

ارزیابی اثرات ضریب فشار جانبی خاک (K) بر نیروهای سازه‌ای پوشش نهایی در تونل‌های کم عمق شهری حفر شده به روش NATM

ناصر عرفاتی^{۱*}، سیده فاطمه احمدیان^۲، نوید جوشیده^۳

۱- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تفرش، Nasser.Arafati@gmail.com

۲- کارشناس ارشد خاک و پی دانشگاه دانشگاه تفرش، Sf.ahmadiyan@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی دانشگاه محقق اردبیلی، n.joushideh@yahoo.com

خلاصه

یکی از موضوعات مهم در تونل‌سازی ارزیابی نیروهای سازه‌ای در پوشش نهایی است. در تونل‌های کم عمق که معمولاً در محیط‌های شهری اجرا می‌شوند، پایداری تونل عمدتاً وابسته به سیستم پوشش نهایی تونل می‌باشد از این رو به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر نیروهای سازه‌ای (نیروی محوری، گشتاور خمشی) یک تحلیل کاملاً سه‌بعدی مورد نیاز است. در این مقاله با استفاده از روش عددی به بررسی تغییرات نیروهای پوشش نهایی تحت اثر مقادیر مختلف ضریب فشار جانبی خاک در اثر حفر تونل‌های کم عمق شهری حفاری شده به روش NATM پرداخته شده است. تونل مورد مطالعه با نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS ۳D TUNNEL مدل‌سازی شده و نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مقادیر نیروهای سازه‌ای) در طول مسیر حفاری تونل (محور Z) ثابت نیستند و به صورت زیگزاگی نوسان می‌کنند و با افزایش ضریب فشار جانبی خاک (k) تا ۱، مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی کاهش و با افزایش k برای مقادیر بزرگتر از ۱ این نیروها افزایش می‌یابند.

کلمات کلیدی: ضریب فشار جانبی خاک، PLAXIS ۳D، تونل کم عمق، نیروهای سازه‌ای.

۱. مقدمه

تونل‌سازی زیرزمینی به طور اجتناب ناپذیری موجب تغییر وضعیت زمین در اطراف ناحیه حفاری و سطح زمین می‌شود که این تغییرات باعث آسیب به سازه‌های موجود و ایجاد خطرهای محیطی شود. یک راه ضروری برای کاهش اثرات مخرب، توانایی پیش‌بینی این تغییرات تا حد امکان است. اهمیت موضوع مورد نظر تحقیقات قابل توجهی را برای توسعه روش جهت پیش‌بینی بهتر جابجایی‌های ناشی از تونل‌زنی سبب می‌شود [۱]. پارامترهای زیادی بر جابجایی‌های ناشی از تونل‌سازی موثر هستند که (k) یکی از مهمترین این کمیت‌ها می‌باشد.

کارشناس ارشد خاک و پی دانشگاه دانشگاه تفرش
Sf.ahmadiyan@yahoo.com

در این مقاله، ابتدا مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه زیگزاگی بودن نمودارهای سازه‌ای و نقش ضریب فشار جانبی خاک در حفاری تونل‌های کم‌عمق ارائه خواهد شد، سپس در بخش‌های بعدی پس از معرفی هندسه مدل، نحوه مدل-سازی بیان می‌گردد و نتایج به صورت نمودارهای سازه‌ای حاصل از تحلیل سه بعدی NATM در مقادیر مختلف ضریب فشار جانبی خاک ارائه می‌شود.

۲. نمودارهای سازه‌ای

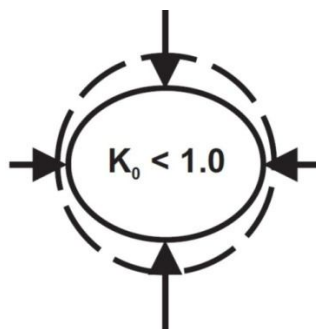
بر خلاف سایر نمودارها، نمودارهای سازه‌ای در جهت Z (مسیر حفاری تونل) از روند یکتایی پیروی نمی‌کنند و دارای نوسان زیگزاگی هستند. شاید این طرح زیگزاگی عجیب به نظر برسد ولی منطقی است. علت مراحل متفاوت گام حفاری است که در هر گام به طول d متر، حفاری و نصب پوشش انجام می‌شود. البته در جبهه کار حفاری (بخش ابتدایی گام حفاری)، پوشش بلافاصله نصب نمی‌شود و پدیده قوسی شدن اتفاق می‌افتد و در نتیجه قسمت ابتدایی هر گام حفاری بارگذاری شدیدتری نسبت به بخش پایانی مشاهده می‌شود، یعنی نیروی محوری و گشتاور خمشی بیشتری به این قسمت وارد می‌شود که این امر باعث ایجاد یک نوسان در مقدار بارگذاری شده و با کنار هم گذاشتن این مقادیر در راستای محور Z (مسیر حفاری تونل) یک نمودار زیگزاگی بدست می‌آید. معمولاً برای طراحی پوشش نهایی از مقادیر متوسط طرح زیگزاگی استفاده می‌شود. [۳،۲]

