نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره هشتم، شماره بیستم، سال ۱۳۹۲، صفحه ۳۷ تا ۴۸
Vol. 8, No. 20, 2013, pp. 37-48

تأثیر فشار نگهداری جبهه‌کار در حفر تونل به روش EPB بر تغییر شکل‌های سطحی و جبهه‌کار

ایمان خیراندیش[۱]; محمد فاروق حسینی[۲*] ; علیرضا طالبی‌نژاد[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه تهران Iman.kheyrandish@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهرانmfarogh@ut.ac.ir

۳-دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود و مدیر گروه تونل قطار شهری تبریزa_talebinejad@yahoo.com

(دریافت ۲۵ آذر ۱۳۹۱، پذیرش ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۲)

چکیده

از مهمترین پارامترها درحفاری تونل با ماشین‌های سپریِ بسته، مانند سپرهای فشار تعادلی زمین، تعیین بازه‌ی مناسبی از فشار جهت نگهداری جبهه‌کار تونل است، به این علت که جلوگیری از ناپایداری جبهه کار تونل هم از نظر ایجاد شرایط لازم برای برش و پیشروی و هم از نظر کنترل جابجایی‌ها در سطح زمین حایز اهمیت است. مطالعات زیادی با استفاده از روش‌های عددی برای تعیین اثرات بکارگیری فشارهای مختلف بر تغییر شکل‌های سطحی صورت گرفته است. هر یک از مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی بررسی اثر فشار نگهداری جبهه‌کار بر تغییرشکل‌های سطحی، برای یک شرایط خاص بوده و بازه‌ی بسیار محدودی از فشارهای مختلف را پوشش می‌دهند. همین‌طور اکثر مطالعات ذکر شده، حکایت از کاهش تغییر شکل‌های سطحی در اثر بکارگیری فشارهای نگهداریِ بزرگتر دارند. در این مقاله به بررسی میزان تأثیر فشار نگهداری بر میزان نشست و جابجایی‌های جبهه کار در شرایط مختلف پرداخته شد. با استفاده از مدل‌سازی‌های عددیِ سه بعدی به روش تفاضل محدود و با انجام آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای محیط حفاری و حفاری در اعماق مختلف، مشاهده شد که در همه‌ی حالات، افزایش فشار نگهداری در ابتدا باعث کاهش قابل توجه در میزان نشست‌ها شده ، پس از آن در بازه‌ای محدود، میزان این تأثیر کم و در نهایت با بکارگیری فشارهای بالاتر، علاوه بر ایجاد بالازدگی در جلوی جبهه‌کار، میزان نشست افزایش پیدا خواهد کرد، با این توضیح که در اعماق بیشتر و زوایای اصطکاک داخلی پایین‌ترِ محیط، حساسیت افزایش نشست نسبت به افزایش فشار نگهداری، بیشتر است. ضمن آنکه نتایج بدست آمده حاکی از آن دارد که حساسیت جابجایی‌های جبهه‌کار نسبت به تغییرات فشار نگهداری در محیط‌هایی با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت، چسبندگی متفاوت و یا در عمق‌های مختلف حفاری تقریبا یکسان است. به این معنی که در صورت افزایش یا کاهش فشار به مقدار مشخص، میزان تغییر جابجایی‌ها در دو محیط به هم نزدیک خواهند بود. در حالی که این موضوع در مورد محیط‌هایی با مدول تغییر شکل پذیری مختلف صدق نمی‌کند.

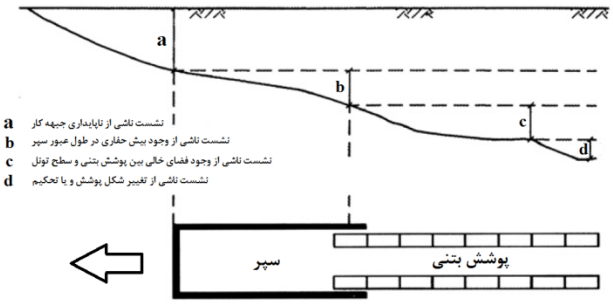
کلمات کلیدی

تونل‌سازی سپری، سپر فشار تعادلی زمین، روش تفاضل محدود، فشار نگهداری جبهه کار، نشست، جابجایی جبهه‌کار

۱- مقدمه

امروزه تمایل زیادی وجود دارد که تا حد امکان همگرایی در محیط اطراف سازه‌های زیرزمینی، به خصوص سازه‌های واقع شده در محیط‌های شهری اتفاق نیفتد. فشار نگهداری در جبهه کار تونل در حفاری به کمک سپرهای فشار تعادلی زمین[1] پارامتری موثر و تعیین کننده در کنترل جابجایی‌های جبهه‌کار و در برخی موارد جابجایی‌های سطح زمین است، بنابراین تخمین این پارامتر به صورت درست و با استفاده از روش‌های مختلف و یک ارزیابی مناسب از مخاطره‌ی شکست در جبهه‌کار تونل هم از نظر ایجاد یک محیط کاری ایمن و هم از نظر تخمین احتمال رخداد نشست‌های بزرگ، ضروری است. در عمل، فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌کار در تونل‌سازی با سپر فشار تعادلی زمین معمولاً اولین پارامتر کنترل کننده حین حفاری است.

جابجایی یا ناپایداری در جبهه‌کار تونل، جابجایی‌های محیطیِ ناشی از وجود فضای خالی بین سپر و سطح تونل یا پوشش بتنی و سطح تونل و همین‌طور تغییر شکل زمین در اثر تغییر شکل نگهداری و تحکیم، عوامل ایجاد نشست کلی در سطح زمین هستند (شکل ۱). به عبارت دیگر تنها بخشی از میزان نشست در سطح زمین در حفاری‌های پایدار را می‌توان با فشار نگهدارنده‌ی جبهه کار مرتبط دانست. . معمولا افت زمین ناشی از فعالیت در سینه کار ۱۰ تا ۲۰ درصد، افت در طول سپر ۴۰ تا ۵۰ درصد و افت پس از عبور سپر ۳۰ تا ۴۰ درصد افت کلی زمین را تشکیل می‌دهند [1]. با این وجود طراحی بهینه و کنترل مناسب فشار نگهداری در کنار طراحی و اجرای مناسب سایر پارامترهای موثر بر نشست می‌تواند تأثیر قابل توجهی در جلوگیری از بروز این پدیده به میزان غیر مجاز داشته باشد.



شکل ۱- مراحل نشست در تونل‌سازی سپری [۱]

از طرف دیگر، در اغلب موارد، بازه‌ای از فشار نگهداری به عنوان فشار مجاز معرفی می‌شود و اپراتور دستگاه سعی در حفظ فشار نگهداری در این بازه را دارد.

در طول دهه‌های اخیر افزایش استفاده از روش‌های عددی برای تخمین و پیش بینی نشست در سطح زمین ناشی از تونل سازی سپری قابل مشاهده است. این تخمین در ابتدا به کمک مدل‌سازی‌های دو بعدی صورت گرفت و در سال‌های اخیر با توجه به گسترش مدل‌های عددی سه بعدی به طور دقیق تر گسترش یافت. با این وجود مطالعات دقیق نسبتاً کمی برای بررسی اثر پارامترهای متنوع در تونل سازی سپری بر تغییر شکل‌های سطح زمین وجود دارد.

فینو و کلاف[2] در سال ۱۹۸۵ اثر فشار نگهدارنده‌ی جبهه کار در روش EPB و لایه بندی زمین بر روی تغییر شکل‌های سطحی را به طور دو بعدی مورد بررسی قرار دادند[2].

