مقایسه تحلیل پایداری عددی دو بعدی و سه بعدی با نگرشی ویژه به وضعیت پایداری تونل شیبلی

دکتر مرتضی احمدی[i]؛ دکتر حسین حسنی[ii]؛ مسعود دهقانی مقدم[iii]

چکیده

وضعیت تنش و جابجایی در اطراف حفاری های زیر زمینی سه بعدی است. بنابراین برای تحلیل کامل تنشها و جابجایی‌ها در اطراف فضاهای زیر زمینی باید از روش‌های سه بعدی استفاده کرد. در این تحقیق به منظور مقایسه‌ی تحلیل دوبعدی و سه بعدی از تحلیل پایداری تونل شیبلی استفاده شده است. تونل شیبلی یک تونل دو خطه راه آهن است که در منطقه شیبلی آذربایجان شرقی حفر خواهد شد. زمین در بر گیرنده تونل از تناوب سنگ آهک شیلی شیستوزیته شده و کنگلومرای دوران کرتاسه فوقانی تشکیل شده است. برای تحلیل پایداری این تونل دو نرم افزار FLAC و FLAC3D بکارگرفته شده است. با استفاده از کرنش بحرانی ساکورایی یک سطح هشدار تعریف شده و به منظور برآورد میزان پایداری تونل جابجایی های تونل با سطح هشدار مذکور مقایسه شده‌اند. مطابق نتایج بدست آمده از مدلهای دو بعدی و سه بعدی مشخص شد که چنانچه در سنگ‌های ضعیف پیشروی سینه کار حفاری درمدل عددی در نظر گرفته شود و تونل نامحدود باشد، جابجایی‌ها در حالت سه بعدی بیشتر از حالت دو بعدی خواهد بود.

کلمات کلیدی

تونل راه آهن، تحلیل پایداری، کرنش بحرانی، تحلیل دو بعدی، تحلیل سه بعدی، نرم افزارFLAC3D

Comparing between 2D and 3D numeral stability analysis with respect to stability status of Shibli tunnel

M.Ahmadi; H.Hassani; M.Dehghani M.

ABSTRACT

Stress and strain around an underground spaces in reality are three dimension. Therefore, in order to analyze the stress and displacement around underground spaces, 3D methods should be applied. In this investigation, stability analyzing of Shibli tunnel is used to comparing between 2D and 3D analyze. Shibli tunnel is a double track railway tunnel, will excavate in the Shibli region. The rock type of tunnel consists of an alternation of shaley limestone and Cretaceous conglomerate. Flac, and Flac3D codes are applied for stability analysis of the tunnel. Further, a hazard warning level was defined using Sakuraii's critical strain and for estimating stability of the tunnel, displacements around tunnel are compared with that of the hazard warning level. According to the results of 2D and 3D analysis, in weak rocks, if the effect of advancing face is considered in numerical modeling and the tunnel is open-ended, displacements in 3D model will be more than displacements in 2D model.

KEYWORDS

Railway tunnel, Stability analysis, Critical strain, 2D analysis, 3D analysis, FLAC3D code.

[i] گروه مکانیک سنگ بخش مهندسی معدن،دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، moahmadi@modares.ac.ir

[ii] دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه امیرکبیر، hhassani@aut.ac.ir

[iii] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ بخش مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس mdehghany@gmail.com