۳. ضریب فشار جانبی خاک در حفاری تونل‌های کم‌عمق

شکل زیر یک المان خاک را نشان می‌دهد که ضریب فشار جانبی آن کوچکتر از یک است. طبق رابطه زیر تنش قائم بزرگتر از تنش افقی می‌شود.

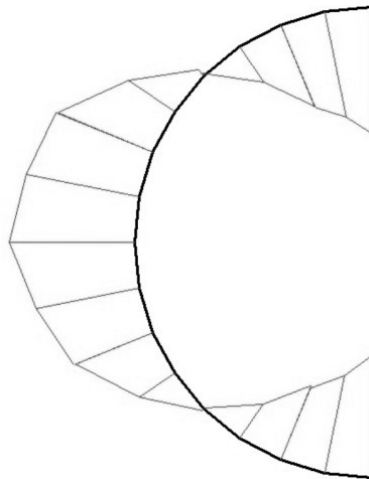
$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (1) \quad \text{اگر } k_0 < 1$$

مطابق شکل ۱ بردار قائم بزرگتر از بردار افقی است. غالب بودن تنش قائم بر تنش افقی موجب تغییر شکل تونل از حالت دایره به شکل بیضی افقی می‌شود (خط تیره وضعیت تغییر یافته المان در حالت $K_0 < 1$ را نشان می‌دهد).



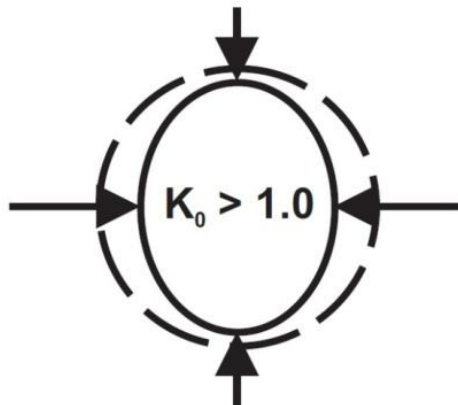
شکل ۱- تغییر شکل المان خاک در شرایط $k_0 < 1$

هنگامی که تونل در خاکهای با $K_0 < 1$ حفاری می‌شود، چون تنش‌ها در جهت قائم بزرگترند این مساله موجب حرکت بیشتر زمین در جهت قائم می‌شود، در نتیجه در صورت عدم نسب فوری سیستم نگهداری، زمین به سمت تاج و کف تونل حرکت می‌کند و این فشار موجب انحراف تاج و کف به سمت داخل و دیواره تونل به سمت بیرون می‌شود (شکل ۲) [۴].



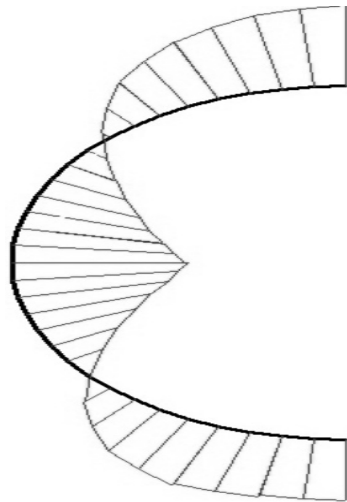
شکل ۲- تغییر شکل دیواره تونل در شرایط $k_0 < 1$

شکل ۳ المان خاکی را با ضریب فشار جانبی بزرگتر از یک نشان می‌دهد. در این حالت بردار افقی بزرگتر از بردار قائم است. علت آن است که طبق رابطه ۱، اگر $K_0 > 1$ باشد، تنش افقی بزرگتر از تنش قائم می‌شود در نتیجه المان تونل از شکل دایروی به شکل بیضی قائم تبدیل می‌شود.



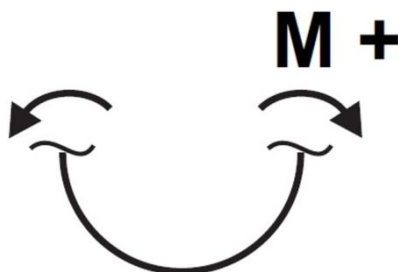
شکل ۳- تغییر شکل المان خاک در شرایط $K_0 > 1$

حال وقتی تونل در خاکهای با $K_0 > 1$ حفاری می‌شود، چون تنش‌ها در جهت افقی بزرگتر هستند، زمین در جهت افقی بیشتر جابجا می‌شود و در نتیجه زمین به سمت دیواره تونل حرکت می‌کند که این فشار دیواره تونل را به سمت داخل و تاج و کف تونل را به سمت بیرون منحرف می‌کند (شکل ۴) [۴].



