

ارزیابی اثر ضریب فشار جانبی خاک (K_0) بر ضریب باربرداری (β) در حفر تونل به روش NATM با مقایسه نتایج تحلیل دو بعدی و سه بعدی

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

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

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

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

چکیده

به دلیل اینکه روزانه جمعیت انبوهی به طور مستقیم یا غیر مستقیم از سازه‌هایی مثل تونل، مترو، زیرگذر و ... استفاده می‌کنند. بررسی رفتار این سازه‌ها برای پیش‌بینی نحوی عملکرد آن‌ها و تشخیص حالت‌های بحرانی ممکن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. آنالیز اجزای محدود سه بعدی روشی مناسب برای تخمین حرکات زمین در اثر حفر تونل می‌باشد که به منظور اعمال اثرات سه بعدی تونل سازی با استفاده از آنالیز دو بعدی، روش‌های مختلفی با توجه به نوع تونل زنی موجود بوده که روش کاهش تنش در حفر تونل به شیوه‌ی NATM، مقبول‌ترین روش می‌باشد. در این روش از یک ضریب به نام فاکتور باربرداری (β) جهت شبیه سازی اثر قوسی شدن سه بعدی خاک استفاده می‌شود. در این مقاله آنالیز سه بعدی برای شش مقدار ضریب فشار جانبی خاک (K_0) شبیه سازی گردید سپس آنالیز دو بعدی برای همان مقادیر K_0 و با مقادیر مختلف ضریب باربرداری (β) انجام شد و نتایج بدست آمده از آن با نتایج آنالیز سه بعدی مقایسه گردید و نتیجتاً مناسب‌ترین ضریب β برای هر مدل با ضریب فشار جانبی خاک مشخص، ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: ضریب باربرداری، ضریب فشار جانبی خاک، نرم افزار PLAXIS، NATM، تونل کم عمق.

۱- مقدمه

با توجه به رشد جمعیت در سال‌های اخیر و بالا رفتن کیفیت زندگی و پیشرفت تکنولوژی شاهد افزایش ساخت و سازه‌های گسترده در مناطق مختلف برای برطرف کردن نیازهای جامعه می‌باشیم. با توجه به نیاز و استفاده، رفته رفته میل به ساخت سازه‌های زیرزمینی رو به افزایش بوده و بررسی رفتار این سازه‌ها برای پیش‌بینی نحوی عملکرد آن‌ها و تشخیص حالت‌های بحرانی ممکن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. [۱] آنالیز اجزای محدود سه بعدی برای پیش‌بینی بهتر تغییر مکان‌های زمین ناشی از حفر تونل‌های زیر زمینی می‌باشد. این آنالیز پاسخگوی بسیاری از پرسش‌های محققین می‌باشد اما معایبی نیز داشته که یک از آن زمان بر بودن آنالیز می‌باشد. این مسأله موجب شده که امروزه آنالیز تونل‌ها اکثراً با اجزای محدود دو بعدی انجام شود به جز در مواردی که وضعیت جبهه حفاری پیچیده باشد (به عنوان مثال محل اتصال تونل به ایستگاه‌های زیرزمینی دیگر) که در این صورت از آنالیز سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

در این مقاله آنالیز سه بعدی برای شش مدل با مقادیر مختلف ضریب فشار جانبی خاک (K_0) انجام و منحنی تغییر مکان عرضی آن بدست آمد. در بخش بعدی، آنالیز دو بعدی برای محدوده مشخصی از ضریب β ($0.18 < \beta < 0.2$)، برای هر شش مدل با مقادیر ضریب فشار جانبی خاک (K_0) مشابه، شبیه سازی شد و در آخر منحنی‌های تغییر مکان عرضی دو بعدی با سه بعدی مقایسه و برای هر مدل مناسب‌ترین منحنی با ضریب باربرداری مربوطه بدست آمد [۲،۳].

۲- مدل سازی تونل با نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL [۴]

