

برهمکنش سینه کار و خاک در زمین‌های سست شهری

صبا قره داش^۱، علی مرتضوی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ali.mortazavi@aut.ac.ir

(دریافت ۱۸ خرداد ۱۳۹۲، پذیرش ۲۸ مرداد ۱۳۹۳)

چکیده

تعیین میزان فشار نگهداری حداقل و حداکثر در سینه کار تونل، یکی از بخش‌های مهم در حفر تونل با ماشین سپری در زمین‌های نرم می‌باشد. این فشار متأثر از هندسه تونل و پارامترهای مختلف زمین‌شناسی از جمله غیرهمگنی محیط است. به همین دلیل در این مقاله نحوه محاسبه این فشار به روش عددی در حالت سه‌بعدی برای این روش حفر تونل در محیط‌های غیرهمگن مورد بررسی قرار گرفته است. نرم افزار سه بعدی تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ برای مدل‌سازی عملیات تونلسازی سپری مورد استفاده قرار گرفت. مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک در برگیرنده تونل و سازه‌های سطحی استفاده شد تا اجازه گسیختگی پلاستیک به خاک داده شود. در این مطالعه نسبت‌های مختلف فشار نگهداری سینه کار به فشار جانبی زمین در بازه ۱۰٪ تا ۲۰۰٪ بررسی شد همچنین با مدل‌سازی برهمکنش خاک و سینه کار، تنش‌های ایجاد شده در اثر حفر تونل و اعمال بارهای سطحی در نرم‌افزار بررسی و تحلیل شد. همچنین تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییر بارهای سطحی انجام شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که افزایش و کاهش بی‌رویه فشار سینه کار باعث می‌شود وضعیت تنش در توده خاک به پوش گسیختگی نزدیک‌تر شود. به طور کلی طراحی فشار سینه کار با استفاده از تغییرشکل‌های خاک اطراف صورت می‌گیرد و اغلب تحت تاثیر برهمکنش بین این دو قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی

سپر فشار تعادلی زمین (EPB)، مدل‌سازی عددی، روش تفاضل محدود (FDM)، بارهای سطحی.

۱- مقدمه

در بحث تونل‌های شهری در محیط‌های خاکی یکی از موارد مهم جهت کنترل پایداری زمین در سینه‌کار تونل و همچنین در سطح زمین و جلوگیری از نشست، بحث فشار سینه‌کار می‌باشد. این فشار با کنترل مواد خروجی از محفظه حفاری^۱ دستگاه و میزان پیشروی دستگاه تامین می‌شود. بطور کلی در ماشین‌های EPB^۲ مواد حفاری شده توسط کله- حفار^۳ در محفظه حفاری جمع شده و در نهایت از قسمت تحتانی آن با استفاده از یک نقاله مارپیچ بیرون برده می‌شود. در این روش حفاری، با توجه به سست بودن سینه‌کار تونل‌ها در محیط‌های خاکی و احتمال هجوم خاک و آب به درون تونل و در نتیجه نشست زمین و تبعات ناشی از آن، باید بین مواد حفاری شده و مواد خارج شده از دستگاه تعادل ایجاد گردد که این کار با ایجاد فشار در سینه‌کار انجام می‌شود. در این راستا باید توجه داشت که افزایش بیش از حد فشار سینه‌کار منجر به بالازدگی زمین و آسیب رساندن یا تخریب سازه‌های بالایی می‌شود. در محفظه حفاری تعدادی سنسور فشار وجود دارد که فشار خاک درون محفظه حفاری را در مونیاتور اتافک اپراتور نشان می‌دهند. اپراتور دستگاه با مشاهده افزایش یا کاهش فشار، با تنظیم نرخ پیشروی یا چرخش نقاله مارپیچ فشار را به مقدار تعیین شده نزدیک می‌کند و بدیهی است که این نوسانات فشار بصورت موج سینوسی می‌باشد [۱].

۱-۲- روش‌های تعیین فشار سینه‌کار

بطور کلی روش‌های تعیین فشار سینه‌کار را می‌توان به موارد زیر تقسیم کرد:

الف) روش‌های تجربی

ب) روش‌های تحلیلی

ج) روش‌های عددی

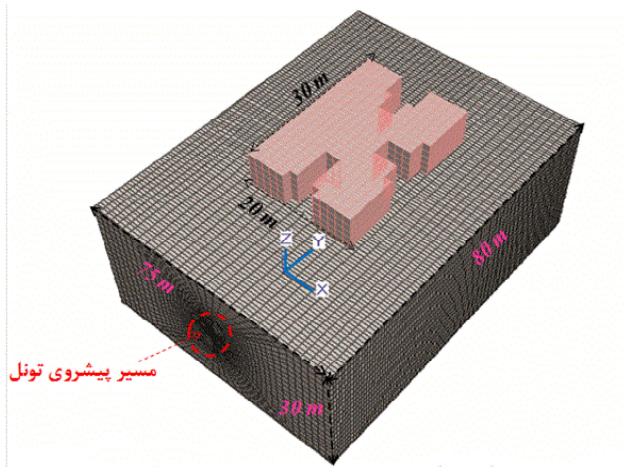
در روش‌های تجربی بر اساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطه‌ای تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار سینه‌کار برقرار می‌شود. این روشها بسیار ساده بوده و در طراحی‌های فاز یک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش‌های تحلیلی در عین سادگی، پارامترهای متعددی در تعیین فشار سینه‌کار لحاظ می‌شود. روش‌های تحلیل به دو دسته روش‌های تعادل حدی و روش‌های مبتنی بر تئوری مرز بالای و پایین پلاستیک تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیل اعداد دقیق و مناسبی برای طراحی‌های مرحله تکمیلی در اختیار طراح قرار می‌دهد. این روشها با ذکر مراجعه بطور مفصل در منبع شماره [۲] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روش‌های عددی که بحث مورد بررسی در این مقاله می‌باشند بیشتر جهت تایید مقادیر حاصله از روش تحلیل و همچنین جهت کنترل مواردی که امکان بررسی در روش تحلیل ندارد مانند عوارض خاص (پی ساختمانها، پی پلها، تقاطع تونل‌ها و) مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های عددی در مواردی به عنوان ابزار کمکی برای توسعه روابط و یا اثبات عددی مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا Lee and Nam (2001) با استفاده از روش عددی ثابت کردند که در خاکهای ماسه سیلتی فشار منفذی در سینه‌کار برابر ۲۲ درصد هد آب می‌باشد [۳]. برای این منظور ایشان از نرم افزار PENTAGON-3D استفاده کردند. به کمک همین نرم‌افزار