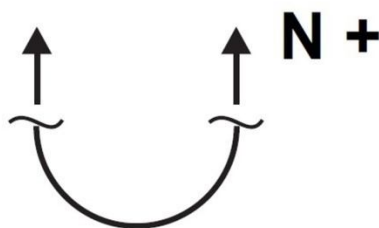
شکل ۴- تغییر شکل دیواره تونل در شرایط $K > 1$

جهت قراردادی گشتاور خمشی مطابق شکل ۵ است که تغییر شکل هم جهت با آن مثبت و خلاف جهت آن منفی فرض می‌شود. به عبارتی دیگر، اگر تغییر شکل پوشش نهایی به سمت داخل تونل باشد مقدار گشتاور خمشی مثبت و چنانچه به سمت خارج تونل باشد، گشتاور خمشی منفی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵- جهت قراردادی گشتاور خمشی

علامت قراردادی نیروی محوری، بر اساس کششی یا فشاری بودن آن در نظر گرفته می‌شود که نیروی محوری کششی، مثبت و فشاری منفی فرض می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶- جهت قراردادی نیروی محوری

۴. مدل سازی تونل با نرم افزار PLAXIS ۳D TUNNEL

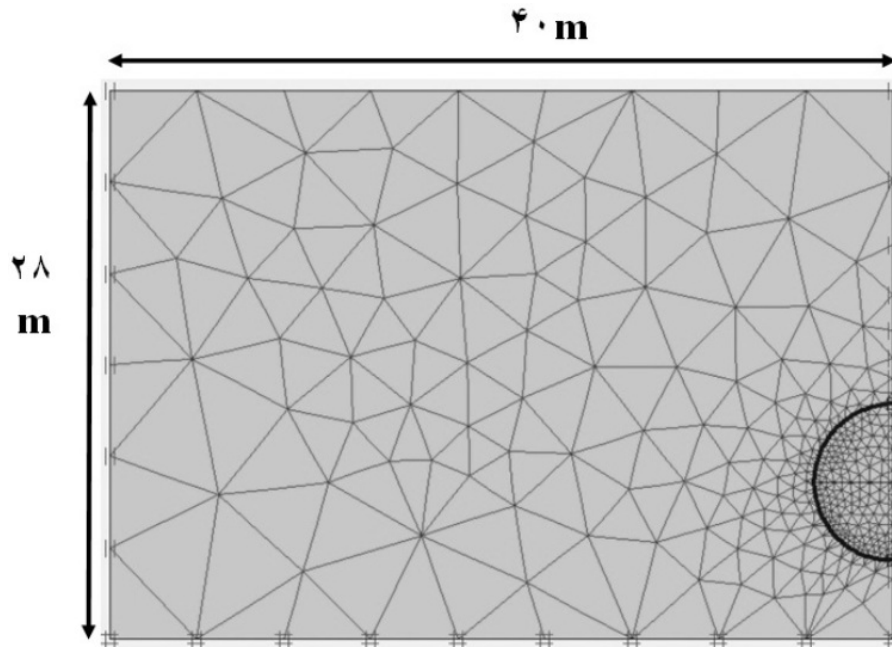
برنامه PLAXIS یکی از نرم افزارهای اجزاء محدود است که قادر به تحلیل مسائل مختلف مکانیکی خاکی است. مراحل اصلی مدل سازی در این نرم افزار به منظور بررسی رفتار خاک در اثر حفر تونل عبارت است از [۲]:

۱.۴. هندسه مدل

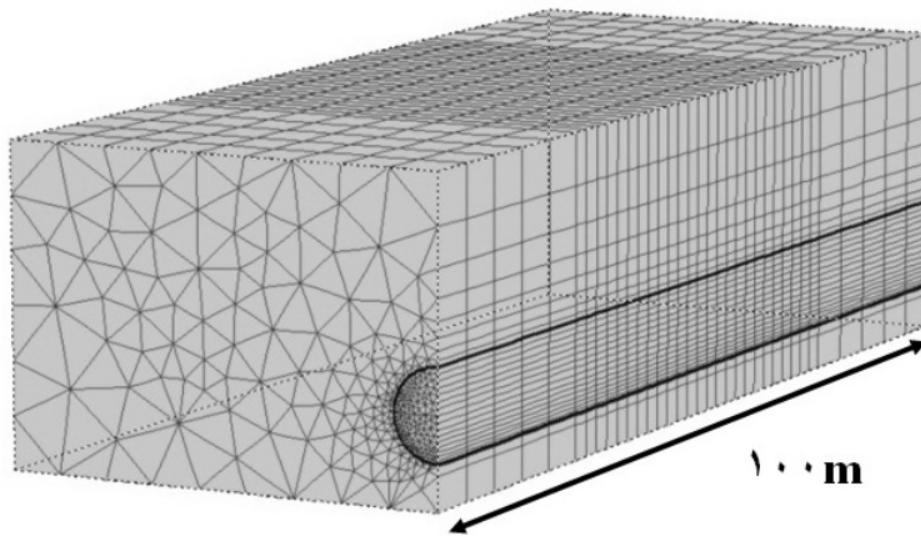
تونل تحت مطالعه دارای قطر ۸ متر و دارای ارتفاع روباره ۱۲ متر می باشد. ارتفاع، طول و عرض مدل نیز به ترتیب برابر ۲۸، ۴۰ و ۱۰۰ متر است. به منظور اجتناب از اثرات نامطلوب شرایط مرزی، ۲۵ متر ابتدائی مدل به صورت حفاری و پوشش نهایی-گذاری در نظر گرفته شده و حفاری در فاصله ۲۵ متر تا ۷۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲.۴. مش بندی

در این مدل سازی از المان مثلثی ۱۵ گرهی با مش درشت استفاده شده است فقط در نواحی مهم مانند سطح زمین، نواحی داخل تونل، خط عمودی بالای تونل (خط روباره تونل) مش به صورت موضعی ریزتر شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات به دلیل تقارن، تنها نیمی از مدل مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۷ و ۸)



شکل ۷- مش بندی دو بعدی



شکل ۸- مش بندی سه بعدی

۵. خواص ژئوتکنیکی مدل

در این مقاله از یک نمونه خاک همگن برای تحلیل و مدل سازی استفاده شده است. مشخصات مکانیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. مدل رفتاری خاک موهر- کولمب انتخاب شد. زیرا این مدل، نتایج واقع گرایانه تری نسبت به حالت الاستیک خطی ارائه می کند و همچنین پارامترهای آن نسبت به دیگر مدل های پیچیده رفتاری ساده تر و قابل دسترس تر است. تحلیل بر اساس شرایط زه کشی شده انتخاب شده است [۵].

جدول ۱- مشخصات مکانیکی خاک

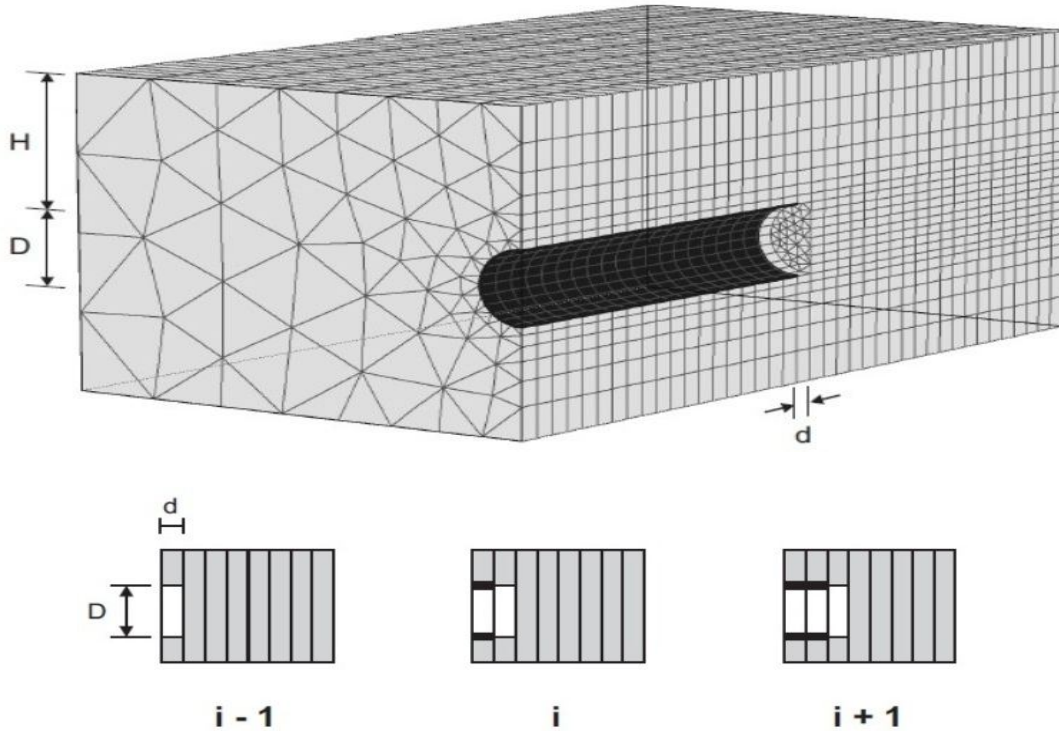
γ (KN/m ³)	E (KN/m ²)	ν	C (KN/m ²)	ϕ (درجه)	ψ
۱۹	۴۲×۱۰^۳	۰٫۲۵	۲۰	۲۰	۰

