



نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل

"فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار"

۱۰ تا ۱۲ آبان ماه ۱۳۹۰

ATS11-03514

مقایسه حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل با ماشین حفاری EPB به وسیله

روش‌های تحلیلی - تجربی و عددی

(مطالعه موردی: خط هفت متروی تهران (قطعه شمالی - جنوبی))

مرتضی کاظمی<sup>۱</sup>، علی اصغر لطفی آزاد<sup>۲</sup>، محمد رضا بیطرفان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ (morteza\_kch@yahoo.com)

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ (a.loftiazad@gmail.com)

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد معدن، شرکت مهندسی سپاسد؛ (zare@ntnu.no)

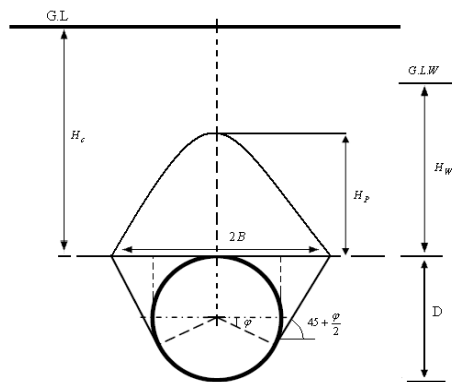
#### چکیده

برآورد فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل یکی از مهم‌ترین عوامل در راندمان حفاری ماشین EPB در نواحی شهری است. چرا که اعمال فشار کمتر و یا بیشتر از حد تعادلی به سینه کار به ترتیب باعث فرونشست و بالازدگی در سینه کار و سطح زمین می‌شود. در نتیجه باعث توقف در حفاری، نشست سطح زمین و آسیب بر ساختمان‌های اطراف تونل می‌شود. فشار لازم برای پایداری سینه کار تونل به کمک خاک موجود در اتاقک حفاری و مواد افزودنی با کنترل سرعت گردش نقاله مارپیچی صورت می‌گیرد. فشار مناسب برای نگهداری سینه کار با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک، ارتفاع روباره، سطح آب زیرزمینی، پارامترهای هندسی تونل و بارهای ترافیکی و سازه‌ای به کمک روش‌های تحلیلی و عددی برآورد می‌شود. در این مقاله به عنوان یک مطالعه موردی، فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در خط هفت متروی تهران با روش‌های تحلیلی و عددی محاسبه و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش عددی با روش‌های تحلیلی بروبر و جانسکز تطابق خوبی دارد.

#### کلمات کلیدی

نشست، بالازدگی، روش‌های تحلیلی - تجربی، روش‌های عددی، EPB.

<sup>۱</sup> مرتضی کاظمی؛ شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، خوابگاه ۱، همراه: ۰۹۱۱۳۴۱۷۹۴۰، پست الکترونیکی: morteza\_kch@yahoo.com



شکل (۱): خاک قوسی بالای تونل [4].

فشار عمودی روی تونل در حالت کلی از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left( 1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) + q_0 \left( e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) \quad (1)$$

طول سست‌شدگی در این رابطه از رابطه (۲) بدست می‌آید، که در رابطه (۲) شعاع تونل است.

$$B_1 = R \left[ \tan(45 - \varphi/2) + (\cos(45 - \varphi/2))^{-1} \right] \quad (2)$$

در این رابطه  $c$  چسبندگی خاک،  $K_0$  ضریب فشار جانبی خاک که از رابطه  $K_0 = 1 - \sin \varphi$  جکی بدست آمده،  $H_c$  ارتفاع روباره،  $D$  ارتفاع تونل،  $B_0$  نصف عرض یا قطر تونل،  $B_1$  نصف طول سست‌شدگی  $H_p$  ارتفاع قوسی،  $H_w$  ارتفاع آب،  $q_0$  بار سطحی،  $\gamma$  وزن مخصوص خاک،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $\sigma_v$  فشار عمودی متوسط روی تاج تونل می‌باشد. ارتفاع سست‌شدگی از تقسیم تنش قائم روی تونل بر وزن مخصوص خاک طبق رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$H_p = \sigma_v / \gamma_d \quad (3)$$

فشار جانبی خاک جلوی ماشین حفاری در مرکز تونل در حالتی که تونل بالای سطح آب زیرزمینی حفاری شده از روابط (۴) و (۵) بدست می‌آید. در این رابطه  $K_a$  ضریب فشار جانبی خاک در حالت فعال است.

$$\sigma_T = K_a * \gamma_d * (H_p + R) \quad (4)$$

$$K_a = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi) \quad (5)$$

در حالتی که تونل زیر سطح آب زیرزمینی حفاری شود، ناحیه بالای تونل را به دو بخش خشک و آبدار تقسیم کرده، فشار ناحیه خشک را بدست آورده و به عنوان یک بار ثابت روی قسمت آبدار اعمال می‌کنند. از تقسیم فشار قائم بر وزن مخصوص غوطه‌ور خاک، ارتفاع سست‌شدگی بدست می‌آید. از مجموع فشار آب و فشار خاک، فشار کل بدست می‌آید [8].

ماشین فشار تعادلی در ۱۵ سال اخیر برای حفاری فضاهای زیرزمینی در نواحی شهری توسعه داده شده است. دامنه کاربرد ماشین سپر فشار تعادلی با افزایش مواد افزودنی در خاک چسبنده تا خاک‌های دانه‌ای با چسبندگی کم و در زمین‌های غیر همگن دارای سنگ و خاک می‌باشد. تکنولوژی ماشین EPB اساساً مبنی بر استفاده از خاک حفاری شده موجود در اتاقک حفاری برای نگهداری سینه‌کار است. فشار نگهداری سینه‌کار به کمک فشار اعمالی بر خاک حفاری موجود در اتاقک حفاری فراهم می‌شود. تنظیم این فشار با سرعت گردش نقاله ماریچی متناسب است (Guglielmetti Et Al, 2007). در این مقاله این فشار به کمک روش‌های تحلیلی-تجربی و عددی قابل برآورد می‌شود.