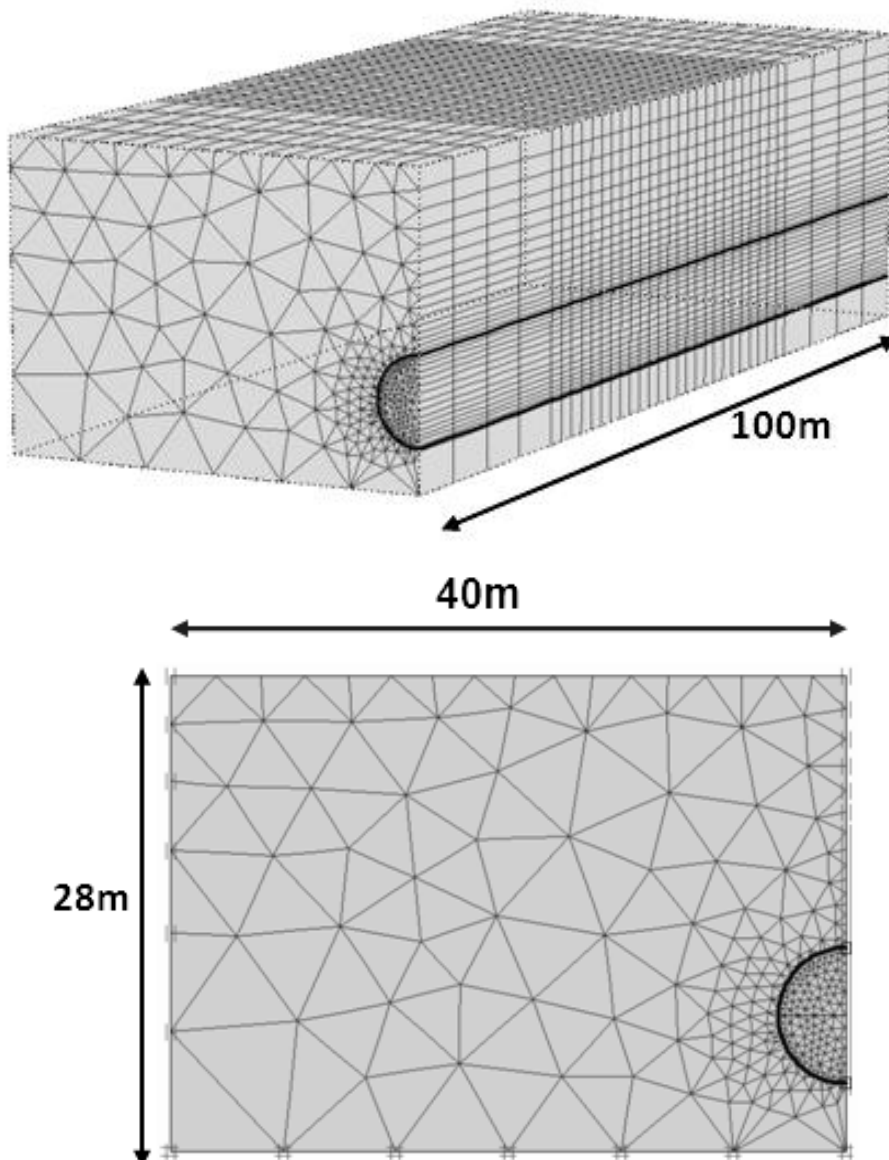
۱-۲- هندسه مدل

برای مدل سازی تونلی به قطر ۸ متر با ارتفاع روباره ۱۶ متر در نظر گرفته شده است. بلوک مدل به ارتفاع ۲۸ متر، عرض ۴۰ متر و طول ۱۰۰ متر می باشد.

به منظور اجتناب از اثرات شرایط مرزی، ۲۵ متر ابتدائی مدل به صورت حفاری و لاینینگ گذاری در نظر گرفته شده و حفاری در فاصله ۲۵ متر تا ۷۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- 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 و با استفاده از تقارن، تنها نیمی از تونل مدل شده است (شکل ۱).



شکل ۱: نمایی شماتیک از مش بندی دو بعدی و سه بعدی مدل

۲-۳- 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 نشان داده شده است. مدل رفتاری خاک موهر- کولمب انتخاب شد. زیرا این مدل، مدل سازی واقع گرایانه تری نسبت به حالت الاستیک خطی دارد و همچنین پارامترهای آن نسبت به دیگر مدل های پیچیده رفتاری ساده و قابل دسترس می باشد. تحلیل بر اساس شرایط زه کشی شده انتخاب شده است [۵].

جدول ۱: مشخصات مکانیکی خاک

پارامتر	واحد	مقدار
γ	(KN/m ³)	۱۹
E	(KN/m ²)	42×10^3
ν	-	۰/۲۵
C	(KN/m ²)	۲۰
ϕ'	-	۲۰
ψ	-	۰

۳- مدل سازی سه بعدی NATM [۴،۶،۷]

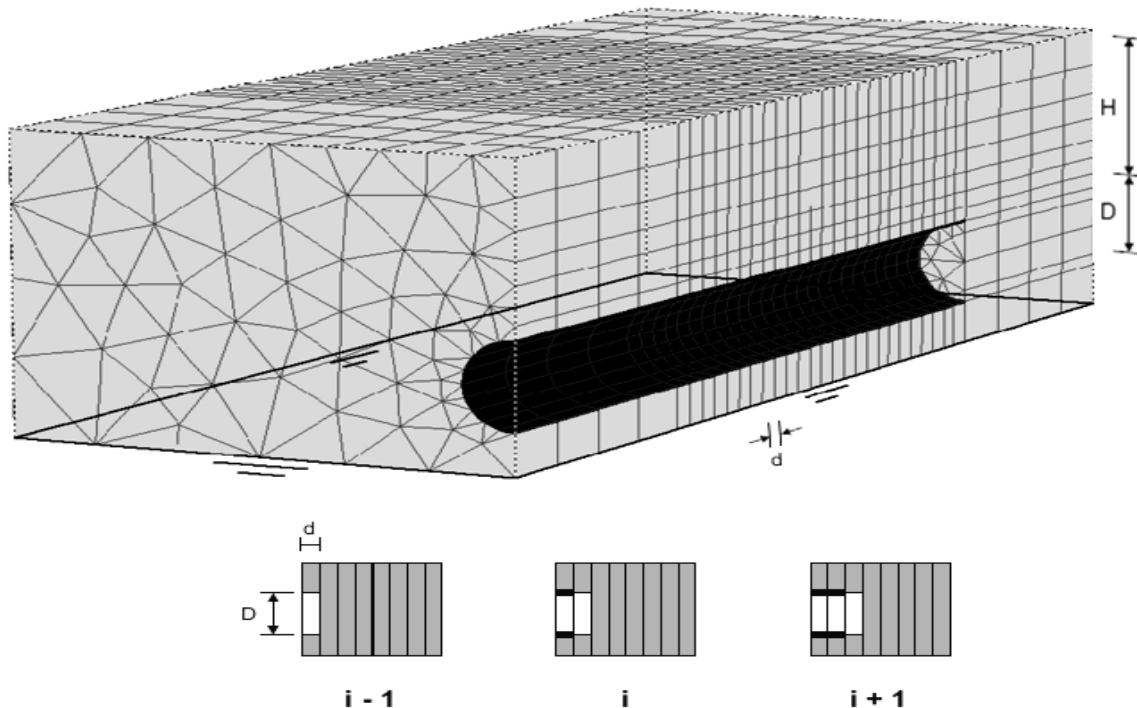
بلوک سه بعدی از تعداد زیادی قطعه تشکیل شده است که هر قطعه یک گام حفاری با طول d متر می باشد که این فاصله در هر سیکل، حفاری و لاینینگ گذاری می شود. در این مدل سازی $d=2$ متر انتخاب شده است. بعد از ایجاد تنش های ژئواستاتیک اولیه ، حفاری به صورت زیر ادامه می یابد:

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 لاینینگ گذاری می شود. در فاز $(i+1)$ ، خاک مربوط به قطعه شماره ۳ حذف می شود و لاینینگ مربوط به قطعه شماره ۲ فعال می شود و این روند به همین ترتیب در فازهای محاسباتی بعدی تکرار می شود (شکل ۲). این روش مدل سازی، روش گام به گام (Step-by-Step) نامیده می شود.