γ وزن مخصوص خاک، E مدول یانگ، ν ضریب پواسون، C چسبندگی خاک، ϕ زاویه اصطکاک خاک و ψ زاویه اتساع خاک می باشد.

۶. مدل سازی سه بعدی NATM

بلوک سه بعدی از تعداد زیادی قطعه تشکیل شده است که طول هر قطعه برابر یک گام (d متر) است که این فاصله در هر سیکل، حفاری و پوشش نهایی گذاری می شود. در این مدل سازی $d=۲$ متر انتخاب شده است. بعد از اعمال تنش های استاتیک اولیه زمین، حفاری به صورت زیر ادامه می یابد:
 در فاز محاسباتی (i-1)، خاک درون تونل مربوط به قطعه شماره ۱ حذف می شود. در فاز بعدی (i)، خاک درون تونل مربوط به قطعه شماره ۲ حذف می شود و علاوه بر آن قطعه شماره ۱ پوشش نهایی گذاری می شود. در فاز (i+1)،

خاک مربوط به قطعه شماره ۳ حذف می شود و پوشش نهایی مربوط به قطعه شماره ۲ فعال می شود و این روند به همین ترتیب در فازهای محاسباتی بعدی تکرار می شود (شکل ۹). این روش مدل سازی، روش گام به گام نامیده می شود [۶].



شکل ۹- روش گام به گام مدلسازی برای تونل سازی به روش NATM

بر اساس نتایج مدلسازی سه بعدی، در هر مرحله، توده خاک درون تونل واقع در قطعه ۱، به منظور شبیه سازی یک گام حفاری بدون نصب نگهداری حذف می شود و نصب پوشش قطعه ۱ در مرحله بعدی انجام می شود. در واقع تاخیر در نصب پوشش نهایی به این منظور است که فرصت کافی به زمین داده شود تا تنش های خود را آزاد کند و که این مورد جزء مراحل اساسی NATM محسوب می شود.

در این مدل مقطع تونل دایره ای و پوشش الاستیک بدون وزن مدل شده است. حفاری در دو مرحله (مقطع بالایی و پایینی) انجام می شود. جدول ۲ خواص مکانیکی پوشش نهایی را نشان می دهد.