نرم‌افزار ANSYS به مدلسازی فشار سینه‌کار پرداخته [۹] و نشان دادند که عدد پایداری N ارائه شده توسط Davis و همکاران (۱۹۸۰) [۱۰] با نتایج عددی همخوانی دارد. ایشان نشان دادند که نقاط نزدیک به کف تونل بیشتر در معرض ناپایداری می‌باشند موضوعی که بعدها توسط Li و همکاران (۲۰۰۹) نیز تایید شد [۱۱]. Mollon و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D فشار سینه‌کار را مدلسازی کردند که مراحل مدلسازی بسیار شبیه به روند مورد استفاده در این مقاله می‌باشد [۱۲]. با استفاده از این نرم‌افزار Li و همکاران (۲۰۰۹) به مقایسه نحوه ناپایداری سینه‌کار و بالازدگی زمین پرداخته و نشان دادند که شباهت زیادی بین مدل‌های تحلیلی و عددی در مدل تخریب وجود دارد لیکن در مدل بالازدگی شکل ناپایداری متفاوت می‌باشد. ایشان ثابت کردند که در بالازدگی تنها نیمه بالایی سینه‌کار دچار ناپایداری می‌شود.

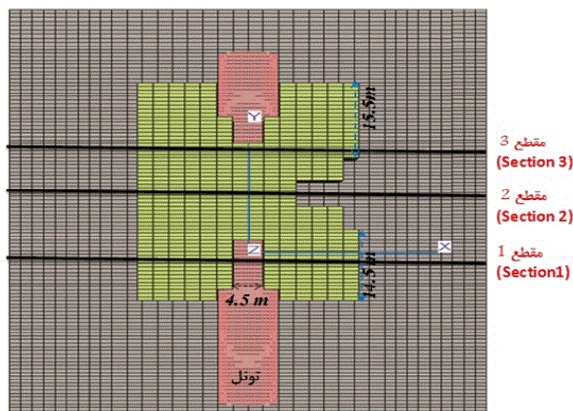
در تحقیق حاضر اندرکنش دستگاه حفاری با سینه‌کار تونل بصورت سه بعدی تحلیل شده است. نرم‌افزار FLAC-3D برای انجام محاسبات انتخاب و مدل رفتاری موهر کولمب برای محیط درونگیر تونل انتخاب شده، شرایط مرزی متناسب با شرایط حفاری تونل در مدل اعمال شده و پارامترهای ورودی مدل بر اساس نتایج مطالعات ژئوتکنیکی انتخاب شده است. در تحقیق حاضر، سه عامل اصلی کنترل-کننده در تونلسازی سپری شامل فشار بار وارده بر سینه‌کار، پارامترهای مکانیکی و فیزیکی خاک و اثر وجود ساختمان-های موجود در سطح زمین بر چگونگی مکانیزم ریزش و بالآمدگی سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای

Lee و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی کاهش فشار منفذی در اثر تزریق لوله‌ای چند مرحله‌ای پرداخته و نشان دادند که فشار منفذی به عنوان یکی از عوامل مهم در ناپایداری سینه-کار کاهش قابل توجهی دارد [۴]. Ohta and Kiya (2001) با استفاده از FLAC3D و بر اساس ماکزیمم بردار جابجایی و جریان نشان دادند که مدلسازی عددی با این نرم‌افزار باید در مواردی که ناپایداری سینه‌کار ناشی از رخنه سیال می‌باشد مورد استفاده قرار نگیرد [۵]. از میان روشهای عددی در زمینه تعیین فشار سینه‌کار، یکی از بهترین مدلسازی توسط Vermeer و همکاران (۲۰۰۲) انجام شد [۶]. بر اساس روش ارائه شده توسط Atkinson and Mair (1981) برای ماسه غیرچسبنده خشک (Anagnostou and Kovari (1996) برای خاکهای چسبنده با زاویه اصطکاک داخلی [۷] که هر دو بر پایه معادلات توسعه داده شده برای ظرفیت باربری پی می‌باشند، Vermeer و همکاران با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS-3D و در حالت زهکشی شده مقادیر ضرایب پایداری را در حالت‌های مختلف تحلیل بدست آوردند. یکی از نتایج مهم تحقیقات ایشان عدم تاثیر روباره بر پایداری در زوایای اصطکاک بیش از ۲۰ درجه می‌باشد. با کمک همین نرم‌افزار، Hofle و همکاران به بررسی اثر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نفوذپذیری بر پایداری سینه‌کار پرداخته و نشان داد که با افزایش نفوذپذیری میزان پایداری کاهش می‌یابد و این وابستگی پایداری به نفوذپذیری در چسبندگی-های بالا بیشتر می‌باشد. همچنین زاویه اصطکاک اثر کمی بر پایداری دارد که علت آن میزان تنش کم در محدوده مورد بررسی می‌باشد [۸]. Sun و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از

تونل در نظر گرفته شده که بوسیله دوجاب و همزمان با حفاری تحت فشار معین پر خواهد شد.