## ۲- روش‌های تحلیلی و تجربی

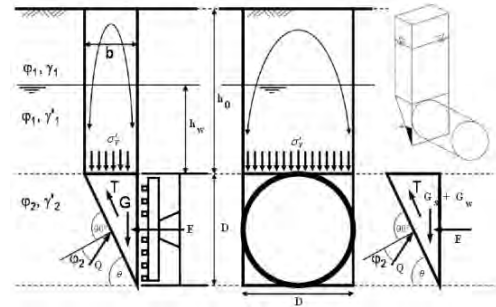
یکی از روش‌های بررسی پایداری ساختار خاک استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی است. به کمک این روش‌ها می‌توان حدود ناپایداری را در ساختار خاک تعیین کرد. روش‌های محاسبه فشار با توجه به شرایط خاک به روش تجربی ترزاقی (خاک چسبنده و غیر چسبنده) و روش‌های تحلیلی آنالیز حدی و تعادل حدی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های آنالیز حدی شامل روش برومز و بنمارک (خاک چسبنده و زهکشی نشده)، روش اتکینسون و پاتز (خاک غیر چسبنده برای تونل بدون پوشش)، روش دیویس (خاک چسبنده) و روش لکا و دورمیو (خاک غیر چسبنده) می‌باشند. روش‌های تعادل حدی شامل روش میوریما (خاک چسبنده و غیر چسبنده)، روش کروس (خاک چسبنده و غیر چسبنده)، روش محکم (خاک چسبنده و غیر چسبنده)، روش جانسکز و استاینر (خاک غیر چسبنده و کمی چسبنده)، روش کواری و آنگونستا (خاک غیر چسبنده) و روش برویر (خاک غیر چسبنده) می‌باشند. در این مقاله تنها به تشریح روش‌های ترزاقی، جانسکز و برویر با توجه به شرایط خاک خط هفت متروی تهران و کاربردی بودن این روش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- روش تجربی ترزاقی

تئوری ترزاقی برای محاسبه بار روی تونل در خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده ارائه شده است. طبق این روش اگر قسمتی از توده خاک در بالای فضای تونل در حین حفاری به حد تسلیم برسد، خاک ناحیه بالای تونل دچار ریزش شده و در نتیجه توده‌های خاک مجاور نیز تحت تأثیر ناحیه سست‌شدگی از وضعیت ساکن خود خارج می‌شوند. در نواحی کم عمق سست‌شدگی به سطح زمین رسیده که اصطلاحاً حالت بدون قوس را تشکیل می‌دهد. در نواحی عمیق، قوسی مطابق شکل (۱) در بالای تونل تشکیل می‌شود. در این حالت توده خاک، بالای قسمت قوسی و بار ثابت روی سطح زمین به عنوان یک بار ثابت روی قسمت قوسی اعمال می‌شود [7].

## ۲-۲- روش تحلیل سیلو و گوه

این روش بر طبق مدل هورن (۱۹۶۱) به صورت یک شکست سه بعدی که شامل گوه گسیختگی در قسمت پایین و سیلوی خاک در قسمت بالا است و مطابق شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): نمایی از چگونگی توزیع بار روی سینه کار تونل در روش جانسکز و استاینر [4].

$$T = \frac{D^2 \cdot \cot \theta}{2} (c + K_{A3} \cdot \bar{\sigma}'_v \cdot \tan \varphi) \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma'_v + \frac{1}{3} D \cdot \gamma' \quad (12)$$

$$E = - \frac{(\cos \theta \cdot \tan \varphi - \sin \theta) \cdot \Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta \cdot \tan \varphi + \cos \theta} \quad (13)$$

مقدار ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک را می‌توان از روابط (۱۶) تا (۱۸) به دست آورد، همچنین زاویه شکست نیز بایستی به گونه‌ای تعیین می‌شود، که فشار خاک حداکثر گردد. زاویه شکست از شکل (۳) به دست می‌آید. در جدول (۱) مقادیر دیگری برای ضریب فشار جانبی خاک در سیلو و گوه تعریف شده است. اثر روباره بر روی زاویه شکست گوه برای روباره‌های بزرگتر و مساوی ۲ برابر قطر تونل شکست گوه کم می‌شود [4]. روش سیلو ترازقی فقط برای روباره‌های بزرگتر از ۲ برابر قطر تونل ( $h_0 > 2D$ ) قابل کاربرد است در غیر اینصورت از روش روباره ( $\sigma_v = \gamma \times h$ ) استفاده می‌شود [8].

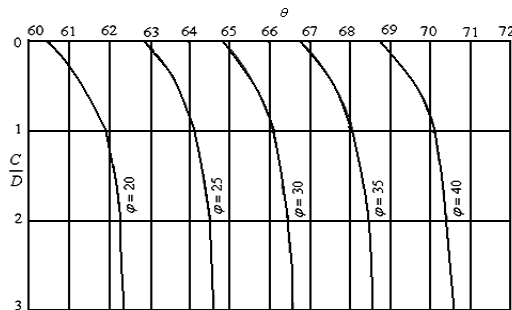
$$S = E + W \quad (14)$$

$$\sigma_T = \frac{4 \cdot S}{\pi \cdot D^2} \quad (15)$$

$$K_{A3} = \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta - \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi - \frac{K \cdot \alpha}{1.5} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\cos \theta \cdot \sin \theta + \tan \varphi \cdot \sin^2 \theta} \quad (16)$$

$$K \approx 1 - \sin \varphi + \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (17)$$

$$\alpha = (1 + 3C/D) / (1 + 2C/D) \quad (18)$$



شکل (۳): نمودار زاویه شکست گوه [4].