ابو فرسخ و تومای[3] نیز در سال ۱۹۹۹ به صورت دو بعدی مطالعاتی را برای تعیین اثر فشار نگهدارنده‌ی جبهه کار، نرخ تحکیم یافتن زمین و عمق تونل‌کاری بر تغییر شکل‌های سطح زمین و افزایش فشار منفذی انجام دادند[3].

در سال ۱۹۹۶ منصور[4] اثرات فشار نگهداری جبهه کار، فشار تزریق و مشخصات خاک را بر نشست در سطح زمین با استفاده از مدل سه بعدی بررسی کرد[4].

ابوکریشا[5] در سال ۱۹۹۸ مدل ارائه شده توسط منصور را برای بررسی اثر آب زیرزمینی بر تغییر شکل سطح زمین به کار برد. او تأثیر خصوصیات خاک و عمق حفاری بر تغییر شکل‌های زمین و سیستم نگهداری را با روش دو بعدی و اثر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر افزایش فشار منفذی را با روش سه بعدی مورد مطالعه قرار داد[5].

از مهمترین کارهای انجام شده می‌توان به مدل سه بعدی اجزاء محدود کسپر و مسک[6] در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد[7,6]. آنها مدل سازی سه بعدی را برای تونل سازی سپری در خاک‌های نرم و اشباع انجام دادند، به طوری که پارامترهای زیادی در این مدل با در نظر گرفتن پیشرفت مرحله به مرحله تونل مورد بررسی قرار گرفت. همین امر مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف بر فشار منفذی، تنش‌های ایجاد شده، تغییر شکل‌های خاک و تغییر شکل‌های لاینینگ را میسر نمود.

هر یک از مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی بررسی اثر فشار نگهداری جبهه‌کار بر تغییرشکل‌های سطحی برای یک شرایط خاص بوده و بازه‌ی بسیار محدودی از فشارهای مختلف را پوشش می‌دهند. همین‌طور تمامی مطالعات ذکر شده حکایت از کاهش تغییر شکل‌های سطحی در اثر بکارگیری فشارهای نگهداریِ بزرگتر دارند.

با توجه به اینکه انتظار می‌رود که در شرایط مختلف زمین شناسی و همین‌طور هندسه‌های مختلف حفاری، اثرات افزایش یا کاهش فشار و دور شدن از میزان بهینه تأثیرات متفاوتی بر

جابجایی‌های سطح زمین داشته باشد، لذا در این مقاله به بررسی میزان تأثیر فشار نگهداری بر میزان نشست و جابجایی-های جبهه کار در شرایط مختلف پرداخته می‌شود.

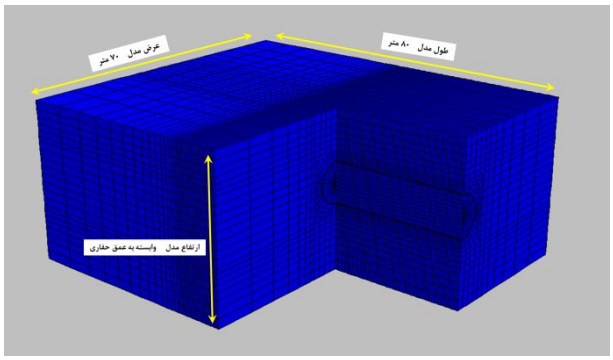
۲- مدل‌سازی عددی سه بعدی به روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل است. این روش برای تحلیل عددی محیط‌های پیوسته[۷]، پیوسته همراه با درزه[۸] و شبه پیوسته[۹] استفاده می‌شود.

در مدل‌سازی‌های عددی، انتخاب اندازه‌ی مش‌ها و فواصل بین گره‌ها، هم از نظر دقت پاسخ‌های بدست آمده و هم از نقطه نظر مدت زمان لازم برای حل مسأله دارای اهمیت است. در این پژوهش جهت رسیدن به یک حالت بهینه، مدل‌هایی با ابعاد مش‌بندی متفاوت ساخته و زمان اجرای آنها با یکدیگر مقایسه شد. در نهایت برای رسیدن به دقت مناسب، در اطراف محدوده‌ی حفاری، به دلیل آشفتگی در میدان‌های بر جای تنش و همینطور جابجایی‌های بزرگ‌تر، ابعاد مش‌ها نسبت به سایر نقاط، در مقاطع عرضی کوچکتر انتخاب گردید. همینطور در امتداد طولی بلوک، تا طول ۴۰ متری، فاصله‌ی بین گره‌ها ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. این موضوع باعث سهولت در مدل‌سازی حفاری مرحله به مرحله‌ی تونل و همین‌طور دستیابی به دقت مناسب می‌شود. با فاصله گرفتن از این نقطه، فاصله‌ی بین گره‌ها تا انتهای بلوک به تدریج بزرگتر انتخاب شد تا در زمان کوتاه‌تری حل مسأله ممکن شود.

برای تعیین ابعاد بلوک باید در نظر داشت که در مقطع عرضی و عمود بر محور تونل، عرض بلوک باید به گونه‌ای انتخاب شود که موقعیت تنش‌ها در اطراف مرز بلوک، مستقل از آشفتگی میدان تنش در اطراف حفاری باشند و مقدار آن‌ها با تنش‌های اولیه‌ی قبل از انجام حفاری برابر باشد.

به‌این منظور، بلوک‌هایی با ابعاد مختلف ساخته شد و وضعیت کنتورهای تنش، پس از عملیات حفاری بررسی گردید و مشاهده شد که در فاصله‌ی بیش از ۶ برابر شعاع تونل از مرکز آن، وضعیت کنتورهای تنش به حالت اولیه خود باز می‌گردند. بدین ترتیب عرض بلوک‌ها ۷۰ متر و طول آنها ۸۰ متر تعیین گردید (شکل ۲).



شکل ۲- نمای کلی از مدل ساخته شده‌ی اولیه

برای تطبیق هر چه بیشتر شرایط حفاری با واقعیت، همان-طور که اشاره شد، مدل‌سازیِ عملیات حفاری به صورت مرحله به مرحله و در گام‌های ۱/۵ متری (معادل طول سگمنت) صورت گرفت. قابل ذکر است که نتایج بدست آمده از حفاری کل تونل در یک مرحله با حفاری مرحله به مرحله آن مقایسه شده و به علت تفاوت در نتایج بدست آمده از مدل‌سازی مرحله به مرحله کمک گرفته شد.

