil Pressures and Soil Deformations by means of a Centrifuge. *Proceedings of the First International Conference ISSMFE (Harvard), vol. 1*, 70.
- [26] Bray, J.W. & Goodman, R.E. (1981). The Theory of Base Friction Models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract* 18, 453-468.
- [27] Zelikson, A. (1969). Geotechnical Models using the Hydraulic Gradient Similarity method, *Geotechnique*, 4, 495-508.
- [28] Atkinson, J.H., Potts, D.M., Schofield, A.N. (1977). Centrifugal Model Tests on Shallow Tunnels in Sand. *Tunnels and Tunnelling*, vol: *Jan/Feb*, 59-64.
- [29] Mair, R.J. (1979). Centrifugal Modelling of Tunnel Construction in Soft Clay. *Ph.D. Thesis*. Cambridge University Engineering Department, UK.
- [30] Kim, S. (2004). Interaction Behaviours between Parallel Tunnels in Soft Ground, *Tunneling and underground space technology*, Underground space fore sustainable urban development, Proceedings of the 30th ITA-AITES world tunnel congress, Singapore, 22 - 27.
- [31] Lee, C., Chiang, K. and Kuo, C. (2004). Ground Movement and Tunnel Stability when Tunneling in Sandy Ground, *Chinese Institute of Engineers*, 27(7), 1021-1032, DOI:10.1080/02533839.2004.9670957.
- [32] Marshall, A. M., Farrell, R., Klar, A. & Mair, R. (2012). Tunnels in sands: The Effect of Size, Depth and Volume Loss on Greenfield Displacements, *Geotechnique*, 62(5) , 385-399, DOI:10.1680/geot.10.p.047.
- [33] Meguid, M.A., Saada, O., Nunes, M.A. & Mattar, J. (2008). Physical Modeling of Tunnels in Soft Ground: A review, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 185-198, DOI: 10.1016/j.tust.2007.02.003.
- [34] 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.

- [35] Lee, K. M., Rowe, R. K. & Lo, K.Y. (1992). Subsidence owing to Tunnelling. I. Estimating the gap parameter, *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), 929-940.
- [36] Mair, R. J. & Taylor, R. N. (1997). Bored Tunnelling in The Urban Environment. *Proceedings of 14th Int. Conf. on Soil Mecaanics and Founation Engineering*, 4, 2353-2385.