همانطور که از مدل سازی سه بعدی پیداست، در هر مرحله همان خاک درون تونل در قطعه X جهت شبیه سازی یک گام حفاری بدون حائل حذف می شود و لاینینگ گذاری قطعه X در فاز بعدی انجام می شود. در واقع تأخیر در نصب لاینینگ به این منظور است که فرصت کافی به زمین داده شود تا تنش های خود را آزاد کند و این اساس روش NATM است. در این مدل مقطع تونل دایره ای و لاینینگ به صورت دایره ای، الاستیک و بدون وزن مدل شده است. حفاری در دو مرحله (مقطع بالایی و پایینی) انجام می شود. جدول ۲ خواص مکانیکی لاینینگ را نشان می دهد.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی لاینینگ

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



شکل ۲: شمایی از روش گام به گام برای تونل سازی NATM

۴- آنالیز دو بعدی NATM [۵،۶]

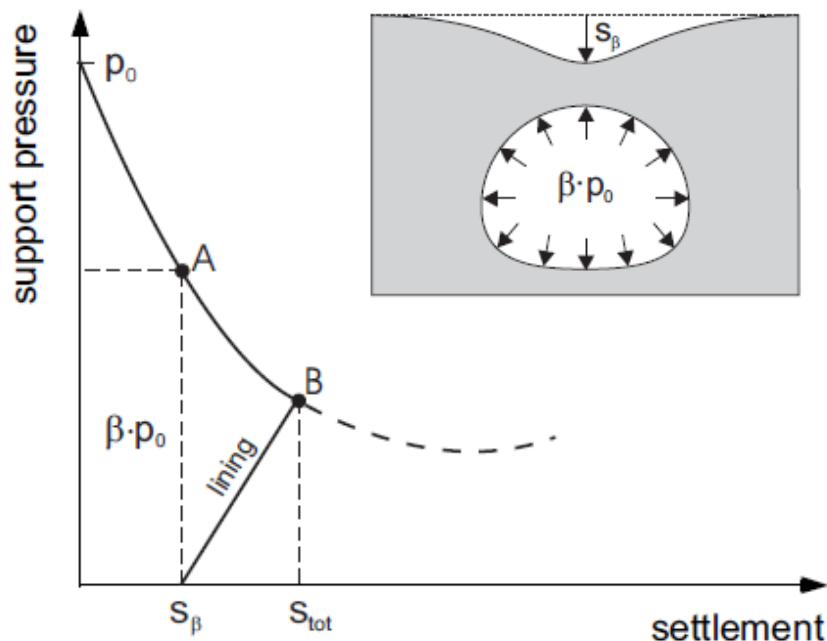
جهت لحاظ کردن اثرات آنالیز سه بعدی در آنالیز دو بعدی در روش NATM از روش های زیر استفاده می شود :

- روش حائل مرکزی (Core Support) یا روش α
- روش کاهش لاینینگ (Lining Reduction) یا روش δ
- روش کاهش تنش (Stress Reduction) یا روش β

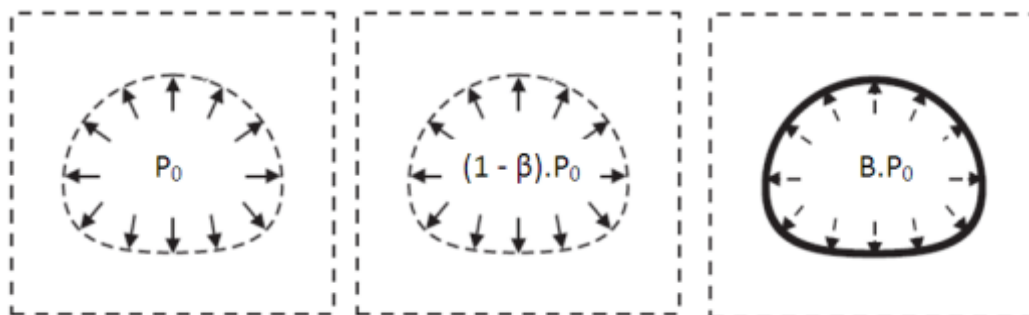
که از بین این ۳ روش، روش کاهش تنش (Stress Reduction) یا روش β پرکاربردترین و محبوب ترین روش در تخمین های دو بعدی NATM است.

روش کاهش تنش (Stress Reduction)، آزادسازی تنش زمین به علت تأخیر در نصب لاینینگ می باشد و اشتراک بارگذاری بین زمین و لاینینگ در این روش به خوبی انجام می شود.

این روش ۲ فاز محاسباتی دارد. در ابتدا تنش های ژئواستاتیکی اولیه ایجاد می شود. شکل ۳ و ۴ دو فاز محاسباتی این روش را در رابطه با منحنی پاسخ زمین توضیح می دهد.



شکل ۳: نمایش روش کاهش تنش مطابق با منحنی پاسخ زمین



شکل ۴: فازهای محاسباتی روش کاهش تنش

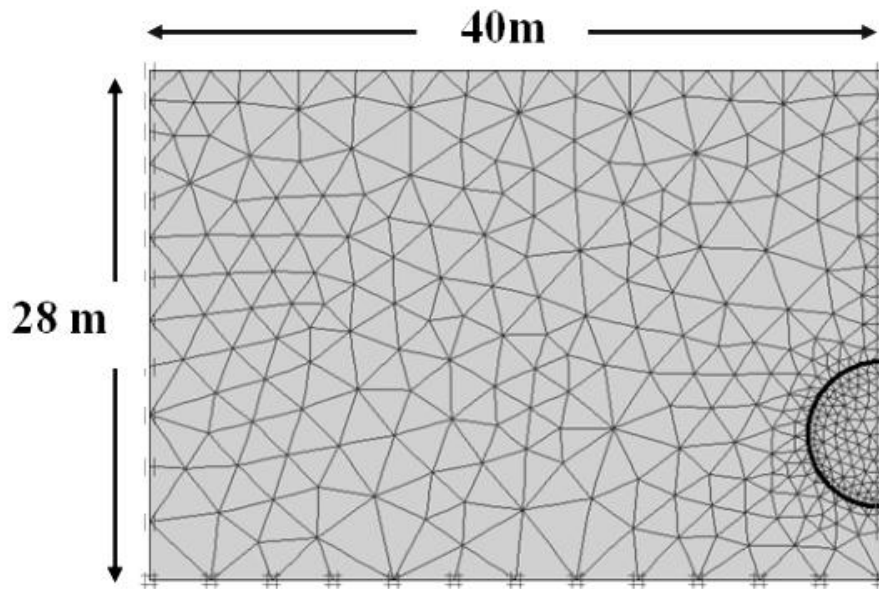
در فاز اول محاسباتی اجرای تونل با حذف المان های زمین درون تونل و فشار اولی و فعال کردن $(1-\beta) P_0$ شبیه سازی می شود.