الف



ب

شکل ۱: الف) نمای سه بعدی مدل تونل و ساختمان، ب) نما از بالای مدل سه بعدی تونل.

فشار سینه کار به صورت یک فشار گرادایانی با دانسیته ۱۲ کیلونیوتن بر مترمکعب در جهت محور Z به صورت خطی بر روی سینه کار تونل وارد شده و نسبت به عمق افزایش می یابد (شکل ۲). فشار اولیه برابر با فشار جانبی زمین در حال سکون (۱۲۱/۴۸ کیلوپاسکال) به مرکز سینه کار وارد می شود

بررسی میزان تأثیر فشار سینه کار، بازه ای برای نسبت های مختلف فشار نگهداری به فشار جانبی زمین ($\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$) در نظر گرفته شد. محدوده این بازه از ۱۰٪ تا ۲۰۰٪ است. برای هر حالت تحلیل عددی به صورت جداگانه انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در تونلسازی سپری تأثیر فشار سینه کار نقش مهمی در عملیات حفاری دارد، ارزیابی فشار سینه کار محور اصلی تحقیق قرار گرفته و نقش آن در مکانیزم تغییر شکل سینه کار به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. فشار سینه کار با استفاده از روشهای تحلیلی تخمین و به روش عددی با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ مورد بررسی جامع قرار گرفته است. در این راستا سعی شده تا نکات اجرایی با تکیه بر توانایی های نرم افزار مدل سازی شوند.

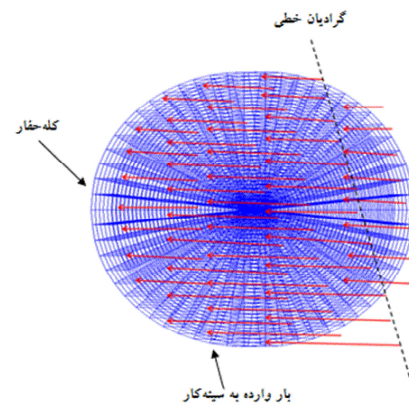
۲- پارامترهای ورودی و مدل هندسی تونل متروی مشهد

شکل ۱- الف) نمای مدل سه بعدی ساخته شده در محیط نرم افزار $FLAC-3D$ را نشان می دهد. با توجه به شکل، هندسه ساختمان بصورت دقیق مدل سازی شده و موقعیت مسیر تونل نسبت به ساختمان در شکل ۱- ب نشان داده شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک درونگیر تونل محاسبه شده و خلاصه نتایج حاصله در جدول ۱ ارائه شده است. برای انجام عملیات حفاری TBM از نوع فشار تعادلی زمین (EPB) انتخاب شده است. قطر تونل ۹ متر و قطر داخلی آن ۸/۵۳ متر طراحی شده است. میزان اضافه حفاری حداکثر ۱۲ سانتی متری بین پوشش بتنی و ناحیه سقف و کف

شکل ۲: نحوه اعمال بار به سینه کار تونل.

لازم به ذکر است که در این تحقیق نفوذ دوغاب به داخل سینه کار در نظر گرفته نشده است. در جدول ۲ خواص فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده در اجزاء مختلف مدل نشان داده شده است. با توجه به اینکه ساختمان با ابعاد واقعی مدل شده است جرم سقف و دیواره‌های ساختمان بر اساس آیین-نامه‌های موجود محاسبه و با توجه به حجم ساختمان دانسیته یکنواخت برای ساختمان محاسبه شده و هندسه سه‌بعدی ساختمان با مدل رفتاری الاستیک شبیه‌سازی شده است. آب زیرزمینی به صورت افقی بدون نشت درون محفظه حفاری در نظر گرفته شده است. در این مقاله با استناد به اعداد بدست آمده با استفاده از روش تحلیلی و با توجه به زمان‌بر بودن پروسه تحلیل عددی، تنها سه مقطع بحرانی برای بررسی فشار سینه کار به روش عددی انتخاب شده‌اند. معیار انتخابی برای مقاطع توزیع غیریکنواخت بار سطحی ساختمان می‌باشند (شکل ۱-ب)

که مقدار آن در سینه کار تونل برای هر مقطع از مقادیر بدست آمده به روش تحلیلی اقتباس شده است. این نرم افزار قابلیت کاهش و افزایش تدریجی فشار وارده بر سینه کار را دارد و زمانیکه کاهش و افزایش این فشار منجر به ریزش و برون‌زدگی در سینه کار تونل شود، عملیات متوقف می‌شود و نسبت فشار نهایی بدست آمده به فشار زمین در حال سکون برای هر دو شکست فعال و غیر فعال بدست می‌آید. با ضرب این نسبت در فشار زمین در حال سکون، فشار حداقل و حداکثر مورد نیاز برای پایداری سینه کار تعیین می‌شود.

