

# تحلیل استاتیکی تونل‌های منفرد شهری در آبرفت درشت‌دانه با استفاده از روش اجزاء مجزا

احسان منافی<sup>۱</sup>، محمد علیانی<sup>۲\*</sup>، سید شهاب الدین یثربی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- استادیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- دانشیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

\*m.olyaei@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۴/۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۶/۱۹]

**چکیده** - از نیازهای شهرنشینی مدرن امروزی ساخت تونل‌های شهری (مترو و راه) است. بسیاری از این سازه‌ها در محیط‌های آبرفتی و سست شهری قرار دارند. در ساخت تونل‌های شهری مهم‌ترین معضلی که با آن برخورد می‌شود نشست‌های به وجود آمده در سطح زمین و تأثیر آن بر سازه‌های سطحی است. علاوه بر این کنترل جابه‌جایی‌های اطراف ناحیه حفاری به منظور تأمین ایمنی سازه تونل از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین تعیین دقیق جابه‌جایی‌های زمین هنگام ساخت تونل از ضروری‌ترین نیازهای پروژه است. با توجه به اینکه خاک، یک محیط ناپیوسته متشکل از ذرات با اندازه‌های مختلف است، پس در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش اجزاء مجزا که خاک را به صورت ذرات مجزا در نظر می‌گیرد، آثار پارامترهای هندسی مختلف تونل از قبیل قطر و عمق بر جابه‌جایی‌های زمین بررسی شود.

بنابراین تحلیل دوبعدی استاتیکی تونل با فرض کرنش صفحه‌ای و با استفاده از نرم افزار PFC<sup>2D</sup> که بر پایه روش اجزاء مجزا است، انجام شده، که نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از نرم افزار PLAXIS<sup>2D</sup> که بر اساس روش اجزاء محدود است و همچنین داده‌های صحرایی و حل تحلیلی مقایسه شده است. نتایج بیانگر دقت بیشتر روش اجزاء مجزا نسبت به روش اجزاء محدود به خصوص در اعماق سطحی و همچنین مدل سازی بهتر تغییرات سربار است.

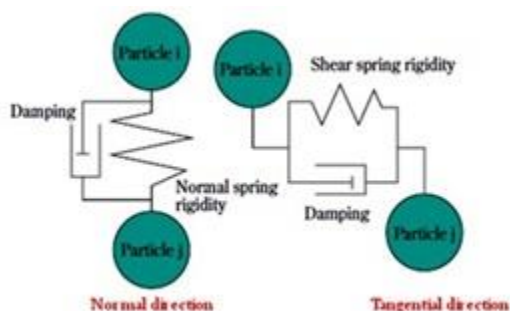
**واژگان کلیدی** - تونل، روش اجزاء مجزا، PFC<sup>2D</sup>، تحلیل استاتیکی، آبرفت درشت دانه

## ۱- مقدمه

محیط‌های پیوسته و ناپیوسته، روش‌های تحلیلی و عددی به سرعت توسعه یافت. در محیط‌های شهری، مهم‌ترین معضلی که به هنگام حفاری سازه‌های زیرزمینی با آن برخورد می‌شود نشست‌های به وجود آمده در سطح زمین و جابه‌جایی‌های اطراف ناحیه حفاری است. از آنجا که خاک، محیطی دانه‌ای و ناپیوسته است، برای مدل‌سازی رفتار واقعی آن و پیش‌بینی منطبق بر واقعیت تغییرشکل‌ها و تنش‌ها، نیاز به یک روش عددی کارا است. در سال‌های

سازه‌ها و تأسیسات زیرزمینی بخش زیربنایی شهرنشینی مدرن را تشکیل می‌دهند و برای گستره وسیعی از موارد کاربردی استفاده می‌شوند (مانند تونل‌های راه و مترو). تا دهه ۶۰ میلادی طراحی و اجرای فضاهای زیرزمینی بر مبنای اصول تجربی استوار بود و دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌هایی تنظیم شده بود. از دهه ۶۰ به بعد، با پیشرفت سریع تکنولوژی کامپیوتر و علوم مهندسی همچون مکانیک

داشت. الگوریتم محاسباتی این روش در شکل (۲) نشان داده شده است [۷].



شکل (۱) مدل مکانیکی ارائه شده به همراه فنرها و میراگرهای بین دو دیسک [۱]



شکل (۲) الگوریتم محاسباتی روش اجزاء مجزا (DEM) [۷]

### ۳- مدل سازی به وسیله PFC<sup>2D</sup>

نرم افزار PFC<sup>2D</sup> بر پایه روش اجزاء مجزا دو بعدی بوده، از این رو تمام فرضیه‌هایی که در این برنامه اعمال می‌شود همان فرضیه روش اجزاء مجزا است. برخلاف بیشتر برنامه‌های موجود که مستقیماً می‌توان پارامترهای خاک محل، مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته و ... را به عنوان داده‌های ورودی به آن‌ها داد، برنامه PFC<sup>2D</sup> هیچ یک از این پارامترها را به طور مستقیم نمی‌گیرد، بلکه باید از طریق کالیبراسیون و به کمک مدل کردن آزمایش سه محوری (که در آزمایشگاه بر روی خاک محل انجام شده و نتایج آن به دست آمده) با PFC<sup>2D</sup> و به دست آوردن منحنی تنش-کرنش به نتایج آزمایشگاهی دست یافته شود [۷]. گام‌های لازم برای مدل سازی و کالیبراسیون به ترتیب زیر است:

اخیر مدل‌سازی‌های زیادی بر اساس روش اجزاء مجزا، که محیط را به صورت ذرات مجزا در نظر می‌گیرد، صورت گرفته است تا بتوان رفتار خاک‌ها و سنگ‌ها را به طور دقیق مطالعه و ارزیابی کرد. مدل‌سازی‌های انجام شده با نتایج به دست آمده از موارد تجربی و آزمایشگاهی مقایسه شد و مشاهده شده که نتایج مطلوبی را در بر داشته است [۱، ۲، ۳، ۴، ۵]. هدف اصلی این پژوهش استفاده از روش اجزاء مجزا برای مدل سازی ماهیت ناپیوسته خاک به هنگام حفر تونل‌های شهری در آبرفت درشت‌دانه است که موضوعی جدید است. در این پژوهش، برای مدل سازی از نرم‌افزار PFC<sup>2D</sup> (Particle Flow Code) استفاده شده است.

### ۲- روش اجزاء مجزا (DEM)

برای اولین بار Goodman مسائل ناپیوستگی را در مدل‌های عددی با تصحیح مدل‌های پیوسته به منظور کاربرد آن‌ها در ژئوتکنیک مطرح کرد. ولی روش اجزاء مجزای تکامل یافته را برای نخستین بار Cundall و همکارانش در سال ۱۹۷۱ به عنوان یک روش محاسباتی برای تحلیل مسائل سنگ که در آن سنگ به عنوان یک مجموعه از بلوک‌های مجزا در نظر گرفته می‌شود تکامل بخشیدند [۶]. روش اجزاء مجزا (DEM)، به روشی که محیط را به صورت بلوک‌ها یا ذرات مجزا به همراه یک راه حل صریح (explicit) حوزه زمان (time domain) برای حل معادلات اصلی حرکت در نظر می‌گیرد گفته می‌شود. این روش ذرات خاک را به شکل دیسک‌های دایره‌ای یا بیضوی در نظر می‌گیرد. این ذرات فقط در نقاط تماس به واسطه فنرها و میراگرهای نرمال و برشی با یکدیگر اندرکنش دارند. نمونه‌ای از مدل یاد شده در شکل (۱) آورده شده است [۱].

در این روش از معیار گسیختگی برشی موهر-کولمب برای مدل‌سازی لغزش بین اجزا استفاده می‌شود و نیروهای مماسی هیچ گونه تأثیری روی نیروهای نرمال نخواهند

## ۳-۱ تولید ذرات در محیط

در ابتدا برای ساخت مدل احتیاج به تولید ذرات است. برای تولید ذرات کافی است که قطر کوچکترین و بزرگترین دیسک‌ها را به برنامه داده و به تعدادی دلخواه که بستگی به تخلخل مورد نیاز برای رسیدن به تنش‌های اولیه دارد، دیسک‌ها را در مدل قرار داد [۷] (در این حالت برنامه دیسک‌ها را به صورت تصادفی در نقاط مختلف قرار خواهد داد). معمولاً نسبت بین قطر کوچکترین و بزرگترین ذرات، یا با توجه به پژوهش‌های انجام شده قبلی و یا با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک محل (در این پژوهش آبرفت درشت‌دانه شامل شن و ماسه) در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌سازی انجام شده این نسبت ۳ در نظر گرفته شده است. برای اینکه بهترین آرایش دیسک‌ها را داشته باشیم تا بتوان به یک تخلخل قابل قبول رسید، باید مدل را به چند ناحیه تقسیم کرد و دیسک‌ها را در هر ناحیه به طور مجزا ریخت و سپس ابعاد کل دیسک‌ها را برای پوشاندن محیط، در یک ضریب خاص ضرب کرد. در این پژوهش، مدل ساخته شده در PFC<sup>2D</sup>، دارای عرض ۱۰۰ متر و ارتفاع ۶۰ متر است. ضمن اینکه شعاع کوچکترین دیسک ۰/۰۵ و شعاع بزرگترین دیسک ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شده که شعاع این دیسک‌ها در ضریب ۱/۴۷ ضرب شده است. تعداد دیسک‌ها ۶۹۹۸۲ عدد است.

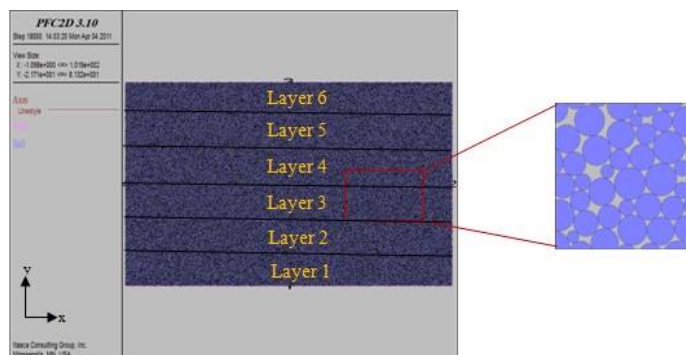
## ۳-۲ رسیدن به شرایط اولیه (تنش‌های برجا)

بعد از اینکه آرایش دیسک‌ها در مدل طبق آنچه گفته شد به دست آمد آنگاه باید شرایط اولیه مدنظر ارضاء شود. این شرایط اولیه عبارتند از رسیدن به تنش‌های برجا، صفر شدن نیروی نامتوازن و اینکه ذرات جابه‌جایی کلی خود را انجام داده باشند (در انتهای این مرحله و قبل از حفر تونل جابه‌جایی‌ها صفر می‌شوند).