β فاکتور کاهش بار است که به نام "فاکتور باربرداری" نامبرده می شود. این فاکتور بخشی از تنش های اولیه زمین را که توسط لاینینگ تحمل می شود نشان می دهد.

در فاز دوم محاسباتی لاینینگ نصب می شود و بار βP_0 بر روی لاینینگ و زمین پخش می شود.

۵- مدل سازی تونل با نرم افزار PLAXIS 2D [۴]

ابعاد مدل دو بعدی مطابق با ابعاد مقطع عرضی در مدل سه بعدی می باشد. این ابعاد با ۴۰ متر عرض و ۲۸ متر ارتفاع می باشد (شکل ۵).



شکل ۵: نمایی شماتیک از مش دو بعدی آنالیز دو بعدی

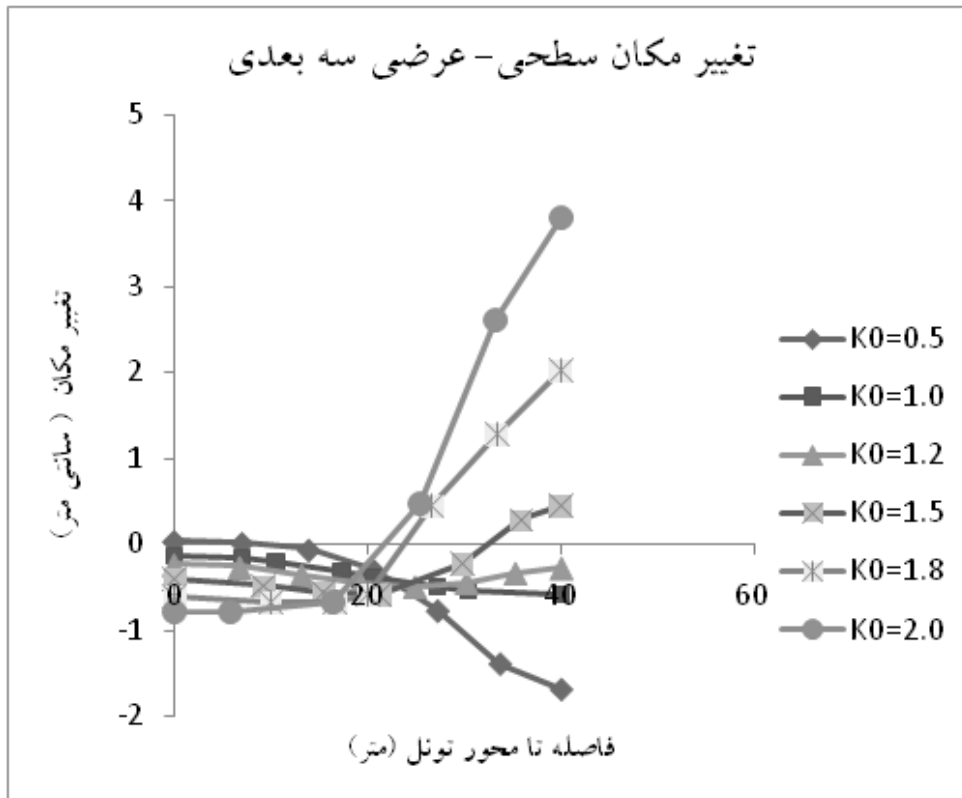
در این آنالیز از المان مثلثی ۱۵ گرهی با مش متوسط استفاده شده است و در نواحی حساس مانند داخل تونل، سطح زمین و خط سربار بالای تونل مش به طور موضعی ریز شده است. خواص ژئوتکنیکی مدل مطابق آنالیز سه بعدی می باشد.

۶- نتایج آنالیز سه بعدی

شکل ۶ منحنی های تغییر مکان عرضی آنالیز سه بعدی را برای مقادیر مختلف K_0 نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است بر روی خط مرکزی تونل (C.L) با افزایش K_0 از مقادیر کمتر به مقادیر بیشتر، منحنی تغییر مکان (نشست) رفته رفته کم عمق تر می شود و برای مقادیر کمی بزرگتر از ۱ به جای نشست، برآمدگی در سطح را خواهیم داشت. جدول ۳ مقادیر تغییر مکان عرضی سه بعدی شش مدل را بر روی خط مرکزی تونل نشان می دهد.

جدول ۳: مقادیر تغییر مکان عرضی سه بعدی

ضریب فشار جانبی خاک	ماکزیمم تغییر مکان عرضی (سانتی متر)
۰/۵	-۱/۷
۱	-۰/۵۹
۱/۲	-۰/۵
۱/۵	+۰/۴۵
۱/۸	+۲/۰۲
۲	+۳/۸