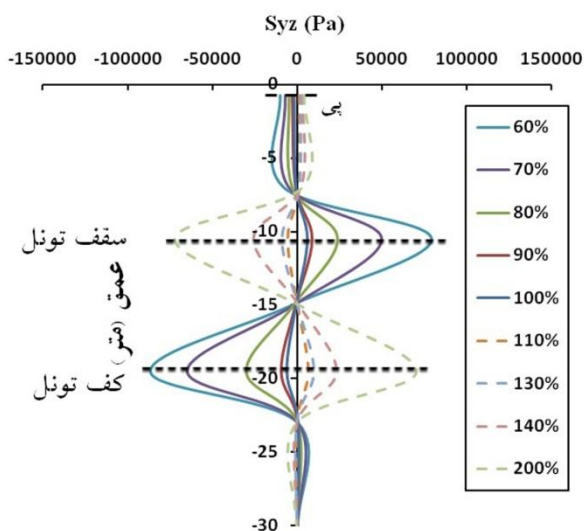


جدول ۱: پارامترهای مکانیکی و مقاومتی لایه‌های خاک درونگیر تونل

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص خشک	وزن مخصوص اشباع	C	ϕ	ν	E	(ضریب فشار جانبی زمین در حال سکون) K_0
		KN/m^3	KN/m^3					
I	SC-SM (ماسه رس‌دار غیرآلی)	۱۹٫۶	۲۱٫۸۵	۰	۳۵	۰٫۳	۸۰	۰٫۴۳
II	GC-GM (شن رس‌دار غیرآلی)	۱۹٫۸	۲۱٫۶۵	۱۱	۴۰	۰٫۲۸	۱۰۰	۰٫۳۶
III	CL-ML (رس غیرآلی)	۱۸٫۲	۲۳	۲۵	۲۰	۰٫۳۴	۳۰	۰٫۶۱

جدول ۲: پارامترهای ورودی مورد استفاده برای شبیه‌سازی المان‌های سپر، دوغاب، پوشش بتنی و ساختمان

نوع المان	ρ_{bulk}	C	ϕ	ν	E	ضخامت
	Kg/m^3	KPa	degree	-	MPa	Cm
سپر	۷۸۵۰	-	-	۰٫۱۷	۲۱۰۰۰۰	۱۰
دوغاب	۱۵۰۰	۶۰۰	۳۵	۰٫۲۵	۴۰	۱۲
پوشش بتنی	۲۶۰۰	-	-	۰٫۲	۳۰۰۰۰	۳۵
ساختمان	۳۶۴	-	-	۰٫۲	۲۵۰۰۰	-
پی	۲۴۰۰	-	-	۰٫۲	۲۵۰۰۰	-

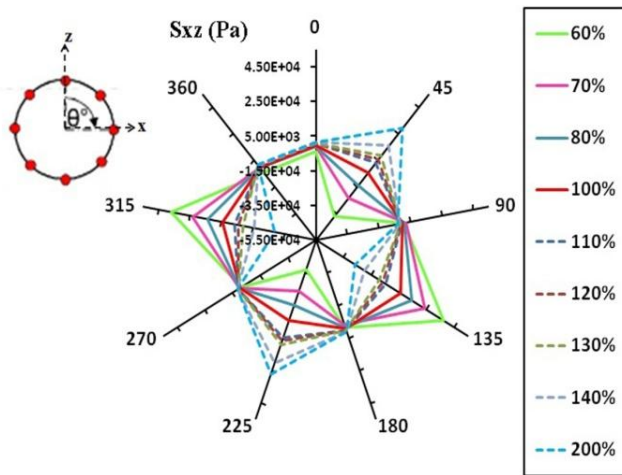


شکل ۳: وضعیت تنش برشی Syz در مقابل سینه‌کار در نسبت‌های مختلف فشار نگهداری سینه‌کار.

در صورتیکه فشار جانبی اعمال شده از طرف کله‌حفار بیشتر از حد بهینه (فشار زمین در حال سکون) باشد تغییر شکل جانبی خاک به سمت خارج سینه‌کار خواهد بود. میزان و جهت تنش‌ها به میزان و جهت جابجایی خاک و محیط اطراف آن بستگی خواهد داشت. در شکل ۳ به وضوح می‌توان مشاهده کرد که در نسبت‌های بالا فشار نگهداری جهت تنش‌های برشی تغییر کرده است. در چنین شرایطی افزایش

۳- نتایج حاصل از تحلیل عددی

برای درک مفهوم مکانیزم گسیختگی برشی در خاک، در شکل ۳ تغییرات تنش برشی Syz در صفحه Y-Z در حالت‌های مختلف از نسبت فشار نگهداری نشان داده شده است. با توجه به شکل بتدریج با کاهش نسبت فشار نگهداری نشست خاک افزایش می‌یابد و در نهایت ظرفیت گسیختگی باربری خاک فرا رسیده و تحت نسبت فشار ۶۰٪ در حالت محرک، گسیختگی برشی کامل رخ می‌دهد. وقتیکه سینه‌کار تحت تأثیر فشار وارده در نسبت ذکر شده ریزش می‌کند، ناحیه گوه‌ای مثلثی شکل از خاک به طرف پایین رانده شده و خاک به حالت تعادل خمیری درآمده و گسیختگی به علت لغزش رخ می‌دهد. ظرفیت باربری خاک سطحی در مقطع مورد نظر کم بوده و از طرفی وزن سازه قابل توجه است در نتیجه حساسیت بالایی به فشار نگهداری سینه‌کار داشته و وقوع گسیختگی برشی سریع اتفاق می‌افتد.



شکل ۴: وضعیت تنش برشی S_{xz} در محیط پیرامون سینه کار در نسبت‌های مختلف فشار نگهداری سینه کار.

برای تشریح بیشتر موضوع تغییرات مؤلفه تنش در جهت محور تونل (y) طی گام‌های محاسباتی متوالی در مقابل سینه کار محاسبه شد. این منحنی که از به هم پیوستن مقادیر مختلف تنش حاصل شده است مسیر تنش نامیده می‌شود. شکل ۵ روند تغییرات تنش S_{yy} (جهت محور تونل) در مقابل سینه کار را نشان می‌دهد. در حین پیشروی سینه کار با نسبت‌های پایین فشار نگهداری، توده خاک به سمت داخل سینه کار حرکت خواهد کرد و رهاسازی تنش در زون سینه کار باعث کاهش سه مؤلفه نرمال تانسور تنش خواهد شد. کاهش در تنش S_{yy} ممکن است بدلیل کاهش سختی سینه کار باشد. فشار جانبی زمین در زون سینه کار با کاهش نسبت فشار نگهداری به شدت کاهش یافته و با دور شدن از این زون شرایط به حالت اولیه بر می‌گردد. در حالت عکس افزایش نسبت فشار نگهداری باعث افزایش سه مؤلفه نرمال تانسور تنش خواهد شد این افزایش تا زمانیکه گسیختگی در سینه کار در حالت مقاوم مشاهده شود ادامه خواهد یافت.