در این روابط،  $G_s$  وزن سیلو،  $B$  عرض گوه برابر ( $B = \pi D / 4$ ) که در محاسبات برابر قطر تونل در نظر گرفته می‌شود،  $D$  قطر تونل،  $\theta$  زاویه شکست،  $G_w$  وزن گوه،  $K$  نیروی چسبندگی،  $K_{A3}$  ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک،  $T$  نیروی برشی خاک،  $E$  نیروی مؤثر جانبی خاک،  $W$  نیروی آب،  $S$  نیروی کل وارد روی سینه کار تونل و  $\sigma_T$  تنش کل است.

فشار عمودی وارد از سیلو بر روی گوه بر طبق رابطه ترازقی در دو حالت بدون آب از رابطه کلی (۶) و در حالتی که دارای آب زیرزمینی است، از رابطه کلی (۷) به دست می‌آید. که در این روابط  $\gamma_d$  وزن مخصوص خشک خاک،  $\gamma'$  وزن مخصوص غوطه‌ور خاک و  $K_0$  ضریب فشار جانبی خاک است که از رابطه  $K_0 = 1 - \sin \varphi$  به دست می‌آید.

$$\sigma'_v = \frac{a \cdot \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] + q_0 \cdot e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \quad (6)$$

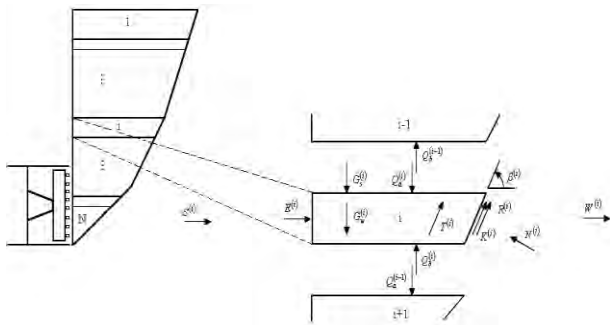
$$\sigma'_v = \frac{a \gamma' - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] + \frac{a \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left( 1 - e^{-\frac{h_0 - h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right) e^{-\frac{h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} + \left( q_0 e^{-\frac{h_0 - h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right) e^{-\frac{h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \quad (7)$$

در این روابط  $c$  چسبندگی خاک،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $h_0$  روباره خاک،  $h_w$  ارتفاع آب زیرزمینی،  $\alpha$  طول سست‌شدگی،  $q_0$  بار سطحی و  $\sigma'_v$  فشار قائم مؤثر در قسمت خشک و آبدار وارده بر گوه است. برای محاسبه فشار جانبی مؤثر خاک لازم است که وزن سیلو، وزن گوه، نیروی چسبندگی و نیروی برشی را از روابط (۸) تا (۱۲) به دست آورده و مقدار حاصله را در رابطه (۱۳) جاگذاری کرده تا نیروی مؤثر جانبی خاک به دست می‌آید. مقدار فشار مؤثر جانبی خاک از نیروی مؤثر جانبی خاک به دست می‌آید و با افزودن آن به فشار آب، فشار کل وارده بر سینه کار به دست می‌آید.

$$G_s = B \cdot D \cdot \cot \theta \cdot \sigma'_v \quad (8)$$

$$G_w = \frac{B \cdot D^2 \cdot \gamma' \cdot \cot \theta}{2} \quad (9)$$

$$K = \frac{B \cdot D \cdot c}{\sin \theta} \quad (10)$$



شکل (۴): مدل چند گوه‌ای [2].

این قطعه‌ها هر کدام ممکن است ضخامت متفاوتی داشته باشند. به هر حال، هر کدام از قطعه‌ها همگن فرض می‌شوند و با توجه به این شرایط زاویه گوه  $\theta_i$  بین قطعه  $i$  صفحه گسیختگی و صفحه افقی تعریف می‌شود. زاویه شکست هر گوه با سعی و خطا به اندازه ای در نظر گرفته می‌شود که بیشترین نیروی خاک در حالت شکست به دست آید. هر قطعه در نتیجه نیروهایی از قطعه بالا ( $i-1$ ) و قطعه پایین ( $i+1$ ) یعنی به ترتیب  $Q_a^{(i)}$  و  $Q_b^{(i)}$ ، وزن مؤثر گوه  $G_w^{(i)}$  و نیروی روباره  $G_s^{(i)}$  را تحمل می‌نماید. در صفحات شکست مایل، نیروی چسبندگی  $k^{(i)}$  موازی با سطح و نیروی اصطکاک  $R^{(i)}$  که ناشی از نیروی عمودی  $N^{(i)}$  بر سطح شکست عمل می‌کنند. فرض می‌شود بر سطوح جانبی هر گوه نیروی برشی  $T^{(i)}$  اعمال می‌شود، که در همان جهت  $K^{(i)}$ ، در خلاف جهت تغییر شکل گوه اعمال شود. تعادل نیروها وقتی حاصل می‌شود که نیروی مؤثر خاک  $E^{(i)}$  در سطحی که با نیروی آب  $W^{(i)}$  جمع می‌شود، معادل نیروی نگهداری  $S^{(i)}$  گردد. نیروی مؤثر خاک از رابطه (۲۰) به دست می‌آید. از تقسیم نیروی مؤثر خاک بر مساحت تونل، فشار مؤثر خاک مطابق رابطه به دست می‌آید.

$$E = -\frac{\zeta'_-}{\zeta'_+} \left[ G_s + G_w + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} (2T^{(i)} + K^{(i)}) \right] \quad (20)$$

$$\frac{\zeta'_-}{\zeta'_+} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\zeta_+^{(i)}}{\zeta_-^{(i)}} \quad (21)$$

$$\zeta_-^{(i)} = \cos \theta^{(i)} \tan \phi^{(i)} - \sin \theta^{(i)} \quad (22)$$

$$\zeta_+^{(i)} = \sin \theta^{(i)} \tan \phi^{(i)} + \cos \theta^{(i)} \quad (23)$$

$$S = E + W \quad (24)$$

در کاربرد روش‌های سه بعدی جانسکز و برویر طول سست‌شدگی از نسبت مساحت سیلو به محیط آن مطابق رابطه (۲۵) به دست می‌آید.

$$a = B * D \cdot \cot \theta / 2 (B + D \cdot \cot \theta) \quad (25)$$

در محاسبات دو بعدی این طول نصف عرض گوه در نظر گرفته می‌شود و عرض گوه در محاسبات پایداری سینه‌کار برابر قطر تونل در

جدول (۱): مقادیر مختلف ضرایب فشار جانبی [5].