۱- مقدمه

بطور نظری، وضعیت تنش و جابجایی در اطراف حفاری های زیر زمینی به صورت سه بعدی است. بنابراین برای تحلیل صحیح تنشها و جابجایی‌ها در اطراف فضاهای زیر زمینی باید از روش‌های سه بعدی استفاده کرد. با این‌حال در تونل‌سازی این تحلیل پیچیده معمولا با یک فرض کرنش صفحه‌ای در یک مقطع عرضی جایگزین می‌شود و یکی از اجزاء تنش اصلی برجا به موازات محور طولی حفاری در نظر گرفته می‌شود. در چنین رویکردی تغییرات هندسی مقطع عرضی حفاری و تغییرات خواص مکانیکی و رفتار محیط در بر گیرنده (خاک وسنگ) در طول محور طولی حفاری یکسان فرض می‌شوند. به هر حال نتایج چنین تحلیلی تنها نشان دهنده‌ی یک وضعیت تغییر شکل یافته تونل (به عنوان مثال وضعیت نهایی تونل) است. همچنین این تحلیل گسترش تنشها و جابجایی‌ها در طول تونل را نشان نمی‌دهد. به هر صورت تحلیل تنش با در نظر گرفتن مقطع طولی تونل (با در نظر گرفتن سینه کار حفاری) می‌تواند در هر گام مقدار جابجایی را که در اطراف سینه کار اتفاق می‌افتد، نشان دهد[۵].

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

سازههای زیر زمینی که توزیع تنش در اطراف آن می‌تواند به صورت دو بعدی تحلیل شود "فضاهای دوبعدی" خوانده می‌شوند. به هر حال حتی در تونل نیز که معمول‌ترین مثال فضای دو بعدی است، نواحی وجود دارند که باید به صورت سه بعدی تحلیل شوند. بهترین مثالها از این نواحی، محل تقاطع با دیگر فضاهای زیرزمینی، ورودی تونلها و سینه کار حفاری است. در این نواحی، مناطق سه بعدی در برگیرنده سینه کار حفاری بسیار مهم است.

در بررسی اثر سینه کار حفاری روی میزان جابجایی در اطراف تونل، مشخص شده است که اگر مدل رفتاری ماده دوره تونل الاستیک در نظر گرفته شود، تاثیر سینه کار حفاری ۲ تا ۳ برابر قطر تونل در راستای پیشروی بوده و اگر مدل رفتاری ماده دوره تونل الاستوپلاستیک در نظر گرفته شود، این تاثیر به خصوصیات توده سنگ بستگی داشته و چندین برابر قطر تونل خواهد بود[۵].

مطالعه این نواحی می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد پایداری و نگهداری مورد نیاز ارائه دهد. این موضوع مهمترین جنبه طراحی از لحاظ ایمنی و اقتصاد است. هنوز هندسه پیچیده و شرایط مرزی این مساله به گونه‌ای است که پیدا کردن یک راه حل فرم بسته را برای آن غیر ممکن می‌سازد. در نتیجه بطور عمده، مطالعات عددی و در حد کمتری اندازه گیری‌های برجا برای بررسی این مسئله مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات عددی، رفتار مواد الاستیک، الاستوپلاستیک، ویسکوپلاستیک، و غیره را شامل می‌شود. این مطالعات برای بررسی همگرایی تونل، تحلیل اندرکنش سنگ و نگهداری، تخمین ناپایداری سینه کار و غیره بکار رفته‌اند.

مطالعه تنش و جابجایی در اطراف سینه کار پیشروی تونل همیشه یکی از موضوعات مورد علاقه محققین در زمینه مکانیک سنگ بوده است. یکی از دلایل این علاقه‌مندی این است که توزیع تنش و جابجایی در اطراف سینه کار پیشروی، اطلاعات ارزشمندی در مورد پایداری تونل ارائه می‌دهد. همچنین هیچ روش فرم بسته‌ای برای این مساله‌ی پیچیده وجود ندارد و باید توسط تحلیل‌های سه بعدی انجام شود[۵].

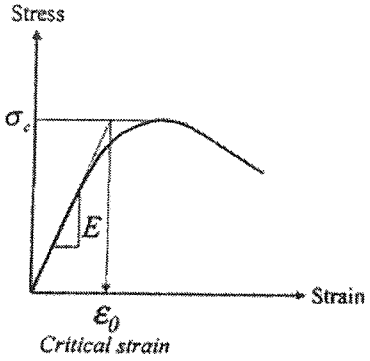
در این تحقیق به منظور مقایسه نتایج تحلیل دو بعدی و سه بعدی و همچنین بررسی تاثیر در نظر گرفتن پیشرفت سینه کار حفاری در نتایج تحلیل عددی سه بعدی از نتایج تحلیل عددی پایداری تونل شیبلی استفاده شده است.