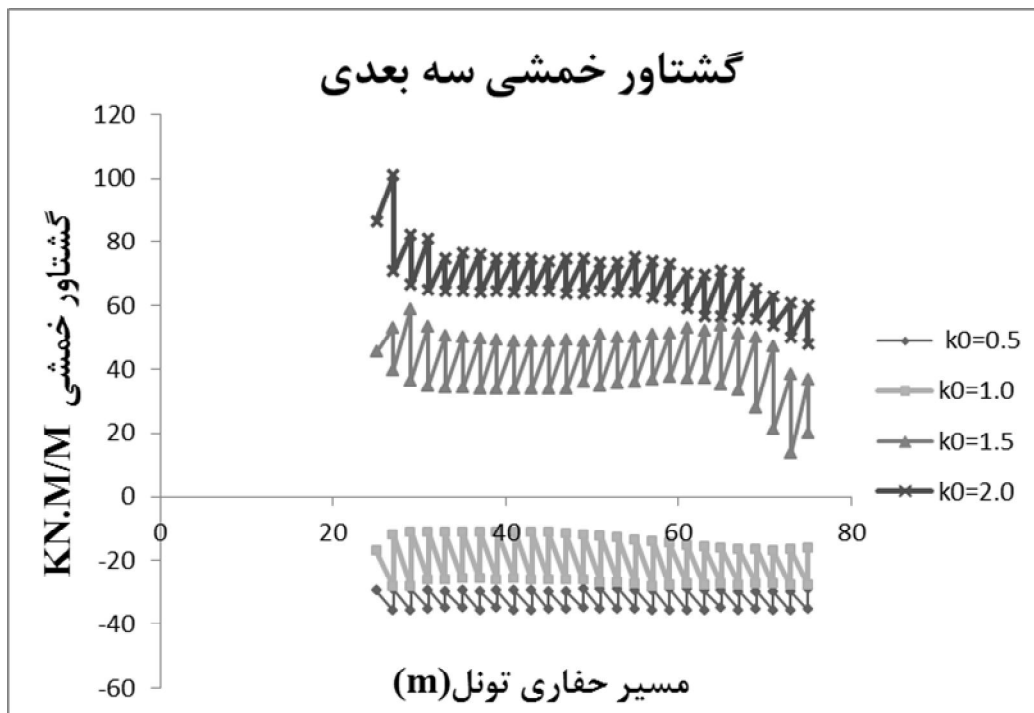
جدول ۲- مشخصات مکانیکی پوشش نهایی

پارامتر	واحد	مقدار
EA	KN/m	6×10^6
EI	KN.m ² /m	$4/5 \times 10^4$
D	m	۰/۳
v	-	۰
W	KN/m/m	۰

۷. نتایج تحلیل نیروهای سازه‌ای

۱.۷. گشتاور خمشی

تحلیل سه‌بعدی NATM برای چهار مدل با ۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵ K . انجام شد. منحنی گشتاور خمشی در امتداد محور Z (مسیر حفاری تونل) در تمام مقادیر K ، نمودار گشتاور خمشی در راستای حفاری تونل به صورت زیگزاگ تغییر کرده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- منحنی های گشتاور خمشی مدل های سه بعدی NATM

براساس نتایج تحلیل، گشتاور خمشی در تمام مقادیر K در دیواره تونل حداکثر است. در مدل $K = 0.5$ چون انحراف دیواره پوشش نهایی به سمت بیرون است، گشتاور مفرداری منفی خواهد بود. برای $K = 1$ نیز همین حالت رخ می دهد با این تفاوت که این بار پوشش نهایی انحراف کمتری دارد و گشتاور خمشی نیز تا حدی کاهش می یابد.

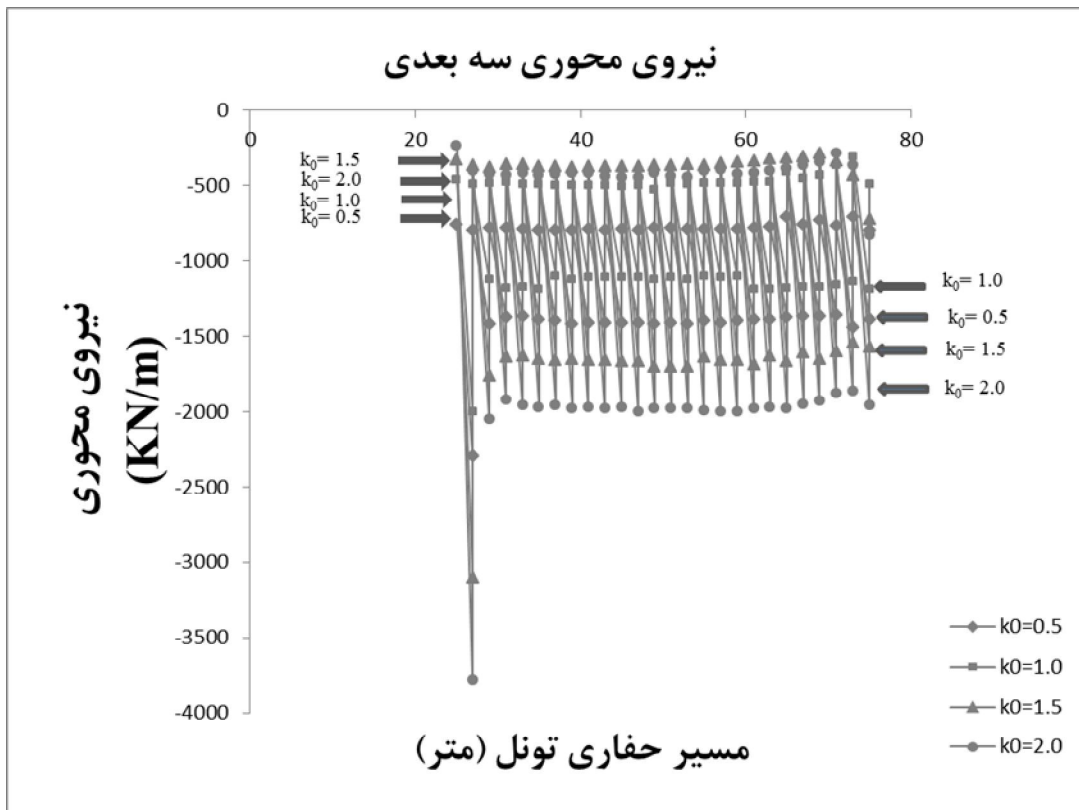
با بررسی مدل ۲، $K = 1/5$ می بینیم دیواره پوشش نهایی به سمت داخل منحرف می شود، بنابراین گشتاور آن مفرداری مثبت خواهد بود که با افزایش K از ۱/۵ تا ۲، مقدار گشتاور خمشی مثبت بزرگتر می شود. جدول ۳ مقادیر متوسط گشتاور خمشی را برای چهار مدل نشان می دهد.