$K_{silo}$	$K_{wedge}$	ارائه دهنده
۰/۸	۰/۴	آنگونستا و کواری
۱	۰	میر و همکاران
۰/۷-۱/۵	۰/۴-۰/۵	جرمسکید
$1 - \sin \phi$	$1 - \sin \phi$	کرش و کولمباس

برای محاسبات فشار کل خاک ضرایب ایمنی مختلفی برای خاک و آب ارائه شده، که در جدول (۲) آمده است.

$$S = \eta_E E + \eta_w W \quad (19)$$

در این رابطه  $\eta_E$  ضرایب ایمنی خاک و  $\eta_w$  ضرایب ایمنی آب است.

جدول (۲): ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب [2].

$\eta_w$	$\eta_E$	منابع
۱	۱/۱-۱/۳	بالتس
۱/۰۵	$\geq 1/5 - 1/75$	جانسکز
۱/۰۵	۱/۵	برویر
۱/۰۵	۱/۷	میدل و کورد
۱/۰۵	۱/۵	Heinenord Tunnel Design
۱/۰۵	۱/۷	Botlek tunnel Design

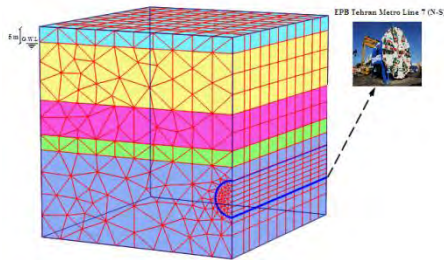
## ۲-۳- روش تحلیلی برویر<sup>۲</sup>

مدل پایداری گوه یک روش تعادل حدی است که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده است. اولین مسأله در روش سیلو و گوه این است که خاک در آن همگن فرض می‌شود که این مسأله با در نظر گرفتن لایه‌های غیرهمگن خاک در روش برویر برطرف شده است. دومین مسأله انتقال نیروی نگهداری روی اسکلت خاک است که در مدل جانسکز و کواری تمام نیروی نگهداری روی گوه مؤثر فرض می‌شدند و سینه‌کار نشت‌ناپذیر یا آب‌بند فرض می‌شود. اگر از دوغاب بنتونیت برای نگهداری سینه‌کار استفاده شود، بنتونیت تا یک طول مشخصی قبل از تشکیل کیک فیلتر نفوذ می‌کند که این مسأله تنها در زمان توقف اهمیت دارد. سومین مسأله با در نظر گرفتن قوس خاک، برآورد دقیق‌تری از کمترین فشار نگهداری حاصل می‌شود. در روش‌های جانسکز و کواری از اثر قوس صرف نظر می‌شود در نتیجه مقدار بزرگتری از کمترین فشار نگهداری حاصل می‌شود. در مدل گوه و سیلوی برویر مطابق شکل (۴) گوی شکستگی به  $N$  قطعه کوچکتر به صورت افقی تقسیم شده است.

شده است. در مدلسازی از مشخصات ماشین حفاری متروی تورین ایتالیا به خاطر تشابه مشخصاتی با ماشین حفاری خط هفت متروی تهران استفاده شده است.



شکل (۶): نمایی از مسیر احداث خط هفت متروی تهران [1].



شکل (۷): مش بندی سه بعدی در موقعیت ۲۰+۷۰۰-۲۱+۳۰۰

جدول (۳): پارامترهای طراحی خاک در خط هفت متروی تهران [1].

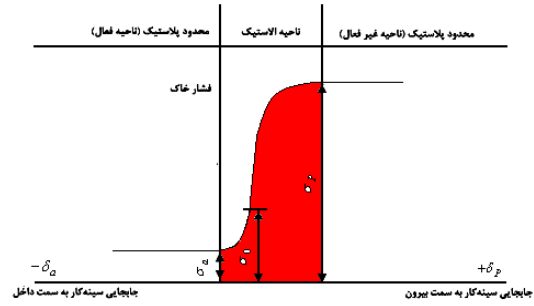
طبقه بندی خاک	پارامترهای فیزیکی خاک		پارامترهای مکانیکی خاک		مدول الاستیک	ضریب پواسون
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (deg)		
شن	۱۷	۱۹	۲۰	۳۸	۱۰۰	۰/۲۷
ماسه	۱۷	۱۹	۳۰	۳۵	۸۰	۰/۲۷
سیلت	۱۷	۱۹	۳۰	۳۰	۵۰	۰/۳
رس	۱۷	۱۹	۴۰	۲۷	۳۰	۰/۳۵

جدول (۴): خصوصیات ماشین EPB ساخت شرکت Lovat [9].

پارامترهای ماشین EPB	علائم	مقدار	واحد
خصوصیات	نوع مواد	الاستیک	-
صلبیت محوری	EA	۱۲۶۰۰	MN/m
صلبیت خمشی	EI	۸۵	MN m <sup>2</sup> /m
ضخامت	d	۰.۲۸۵	m
وزن	w	۵۰.۷۷	kN/m/m
نسبت پواسون	$\nu$	۰.۰۰	-

برای بررسی پایداری سینه کار و برآورد فشار نگهداری دو فاز محاسباتی در نرم افزار تعریف می شود. فاز اول جابجایی ناشی از مخروطی بودن انتهای ماشین را نشان می دهد. همچنین فاز دوم کاهش فشار سینه کار را نشان می دهد. آنالیز ایمنی با کاهش پارامترهای مکانیکی خاک می توان به کار گرفته شود.