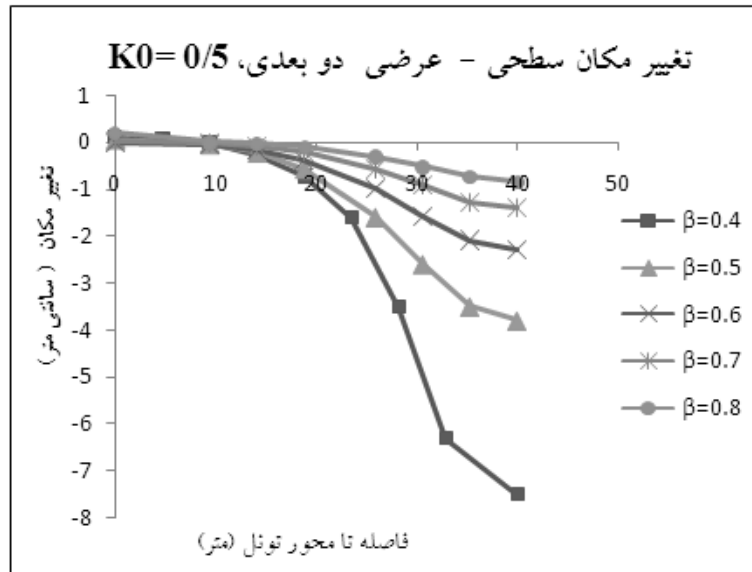
شکل ۶: منحنی های تغییر مکان عرضی سه بعدی برای ضرائب مختلف K_0

۷- نتایج آنالیز دو بعدی و مقایسه نتایج با آنالیز سه بعدی

اسوبودا^۱ و لاابمایر^۲ در سال ۱۹۸۶، فاکتورهای باربرداری را از درصد تغییر شکل اتفاق افتاده در جلوی جبهه حفاری و درصد اندازه گیری شده در پشت جبهه حفاری هنگام ساخت تونل بدست آوردند. آنها ضریب β را عددی بین ۰/۲ تا ۰/۸ پیشنهاد کردند و در این مقاله نیز با استناد به این مرجع آنالیز دو بعدی انجام می شود [۳،۶].

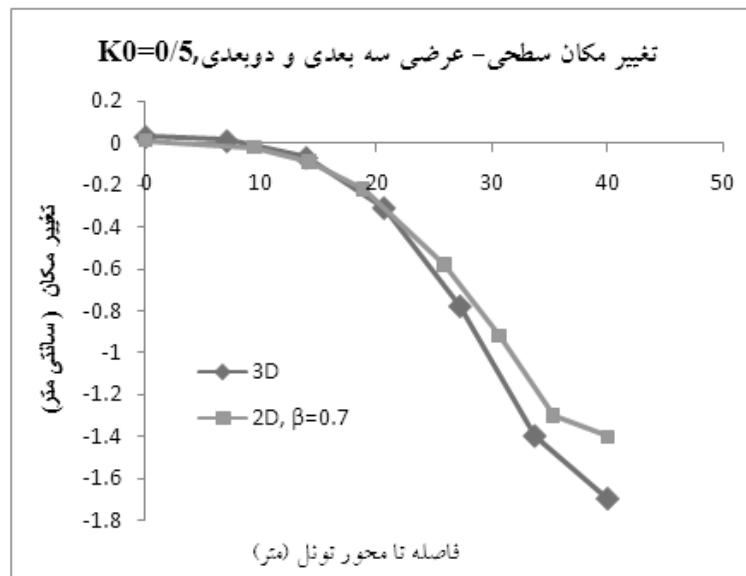
شکل ۷ منحنی های تغییر مکان عرضی آنالیز دو بعدی $K_0 = 0/5$ را در محدوده تغییرات β نشان می دهد. آنالیز برای $\beta = 0/2$ و $0/3$ ناموفق بوده و اصطلاحاً جواب نداد.

¹ Swoboda
² Laabmayr



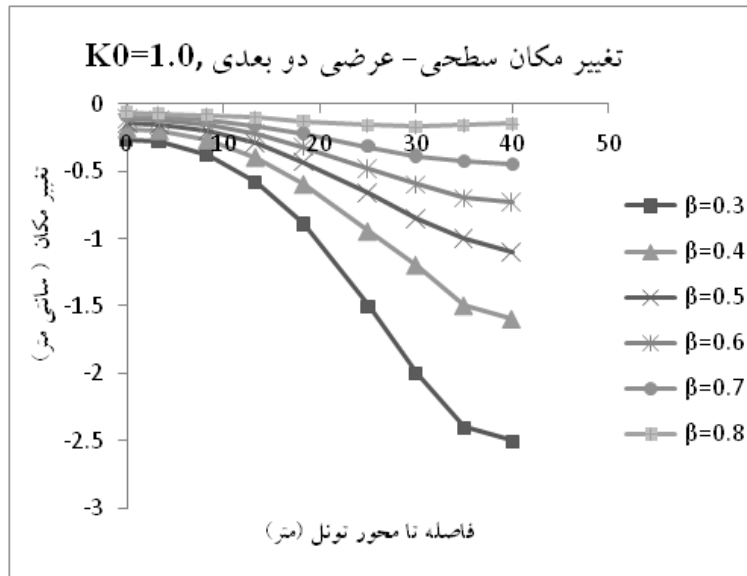
شکل ۷: منحنی های تغییر مکان عرضی دو بعدی با مقادیر مختلف β , $K_0 = 0.5$

برای $K_0 = 0.5$ ، منحنی تغییر مکان عرضی آنالیز دو بعدی با $\beta = 0.7$ تقریباً با منحنی عرضی سه بعدی تطابق دارد و از هماهنگی خوبی برخوردار است. در این مدل سازی آنالیز سه بعدی نشست عرضی $1/7$ سانتیمتر و آنالیز دو بعدی نشست $1/4$ سانتیمتر را نشان می دهد (شکل ۸).