در PFC<sup>2D</sup>، تنش‌های اولیه علاوه بر دانسیته به چندین پارامتر دیگر مانند تخلخل و ضرایب سختی فنر برخورد نیز بستگی دارند و تغییر در آن‌ها منجر به تغییر در تنش‌ها خواهد شد [۷]. بنابراین برای رسیدن به تنش‌های اولیه ابتدا به یک تخلخل مطلوب رسیده و از طریق کالیبراسیون، ضرایب سختی فنرهای نرمال و برشی ( $K_s$ ،  $K_{II}$ ) و ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) را به دست آورده و با ثابت نگه داشتن این پارامترها فقط دانسیته خاک تغییر داده می‌شود تا تنش‌ها به دست آید. در این پژوهش خاک را به ۶ لایه هر کدام به ارتفاع ۱۰ متر تقسیم می‌کنیم. ضمن اینکه در هنگام کالیبراسیون هر لایه را جدا کالیبره می‌کنیم. نمونه‌ای از مدل ساخته شده در انتهای سیکل محاسباتی اولیه (شرایط تنش برجا) در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

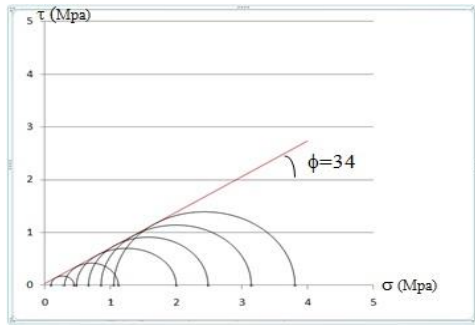
## ۳-۳ به دست آوردن پارامترها از طریق کالیبراسیون

ابتدا خاک محل را در آزمایشگاه تحت آزمایش سه محوری قرار داده و پارامترهای خاک محل به دست آورده می‌شود.

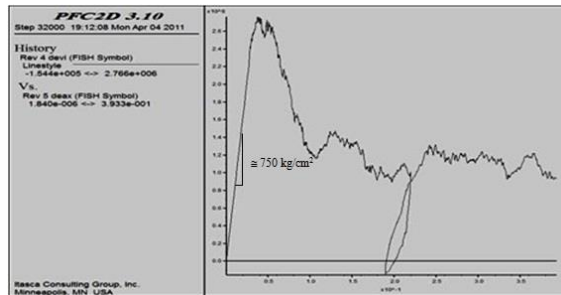


شکل (۳) مدل ساخته شده بعد از اعمال سیکل محاسباتی اولیه (شرایط تنش برجا)





شکل (۵) دایره موهر به دست آمده از مدل سازی آزمایش سه محوری و پوش گسیختگی



شکل (۶) منحنی تنش-کرنش لایه اول در عمق ۵۵ متری

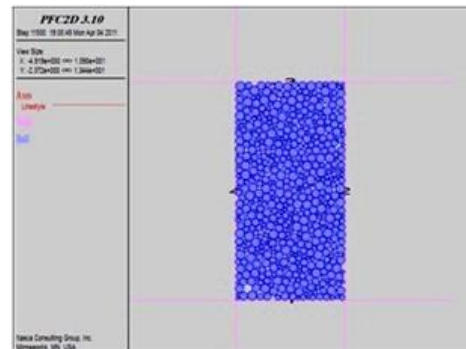
مدل‌های ساختاری برخورد شامل مدل‌های سختی تماسی (Slip Contact Stiffness Model)، مدل لغزش (Slip Model) و مدل اتصالی (Bonding Model) است [۷]. مدل سختی تماسی برای مدل‌سازی نیروهای برخورد در دو راستای نرمال و برشی بین ذرات و مدل لغزش برای محدود کردن نیروی برشی بین ذرات با ایجاد لغزش به کار می‌روند. مدل اتصالی که خود دو نوع مدل اتصالی برخورد (Contact Bond Model) و مدل اتصالی موازی (Parallel Bond Model) را در بر می‌گیرد امکان اتصال ذرات در برخورد را به وجود می‌آورد. مدل برخورد برای انتقال نیرو و مدل موازی برای انتقال نیرو و ممان قابل کاربرد است. در این پژوهش از مدل اتصالی برخورد برای مدل‌سازی رفتار آبرفت درشت دانه سیمانته تهران استفاده شده است. رفتار ساختاری در برخورد بین ذره با مدل اتصالی برخورد در شکل (۷) نشان داده شده است.