به منظور برآورد پایداری فضاهای زیر زمینی، ساکورایی توصیه می‌کند که قبل از شروع احداث فضاهای زیر زمینی، یک سطح هشدار خطر برای هر اندازه‌گیری انجام شود. این کار امکان تخمین پایداری را بلافاصله پس از اندازه گیری مقادیر جابجایی و مقایسه آن با سطح هشدار خطر ممکن می‌سازد[۳].

برای تشخیص سطح هشدار خطر، ساکورایی در سال ۱۹۸۱ کرنش بحرانی را پیشنهاد نموده است که می‌تواند برای برآورد نتایج جابجایی اندازه گیری شده در تونلها مانند نشست تاج، همگرایی و اندازه گیری‌های اکستنسومترها استفاده شود. تعریف کرنش بحرانی(ε_c) چنین است:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \qquad (۱)$$

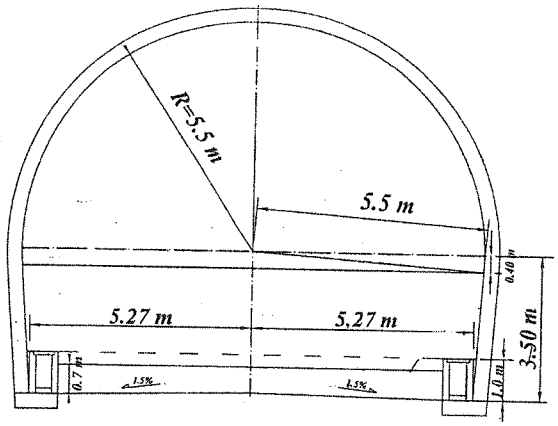
که در آن σ_c مقاومت فشاری تک محوره و E مدول یانگ است[۴]. شکل (۱) تعریف کرنش بحرانی پیشنهاد شده ساکورایی را نشان می‌دهد.



شکل(۱) تعریف کرنش بحرانی[۴].

۳- مشخصات تونل شیبلی

تونل شیبلی یک تونل دو خطه راه آهن است که در منطقه شیبلی آذربایجان شرقی حفر خواهد شد. این تونل در حد فاصل ۱۴۷+۷۰۰ و ۱۵۰+۵۰۰ خط راه آهن میانه-تبریز قرار دارد. طول تونل ۲۸۰۰ متر و محور تونل مستقیم با شیب طولی ملایم است. . در محدوده کیلومتر ۱۴۹+۳۰۰ بلندترین تراز سطح زمین ۲۱۷۵ متر و پایین ترین تراز آن در محدوده دهانه ورودی ۱۹۹۵ متر است. بنابراین حداکثر عمق تونل ۱۸۰ متر است که جزء تونلهای نیمه عمیق بشمار می-آید. مقطع هندسی تونل در شکل (۲) نشان داده شده است [۱].



شکل(۲) مقطع عرضی تونل راه آهن دو خطه [۱].

٤- زمین شناسی منطقه در بر گیرنده تونل

زمین در بر گیرنده تونل از تناوب سنگ آهک شیلی شیستوزیته شده و کنگلومرای دوران کرتاسه فوقانی تشکیل شده است. این سنگها لایه بندی منظم دارند و ضخامت لایه ها بین ۲۰ سانتیمتر تا ۱/۵ متر است. سطح زمین تونل بدلیل فرسودگی و تخریب‌های سطحی ساخت تپه ماهوری مرتفع دارد. زاویه شیب طولی و عرض دامنه ها در بخشهای میانی کمتر از ۴۵ درجه و در دامنه خروجی، بخصوص در دامنه ورودی بسیار ملایم است، بطوریکه عمق سقف تونل از سطح زمین در طول حدود ۷۰۰ متر، کمتر از ۶۰ متر است.