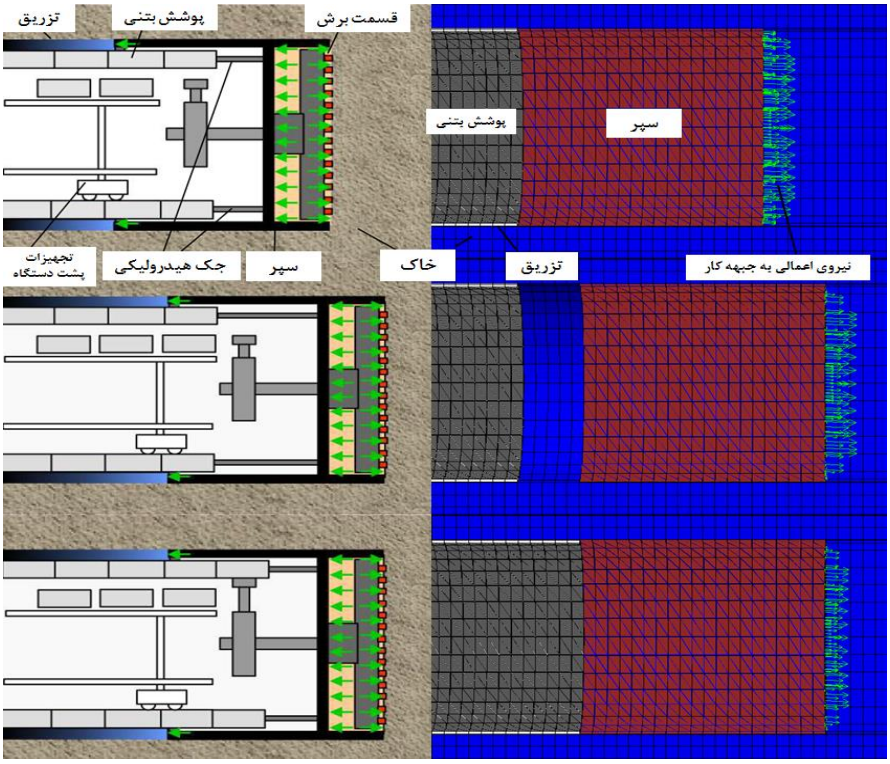
در حفاری، ابتدا یک گام به طول مشخص از تونل حفاری شده، سپس سپر ماشین حفاری به کمک جک‌های پیشران به سمت جلو رانده می‌شوند، پس از آن در فضای خالی ایجاد شده در پشت سپر، سگمنت‌های نگهداری نصب می‌شوند و در نهایت فضای پشت سگمنت‌های حفاری تا سطح تونل، به کمک تزریقِ دوغاب، پر می‌شود.

شکل ۳ مراحل مختلف پیشروی حفاری در واقعیت را به صورت شماتیک و مدل‌سازی صورت گرفته برای هر مرحله را نشان می‌دهد.

با توجه به خصوصیات محیط حفاری، مدل رفتاری پلاستیک موهر کلمب، به عنوان مدل مناسب برای توده خاک در نظر گرفته شد. خصوصیات مبنای بکارگرفته شده برای محیط حفاری در قالب جدول ۱ آورده شده‌اند. قابل ذکر است که این خصوصیات برگرفته از خصوصیاتِ بخشی از مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد می‌باشند.

جدول ۱- پارامترهای محیط حفاری جهت ساخت مدل اولیه

وزن مخصوص خشک خاک (KN/m3)	وزن‌مخصوص برجای خاک - γ (KN/m3)	چسبندگی خاک - c (Kpa)	زاویه اصطکاک داخلی خاک - φ(درجه)
۱۶/۵	۱۸	۱۴/۵	۳۰
مدول تغییر شکل پذیری توده‌ی خاک - E (Kpa)	مقاومت‌برشی زهکشی نشده خاک- C_u (Kpa)	ضریب‌فشار جانبی زمین در حالت سکون - K0	ضریب پواسون - ν
۳۰	٤۰	۰/۵۲	۰/۳



شکل ۳- مراحل مختلف پیشروی در حفاری با سپر EPB در واقعیت و مدل‌سازی صورت گرفته برای هر مورد

لازم به ذکر است که قطر نهایی تونل(قطر داخلی) ۸ متر و ضخامت پوشش بتنی ۳۵ سانتیمتر می‌باشد. همین طور ارتفاع روباره تا تاج تونل در مدل اولیه، ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب در انجام هر تحلیل حساسیت با ثابت ماندن سایر پارامترها (پارامترهای هندسی و پارامترهای محیط)، یکی از آن‌ها تغییر می‌کند. در ضمن با توجه به اینکه هدف بررسی تغییرات نتایج است و نه مقدار مطلق خروجی، خصوصیات محیط در تمامی بخش‌های بلوک، یکسان فرض شده است.

۳- تأثیر فشار نگهداری جبهه‌کار بر تغییرشکل‌ها در شرایط مختلف

در این پژوهش و درادامه، اثر اعمال فشارهای مختلف نگهداری در اعماق مختلف حفاری، در زمین‌هایی با چسبندگی‌های متفاوت، در زوایای اصطکاک داخلی مختلف و در نظر گرفتن مدول‌های تغییر شکل پذیری متفاوت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ضمن، با توجه به اینکه تغییر محیط حفاری در اکثر موارد همراه با تغییر تمامی‌پارامترهای فوق می‌باشد، لذا این مطالعه با در نظر گرفتن مشخصات میانگین چند نوع مختلف خاک نیز انجام خواهد شد.

۳-۱- تأثیر فشار نگهداری جبهه کار با تغییر زاویه اصطکاک داخلی محیط حفاری

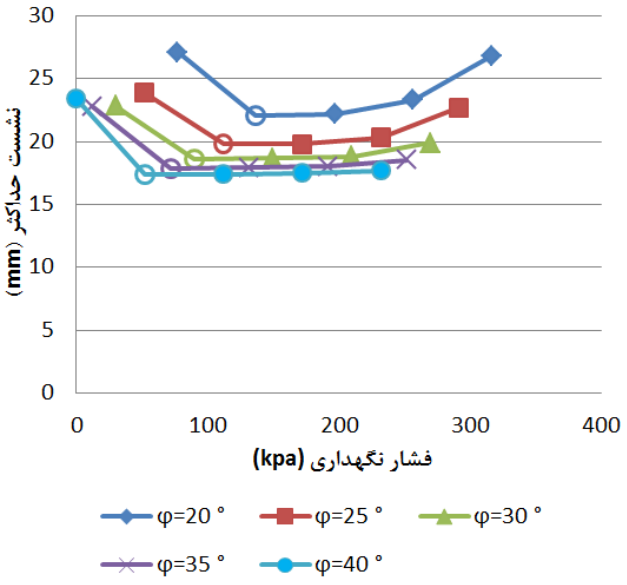
با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها، در پنج زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه به مطالعه‌ی اثر فشار نگهداری پرداخته می‌شود. زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ درجه معمولاً معرف خاک‌های نسبتاً آلی رسی و زاویه اصطکاک داخلی ۴۰ درجه در انواع خاک‌های ماسه‌ای دیده می‌شود[8].

می‌توان گفت که معمولاً زاویه اصطکاک داخلی در محیط‌های معمول حفاری در خارج از بازه‌ی فوق نخواهد بود. برای هر مورد، مدل‌سازی حفاری همانطور که گفته شد، به صورت مرحله به مرحله انجام گرفت و از راه حل تحلیلی ارائه شده توسط لکا و دورمیکس (مرز پایین تر) برای رسیدن به یک فشار نگهداری مبنا در هر مورد کمک گرفته شد. لکا و دورمیکس با استفاده از آنالیز حدی و انجام یک تحلیل سه بعدی، بحث پایداری جبهه کار تونل‌های دایره‌ای شکل را در حفاری‌های کم عمق مورد بررسی قرار دادند [9]. شکل ۴ حداکثر نشست در سطح زمین در فشارهای مختلف نگهداری را در محیط‌هایی بازاویه‌های اصطکاک داخلی مختلف نشان می‌دهد. در این شکل، هر منحنی، معرف تغییرات در نشست حداکثر با اعمال فشارهای مختلف نگهداری در یک زاویه اصطکاک داخلی ثابت می‌باشد و دایره‌ی توخالی در هر شکل، میزان نشست مرتبط با به‌کارگیری فشار نگهداریِ به دست آمده از روش لکا و دورمیکس را نشان می‌دهد. برای بدست

آوردن حداکثر نشست، در هر مورد، میزان جابجایی‌ها در کل مسیر بطور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه در این نمودارها نشست کلی(نشست ناشی از تأثیر همه‌ی پارامترهای موثر بر نشست) آورده شده است، باید گفت از آنجا که در هر بررسی، فشار نگهداری تغییر کرده و سایر پارامترها ثابت می‌باشند، میزان تغییرات جابجایی در سطح زمین و در جبهه‌کار تونل تنها ناشی از تغییرات فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌کار خواهد بود.