در این پژوهش، آبرفت درشت دانه سیمانته تهران در نظر گرفته شده است. پارامترهای مکانیکی متوسط آبرفت درشت دانه تهران در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) پارامترهای مکانیکی متوسط آبرفت درشت دانه تهران [۸]

$\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$E$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\nu$	$C$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\phi$ Degree
19	20	750	0.35	0.3	34

سپس مدلی با دانه‌بندی و تخلخل مشخص و با همان دانسیته‌ای که در گام قبل به دست آمده است، برای مدل‌سازی آزمایش سه محوری، در ابعاد کوچک‌تر برای هر لایه ساخته می‌شود. ابعاد نمونه ۵ متر (قطر) در ۱۰ متر (ارتفاع) است. نمونه‌ای از مدل اولیه ساخته شده برای یک لایه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴) مدل ساخته شده اولیه برای آزمایش سه محوری

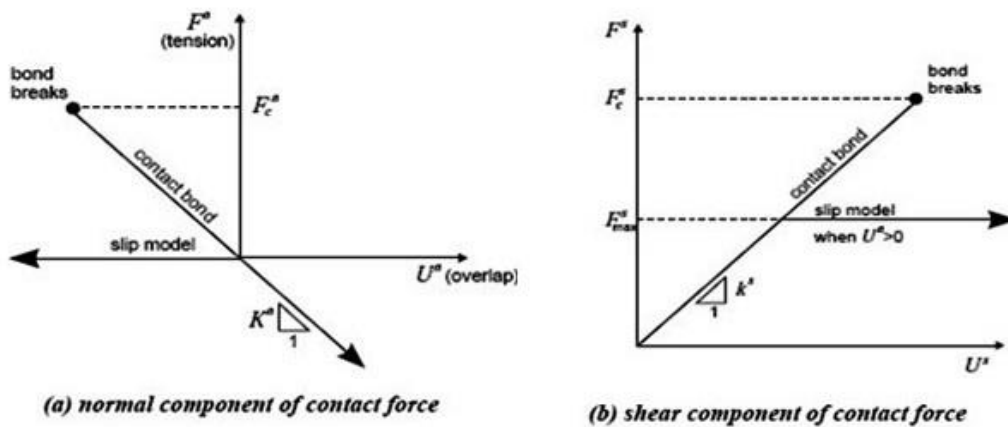
برای هر لایه، منحنی تنش-کرنش با مدل‌سازی آزمایش سه محوری به دست آمده و با رسم دایره موهر برای هر لایه پوش گسیختگی رسم می‌شود (شکل ۵) تا به پوش گسیختگی آزمایشگاه رسیده شود.

به عنوان نمونه، منحنی تنش-کرنش لایه اول برای عمق متوسط ۵۵ متری در شکل (۶) ملاحظه می‌شود. مقدار مدول الاستیسیته مدل، همان شیب منحنی تنش-کرنش در ناحیه الاستیک است؛ پارامترهای به دست آمده از کالیبراسیون در جدول (۲) آورده شده است.

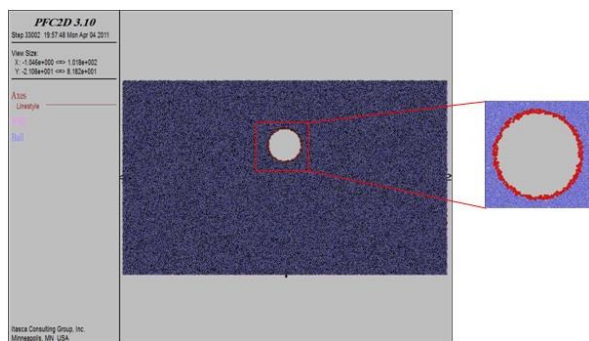


جدول (۲) پارامترهای بدست آمده برای هر لایه از کالیبراسیون

	$k_n$ (N/m)	$k_s$ (N/m)	$n$ -bond (N/m)	$s$ -bond (N/m)	$\mu$	Porosity	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Layer 1	2e8	1e8	0.45e6	0.45e6	0.1	0.14	2650
Layer 2	2e8	1e8	0.42e6	0.39e6	0.1	0.14	2500
Layer 3	2e8	1e8	0.28e6	0.27e6	0.1	0.14	2450
Layer 4	2e8	1e8	0.24e6	0.22e6	0.1	0.14	2400
Layer 5	2e8	1e8	0.14e6	0.14e6	0.1	0.15	2400
Layer 6	2e8	1e8	0.04e6	0.04e6	0.1	0.15	2300



شکل (۷) رفتار ساختاری در برخورد بین دو ذره با مدل اتصالی برخورد [۷]



شکل (۸) مدل سازی تونل حفاری شده به همراه نصب پوشش

جدول (۳) پارامترهای پوشش به ضخامت ۵۰ سانتی متر در مدل سازی

PFC <sup>2D</sup>					
$k_n$ (N/m)	$k_s$ (N/m)	$n$ -bond (N/m)	$s$ -bond (N/m)	$\mu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
2e10	2e10	1e15	1e15	0.1	2400

### ۳-۴ مدل سازی تونل

در این پژوهش برای مدل سازی تونل حفر شده، از اثر سربار سازه های سطحی در مقایسه با سربار تونل چشم پوشی و فرض شده که سطح آب زیرزمینی در کف مدل است، ضمناً ضخامت پوشش (Lining) ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته می شود. همان گونه که در شکل (۸) ملاحظه می شود برای ایجاد پوشش از همان دیسک هایی که در مدل وجود دارد استفاده می شود. در انتخاب پارامترهای پوشش از نمونه های دستور العمل PFC<sup>2D</sup> استفاده شده است [۷]. پارامترهای پوشش برای مدل سازی در PFC<sup>2D</sup> در جدول (۳) ارائه شده است.