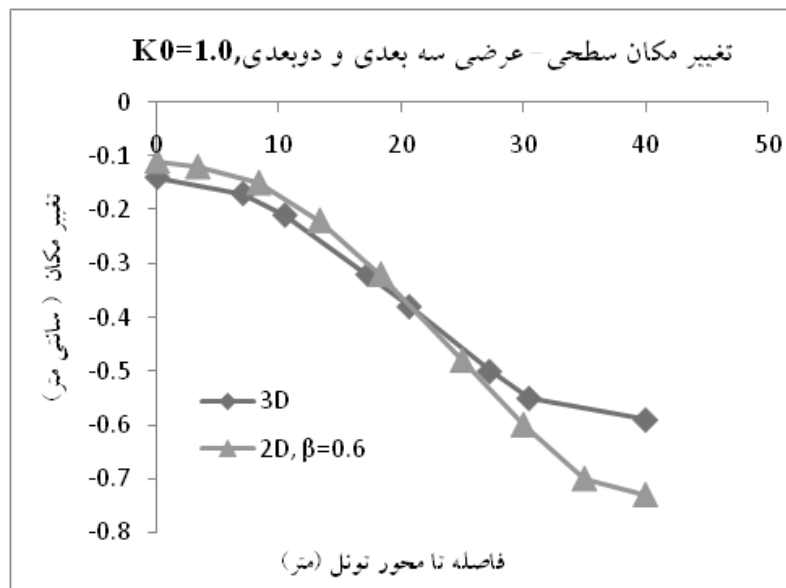
شکل ۸: مقایسه منحنی تغییر مکان عرضی دو بعدی و سه بعدی، $K_0 = 0.5$

شکل ۹ منحنی های تغییر مکان عرضی آنالیز دو بعدی $K_0 = 1$ را در محدوده تغییرات β نشان می دهد. آنالیز برای $\beta = 0.2$ ناموفق بوده و اصطلاحاً جواب نداد.



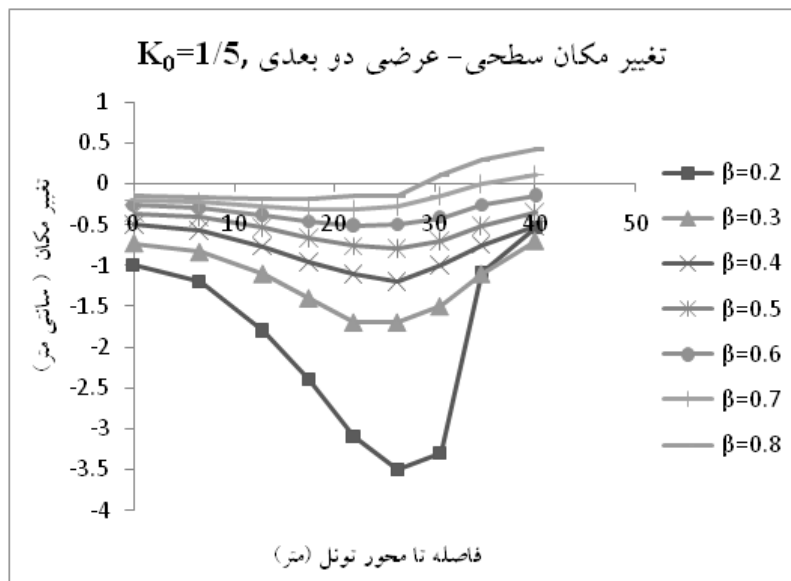
شکل ۹: منحنی های تغییر مکان عرضی دو بعدی با مقادیر مختلف β , $K_0=1$

برای $K_0=1$ ، منحنی نشست عرضی دو بعدی با $\beta=0.6$ منحنی مناسبی را در مقایسه با آنالیز نشست عرضی سه بعدی ارائه می دهد. در این مدل، آنالیز سه بعدی نشست عرضی 0.59 سانتیمتر و آنالیز دو بعدی نشست 0.73 سانتیمتر را ارائه می دهد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: مقایسه منحنی تغییر مکان عرضی دو بعدی و سه بعدی، $K_0=1$

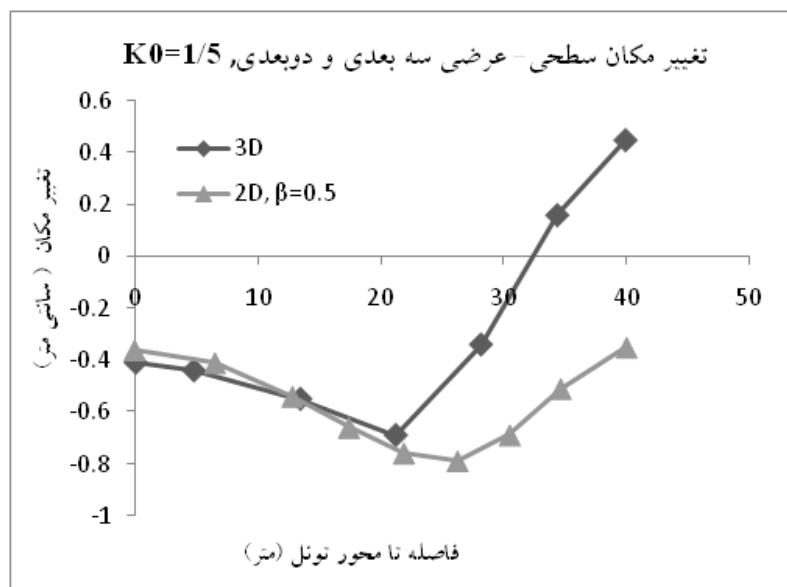
شکل ۱۱ منحنی های تغییر مکان عرضی آنالیز دو بعدی $K_0=1/2$ را در محدوده تغییرات β نشان می دهد.



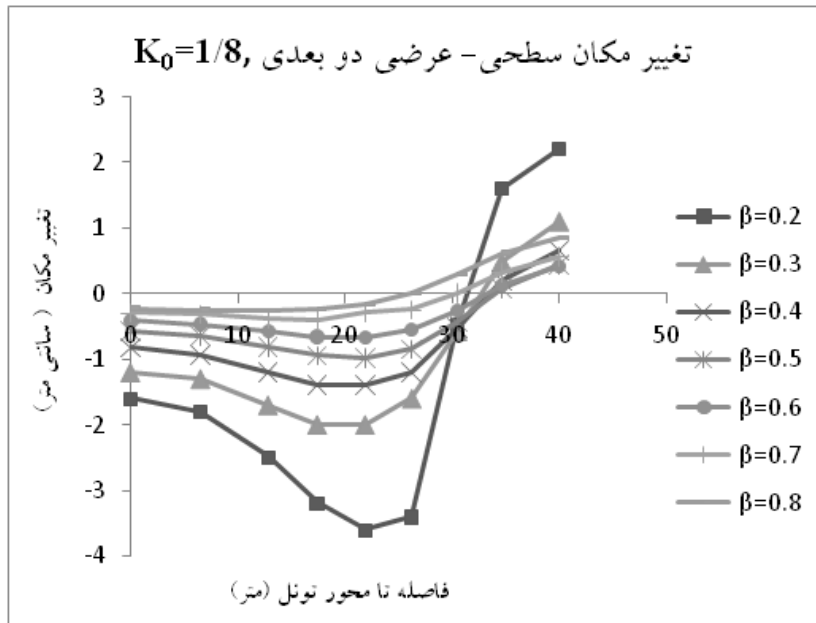
شکل ۱۳: منحنی های تغییر مکان عرضی دو بعدی با مقادیر مختلف β , $K_0=1/5$