طبق این شکل، با اعمال فشاری به میزان ۶۰ کیلوپاسگال کمتر از فشار پیشنهاد شده توسط روش تحلیلی، میزان نشست به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه در این شکل این است که در فشارهای مختلفِ مورد بررسی قرار گرفته، کمترین میزان نشست مربوط به حالتی است که از فشار مربوط به راه حل تحلیلی استفاده شده است. علی‌رغم این‌که در نگاه اول ممکن است این دید وجود داشته باشد که همواره افزایش فشار، کاهش نشست را به دنبال خواهد داشت. افزایش نشست در اثر افزایش فشار نگهداری، در محیط‌هایی که دارای زاویه‌ی اصطکاک داخلی کمتری هستند قابل توجه‌تر می‌باشد. به طوری که در زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۲۰ درجه، با اعمال فشاری برابر با ۳۱۷ کیلوپاسگال، میزان نشست نسبت به حالتی که از فشار نگهداریِ به دست آمده از روش لکا و دورمیکس استفاده شود، به میزان ۵ میلیمتر افزایش می‌یابد. این عدد با توجه به اینکه تنها بخشی از نشست‌ها مربوط به فشار نگهداری است، عدد قابل توجهی می‌باشد، در حالی که در زوایای اصطکاک داخلی بالا مقدار افزایش نشست بسیار ناچیز است.

به طور کلی روند تمامی منحنی‌ها حاکی از آن است که افزایش فشار نگهداری تا مرز مشخصی موجب کاهش نشست خواهد شد. پس از آن در بازه‌ی خاصی میزان این تأثیرات ناچیز بوده و در نهایت در فشارهای بالا، افزایش نشست‌ها را به همراه خواهد داشت. علت افزایش نشست در اثر اعمال فشارهای نگهدارنده‌ی خیلی بالا را می‌توان به‌وجود آمدن محیط پلاستیک در زونِ اطراف جبهه‌کار، هنگام عبور دستگاه از یک مقطعِ مشخص دانست. به‌طوری که این محیط پلاستیک، پس از عبور دستگاه، جابجایی‌های بیشتری را از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که در ادامه دیده خواهد شد، افزایش فشار نگهداری باعث ایجاد تغییر شکل‌های قابل توجهی در جبهه‌کار تونل و در جهت پیشروی می‌شود.



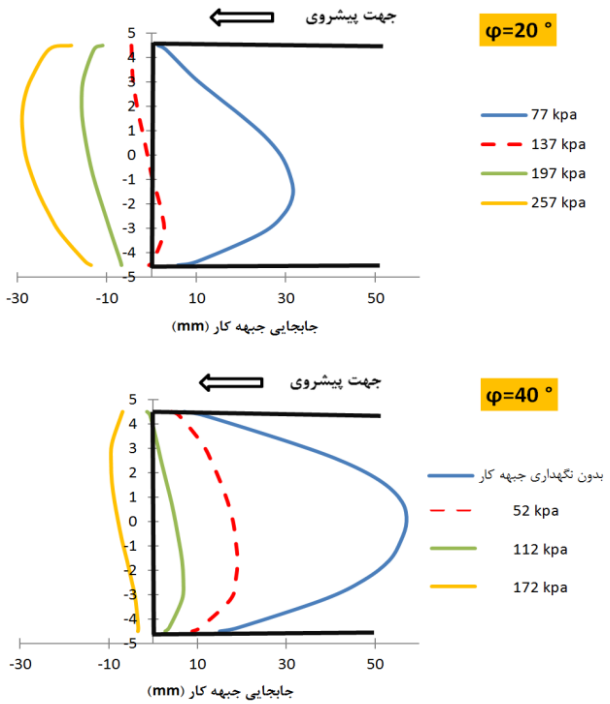
شکل ۴- تأثیر بکارگیری فشارهای مختلف نگهداری بر نشست حداکثر در محیط‌هایی با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت

با مقایسه‌ی نمودارها دیده می‌شود که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی مقدار عدد پیشنهاد شده از روش لکا و دورمیکس برای نگهداری جبهه‌کار کاهش می‌یابد.

اما با توجه به ارتباط مستقیم فشار نگهداری با جابجایی جبهه کار تونل، حتی در مواردی که اثر این فشار بر جابجایی‌های سطح زمین ناچیز باشد، امکان تأثیر قابل توجه آن بر تغییر شکل در جبهه کار وجود دارد. در دو زاویه اصطکاک داخلی مختلف و در هر حالت با اعمال چهار فشار مختلف نگهداری، جابجایی‌ها در نقاط مختلف جبهه کار تونل اندازه گیری شده و در قالب شکل ۵ آورده شده‌اند.

در اینجا نیز منحنی نشان داده شده با خطوط منقطع، روند جابجایی‌ها در جبهه کار تونل پس از اعمال فشار نگهداریِ پیشنهاد شده از روش لکا و دورمیکس را نشان داده و سایر خطوط، جابجایی‌ها را با مدنظر قرار دادن یک فشار نگهدارنده به میزان ۶۰ کیلوپاسگال کوچکتر و در فشارهای نگهدارنده به میزان ۶۰ و ۱۲۰ کیلوپاسگال بزرگتر از عدد بدست آمده از حل تحلیلی نشان می‌دهند. این موضوع در مورد سایر بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش نیز صدق می‌کند.

مطابق این شکل در مقادیری بزرگتر و کوچکتر از فشار حاصل از حل تحلیلی، به ازای افزایش مشخصی در فشار جبهه-کار، در هر دو محیط به میزان تقریبا یکسانی جابجایی‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر حساسیت جابجایی‌های جبهه-کار نسبت به تغییرات فشار نگهداری در محیط‌هایی با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت، تقریبا یکسان است.

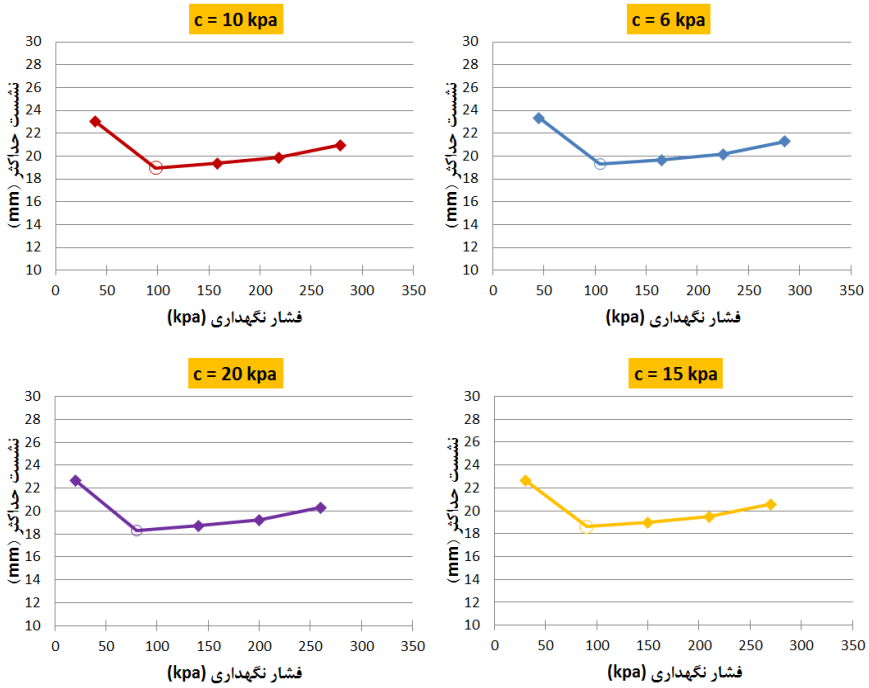


شکل ۵- تغییر شکل در جبهه کار تونل با اعمال فشارهای مختلف نگهداری در دو محیط با زوایای اصطکاک داخلی متفاوت