نظر گرفته می شود. بنابراین سه فشار مختلف با توجه به طول سست شدگی الف) بدون قوس خاک ( $a = \infty$ )، ب) قوس دو بعدی ( $a = R$ ) و پ) قوس سه بعدی ( $a = R/1 + \tan \theta$ ) به دست می آید. برای تونل زنی با ماشین فشار تعادلی، استفاده از یک فشار نگهداری سینه کار که بتواند کمترین تغییر شکل در سینه کار را تخمین زده و پایداری آن را تأمین نماید، مطلوب است. فشار استاتیکی مطابق شکل (۵) باید بین فشار فعال و غیرفعال باشد [6].



شکل (۵): تغییرات فشار جانبی خاک در مقابل جابجایی سینه کار [6].

### ۳- روش عددی

روش المان محدود برای تحلیل سازه ها در محیط های پیوسته کاربرد دارد. در این روش محیط پیوسته واقعی به صورت مجموعه ای مرکب از تقسیمات کوچکتر بنام المان (اجزاء) نمایش داده می شود. هر المان توسط گره های اطراف خود تعریف می شود که ارتباط المان های مجاور از طریق گره های مشترک می باشد.

نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL (v.1.2) یک برنامه المان محدود برای تحلیل سه بعدی تغییر شکل و پایداری تونل می باشد که برای مدل سازی عددی استفاده شده است.

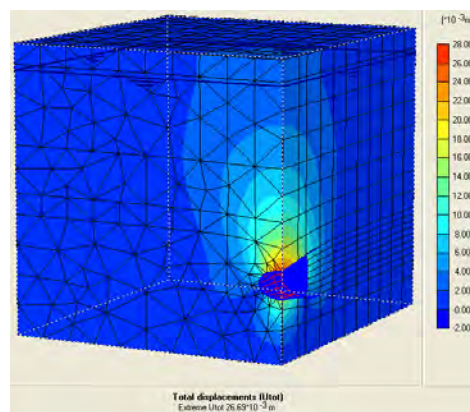
### ۴- مطالعه موردی

قطعه شمالی - جنوبی خط هفت متروی تهران به وسیله ماشین حفاری EPB به طول ۱۰/۵ متر، قطر ۹/۱۴ متر و طول کلی ۹۰ متر حفاری می شود. شکل (۶) مسیر احداث خط هفت متروی تهران را نشان می دهد. در موقعیت ۲۰+۸۰۰-۲۰+۹۰۰ تونل زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد. با توجه به اطلاعات اکتشافی، خاک در محدوده گمانه حفر شده شامل پنج لایه به ارتفاع های ۴ متر (لایه اول)، ۱۵ متر (لایه دوم)، ۹ متر (لایه سوم)، ۴ متر (لایه چهارم) و ۱۸ متر (لایه پنجم) می باشد. هندسه سه بعدی مدل مطابق شکل (۷) با اعمال مش بندی (مثلثی - ۱۵ گرهی) در نرم افزار پلاکسیس با طول ۵۰ و عرض ۵۰ متر و امتداد ۶۰ در جهت محور Z در نظر گرفته شده است. سطح آب زیرزمینی در پهنه مورد مطالعه در عمق ۵ متری از سطح زمین است.

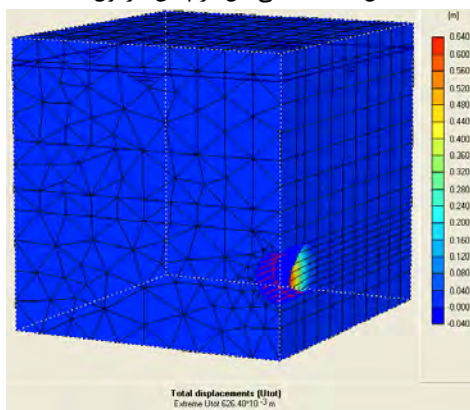
پارامترهای طراحی خاک در خط هفت متروی تهران در جدول (۳) و خصوصیات ماشین EPB ساخت شرکت Lovat در جدول (۴) آورده

#### ۱-۴- نتایج خروجی

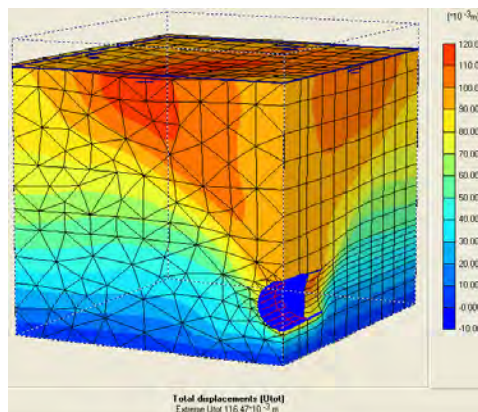
در شکل (۸) جابجایی کل در پایان فاز اول را نشان می‌دهد، که بیانگر آن است که فشار سینه‌کار به اندازه کافی برای پایداری سینه-کار بزرگ است. بیشترین تغییر شکل در انتهای ماشین اتفاق می‌افتد، که دلیل آن ناشی از انقباض خاک است. فاز دوم و سوم بیانگر نشست در سینه‌کار می‌باشند. شکل (۹) مربوط به فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار) جابجایی خاک به داخل سینه‌کار را نشان می‌دهد که کمتر از ۰/۵ سانتی‌متر است. شکل (۱۰) فاز سوم (کاهش  $\Phi$ -c) مکانیزم گسیختگی تا سطح زمین را نشان می‌دهد.



شکل (۸): جابجایی کل در پایان فاز اول.



شکل (۹): جابجایی کل در پایان فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار).



شکل (۱۰): جابجایی کل در پایان فاز سوم (کاهش  $\Phi$ -c).

#### ۲-۴- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی در موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا

۲۰+۹۰۰

مقایسه نتایج عددی با روش‌های تجربی و تحلیلی در جدول (۵) نشان می‌دهد که در این مناطق فشار محاسبه شده به روش عددی با فشار روش‌های تحلیلی همخوانی بیشتر دارد.