منحنی عرضی سه بعدی $K_0=1/5$ ، برآمدگی $0/45$ سانتیمتری را بر روی خط مرکزی تونل نشان می دهد در حالی که منحنی تغییر مکان عرضی دو بعدی با $\beta=0/5$ نشست $0/35$ سانتیمتری را نشان می دهد که از بین منحنی های بدست آمده، این منحنی مشابه ترین منحنی با نوع سه بعدی می باشد (شکل ۱۴).

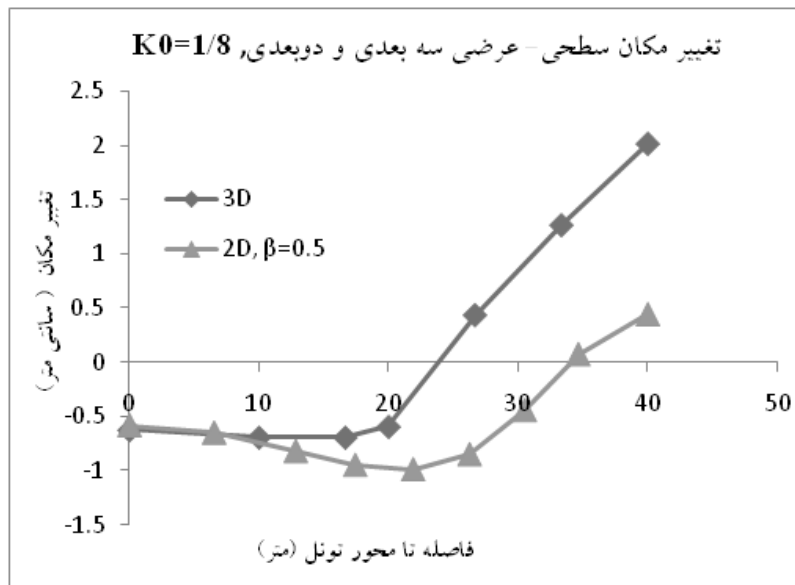
شکل ۱۵ منحنی های تغییر مکان عرضی آنالیز دو بعدی $K_0=1/8$ را در محدوده تغییرات β نشان می دهد. همینطور برای $K_0=1/8$ ، فاکتور باربرداری $\beta=0/5$ بدست آمد. منحنی عرضی دو بعدی $0/45$ سانتیمتر و منحنی عرضی سه بعدی $2/02$ سانتیمتر برآمدگی را نشان می دهد (شکل ۱۶).