تدریجی فشار نگهداری باعث فشرده شدن خاک می‌شود تا اینکه خاک‌های اطراف سینه کار بالا زده و سطح لغزش تا سطح زمین ادامه می‌یابد.

گسیختگی برشی کل در مقطع موردنظر در نسبت ۲۰٪ فشار سینه کار به فشار جانبی خاک اتفاق می‌افتد، در این حالت سطح لغزش تا سطح زمین گسترش یافته و علائمی از بالازدگی خاک مشاهده می‌شود.

وجود سازه سطحی که بر روی خط مرکزی تونل قرار گرفته است، مقاومت برشی بالایی از خود در حین بالازدگی خاک نشان می‌دهد و همین امر باعث تأخیر در بالازدگی خاک می‌شود.

مشارکت چسبندگی، زاویه اصطکاک خاک، سازه سربار و وزن مخصوص خاک در ایجاد گسیختگی مقاوم نقش مهمی ایفا می‌کنند. با توجه به شکل ۳ با کاهش و افزایش بی‌رویه فشار سینه کار تنش برشی به طور موضعی در اطراف زون سینه کار و بیشتر در ناحیه سقف و کف گسترش یافته و مقادیر تنش‌های برشی S_{yz} در حالت محرک و مقاوم بزرگتر از حالت‌های دیگر هستند.

شکل ۴ تغییرات تنش برشی S_{xz} را در اطراف تونل و در صفحه $X-Z$ نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود پارامترهای مقاومت برشی نسبت به سربار تأثیر بیشتری در گسیختگی برشی خاک دارند.

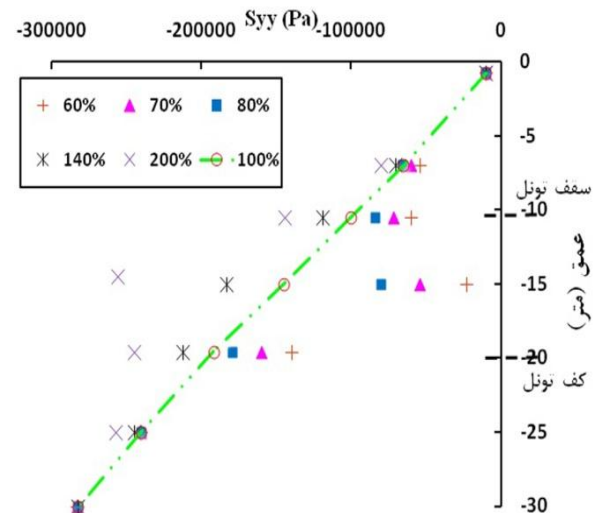
مختلف فشار نگهداری بررسی کرده و سختی سینه کار که عبارت است پتانسیل سینه کار در برابر تغییر شکل را به عنوان تابعی از حالت تنش که بر سینه کار وارد می شود محاسبه شده است.

شکل ۶ مقادیر تغییر مکان جانبی حداکثر لازم برای رسیدن به حالت محرک و یا مقاوم را در مقطع مورد نظر نشان می دهد. در این شکل u_{yave} جابجایی نقاط گرهی واقع بر سینه کار در راستای y است. محور قائم این منحنی $(\frac{z}{D})$ نسبت به قطر تونل نرمالیزه شده، و Z ارتفاع از تاج تونل است.

شکل ۷ ارتباط بین جابجایی میانگین سینه کار و نسبت های مختلف فشار نگهداری را نشان می دهد. u_{yave} جابجایی میانگین سینه کار می باشد. با استفاده از جابجایی میانگین سینه کار می توان تأثیر مؤلفه جابجایی تمام نقاط گرهی واقع بر سینه کار را برای هر یک از نسبت های مختلف فشار نگهداری به طور جداگانه ارزیابی کرد. در واقع برای هر یک از نسبت های مختلف فشار نگهداری از مؤلفه جابجایی تمام نقاط گرهی واقع بر سینه کار میانگین وزنی گرفته شده است. رابطه استفاده شده جهت گرفتن میانگین وزنی از جابجایی نقاط گرهی واقع در سینه کار به صورت زیر است:

$$u_{yave} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n ((z)_{i+1} - (z)_i) ((u_y)_{i+1} + (u_y)_i) \quad (1)$$

Z فاصله مابین نقاط گرهی واقع در سینه کار، D قطر تونل است.



شکل ۵: وضعیت تنش محوری S_{yy} در مقابل سینه کار در نسبت های مختلف فشار نگهداری سینه کار.

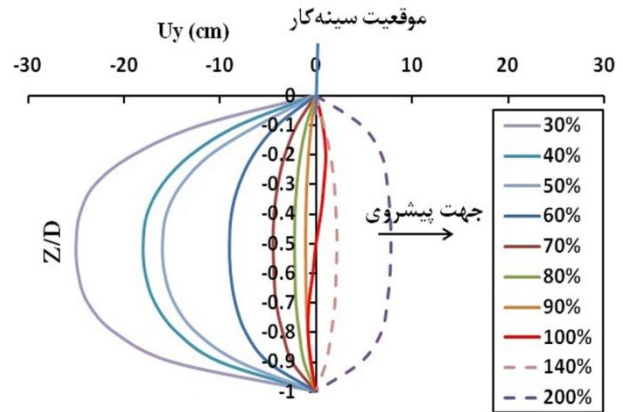
در هر دو حالت محرک و مقاوم حساسیت تنش S_{yy} (محوری) و S_{xx} (افقی) نسبت به این تغییرات در مقایسه با تنش S_{zz} (قائم) بیشتر است.