جدول (۵): مقایسه نتایج عددی با روش‌های تجربی و تحلیلی در

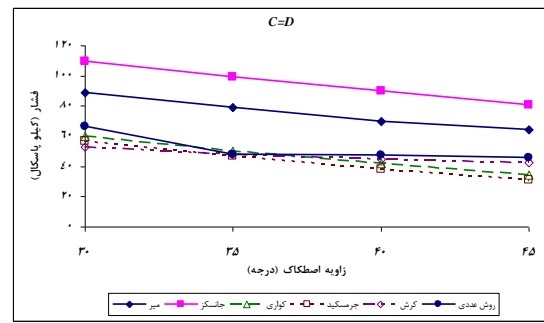
موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا ۲۰+۹۰۰

فشار نگهداری سینه‌کار در تاج تونل (کیلو پاسکال)								
موقعیت	کوارتی (روش اول)	پاسکال	کوارتی (روش اول)	پاسکال	کوارتی (روش دوم)	پاسکال	کوارتی (روش دوم)	عددی
حداقل فشار	343	313	333	333	333	333	333	333
حداقل فشار با دامنه تغییرات	363	333	323	323	323	323	323	313

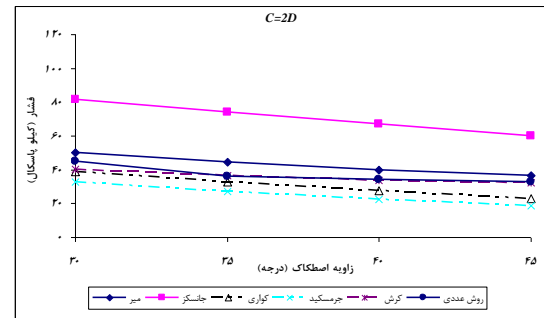
#### ۳-۴- مقایسه روش‌های تحلیلی و عددی

با توجه به شرایط تغییرات ژئوتکنیکی زمین در مسیر احداث خط هفت متروی تهران، در این بخش تأثیر تغییر پارامترهای مکانیکی خاک بر مقدار فشار نگهداری بررسی شده است. در ابتدا مطالعه بر روی خاک‌های دانه‌ای با زاویه اصطکاک ۳۰ تا ۴۵ درجه با مدول یانگ ۳۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چسبندگی صفر انجام گرفته که نتایج مقایسه روش‌های تحلیلی برای نسبت ارتفاع روباره (C) به قطر تونل (D) ۱، ۲ و ۳ در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) نشان داده شده است. برای  $C=D$  و اصطکاک کوچکتر از ۳۵ درجه نتایج کوارتی با روش عددی تطابق خوبی دارد. با افزایش اصطکاک روش کرش نتایج حاصل از کاربرد روش کرش با روش عددی نزدیک‌تر است. نتایج روش جانسکرز با توجه به در نظر گرفتن ضریب ایمنی ۱/۵ تا ۱/۷۵ همواره در مقایسه با سایر روش‌ها مقادیر بیشتری را برآورد می‌کند. جمع‌بندی نتایج حاصل از مقایسه روش عددی با روش‌های تحلیلی و برای خاک‌های مذکور در جدول (۶) آمده است. در این جدول علامت H، L و E بترتیب بیانگر آن است که فشار برآورد شده با روش عددی در مقایسه با روش‌های تحلیلی بزرگتر، کوچکتر و مساوی است.

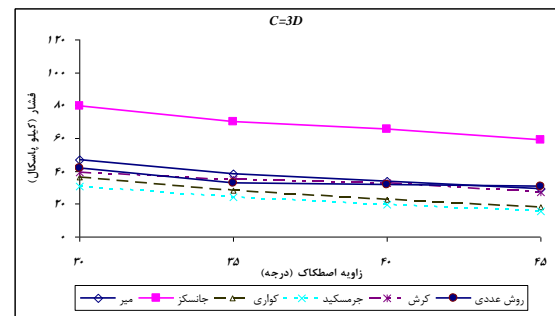
نهایت جمع‌بندی تغییرات فشار برای  $C=2D$  و  $C=3D$  در جدول (۷) آمده است. فشار نگهداری به روش جانسکز با اعمال ضریب ایمنی ۱/۵ برای خاک در این نواحی محاسبه شده که برای چسبندگی کمتر از ۲۰ کیلو پاسکال روش جانسکز فشار بیشتر را نسبت به روش میر برآورد می‌کند. برای چسبندگی بزرگتر از ۲۰ کیلو پاسکال روش میر فشار بیشتر را نسبت به روش جانسکز برآورد می‌کند. در تمام عمق‌ها نواحی خشک فشار میر و جانسکز از فشار عددی بیشتر است. برای چسبندگی بیشتر از ۳۰ کیلو پاسکال فشار محاسبه شده به روش عددی صفر در مناطق با  $C=D$  برابر صفر است. که این فشار در روش‌های تحلیلی برای چسبندگی بیشتر از ۴۰ کیلو پاسکال در این مناطق صفر است.



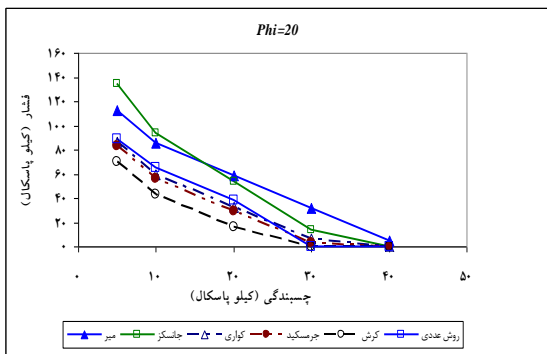
شکل (۱۱): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با  $C=D$