۳-۲- تأثیر فشار نگهداری جبهه کار با تغییر چسبندگی محیط حفاری

برای بررسی تأثیر چسبندگی محیط، با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترهای بخش قبل، مدل‌هایی برای محیط غیر چسبنده و محیط‌هایی با چسبندگی ۶، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوپاسگال تهیه شد. در هر مدل، عدد بدست آمده از روش لکاو دورمیکس به عنوان فشار نگهداری مبنا مورد استفاده قرار گرفت و در فشارهای نگهدارنده‌ی بیشتر و کمتر از این مقدار، میزان جابجایی‌های عمودی در سطح زمین بدست آمد. شکل ۶ حداکثر نشست در سطح زمین در فشارهای مختلف نگهداری را در محیط‌هایی با چسبندگی متفاوت نشان می‌دهد. هر شکل مربوط به محیطی با یک چسبندگی معین بوده و در هر مورد، دایره‌ی توخالی میزان نشست در سطح زمین پس از اعمال فشار نگهداریِ بدست آمده از روش لکا و دورمیکس را نشان می‌دهد.

در شکل مشاهده می‌شود که کمترین میزان نشست در بین فشارهای نگهدارنده‌ی حاضر، با به‌کارگیری فشار به‌دست آمده از روش تحلیلی حاصل خواهد شد و با استفاده از فشارهای کمتر و حتی بیشتر، میزان نشست حداکثر افزایش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه این است که هر چهار نمودارِ این شکل از یک روند تبعیت می‌کنند (بر خلاف آنچه در مورد اثر زاویه‌ی اصطکاک داخلی دیده شد).



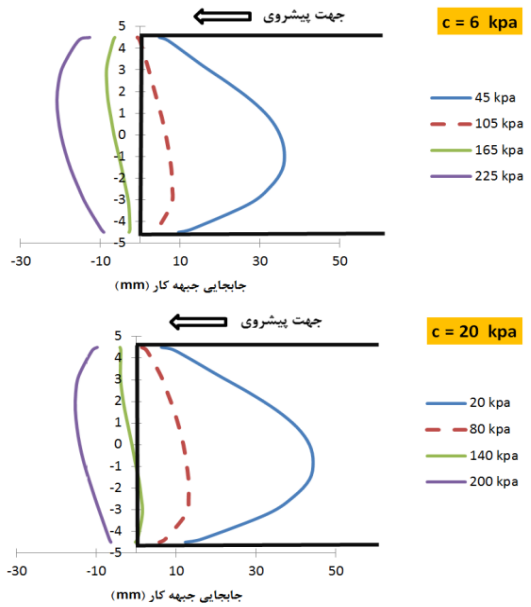
شکل۶- تأثیر بکارگیری فشارهای مختلف نگهداری بر نشست حداکثر در محیط‌هایی با چسبندگی متفاوت

لذا به نظر می‌رسد که در محیط‌های با چسبندگی مختلف، حساسیت تغییر شکل‌های سطحی نسبت به استفاده از مقادیر مختلف فشار نگهداری، تقریبا یکسان است ودر هر محیط، افزایش فشار نگهداری تا مرز مشخصی موجب کاهش نشست و پس از آن افزایش نشست‌ها را به همراه خواهد داشت.

برای مطالعه‌ی اثر اعمال فشارهای مختلف بر جابجایی‌های

جبهه کار تونل در محیط‌هایی با چسبندگی متغیر، منحنی‌های تغییر شکل جبهه کار تونل با اعمال چهار فشار نگهداری، در چسبندگی‌های ۶ و ۲۰ کیلوپاسگال در شکل ۷ آورده شده است. دو منحنی رسم شده با خطوط منقطع، جابجایی‌ها پس از اعمال فشار حاصل از روش لکا و دورمیکس را نشان می‌دهند.

با توجه به شکل، در اینجا نیز حساسیت جابجایی‌های جبهه‌کار نسبت به تغییرات فشار نگهداری در محیط‌هایی با چسبندگی متفاوت، تقریبا یکسان است.



شکل ۷- تغییر شکل در جبهه کار تونل با اعمال فشارهای مختلف نگهداری در دو محیط با چسبندگی‌های متفاوت

۳-۳- تأثیر فشار نگهداری جبهه کار در محیط‌هایی با مدول تغییر شکل پذیری متفاوت

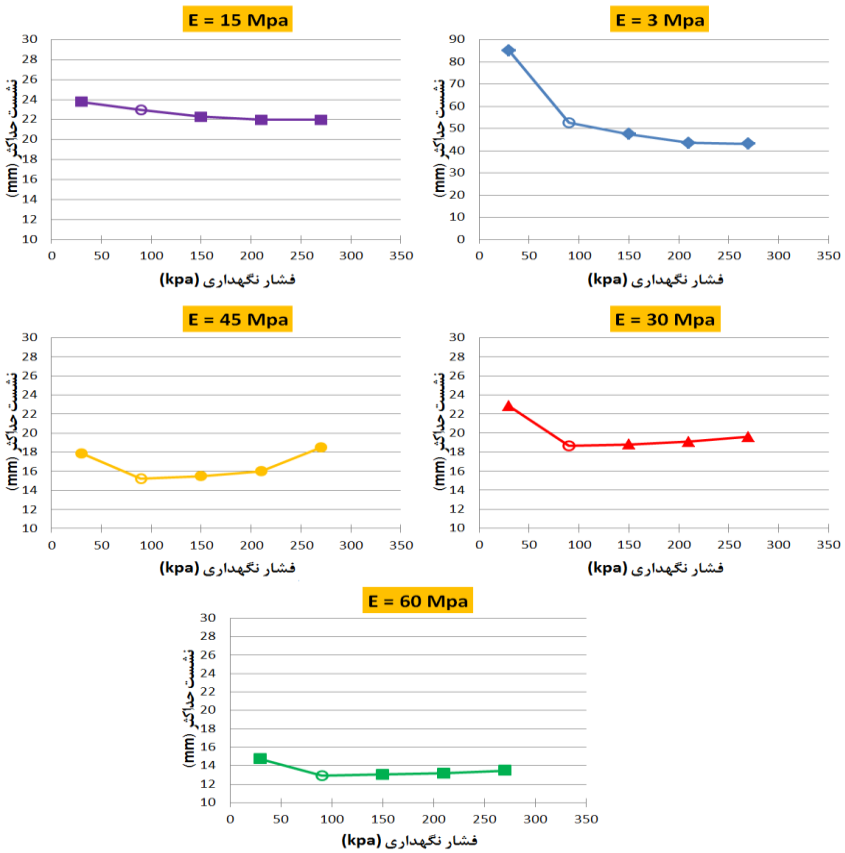
پنج مدول تغییر شکل پذیری مختلف که تقریباً تمامی‌محیط‌های خاکی معمول که در آنها حفاری صورت می‌گیرد را دربر می‌گیرند، برای انجام این مطالعه انتخاب شد. این مقادیر عبارتند از ۳، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ مگا پاسگال. جهت همخوانی روند انجام مطالعه با بخش‌های قبل، در اینجا نیز عدد بدست آمده از روش لکا و دورمیکس به عنوان فشار نگهداری مبنا در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در این راه حل تحلیلی، مقدار فشار نگهداری به طور مستقیم به مدول تغییر شکل پذیری زمین وابسته نیست، لذا در هر ۵ حالت، فشار نگهداری مبنا با هم برابر خواهند بود.