شکل ۱۴: مقایسه منحنی تغییر مکان عرضی دو بعدی و سه بعدی، $K_0=1/5$

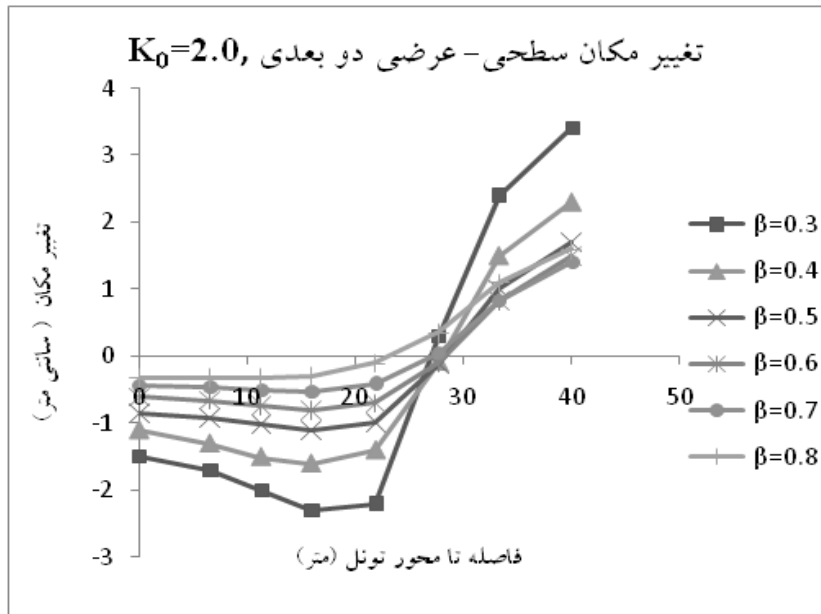


شکل ۱۵: منحنی های تغییر مکان عرضی دو بعدی با مقادیر مختلف β , $K_0=1/8$

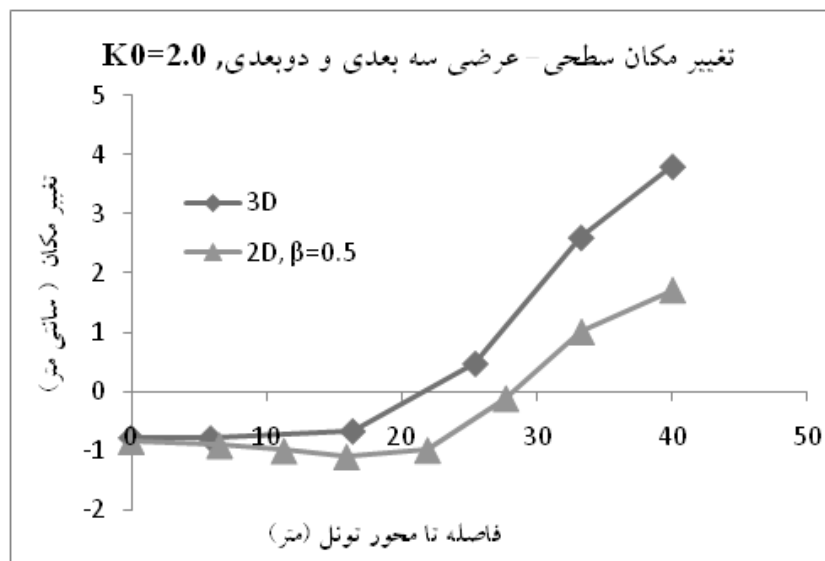


شکل ۱۶: مقایسه منحنی تغییر مکان عرضی دو بعدی و سه بعدی, $K_0=1/8$

شکل ۱۷ منحنی های تغییر مکان عرضی آنالیز دو بعدی $K_0=2$ را در محدوده تغییرات β نشان می دهد. آنالیز برای $\beta=0/2$ ناموفق بوده و اصطلاحاً جواب نداد و در آخر، برای مدل $K_0=2$ منحنی عرضی سه بعدی $3/8$ سانتیمتر و منحنی عرضی دو بعدی $1/7$ سانتیمتر برآمدگی را با ضریب باربرداری $\beta=0/5$ نشان می دهد (شکل ۱۸).



شکل ۱۷: منحنی های تغییر مکان عرضی دو بعدی با مقادیر مختلف β , $K_0=2$



شکل ۱۸: مقایسه منحنی تغییر مکان عرضی دو بعدی و سه بعدی، $K_0=2$

۸- نتیجه گیری

۱. فاکتور باربرداری β علاوه بر هندسه مقطع عرضی، گام حفاری و رفتار مصالح به فرآیند ساخت نیز بستگی دارد بنابراین تعیین دقیق آن مشکل می باشد. ولی تعیین حدود آن بر اساس تجربیات مهندسی، اندازه گیری در محل، فرضیات تئوری یا نتایج حاصله از مقایسه آنالیز دو بعدی و سه بعدی می باشد [۶].
- در این مقاله مقادیر β بر اساس نتایج حاصله از مقایسه آنالیز دو بعدی و سه بعدی بدست آمده است.

۲. ضریب β برای همه تونل ها به وضوح صدق نخواهد کرد چرا که به هر حال در روش های اجزای محدود، شرایط مرزی، هندسه پروفیل و هندسه تونل تفاوت وجود دارد مقادیر β بدست آمده در این مقاله برای خاک ماسه رس دار همگن با مدل رفتاری موهر- کولمب و تونل کم عمق با مقطع دایره ای با گام حفاری ۲ متر و روش تونل زنی NATM می باشد که در مدل های مشابه با این مدل می توان از این مقادیر β استفاده کرد. مقادیر β بدست آمده برای $K_0 = 0.5$ مساوی 0.7 ، برای $K_0 = 1$ مساوی 0.6 و برای 2 ، 1.8 ، 1.5 ، 1.2 مساوی 0.5 بدست آمده است.
۳. در تونلسازی حجم زیادی از خاک برداشته می شود به عبارتی دیگر زمین باربرداری می شود که در اثر پدیده باربرداری تنش های زمین کاهش می یابد. برای $K_0 = 0.5$ ، 30% آزاد سازی تنش، برای $K_0 = 1$ ، 40% آزاد سازی تنش و برای 2 ، 1.8 ، 1.5 ، 1.2 ، $K_0 = 1.2$ ، 50% آزاد سازی تنش بدست آمده است و این نشان می دهد با افزایش K_0 از مقادیر کمتر از 1 به مقادیر بزرگتر از 1 ، آزاد سازی تنش زمین افزایش می یابد.
۴. هر چه تنش های زمین بیشتر آزاد شود لاینینگ بار کمتری را تحمل می کند و از آن جایی که ضریب β سهم بار تحمل شده توسط لاینینگ می باشد با افزایش K_0 ، β کاهش می یابد.
۵. کاهش β موجب کاهش در بارگذاری لاینینگ و متعاقباً کاهش نیروهای سازه ای در لاینینگ می شود.
۶. هر چه تنش های زمین بیشتر آزاد شود، تغییر شکل های زمین بیشتر خواهد بود و تغییر شکل های لاینینگ کمتر. بنابراین برای مقادیر کمتر β ، تغییر شکل های زمین بیشتر و تغییر شکل های لاینینگ کمتر و برای مقادیر بیشتر β ، تغییر شکل های زمین کمتر ولی تغییر شکل های لاینینگ بیشتر خواهد بود.
۷. نتایج آنالیز سه بعدی برای مقادیر مختلف K_0 نشان می دهد که تغییر مکان بر روی خط مرکزی تونل برای مقادیر $1.2 < K_0 < 0.5$ از نوع نشست و برای مقادیر $2 < K_0 < 1.5$ از نوع برآمدگی خواهد بود.

مراجع

- [۱] نگهدار، ع؛ جوشیده، ن. ارزیابی نشست های بلند مدت تونل های حفاری شده در زمین های نرم با استفاده از مدل رفتاری خزش خاک نرم، دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، قم، ۱۳۹۴.
- [2] P. A. Vermeer, S. C. Möller, and N. Ruse. On the application of numerical analysis in tunnelling. the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Singapore, August 2003.
- [3] G. SWOBODA, F. LAABMAYR, I. MADER: Grundlagen und Entwicklung bei Entwurf und Berechnung im seichtliegenden Tunnelbau. Teil 2, Felsbau 4, (1986) S.184–187.
- [4] Brinkgreve, R. B. J., Vermeer, P. A., PLAXIS 3D Tunnel Manual. Version1, A. A. Balkema Publishers, Netherlands, 2001.
- [۵] بهپور گوهری، م؛ روحی مهر، الف؛ وفائی پور، ر. مرجع کامل PLAXIS V8، انتشارات فروزش، تبریز، ویرایش اول، ۱۳۸۵
- [6] Moller Sven Christian. PhD Thesis : Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Berlin. 2006
- [7] Wittke W. Rock Mechanics Berlin: Springer-Verlag, 1984.