۳-۱- بررسی سختی سینه کار در نسبت های مختلف از فشار نگهداری به فشار جانبی زمین

سختی سینه کار در واقع ظرفیت تحمل سینه کار را در برابر تغییر شکل تحت تأثیر نسبت های مختلف فشار نگهداری ارزیابی می کند این پارامتر به راحتی می تواند رفتار سینه کار را تحت تأثیر هر یک از نسبت های مختلف فشار نگهداری نشان دهد. اهمیت سختی سینه کار بسته به نوع روش اجرا حفاری متفاوت است و در روش های حفاری مکانیزه به طور موقت و در حین اجرا از طریق کله حفار کنترل می شود.

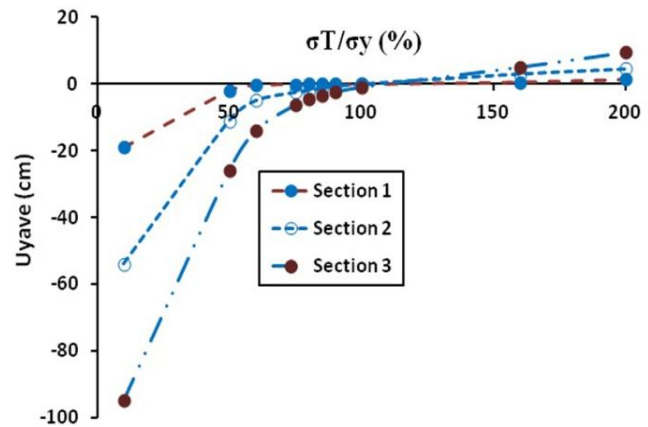
در این بخش هدف پیدا کردن ارتباط بین تنش- کرنش در زون سینه کار است. تغییر شکل سینه کار را به ازای نسبت های

زمین باعث افزایش جابجایی ناگهانی در سینه کار می شود (مقطع ۳)، سایر توزیعات بار سطحی زمین نشان دهنده این واقعیت است که در صورت قرارگیری این بار در سقف تونل باعث افزایش جابجایی سینه کار می شود (مقطع ۲) ولی در صورت نبود این بار در سقف جابجایی روند کاهشی دارد نسبت به سایر مقاطع دارد (مقطع ۱).



شکل ۶: مقادیر تغییر مکان جانبی حداکثر لازم برای رسیدن به حالت محرک و یا مقاوم.

در نسبت فشار نگهداری ۱۰۰٪ رفتار سینه کار مستقل از بارگذاری های سطحی زمین و در حالت تعادل الاستیک است و رفتار آن تنها بوسیله خواص الاستیک کنترل می شود و جابجایی سینه کار با افزایش نسبت فشار نگهداری به طور خطی تغییر می کند. با توجه به شکل ۷ می توان دریافت که کنترل جابجایی سینه کار هنگامیکه نسبت فشار نگهداری بزرگتر از ۱۰۰٪ باشد، راحت تر است.



شکل ۷: ارتباط بین جابجایی میانگین سینه کار و نسبت های فشار نگهداری به فشار جانبی زمین در سه مقطع ۱، ۲ و ۳.

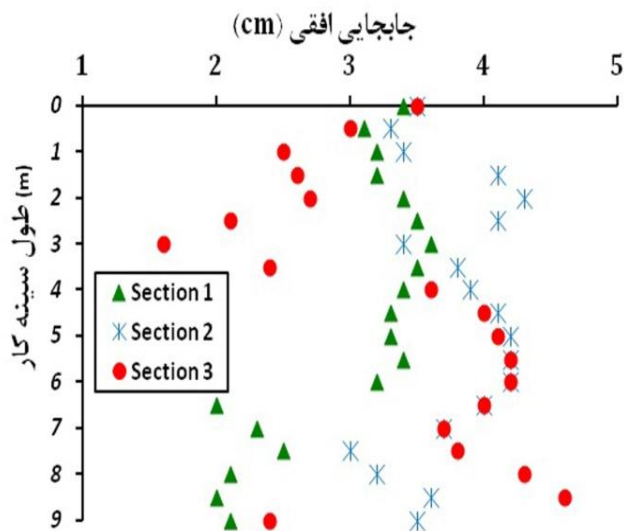
رابطه بین جابجایی و نیرو را می توان با تعریف پارامتر سختی سینه کار نشان داد. در اینجا سختی سینه کار در واقع تانژانت معکوس منحنی ۷ است و از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{stiffness of face} = \frac{\Delta(\sigma_T/\sigma_\gamma)}{\Delta(u_{yave})} \quad (2)$$

$\Delta(\sigma_T/\sigma_\gamma)$ اختلاف بین نسبت های فشار نگهداری را نشان می دهد و $\Delta(u_{yave})$ اختلاف جابجایی میانگین سینه کار است. سختی سینه کار در شکل ۸ نشان داده شده است.

مقادیر منفی نشان دهنده جابجایی سینه کار به داخل تونل (حالت محرک) و مقادیر مثبت، جابجایی سینه کار را در جهت پیشروی تونل (حالت مقاوم) نشان می دهد. اگرچه رفتار سینه کار در نسبت های مختلف فشار نگهداری تحت تأثیر فاکتورهای مختلف قرار می گیرد، ولی به طور کل می توان نتیجه گرفت بارگذاری سطحی در توزیعات مختلف در جابجایی میانگین سینه کار موثر است و هر چه توزیع متقارن تر باشد در سطح

ایجاد شده در راستای قطر سینه کار در شکل ۹ نشان داده شده است.