شکل ۸ نشان دهنده‌ی جابجایی‌های عمودی حداکثر سطح زمین با بکارگیری فشارهای مختلف و در محیط‌هایی با مدول تغییر شکل پذیری متفاوت است. دایره‌های توخالی مربوط به فشار حاصل از روش لکا و دورمیکس می‌باشند.

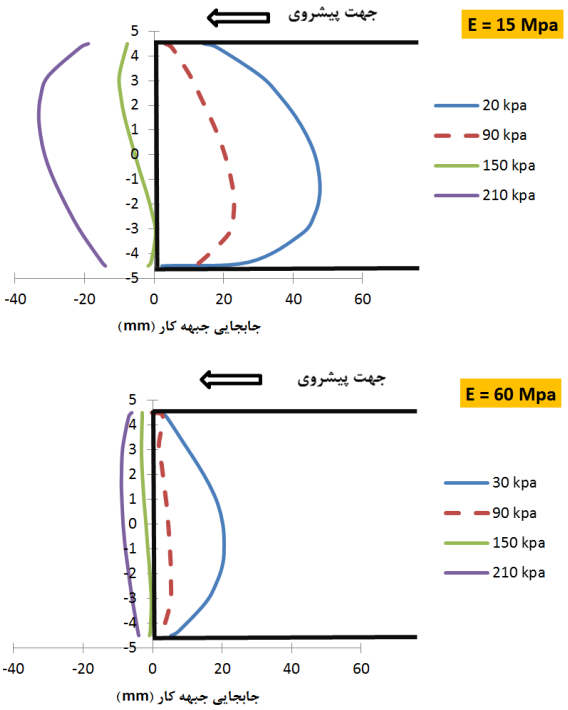
با در نظر گرفتن ۵ فشار مشخص در هر ۵ نمودار، آنچه که از شکل بر می‌آید این است که در مدول تغییر شکل پایین، با افزایش فشار نگهداری در محدوده‌ی فشارهای انتخاب شده، همواره شاهد کاهش نشست حداکثر با شیب کند شونده هستیم. میزان این تأثیرات در مدول‌های بالاتر کاهش پیدا می‌کند، تا جایی که اگر مدول تغییر شکل محیط ۳۰ مگاپاسگال فرض شود، مشابه قبل، در همان فشارهای نگهدارنده ابتدا افزایش فشار نگهداری تا مرز مشخصی موجب کاهش نشست و پس از آن افزایش نشست‌ها را به همراه خواهد داشت، مجددا در مدول‌های تغییر شکل خیلی بالا میزان این تأثیرات کم خواهد شد. با توجه به تغییرات این روند در مدول‌های مختلف لزوم بررسی بیشتر این موضوع با افزایش تعداد مطالعات ضروری به نظر می‌رسد.

در دو محیط با مدول‌های تغییر شکل پذیری ۱۵ و ۶۰ مگاپاسکال و در هر مورد، با اعمال چهار فشار نگهدارنده، جابجایی‌های جبهه کار تونل مورد بررسی قرار گرفت که میزان جابجایی‌ها و روند تغییر شکل جبهه کار تونل در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل در محیطی با مدول بالاتر میزان تأثیر افزایش یا کاهش فشار نگهداری بر جابجایی جبهه کار کمتر است. از طرف دیگر روش‌های تحلیلی مانند روش لکا و دورمیکس برای محیط‌های با مدول مختلف (در صورت ثابت بودن سایر پارامترها)، فشار یکسانی را پیشنهاد می‌دهند، در حالی که در دو شکل دیده می‌شود که در دو فشار نگهداریِ برابر، میزان جابجایی‌های جبهه‌کار دارای اختلاف معنی‌داری است، لذا لزوم توجه بیشتر در طراحی فشار نگهداری با تغییر یافتن مدول تغییر شکل زمین و همین‌طور دقت بیشتر در اجرای آن ضروری به نظر می‌رسد.

در ضمن به همین علت و با توجه به اینکه جابجایی‌های جبهه کار به نوعی معرف پایداری یا عدم پایداری آن هستند، می‌توان گفت که یکی از نقاط ضعف در روش‌های تحلیلی عدم در نظر گرفتن مدول تغییر شکل محیط جهت پیشنهاد دادن فشار نگهداریِ مورد نیاز می‌باشد.



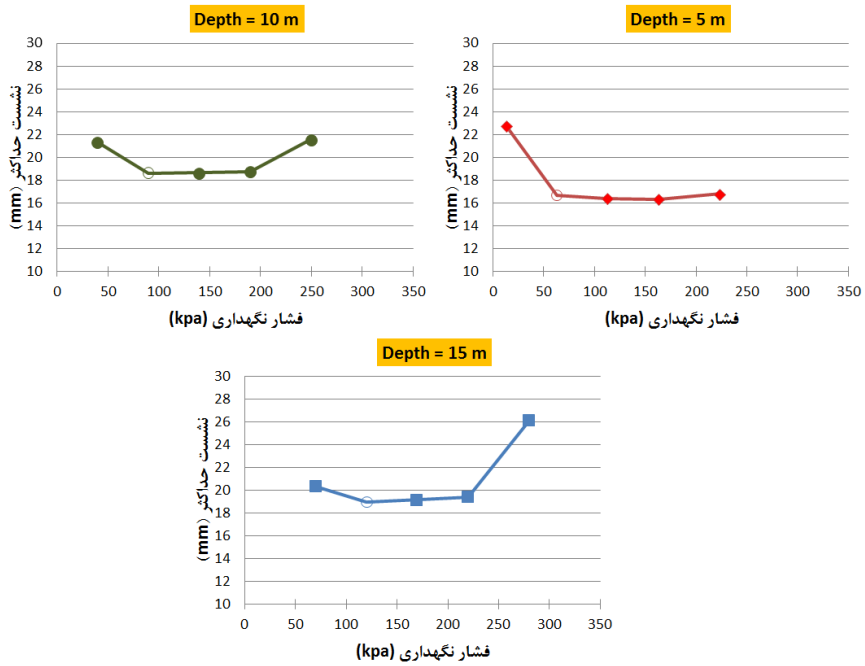
شکل ۸- تأثیر بکارگیری فشارهای مختلف نگهداری بر نشست حداکثر در محیط‌هایی با مدول تغییر شکل پذیری متفاوت



شکل ۹- تغییر شکل در جبهه کار تونل با اعمال فشارهای مختلف نگهداری در محیط‌هایی با مدول تغییر شکل ۱۵ و ۶۰ مگاپاسکال