جدول ۳- مقادیر متوسط گشتاور خمشی

ضریب فشار جانبی خاک	۰/۵	۱	۱/۵	۲
گشتاور خمشی (KN.m/m)	-۳۲	-۲۰	+۴۰	+۷۰

۲.۷. نیروی محوری

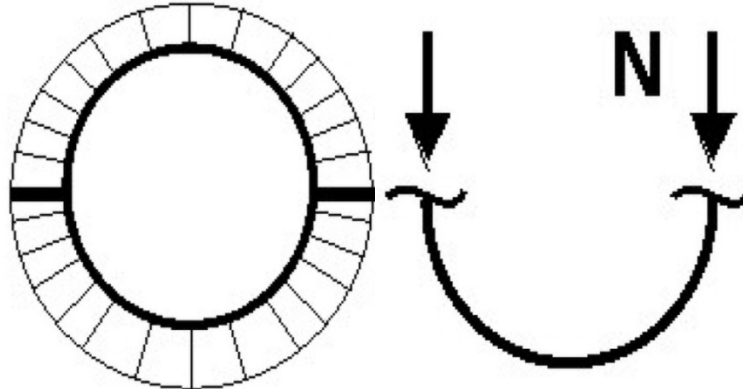
شکل ۱۱ نتایج نیروی محوری تحلیل سه بعدی NATM را برای چهار مدل با ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ نشان می دهد.



شکل ۱۱- منحنی های نیروی محوری مدل های سه بعدی NATM

مشابه نمودار گشتاور خمشی، نمودار نیروی محوری نیز به صورت زیگزاگی است و مقادیر در عقب پوشش نهایی حداقل و در جلوی پوشش نهایی حداکثر هستند با این تفاوت که در نیروی محوری اختلاف زیادی بین مقادیر عقب و جلوی پوشش نهایی وجود دارد. همانطور که از شکل ۱۱ پیداست، برای تمامی ضرایب فشار جانبی خاک، مقادیر نیروی

محوری منفی است. علت آن است که نیروی محوری به صورت فشاری وارد می شود که در اثر آن مقطع تونل تمایل به واگرایی به سمت خارج پیدا می کند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- واگرایی مقطع تونل تحت اثر نیروی فشاری منفی

با افزایش K تا ۱، مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی کاهش می یابد ولی با افزایش K برای مقادیر بزرگتر از ۱، مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی افزایش می یابد. علت آن است که مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی، برای مقادیر $K < 1$ در دیواره حداکثر است و با توجه به اینکه در حالت $K < 1$ ، دیواره به سمت خارج منحرف می شود. این عامل تاثیر مستقیم بر نیروی محوری دارد زیرا نیروی محوری نیز تمایل به واگرایی مقطع تونل به سمت خارج دارد. بنابراین با افزایش K از ۰/۵ به ۱، چون انحراف دیواره به سمت خارج کاهش می یابد در نتیجه نیروی محوری هم کاهش می یابد. ولی برای مقادیر $K > 1$ ، مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی در تاج و کف حداکثر است و با توجه به اینکه در حالت $K > 1$ ، تاج و کف به سمت خارج منحرف می شود. این عامل تاثیر مستقیم بر نیروی محوری دارد زیرا نیروی محوری نیز تمایل به واگرایی مقطع تونل به سمت خارج دارد. بنابراین با افزایش K از ۱/۵ به ۲، چون انحراف تاج و کف به سمت خارج افزایش می یابد در نتیجه نیروی محوری هم افزایش می یابد. جدول ۴ و جدول ۵ مقادیر نیروی محوری را در قسمت عقب و جلوی پوشش نهایی به ترتیب نشان می دهد.

جدول ۴- مقادیر نیروی محوری در عقب پوشش نهایی

ضریب فشار جانبی خاک	۰/۵	۱	۱/۵	۲
نیروی محوری (KN/m)	-۷۹۰	-۴۸۰	-۳۷۰	-۴۴۰

جدول ۵- مقادیر نیروی محوری در جلوی پوشش نهایی

ضریب فشار جانبی خاک	۰/۵	۱	۱/۵	۲
---------------------	-----	---	-----	---

۸. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج تحلیل سه بعدی روش تونلسازی اتریشی، مقادیر نیروهای سازه‌ای (نیروی محوری - گشتاور خمشی) در طول محور Z (مسیر حفاری تونل) ثابت نیستند و به صورت زیگزاگی نوسان می‌کنند.