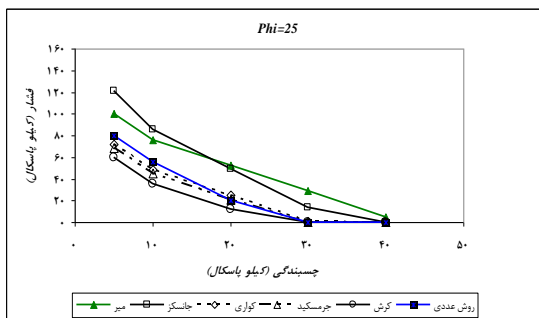
شکل (۱۲): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با  $C=2D$



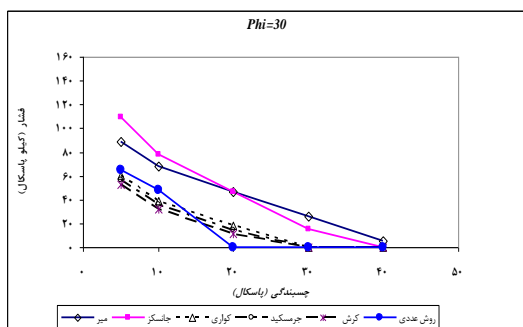
شکل (۱۳): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با  $C=3D$



شکل (۱۴): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با  $C=D$  و  $\Phi=20$



شکل (۱۵): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با  $C=D$  و  $\Phi=25$



شکل (۱۶): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با  $C=D$  و  $\Phi=30$

جدول (۶): مقایسه روش عددی با روش‌های تحلیلی برای خاک‌های غیر

چسبنده

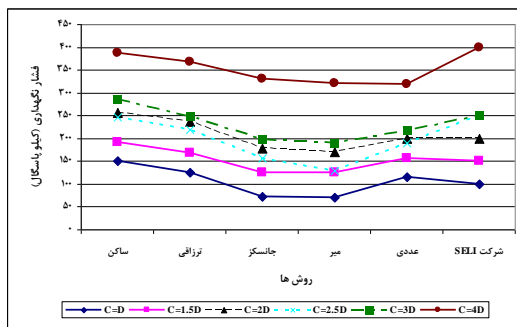
روش‌ها	چسبنده				
	میر	جانسکز	کوار	جرمسکید	کرش
$\frac{C}{D}$	۳	۳	۴	۴	۳
$\Phi$	۰	۵	۰	۵	۰
۱	L	L	E	E	L
۲	L	L	L	L	L
۳	L	L	L	L	L

بررسی اثر چسبندگی خاک بر فشار وارد بر سینه‌کار نیز حالت‌های مختلفی برحسب روباره به قطر تونل بررسی شده است. تغییرات فشار در خاک‌های چسبنده با چسبندگی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلو پاسکال و اصطکاک ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ در خط هفت متروی تهران برای  $C=D$  در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) نشان داده شده است.

پارامترهای بیشتری از خاک مثل مدول الاستیک و ضریب پواسون، همگنی یا ناهمگنی خاک، خصوصیات ماشین حفاری، مواد بهسازی، بررسی نشست سینه کار و زمین و نشت آب تحلیل صحیح تر و منطقی تری از پایداری سینه کار نسب به روش های تحلیلی و تجربی دارد. فشار محاسباتی شرکت SELI ایتالیا در مناطق آبدار برای  $C \geq 2.5D$  نسبت به روش های عددی و ترزاقی، بیشتر برآورد شده که این فشار تقریباً با فشار استاتیکی برابر است. با توجه به نتایج روش عددی می توان برای مناطق  $C \geq 3D$ ، فقط فشار آب را با در نظر گرفتن ۲۰ کیلو پاسکال دامنه تغییرات به عنوان فشار سینه کار در روش های تحلیلی استفاده کرد. در مجموع فشار در مناطق آبدار قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران بین ۱۰۰ کیلو پاسکال تا ۴۰۰ کیلو پاسکال تغییر می کند. شکل (۱۸) فشار نگهداری در عمق های مختلف مناطق آبدار خط هفت متروی تهران را نشان می دهد.

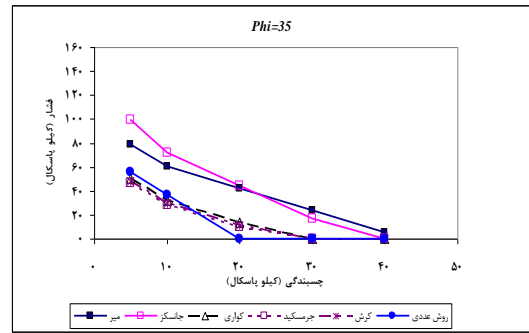
جدول (۸): مقایسه فشار در مناطق آبدار خط هفت متروی تهران.

مشخصات هندسی	فشار نگهداری سینه کار (کیلو پاسکال)						
	شرکت SELI	عددی	برویر	جانسکز	میر	ترزاقی	فشار ساکن
$C = D$	۱۰۰	۱۱۴/۵	۷۲/۵	۷۲/۵	۷۰	۱۲۴/۸	۱۵۱
$C = 1.5D$	۱۵۰	۱۵۶/۱	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۰	۱۶۸/۵	۱۹۱/۶
$C = 2D$	۲۰۰	۱۹۹/۹	۱۷۷/۵	۱۷۷/۵	۱۷۰	۲۳۷/۵	۲۵۵/۷
$C = 2.5D$	۲۵۰	۱۹۰	۱۵۶/۵	۱۵۶/۵	۱۳۰	۲۱۹	۲۴۶
$C = 3D$	۲۵۰	۲۱۷	۱۹۸/۵	۱۹۸/۵	۱۹۰	۲۵۸/۲	۲۸۵/۵
$C = 4D$	۴۰۰	۳۳۶	۳۳۱/۵	۳۳۱/۵	۳۲۰	۳۶۸	۳۸۶/۸



شکل (۱۸): فشار نگهداری در عمق های مختلف مناطق آبدار خط هفت متروی تهران.