محل مورد مطالعه که در نزدیکی گسل بزرگ شیبلی قرار گرفته است، به شدت تکتونیزه شده و تشکیل گسلهای فرعی در سنگهای کرتاسه و حتی در رسوبات جوانتر نمایانگر ادامه فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه است[۱].

۵- رده بندی توده سنگ در بر گیرنده تونل شیبلی

به منظور تعیین امتیاز توده سنگ در بر گیرنده تونل شیبلی منطقه در بر گیرنده به ۱۱ محدوده تقسیم شده و طبقه بندی توده سنگ در هر محدوده مشخص شده است. مطابق بررسی-های انجام شده امتیاز RMR منطقه در نواحی مختلف بین ۳۱ تا ۴۴ است، بطوریکه در نواحی ورودی تونل توده سنگ ضعیف تر بوده و در نواحی میانی توده سنگ مقاوم تراست [۲] .

۶- شرح مدلهای عددی

به منظور تحلیل عددی، با توجه به لایه بندی در منطقه، سنگ در بر گیرنده‌ی تونل به ۴ ناحیه تقسیم شد. نظر به اینکه اطلاعات اولیه (گمانه های اکتشافی) در ناحیه ۲ تونل کامل تر است، بررسی های عددی در این ناحیه از تونل انجام شده است. با توجه به آزمایش‌های تک محوری که درآزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس انجام شدند، پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکرمحاسبه شد. سپس خصوصیات مکانیکی توده سنگ با توجه به رابطه سرافیم و جداول ارائه شده توسط بینیاویسکی و بیسکود محاسبه شد که مقادیر آن در جدول (۱) گزارش شده است. تنشهای عمودی با توجه به وزن روباره محاسبه شد. از آنجا که ضریب K (نسبت تنش افقی به قائم) در منطقه اندازه گیری نشده بود، آنالیز حساسیت در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه منطقه شیبلی به شدت تکتونیزه است، فرض لیتواستاتیک (K_S=۰/۳۳) برای منطقه رد شده و تحلیلها با فرض مقادیر ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ انجام شد. مقدار وزن مخصوص سنگ ارائه شده در جدول (۱) با توجه به نتایج گزارش آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی شده است.

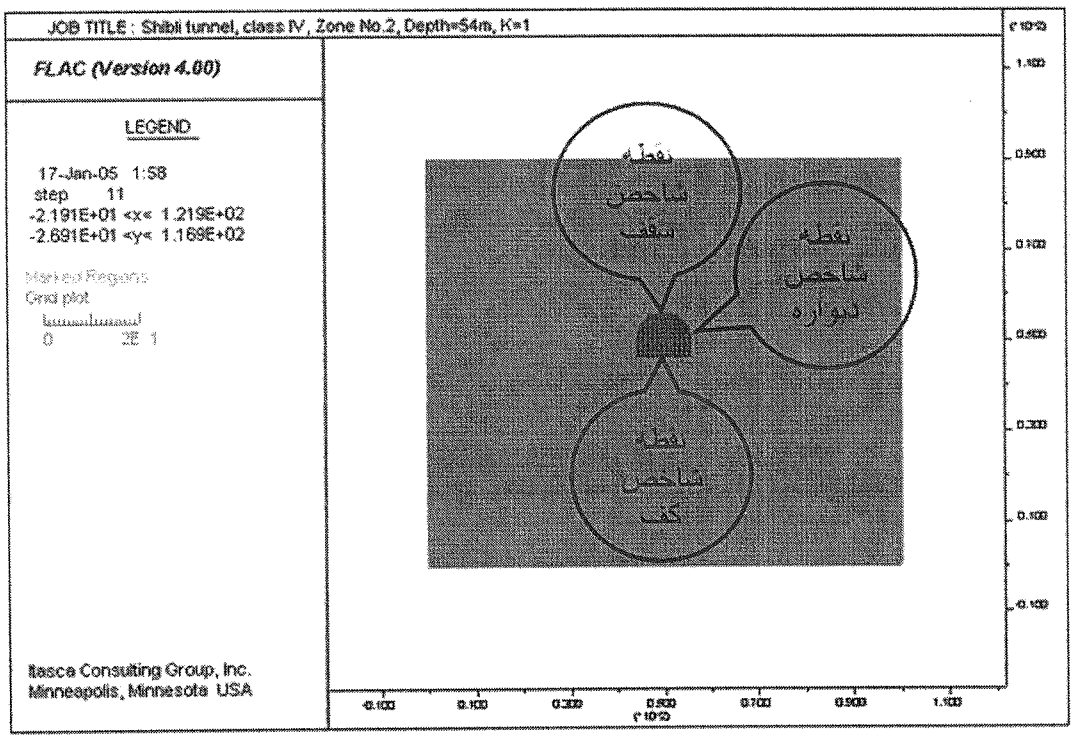
برای مدلسازی عددی دو بعدی از نرم افزار FLAC و برای بررسی دقیق تر جابجایی‌های ناشی از پیشرفت سینه کار از مدل سه بعدی ساخته شده توسط نرم افزار FLAC3D استفاده شد. ابعاد مدل ساخته شده در مقطع، در هر دو نرم افزار یکسان بوده و از مش بندی مشابهی در هر دو مدل دو بعدی و سه بعدی استفاده شده است. مرزها در فاصله ای بیش از پنج