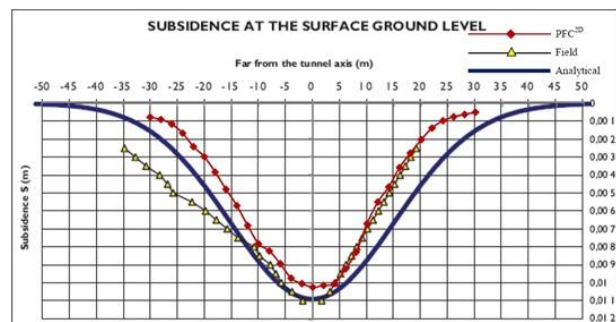
## ۴- صحت سنجی نتایج

به منظور صحت سنجی (Verification) مدل عددی با نتایج تحلیلی و صحرایی، مدل‌سازی تونل متروی پورتو پرتغال انجام گرفته است. تونل مورد نظر به قطر نهایی ۸/۵ متر، دارای ضخامت پوشش ۳۰ سانتی‌متر است. عمق حفاری از سطح زمین ۱۹ متر است. پارامترهای مکانیکی خاک آبرفتی محدوده تونل در جدول (۴) ارائه شده است [۹].

جدول (۴) پارامترهای مکانیکی آبرفت پورتو پرتغال [۹]

$\gamma_{unsat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$E$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\nu$	$C$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\phi$ Degree
18.7	20	700	0.3	0.45	29

پس از مدل‌سازی اولیه برای رسیدن به شرایط تنش برجا و سازی تونل انجام گرفته است. مقایسه نتایج عددی روش اجزاء مجزا با داده‌های ابزار دقیق و حل تحلیلی [۹]، در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هماهنگی بسیار خوبی بین نتایج برقرار است. بیشینه نشست سطح زمین به دست آمده از روش اجزاء مجزا ۱۰/۲ میلی‌متر و اندازه‌گیری شده به وسیله ابزار سنجی ۱۰/۹ میلی‌متر است.



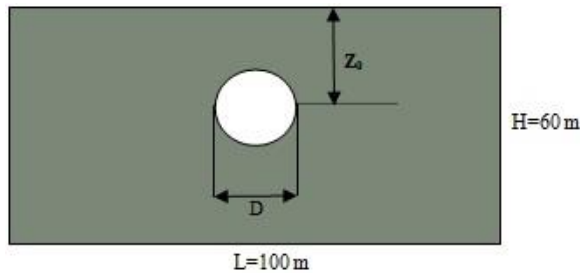
شکل (۹) مقایسه پروفیل نشست سطح زمین بین نتایج عددی (DEM) با داده‌های صحرایی و حل تحلیلی

جدول (۵) قطرها و عمق‌های مختلف تحلیل

	$D(m)$	$Z_0(m)$
تأثیر قطر	6,8,10,12,14	20
تأثیر عمق	10	10,15,20,25,30

## ۵- نتایج تحلیل

در این پژوهش اثر عمق و قطر تونل در تونل‌های دایره‌ای (مطابق شکل ۱۰ و جدول ۵) روی جابه‌جایی‌های سطح زمین و اطراف ناحیه حفاری به روش اجزاء مجزا تحلیل و بررسی شده است. در مدل‌سازی تونل‌های دایره‌ای فرض بر این است که پوشش تونل بلافاصله بعد از حفاری و بدون سیستم نگه‌داری اولیه و در تماس مستقیم با خاک نصب می‌شود. به عبارت دیگر درصد آزادسازی تنش برجا (Relaxation Factor) قبل از نصب پوشش صفر بوده و بنابراین درصد تنش برجای اعمالی به پوشش ۱۰۰ درصد است. خاطر نشان می‌شود برای مقایسه DEM با FEM، از نرم افزار PLAXIS<sup>2D</sup> بهره گرفته شده است.



شکل (۱۰) موقعیت و ابعاد تونل در محیط

### ۵-۱ اثر قطر مقطع حفاری تونل‌های دایره‌ای

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) پروفیل نشست سطح زمین برای قطرهای مختلف حفاری، به دست آمده از روش اجزاء مجزا و روش اجزاء محدود را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برخلاف روش اجزاء محدود که نشست‌ها به شکل کاملاً متقارن است، در روش اجزاء مجزا نشست‌های تا حدی نامتقارن دیده می‌شود. این موضوع به دلیل تغییرات نیروها و تنش‌ها از دیسکی به دیسک دیگر حین مدل‌سازی است. البته بیشتر نشست‌های متقارن در حین حفاری در سطح زمین در واقعیت نیز وجود نخواهد داشت. همچنین در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود هر چه قطر حفاری

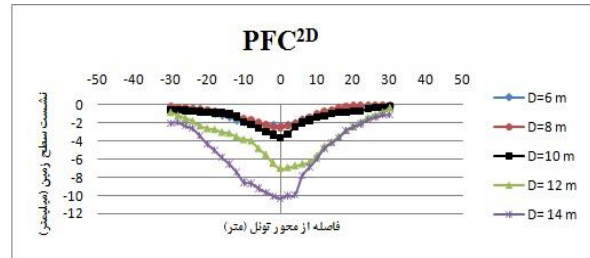


حالی که از قطر ۱۰ متر به بعد نرخ افزایش نشست بیشتر می‌شود. به همین دلیل معمولاً قطر تونل‌های مترو عموماً کمتر از ۱۰ متر است. جابه‌جایی‌های اطراف ناحیه حفاری به دست آمده برای قطرهای مختلف حفاری (برای هر دو روش عددی) در جدول (۶) ارائه شده است. تغییرات جابه‌جایی قائم تاج و کف تونل با افزایش قطر در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) آورده شده است. طبق منحنی جابه‌جایی‌های تاج تونل و کف تونل با افزایش قطر، افزایش پیدا می‌کند. این افزایش باعث کاهش جابه‌جایی‌ها در جداره‌های تونل خواهد شد (جدول ۶).