۳-۴- تأثیر فشار نگهداری جبهه کار بر تغییر شکل‌ها در اعماق مختلف حفاری

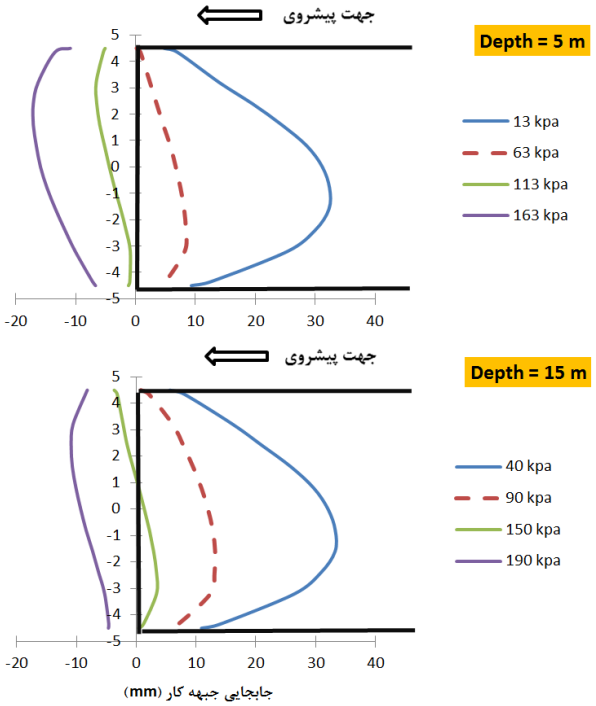
برای بررسی تأثیر فشار نگهداری بر تغییر شکل‌ها در سطح زمین و همین‌طور در جبهه کار تونل در اعماق مختلف حفاری، با در نظر گرفتن اعماق حفاری معمول در محیط‌های شهری، مدل‌سازی در سه عمق مختلف انجام شد. ارتفاع تاج تونل تا سطح زمین در این سه حالت ۵، ۱۰ و ۱۵ متر در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در این بخش بحث تأثیر فشار نگهداری در حضور تنش‌های حاصل از مقادیر مختلف روباره‌ی تونل مدنظر است. همانند حالت‌های قبل، شکل ۱۰ بیانگر میزان نشست حداکثر با بکارگیری فشارهای مختلف و در اعماق مختلف حفاری می‌باشد. دایره‌های توخالی، نشست حداکثرِ مرتبط با اعمال فشار نگهدارنده‌ی حاصل از روش لکا و دورمیکس را نشان می‌دهند. شیب بیشتر در نمودار شکل‌های مربوط به اعماق حفاری کمتر نشان دهنده‌ی حساسیت بیشتر تغییر شکل‌ها در سطح زمین نسبت به اعمال فشارهای مختلف نگهداری در اعماق کمتر است. به‌طوری که در عمق حفاری بیش از ۱۰ متر این حساسیت کاهش می‌یابد. طبق این شکل و



شکل۱۰- تأثیر بکارگیری فشارهای مختلف نگهداری بر نشست حداکثر در اعماق مختلف حفاری

با استفاده از یک روش تحلیلی خاص، در عمق‌های حفاری کمتر میزان تغییر شکل‌های حداکثر در سطح زمین کمتر است. این امر به علت ضخامت کم روباره می‌باشد. اما انتظار می‌رود که در عمق‌های بزرگتر، با افزایش عمق، میزان نشست کاهش پیدا کند. کاهش شیب در شکل ۱۰ نیز در جهت همین امر است. با در نظر گرفتن دو عمق حفاری ۵ و ۱۵ متر، مقدار جابجایی در نقاط مختلف جبهه کار تونل و روند تغییر شکل آن با اعمال چهار فشار نگهدارنده‌ی مختلف اندازه گیری شد. شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی نحوه‌ی تغییر شکل جبهه کار تونل در شرایط فوق می‌باشد. (خطوط منقطع تغییر شکل جبهه کار با اعمال فشار نگهدارنده‌ی حاصل از لکا و دورمیکس را نشان می‌دهند).

نمودارهای شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی قابل صرفنظر بودن اثرات تغییرات فشار نگهداری بر جابجایی‌های جبهه کار در شرایط حفاری در اعماق مختلف می‌باشد. چرا که منحنی‌های متناظر در هر دو حالت تقریباً هم از نظر کمیت اختلاف جابجایی‌ها در نقاط مشابه و هم از نظر روند تغییر شکل‌ها در جبهه کار تونل، شرایط یکسانی را توصیف می‌کنند.



شکل ۱۱- تغییر شکل در جبهه کار تونل با اعمال فشارهای مختلف نگهداری در اعماق حفاری ۵ و ۱۵ متر

۳-۵- تأثیر فشار نگهداری جبهه کار بر تغییر شکل‌ها با تغییر همزمان پارامترهای مختلف زمین شناسی

همانطور که در بخش‌های گذشته دیده شد، با تغییر بعضی از پارامترهای محیط حفاری، نسبت به تغییر پیدا کردن سایر پارامترها، اعمال فشارهای مختلف نگهداری تأثیر بیشتری بر تغییر شکل‌ها در جبهه کار تونل و یا سطح زمین دارد.

با توجه به اینکه تغییر محیط حفاری معمولاً همراه با عوض شدن بیشتر و یا تمامی‌پارامترهای مورد مطالعه قرار گرفته

می‌باشد، بسته به همسو بودن یا غیر همسوبودن تأثیر هر یک از پارامترهای تغییر یافته، انتظار می‌رود که تغییرات فشار نگهداری اثرات مختلفی بر روی تغییرشکل‌ها داشته باشد. در این بخش، با در نظر گرفتن خصوصیات میانگین برخی از خاک‌های متداول، اثر فشار نگهدارنده بر جابجایی در نقاط مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

خصوصیات شاخص ۴ نوع محیطِ در نظر گرفته شده برای انجام این مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

دو نوع اول از خاک‌های فوق، برگرفته از بخش‌هایی از محیط حفاری در خط ۲ متروی مشهد بوده و ۲ نوع دیگر جهت گسترش بحث و پوشش بیشتر انواع محیط‌های حفاری و با توجه به خصوصیات کلی این خاک‌ها انتخاب شده‌اند[8].

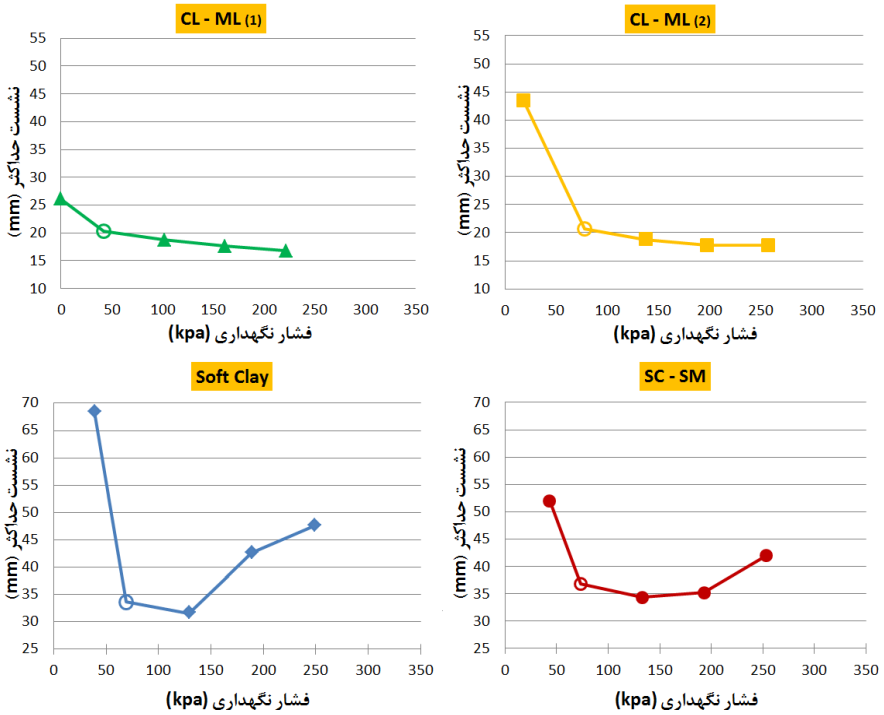
تحلیلی به عنوان فشار نگهداری مبنا انتخاب شده و با حل مسأله در هر مورد و با اعمال فشارهای بیشتر و کمتر از فشار مبنا و بررسی جابجایی‌ها در تمامی‌نقاط سطحی در امتداد محور تونل، میزان نشست حداکثر معین شد. شکل ۱۲ میزان نشست حداکثر با بکارگیری فشارهای مختلف در محیط‌های مختلف حفاری را به‌طور جداگانه نشان می‌دهد. دایره‌ی توخالی در هر شکل مربوط به فشار نگهدارنده‌ی حاصل از روش لکا و دورمیکس می‌باشد.