برابر شعاع تونل قرار داده شد و شرایط مرزی به آن اعمال گشت. ابعاد مدل در جهت افقی ۱۰۰ متر و در جهت عمودی نیز ۹۰ متر در نظر گرفته شد.

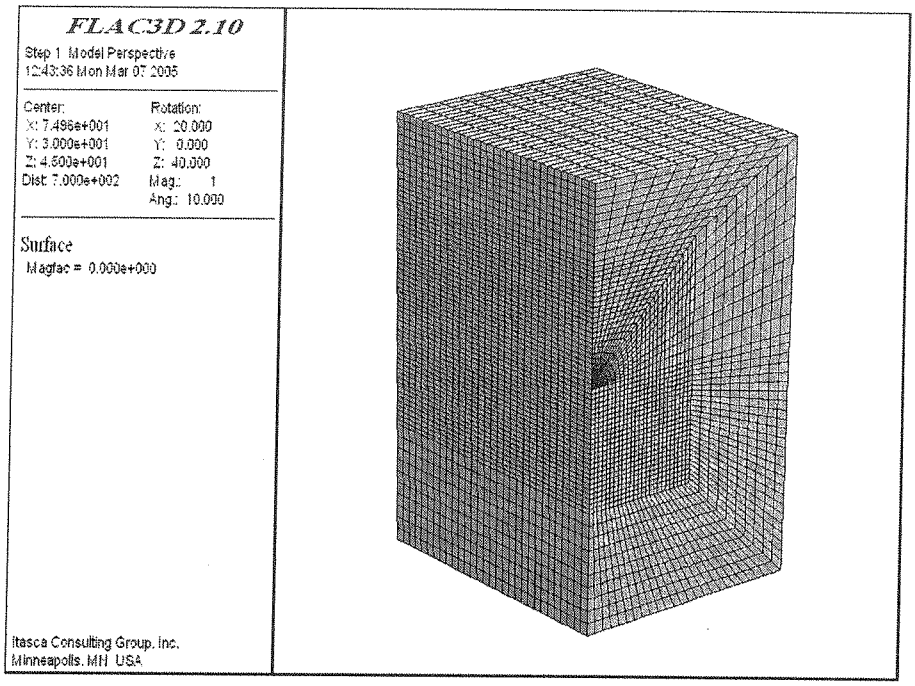
به منظور تحلیل پایداری از معیار شکست موهر-کلمب و همچنین کرنش بحرانی ساکورایی استفاده شد. برای بررسی دقیق جابجایی و کرنش، نقاط تاریخچه‌ای در نقاط شاخص سقف، دیواره و کف در نظر گرفته شد. این نقاط شاخص به همراه مش بندی مدل در نرم افزار FLAC در شکل (۳) نشان داده شده است. به دلیل اینکه شرایط فرض شده برای تونل کاملا به صورت متقارن است، در مدل سه بعدی تونل به صورت نیمه مدل شد و شرایط مرزی تقارن محوری به آن اعمال گشت(شکل (۴)).