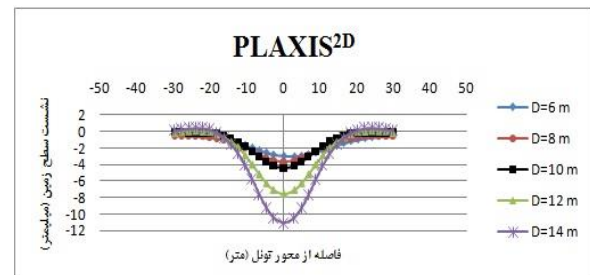
## ۵-۲ اثر عمق قرارگیری تونل‌های دایره‌ای

شکل‌های (۱۶) و (۱۷) پروفیل نشست سطح زمین برای عمق‌های مختلف حفاری را نشان می‌دهند. همان گونه که دیده می‌شود با افزایش عمق، میزان جابه‌جایی‌های سطح زمین کاهش پیدا می‌کند. در اعماق سطحی (۱۰ متر و ۱۵ متر) میزان نشست‌های به دست آمده از روش اجزاء مجزا بیشتر از روش اجزاء محدود است. این پدیده به این علت است که در اعماق سطحی، قسمتی از حفاری، در لایه فوقانی مدلسازی روش اجزاء مجزا قرار دارد و چون این لایه با توجه به کالیبراسیون دارای مقاومت اتصالی ضعیفی است، نشست‌ها بیشتر می‌شود که حتی منجر به ریزش محدوده حفاری زمانی که هنوز پوشش تونل نصب نشده است، می‌شود (شکل ۱۸). بر اساس پژوهش‌های انجام شده اگر سربار روی تونل کمتر از ۱/۵ برابر قطر تونل باشد در این صورت مشکل نشست جدی سطح به وجود خواهد آمد [۹]. بنابراین DEM، برای اعماق سطحی نشست‌های بیشتر و برای اعماق بیشتر، نشست‌های کمتری را باعث می‌شود که ناشی از تقید حرکت ذرات در اعماق زیاد به دلیل وجود سربار است. این موضوع در شکل (۱۹) نیز نشان داده شده است.

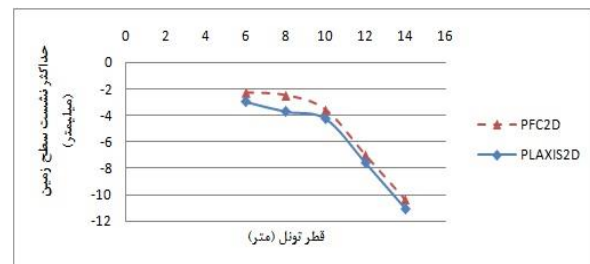
بیشتر می‌شود نشست‌ها نامتقارن‌تر (به دلیل افزایش آشفستگی) و محدوده تأثیر نشست سطح زمین نیز بیشتر می‌شود.



شکل (۱۱) پروفیل نشست سطح زمین برای قطرهای حفاری مختلف به دست آمده از PFC<sup>2D</sup>



شکل (۱۲) پروفیل نشست سطح زمین برای قطرهای حفاری مختلف به دست آمده از PLAXIS<sup>2D</sup>



شکل (۱۳) تغییرات نشست بیشینه سطح زمین نسبت به افزایش قطر

در شکل (۱۳) تغییرات نشست بیشینه سطح زمین نسبت به افزایش قطر نشان داده شده است. با افزایش قطر، مقدار بیشینه نشست برای هر دو روش اجزاء محدود و اجزاء مجزا افزایش پیدا می‌کند (بیشینه نشست‌ها در DEM کمتر از FEM است). با توجه به شیب دو منحنی، تا قطر ۱۰ متر نرخ افزایش کمی را در نشست بیشینه شاهد هستیم، در