مطابق نتایج بدست آمده در بین روش های تحلیلی- تجربی و عددی با توجه به وضعیت روباره و ارتفاع آب، فشار استاتیکی همیشه ایمن ترین فشار در مناطق آبدار است. در بین فشارهای فرونشست، فشار محاسبه شده به روش ترزاقی فشار بیشتر و ایمن تری را نسبت به سایر روش ها برآورد می کند. روش عددی با در نظرگیری پارامترهای بیشتری از خاک مثل مدول الاستیک و ضریب پواسون، همگنی یا ناهمگنی خاک، خصوصیات ماشین حفاری، مواد بهسازی، بررسی نشست سینه کار و زمین و نشت آب تحلیل صحیح تر و



شکل (۱۷): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با  $C=D$  و  $\Phi=35$

جدول (۷): مقایسه نتایج عددی با روش های تحلیلی در خاک چسبیده.

$\frac{C}{D}$	$\frac{b'}{d}$	۲۰					۲۵					۳۰					۳۵				
		۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
جانسکز و استاینر																					
میر																					
کواری و آنگونستا																					
جرمسکید																					
کرش																					

#### ۴-۴- بررسی فشار در مناطق آبدار با روباره های مختلف

فشار در مناطق آبدار خط هفت متروی تهران با روباره های  $C = D$  با ارتفاع تقریبی ۵ متر آب،  $C = 1.5D$  با ارتفاع تقریبی ۱۰ متر آب،  $C = 2D$  با ارتفاع تقریبی ۱۵ متر آب،  $C = 2.5D$  با ارتفاع تقریبی ۱۳ متر آب،  $C = 3D$  با ارتفاع تقریبی ۱۷ متر آب و  $C = 4D$  با ارتفاع تقریبی ۳۰ متر آب با روش های تحلیلی- تجربی و عددی مطابق جدول (۸) به دست آمده است.

مطابق نتایج بدست آمده در بین روش های تحلیلی- تجربی و عددی با توجه به وضعیت روباره و ارتفاع آب، فشار استاتیکی همیشه ایمن ترین فشار در مناطق آبدار است. در بین فشارهای فرونشست، فشار محاسبه شده به روش ترزاقی فشار بیشتر و ایمن تری را نسبت به سایر روش ها برآورد می کند. روش عددی با در نظرگیری



است. با توجه به اطلاعات ژئوتکنیکی کلی در منطقه و تغییرات شرایط خاک فشار مناسبی می‌باشد. فشار در مناطق آبدار با وضعیت ژئوتکنیکی و هیدرولوژی نامناسب ۳۲۰ تا ۳۷۰ کیلو پاسکال با روش‌های دو بعدی و سه بعدی برآورد شده و ۳۳۶ کیلو پاسکال با روش عددی برآورد شده که این فشار توسط شرکت پیمانکار (SELI) به میزان ۴۰۰ کیلو پاسکال برآورد شده است. فشار در این مناطق با احتیاط بیشتری برآورد شده است و این فشار با روش عددی محاسبه شده اختلاف قابل توجهی دارد. فشار محاسباتی شرکت SELI ایتالیا در مناطق آبدار برای  $C \geq 2.5D$  نسبت به روش‌های عددی و ترزاقی، بیشتر برآورد شده که این فشار تقریباً با فشار استاتیکی برابر است. با توجه به نتایج روش عددی می‌توان برای مناطق  $C \geq 3D$ ، فقط فشار آب را با در نظر گرفتن ۲۰ کیلو پاسکال دامنه تغییرات به عنوان فشار سینه‌کار در روش‌های تحلیلی استفاده کرد. همچنین در فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار)، جابه‌جایی خاک به داخل سینه‌کار به میزان کمتر از ۰/۵ سانتی‌متر برآورد شده است.

منطقی‌تری از پایداری سینه‌کار نسب به روش‌های تحلیلی و تجربی دارد. فشار محاسباتی شرکت SELI ایتالیا در مناطق آبدار برای  $C \geq 2.5D$  نسبت به روش‌های عددی و ترزاقی، بیشتر برآورد شده که این فشار تقریباً با فشار استاتیکی برابر است. با توجه به نتایج روش عددی می‌توان برای مناطق  $C \geq 3D$ ، فقط فشار آب را با در نظر گرفتن ۲۰ کیلو پاسکال دامنه تغییرات به عنوان فشار سینه‌کار در روش‌های تحلیلی استفاده کرد. در مجموع فشار در مناطق آبدار قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران بین ۱۰۰ کیلو پاسکال تا ۴۰۰ کیلو پاسکال تغییر می‌کند. شکل (۱۸) فشار نگهداری در عمق‌های مختلف مناطق آبدار خط هفت متروی تهران را نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه و جمع‌بندی

با توجه به مطالب ذکر شده، روش‌های تحلیلی جانسکر و عددی روش‌های مناسبی برای محاسبه فشار در خط هفت متروی تهران

## مراجع

- [۱] مهندسین مشاور زمین فن آوران؛ گزارشات زمین شناسی و ژئوتکنیکی خط هفت متروی تهران، ۱۳۸۶.
- [۲] Broere, W; *Tunnel Face Stability & New CPT Applications*, Delft University of Technology, 2001.
- [۳] ITA. ; *Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining*, International Tunneling Association, Volume 15, Number 3, 2000.
- [۴] Jancsecz, S., Steiner W.; *Face support for a Large Mix-Shield in Heterogeneous Ground Conditions*, Tunneling 94, conf, proc, 1994.
- [۵] Kirsch, A.; *On the Face Stability of Shallow Tunnels in Sand*, logos Verlag Berlin GmbH, 2009.
- [۶] Russo, G.; *Evaluating the Required Face-Fupport Fressure in EPBS Advance Mode*, Gallerie e Grandi Opere Sotteranee , 2003.
- [۷] Terzaghi, K. ; *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, 1934.
- [۸] Thewes, M. ; *Face Stability and Annular Grouting*, ITI/AITES-Training Course Tunnel Engineering,
- [۹] Toan, D. N.; *TBM and Lining Essential Interfaces*, Master thesis, Politecnico di Torino, 2006.