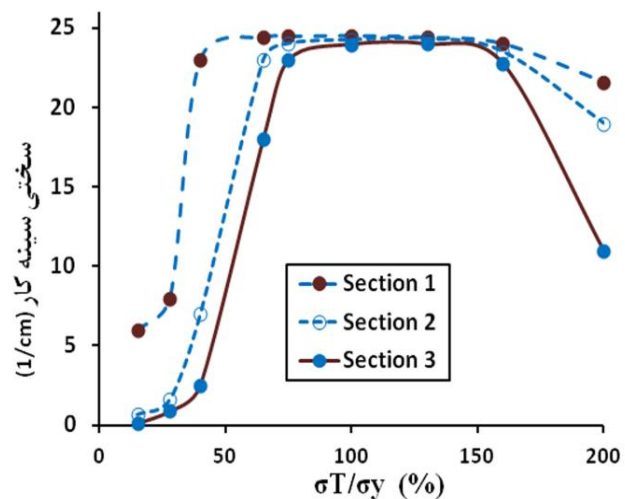
شکل ۹: تغییر مکان افقی ایجاد شده در سه مقطع مورد نظر ۱، ۲ و ۳.

چنانکه در نتایج نشان داده شده است، تغییرات جابجایی افقی در طول قطر سینه کار تاثیرگذار نیست. از این مزیت می-توان در روش‌های ساده‌سازی شده طراحی فشار سینه کار تونل-ها استفاده کرد. اما باید توجه داشت که این نتایج در پایان بارگذاری و در حالت نهایی تعیین شده است و باید تغییرات این جابجایی در هنگام اعمال بار سینه کار نیز در نظر گرفته شود.

برای مثال در مورد شکل‌های ۱۰ و ۱۱ فشار اعمال شده به سینه کار و مراحل بارگذاری مختلف توسط TBM در تاج سینه کار نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر جابجایی و تنش برشی ایجاد شده در تاج سینه کار در حین حفاری می‌باشد. این موضوع باید در طراحی‌ها در نظر گرفته شود.

در واقع این نسبت به عنوان مقدار مطلق سختی سینه کار نیست و تنها به منظور مقایسه افت سختی سینه کار در دو حالت محرک و مقاوم به کار رفته است.

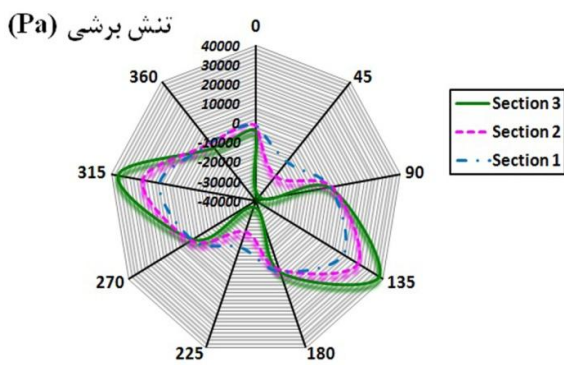
قسمت ثابت منحنی نشان‌دهنده این است که در این نسبت‌ها از فشار نگهداری سختی سینه کار مستقل از پارامترهای مقاومت برشی و بارگذاری‌های سطحی است. در چنین شرایطی سینه کار در حال تعادل الاستیک است. افت سختی سینه کار در حالت محرک بیشتر از حالت مقاوم می-باشد.



شکل ۸: ارتباط بین سختی سینه کار و نسبت‌های مختلف فشار

نگهداری سینه کار در سه مقطع ۱، ۲ و ۳.

برای این تحلیل مقاطع متناسب با شرایط بارگذاری‌های سطحی متفاوت انتخاب شد. دلیل این انتخاب خرابی‌های ایجاد شده در جریان این بارگذاری‌ها و مکانیزم عمل فشار سینه کار در این بارگذاری‌هاست. با اعمال بارگذاری‌های سطحی متفاوت به سینه کار جابجایی افقی ایجاد شده در سینه کار به صورت شکل ۹ می‌باشد. در اثر اعمال این بارهای سطحی تغییر مکان



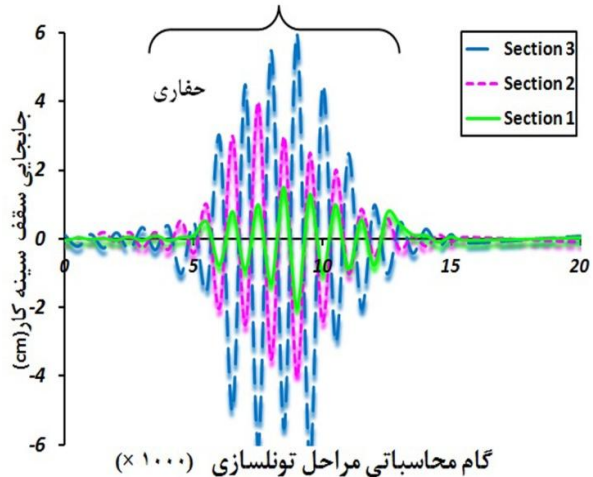
شکل ۱۲: مقایسه تنش‌های برشی ایجاد شده در پیرامون سینه کار

در سه مقطع مورد نظر ۱، ۲ و ۳.