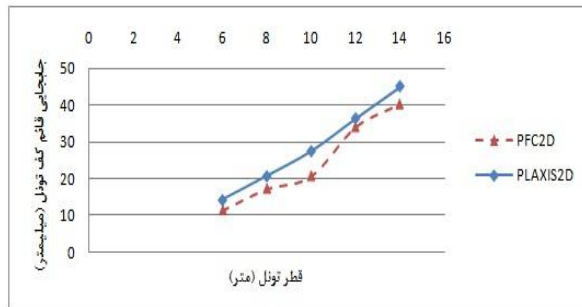


جدول (۶) جابه‌جایی های اطراف ناحیه حفاری با قطرهای مختلف

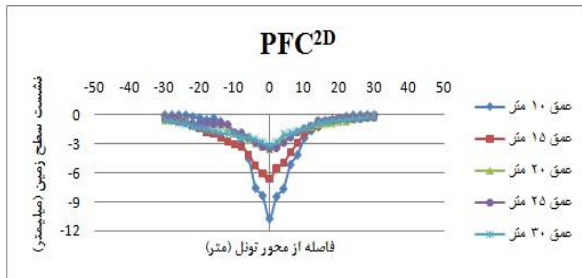
D	PFC2D				PLAXIS2D			
	جابجایی قائم تاج تونل	جابجایی افقی دیواره تونل (سمت راست)	جابجایی افقی دیواره تونل (سمت چپ)	جابجایی قائم کف تونل	جابجایی قائم تاج تونل	جابجایی افقی دیواره تونل (سمت راست)	جابجایی افقی دیواره تونل (سمت چپ)	جابجایی قائم کف تونل
	A	B	C	D	A	B	C	D
	میلیمتر				میلیمتر			
D=6 m	-۱۰/۱	-۱۰	۸/۷	۱۱/۳	-۱۰/۴	-۸/۸	۸/۸	۱۴/۲
D=8 m	-۱۱/۳	-۹/۴	۷/۴	۱۷/۲	-۱۲/۴	-۷/۶	۷/۶	۲۰/۷
D=10 m	-۱۲/۱	-۲/۴	۵/۱	۲۰/۷	-۱۳/۶	-۴/۷	۴/۷	۲۷/۵
D=12 m	-۱۶/۳	-۲/۲	۳/۵	۲۴	-۱۷/۵	-۳/۴	۳/۴	۳۶/۴
D=14 m	-۲۱/۹	-۱/۹	۲	۴۰/۲	-۲۱/۴	-۲/۱	۲/۱	۴۵/۱

\* علامت مثبت: جابجایی به سمت بالا یا به سمت راست

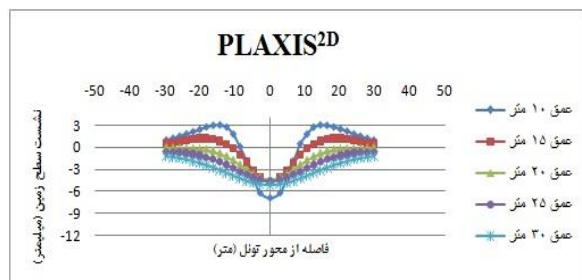
\* علامت منفی: جابجایی به سمت پایین یا به سمت چپ



شکل (۱۵) تغییرات جابه‌جایی قائم کف تونل نسبت به افزایش قطر

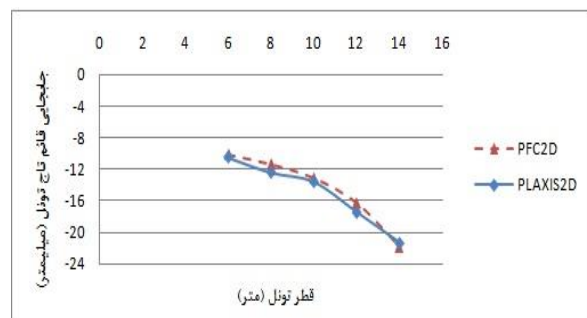


شکل (۱۶) پروفیل نشست سطح زمین برای عمق‌های حفاری مختلف به دست آمده از PFC<sup>2D</sup>

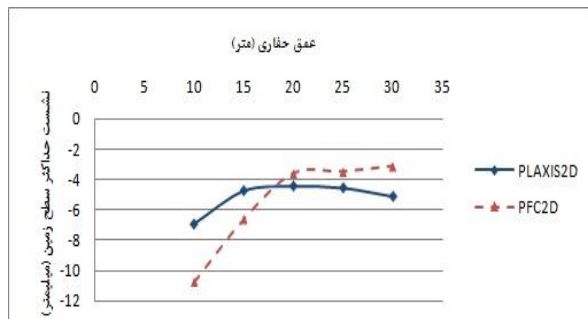


شکل (۱۷) پروفیل نشست سطح زمین برای عمق‌های حفاری مختلف به دست آمده از PLAXIS<sup>2D</sup>

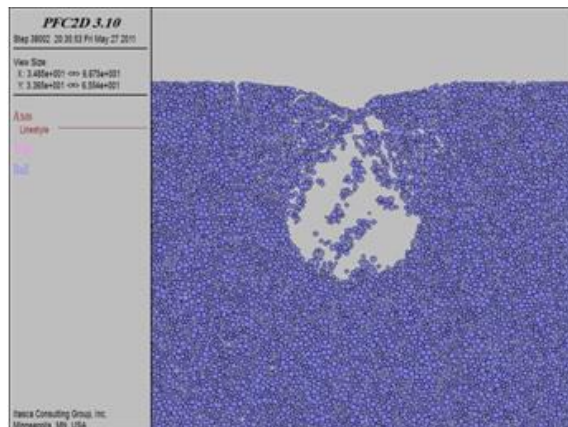
در شکل (۱۹) تغییرات نشست بیشینه سطح زمین نسبت به افزایش عمق نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حساسیت FEM نسبت به عمق بسیار کمتر از DEM است که این موضوع مبین آن است که DEM بهتر می‌تواند اثر سربار را در تحلیل‌ها (نشست‌های سطح زمین) لحاظ نماید. جابه‌جایی‌های اطراف ناحیه حفاری به دست آمده برای عمق‌های مختلف حفاری (برای هر دو روش عددی) در جدول (۷) ارائه شده است. با مقایسه نتایج جدول‌های (۶) و (۷) مشخص می‌شود با افزایش قطر، میزان جابه‌جایی‌های کف تونل و تاج تونل به نسبت بیشتر از زمانی است که عمق یا سربار افزایش یابد. بنابراین افزایش قطر منجر به جابه‌جایی‌های بحرانی‌تر در اطراف ناحیه حفاری می‌شود.