مطابق شکل، اگر تغییر محیط همراه با تغییر اکثر پارامترهای زمین باشد، بسته به میزان تأثیرگذاری هر پارامتر، حساسیت‌های مختلفی نسبت به تغییرات فشار جبهه‌کار وجود خواهد داشت.

یک فشار نگهداری همانند بخش‌های قبل با استفاده از حل

جدول ۲- خصوصیات خاک‌های مختلف برای انجام بررسی تأثیر فشار نگهداری بر جابجایی‌ها در محیط‌های مختلف

خصوصیت / نوع خاک	علامت	γ - (KN/m3)	c -(Kpa)	φ - (درجه)	E -(kpa)	ν
رس لای دار همراه با حضور موضعی شن	CL – ML (1)	۱۶/۵	۹/۸۱	۲۵	۱۱۷۸۰	۰/۳۵
رس لای دار همراه با حضور موضعی شن	CL – ML (2)	۱۸	۳۹	۲۴	۱۶۰۰۰	۰/۳۵
ماسه‌ی رس و لای دار	SC - SM	۱۸/۵	۴/۹	۳۲/۲	۶۰۰۰	۰/۳۵
ماسه‌ی نرم	Soft clay	۱۲	۷	۲۰	۲۵۰۰	۰/۲



شکل ۱۲- تأثیر به‌کارگیری فشارهای مختلف نگهداری بر نشست حداکثر با حفاری در خاک‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر افزایش یا کاهش فشار نگهداری بر تغییر شکل‌ها در سطح زمین و جبهه‌کار، در محیط‌ها و اعماق مختلف حفاری، مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج حاصل از این مطالعه به طور خلاصه بیان می‌شود:

- اگر چه در نگاه اول به نظر می‌رسد که فشارهای بالای نگهداری جبهه کار باعث‌کنترل نشست درسطح زمین می‌شوند، اما اعمال فشارهای خیلی زیاد علاوه بر تخریب قسمت برش دستگاه حفاری، ایجاد محیط پلاستیک در جبهه‌کار و بالازدگی‌های سطحی جزئی، در نقاط دورتر از جبهه‌کار تونل باعث افزایش در میزان نشست‌های سطحی خواهند شد.

- به طور کلی، افزایش فشار نگهداری تا مرز مشخصی موجب کاهش نشست خواهد شد. پس از آن در بازه‌ی خاصی میزان این تأثیرات ناچیز بوده و در نهایت در فشارهای بالا، افزایش نشست‌ها را به همراه خواهد داشت.

- با ثابت ماندن سایر پارامترهای محیط و هندسه‌ی حفاری، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که در زاوایای اصطکاک داخلی پایین، اثرات به‌کارگیری فشارهای نگهداری بالا بر افزایش نشست‌های سطحی برجسته تر است. به عبارت دیگر در زوایای اصطکاک داخلی پایین، بازه‌ی کوچکتری از فشارنگهداری وجود دارد که تأثیرات آن بر جابجایی‌ها ناچیز باشد.

- در محیط‌های با چسبندگی مختلف، حساسیت تغییر شکل‌های سطحی نسبت به استفاده از مقادیر مختلف فشار نگهداری، تقریبا یکسان است و در هر محیط افزایش فشار نگهداری تا مرز مشخصی موجب کاهش نشست و پس از آن افزایش نشست‌ها را به همراه خواهد داشت.

- در عمق‌های مختلف حفاری نیز همین روند وجود دارد، با این تفاوت که در محدوده اعماق ۵ تا ۱۵ متر، با افزایش عمق ، اثرات افزایش فشار بر افزایش نشست‌های سطحی بیشتر است.

- روش‌های تحلیلی مانند روش لکا و دورمیکس برای محیط‌های با مدول تغییر شکل‌پذیری مختلف (در صورت ثابت بودن سایر پارامترها)، فشار یکسانی را پیشنهاد می‌دهند، در حالی که با استفاده از نتایج حل عددی دیده می‌شود که در دو فشار نگهداریِ برابر، میزان جابجایی‌های جبهه‌کار در دو مدول مختلف دارای اختلاف معنی‌داری هستند، لذا لزوم توجه بیشتر در طراحی فشار نگهداری با تغییر یافتن مدول تغییر شکل زمین ضروری به نظر می‌رسد.

۵- مراجع

[1] Leca.E, 2007, *Settlements induced by tunneling in Soft Ground*, Tunnelling and Underground Space Technology, vs.22, pp: 119–149.

[2] Finno, J. R., Clough, G.W., 1985, *Evaluation of soil respone to EPB shield Tunneling*, journal of Geotechnical eng, pp: 111-155.

[3] Abu-Farsakh, M.Y., Tumay, M.T., 1999, *Finite element analysis of ground response due to tunnel excavation in soils*, In: Fernandez,G., Bauer, R. (Eds.), Geo-Engineering for Underground Facilities, ASCE Geotechnical Special Publication No. 90, pp: 514–525.

[4] Mansour, M.A.M., 1996. *Three-dimensional numerical modelling of hydroshield tunnelling*, Ph.D. Thesis, University of Innsbruck.

[5] Abu-Krisha, A.A.M., 1998. *Numerical modelling of TBM tunneling in consolidated clay*, Ph.D. Thesis, University of Innsbruck.

[6] Kasper, T., Meschke, G., 2006, *On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling*, Published by Elsevier Science Ltd.

[7] Meschke, G., Nagel, F., Stascheit, J., Kasper, T., 2007, *Advanced numerical simulation of shield tunneling and its rolein the design process*, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling .

[8] براجا، ام. داس.، ترجمه شاپور طاحونی، (۱۳۸۶)، **اصول مهندسی ژئوتکنیک**، جلد اول، انتشارات پارس‌آیین، چاپ پانزدهم.

[9] Leca, E. Dormieux, L., 1990, *Upper and Lower Bound Solutions for The Face Stability of Shallow Circular Tunnels in Frictional Material*, Geotechnique , Vol. 40, No.4,pp: 581-606.

[1] Earth pressure balance shield - EPBs
[2] Finno & Clough
[3] Abu-Farsakh and Tumay
[4] Mansour
[5] Abu- Krisha
[6] Kasper & Meschke
[7] continuum
[8] continuum and joints
[9] Pseudo continuum