۴- نتایج

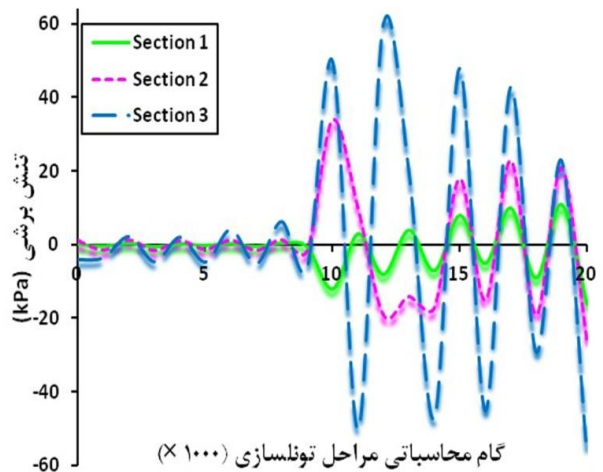
در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار FLAC-3D به بررسی رفتار سینه کار تحت تأثیر نسبت‌های مختلف فشار نگهداری به فشار جانبی زمین پرداخته شد و سپس به بررسی تأثیر بارهای سطحی و برهمکنش آنها با سینه کار بر روی گسیختگی برشی کامل خاک در ناحیه سینه کار و همچنین سختی سینه کار در مسیر پیشروی تونل پرداخته شد. نتایج بدست آمده، از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- فرآیند شکست سینه کار بسیار پیچیده بوده و مراحل بارگذاری متوالی را شامل می‌شود. پیش‌بینی رفتار سینه کار تحت عملیات حفاری بسیار دشوار بوده و تاکنون مدل ریاضی که بیانگر کلیه جوانب رفتار سینه کار تحت این عملیات باشد، ارائه نشده است.
- بکارگیری فشار بهینه در سینه کار باعث کاهش منطقه پلاستیک، کاهش شعاع تأثیر سینه کار و کاهش هزینه‌های اجرایی می‌گردد.



شکل ۱۰: جابجایی تاج سینه کار در مراحل مختلف بارگذاری توسط

TBM در سه مقطع ۱، ۲ و ۳.



شکل ۱۱: تنش برشی سینه کار در مراحل مختلف بارگذاری توسط

TBM در سه مقطع ۱، ۲ و ۳.

نکته دیگری که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود؛ تفاوت ایجاد شده تنش برشی محیطی در سه مقطع مورد نظر در برابر اعمال بارهای سطحی مختلف می‌باشد. تنش برشی در مقطع سه تا بیش از دو برابر افزایش یافته است.

مراجع

[1] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., and Xu, S., 2008. "Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design, Methodology and Construction Control", Taylor and Francis.

[2] Borio, L., Peila, D., Oggeri, C., and Pelizza, S., «Characterization of Soil Conditioning for Mechanized Tunnelling»

[3] Lee, I.M., and Nam, S.W., 2001. "The Study of Seepage Acting on the Tunnel Lining and Tunnel Face in Shallow Tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, pp: 31-40.

[4] Lee, I.M., Lee, J.S., and Nam, S.W., 2004. "Effect of Seepage Force on Tunnel Face Stability Reinforced with Multi-step Pipe Grouting», Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp: 551-565.

[5] Ohta, T., and Kiya, H., 2001. "Experimental Study and Numerical Analysis on Stability of Tunnel Face in Sandy Ground", QR of RTRI, Vol. 42, No. 3, Sep.

[6] Vermeer, A., Ruse, N., and Marcher, T., 2002. "Tunnel Heading Stability in Drained Ground", FELSBAU Vol. 20, No. 6.

[7] Anagnostou, G., and Kovari, K., 1996. "Face Stability Condition with Earth Pressure Balance Shield", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, pp: 165-173.

[8] Höfle, R., Fillibech, J. and Vogt, N., "Time Depending Stability of Tunnel Faces", Zentrum Geotechnik, Technische Universität München, Baumbachstr. 7, 81245 München, Germany.

[9] Sun, S., Pei, H., and Zhang, S., 2006. "Analysis of Face Stability and Ground Settlement in EPB Shield Tunnelling for the Nanjing Metro", The Geological Society of London, IAEG, Paper Number 274.

- نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که اعمال نسبت-های مختلف فشار نگهداری موجب تغییر در تنش-های برشی ایجاد شده در سطح مشترک خاک و محیط اطراف حفریه از جمله زون سینه‌کار می‌شود.
- در نسبت فشار نگهداری ۱۰۰٪ می‌توان نتیجه گرفت که رفتار سینه‌کار مستقل از بارهای سطحی زمین است و در حالت تعادل الاستیک است و رفتار زمین تنها بوسیله خواص الاستیک کنترل می‌شود.
- کنترل رفتار سینه‌کار هنگامیکه نسبت فشار نگهداری بزرگتر از ۱۰۰٪ باشد، راحت‌تر است.
- حداقل مقدار فشار نگهداری ۷۴/۷۵۹ کیلوپاسکال و حداکثر آن در سینه‌کار تونل ۲۲۶/۵۴ کیلوپاسکال محاسبه شده است.
- نتیجه‌ای که از مقایسه این سه مقطع دریافت می‌شود، پیچیدگی پیش‌بینی پاسخ سینه‌کار به اعمال بار سطحی و فراوانی شرایط تاثیرگذار بر این پاسخ می‌باشد. برای مثال رابطه معینی میان بزرگی بار سطحی و پاسخ سینه‌کار وجود ندارد. از طرف دیگر اعمال بار سطحی (وزن ساختمان) در معیارهای طراحی در نظر گرفته شود.

فهرست واژگان

- ¹ Working Chamber
- ² Earth Pressure Balance
- ³ Cutter Head

[10] Davis, E.H., Gunn, M.J., Mair, R.J., and Seneviratne, 1980. "The Stability of Shallow Tunnels and Underground Opening in Cohesive Material", *Géotechnique* 30, No. 4, 397-416.

[11] Li Y., Emerialut F., Kastner R. and Zhang Z.X., 2009. "Stability Analysis of Large Slurry Shield-Driven Tunnel in Soft Clay", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp: 472-481.

[12] Mollon, G., Dias, D., and Subra, A.H., 2009. "Probabilistic Analysis of Circular Tunnels in Homogeneous Soil using Response Surface Methodology", *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp: 1314-1325.