شکل (۱۴) تغییرات جابه‌جایی قائم تاج تونل نسبت به افزایش قطر



شکل (۱۹) تغییرات نشست بیشینه سطح زمین نسبت به افزایش عمق حفاری



شکل (۱۸) ریزش ناحیه حفاری در عمق ۱۰ متری قبل از نصب پوشش

جدول (۷) جابه‌جایی‌های اطراف ناحیه حفاری در اعماق مختلف

A C D D=10 m	PFC2D				PLAXIS2D			
	جابه‌جایی قائم	جابه‌جایی افقی دیواره تونل (سمت راست)	جابه‌جایی افقی دیواره تونل (سمت چپ)	جابه‌جایی قائم کف تونل	جابه‌جایی قائم	جابه‌جایی افقی دیواره تونل (سمت راست)	جابه‌جایی افقی دیواره تونل (سمت چپ)	جابه‌جایی قائم کف تونل
	A	B	C	D	A	B	C	D
	میلیمتر				میلیمتر			
Z <sub>0</sub> =10 m	-۱۲/۱	-۱۰/۸	۹/۵	۲۳/۵	-۹/۸	-۸/۴	۸/۴	۲۴/۶
Z <sub>0</sub> =15 m	-۱۲/۳	-۸/۳	۶/۸	۲۶/۳	-۱۱/۱	-۶/۵	۶/۵	۲۶/۳
Z <sub>0</sub> =20 m	-۱۳/۱	-۳/۴	۵/۱	۲۰/۷	-۱۳/۶	-۴/۷	۴/۷	۲۷/۵
Z <sub>0</sub> =25 m	-۱۵/۹	-۲/۹	۲/۵	۲۷/۳	-۱۶/۲	-۲/۸	۲/۸	۲۸/۶
Z <sub>0</sub> =30 m	-۱۸/۳	-۱/۸	۲	۳۱	-۱۹/۱	-۱/۲	۱/۲	۲۸/۴

\* علامت مثبت: جابه‌جایی به سمت بالا یا سمت راست

\* علامت منفی: جابه‌جایی به سمت پایین یا سمت چپ

## ۶- نتیجه‌گیری

نتایج اصلی این پژوهش عبارتند از:

- ناحیه تأثیر نشست سطح زمین، با افزایش قطر افزایش پیدا می‌کند. با این تفاوت که برخلاف نتایج به دست آمده از روش اجزاء محدود، این نشست‌ها در روش اجزاء مجزا نامتقارن است.
- نتایج DEM نسبت به FEM، به خصوص در اعماق سطحی از دقت بیشتری برخوردار است.
- با افزایش عمق تونل، نشست بیشینه سطح زمین کاهش یافته و از عمقی به بعد تقریباً ثابت می‌شود. مقدار

این نشست‌ها در اعماق سطحی (۱۰ و ۱۵ متر) برای DEM زیادتر از نتایج به دست آمده از FEM است در حالی که در اعماق پایین‌تر نتایج به دست آمده از FEM بیشتر است. این موضوع ناشی از ضعیف بودن مقاومت لایه فوقانی و کم بودن سربار در اعماق سطحی و همچنین تقید حرکت ذرات در در اعماق زیاد به دلیل وجود سربار است. (۴) حساسیت بیشینه نشست سطح زمین به دست آمده از FEM نسبت به تغییرات عمق بسیار کمتر از DEM است که این موضوع مبین آن است که DEM بهتر می‌تواند اثر سربار را در تحلیل‌ها لحاظ کند.

4. Donze, F.V., Richefeu, V., and Magnier, S.A., "Advances in Discrete Element Method Applied to Soil, Rock and Concrete Mechanics," EJGE, Bouquet 08, 2008.
5. Teufelsbauer, H., Hübl, J., and Wei Wu., "A Revision of the Linear-Dashpot Model Applied in PFC," Contemporary Engineering Sciences, Vol. 2, no. 4, 165–178, 2009.
6. Cundall, P.A. "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems," Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics (Nancy, France, 1971), Vol. 1, Paper No. II-8, 1971.
7. Itasca Consulting Group, Inc. PFC<sup>2D</sup> (Particle Flow Code in 2 Dimensions), Version 3.
8. "Geological and Geotechnical Report of Sadr-Nyayesh Tunnel," Pazhouhesh Omran Rahvar, 1389.
9. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., and Xu, S., "Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control," Geodata S.P.A., Turin, Italy, 2007.
10. Kolymbas, D., "Tunelling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunnelling," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.

(۵) با مقایسه بین جابه‌جایی‌های به دست آمده در مرز حفاری، مشخص می‌شود که افزایش قطر به نسبت افزایش عمق، موجب جابه‌جایی‌های بیشتر و بحرانی‌تری می‌شود.

## قدردانی

بدین وسیله از آقایان دکتر احمد علی فخیمی، مهندس وهاب سرفرازی و مهندس سینا مجیدیان برای نظرات ارزنده ایشان قدردانی می‌شود.

## مراجع:

1. Kanou, S., Amano, M., Terasaka, Y., Matsumoto, N. and Wada, T., "Terra-Mechanical Simulation Using Distinct Element Method," KOMAT'SO technical report, pp. 13~14, 2003.
2. Fakhimi, A., Carvalho, T., and Labuz, J.F., "Simulation of Failure around a Circular Opening in Rock," International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39, 507-515, 2002.
3. Dae-Sung, C., Chan, P., Jeon, S., and Young-Sik, J., "Simulation of failure around a circular tunnel using a bonded particle model," Underground Space, the 4th Dimension of Metropolises – Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds), 2007.