طبق رابطه $\sigma_h = K_v \cdot \sigma_v$ ، اگر $K_v < 1$ باشد، تنش قائم بر تنش افقی غالب می‌شود در نتیجه در اثر حفاری، زمین در جهت قائم حرکت می‌کند که این موضوع سبب انحراف تاج و کف تونل به سمت داخل و دیواره تونل به سمت بیرون می‌شود. با توجه به ماکزیمم بودن گشتاور خمشی در دیواره و انحراف دیواره به سمت بیرون در این حالت، گشتاور خمشی $K_v = 0.51$ مقدار منفی خواهد بود.

طبق رابطه $\sigma_h = K_v \cdot \sigma_v$ ، اگر $K_v > 1$ باشد، تنش افقی بر تنش قائم غلبه می‌کند در نتیجه در اثر حفاری، زمین در جهت افقی حرکت می‌کند و این مساله موجب انحراف دیواره تونل به سمت داخل، و تاج و کف تونل به سمت بیرون می‌شود. با توجه به ماکزیمم بودن گشتاور خمشی در دیواره و انحراف دیواره به سمت داخل در این حالت، گشتاور خمشی $K_v = 1.52$ مقدار مثبت خواهد بود.

بین مقادیر گشتاور خمشی در عقب و جلوی پوشش نهایی تفاوت چندانی نیست، در صورتی که برای نیروهای محوری مقادیر در عقب و جلوی پوشش نهایی تفاوت زیادی دارند. در کل، گشتاورهای خمشی دارای مقادیر کمتری نسبت به نیروهای محوری در پوشش نهایی هستند و به همین دلیل از اهمیت کمتری نسبت به نیروهای محوری برخوردارند.

با افزایش K_v تا ۱ مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی کاهش می‌یابد. علت آن است که مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی، برای مقادیر $K_v < 1$ در دیواره حداکثر است و با توجه به اینکه در حالت $K_v < 1$ دیواره به سمت خارج منحرف می‌شود و نیروی محوری نیز تمایل به واگرایی مقطع تونل به سمت خارج دارد، بنابراین این عامل تاثیر مستقیم بر نیروی محوری دارد که با افزایش K_v از ۰.۵ به ۱، چون انحراف دیواره به سمت خارج کاهش می‌یابد در نتیجه نیروی محوری هم کاهش می‌یابد.

با افزایش K_v برای مقادیر بزرگتر از ۱، مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی افزایش می‌یابد. علت آن است که مقدار نیروی محوری در عقب و جلوی پوشش نهایی، برای مقادیر $K_v > 1$ در تاج و کف حداکثر است و با توجه به اینکه در حالت $K_v > 1$ ، تاج و کف به سمت خارج منحرف می‌شود و نیروی محوری نیز تمایل به واگرایی مقطع تونل به سمت خارج دارد، بنابراین این عامل تاثیر مستقیم بر نیروی محوری دارد که با افزایش K_v از ۱.۵ به ۲، چون انحراف دیواره به سمت خارج افزایش می‌یابد در نتیجه نیروی محوری هم افزایش می‌یابد.

۱. Yanga, J.S., Liua, B.C. and Wang, M.C. (۳۰ July ۲۰۰۳). "Modeling of tunneling- induced ground surface movements using stochastic medium theory". Tunneling and Underground Space Technology , ۱۱۳-۱۲۳.
۲. Brinkgreve, R. J. B. and Vermeer, P. A. (۲۰۰۱) "PLAXIS ۳D Tunnel Tutorial Manual," Edited by Balkema Publishers.
۳. Bonnier, P.G., Moller, S.C. and Vermeer. P.A. (۲۰۰۲). "Bending Moments and Normal Force in Tunnel Lining". ۵th European Conference of Numerical Methods in Geotechnical Engineering. Paris, France.
۴. Vermeer P.A., Moller, S.C. and Ruse, N. (۲۰۰۳). "On the Application of Numerical Analysis In Tunneling". Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, Germany.
۵. بهپور گوهری، م؛ روحی مهر، الف؛ وفائی پور، ر. (۱۳۸۵) "مرجع کامل PLAXIS V۸". انتشارات فروزش، تبریز.
۶. Moller, S. (۲۰۰۶). "Tunnel induced Settlement and Structural forces in lining". PHD thesis . University of Stuttgart, Germany.