جدول(۱) مشخصات ناحیه های مختلف تونل به منظور انجام تحلیل عددی.

مشخصات ناحیه / شماره ی ناحیه	ارتفاع روباره(m)	γ $\left(Kg/m^3\right)$	ϕ°	E(GPa)	C(KPa)	K(GPa)	G(GPa)
II (کیلومتر ۲۰۰-۱۴۸ تا ۳۰۰-۱۴۸)	۵۴	۲۶۰۰	۲۰	۳/۳۵	۱۵۰	۲/۲۳	۱/۳۴
III (کیلومتر ۳۰۰-۱۴۸ تا ۹۰۰-۱۴۸)	۱۱۹	۲۶۰۰	۲۵	۵/۳	۲۰۰	۳/۵۴	۲/۱۲۳
IV (کیلومتر ۹۰۰-۱۴۸ تا ۱۱۰-۱۵۰)	۱۸۰	۲۶۰۰	۲۷	۷/۰۸	۲۴۰	۴/۷۲	۲/۸۳
V (کیلومتر ۱۱۰-۱۵۰ تا ۵۳۵-۱۵۰)	۷۲	۲۶۰۰	۲۲	۳/۹۸	۱۷۰	۲/۶۵۴	۱/۵۹۲



شکل(۳) مش بندی، ابعاد و موقعیت نقاط شاخص تونل.



شکل(۴) مش بندی مدل سه بعدی.

۷- مدلسازی عددی ناحیه شماره ۲

در این ناحیه حد اکثر ارتفاع روباره ۵۴ متر است. به دلیل مشخص نبودن وضعیت تنش-های افقی در منطقه، تحلیل‌ها در دامنه-ای از K_S انجام شده-اند. در این ناحیه RMR=۳۱ و مشخصات الاستوپلاستیک معادل توده سنگ از جدول (۱) قابل استحصال است. به منظور برآورد وضعیت پایداری توده سنگ ، مدلسازی بر اساس شرایط کرنش صفحه-ای در نرم افزار FLAC انجام و جابجایی‌های محاسبه شده در نقاط شاخص تونل در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول(۲) جابجایی محاسبه شده توسط نرم افزار FLAC در نقاط شاخص تونل در شرایط مختلف تنش در ناحیه شماره ۲

جابجایی / نسبت K_S	در کف (cm)	در دیواره (cm)	در سقف (cm)
۰/۷۵	۱/۴۳	۲/۴۵	۲/۷۴
۱	۱/۶۶	۲/۴۷	۲/۶۵
۱/۵	۳/۴۴	۳/۳۴	۴/۵۲

با توجه به معیار کرنش بحرانی ساکورایی مقدارتغییر شکل بحرانی محاسبه می شود:

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_c = ۱۳/۵MPa \\ E = ۳/۳۵GPa\end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l}\varepsilon_o = \dfrac{\sigma_{cR}}{E_R} = \dfrac{۱۳/۵\times۱۰^{۶}}{۳/۳۵\times۱۰^{۹}} = ۰/۰۰۴۰۲۱ \\ \varepsilon_\theta = \dfrac{u_c}{a}, a = ۶m\end{array}\right\} \Rightarrow (۲)$$

$$u_c = ۰/۰۲۴۲m = ۲/۴۲cm$$

که در آن a شعاع تونل است. با مشاهده جدول (۲) مشخص می شود که با افزایش مقدار KS جابجایی ها درتمام نقاط تونل افزایش پیدا می کند. با مقایسه جابجایی‌ها و رابطه (۲) مشخص می‌شود که جابجایی در تونل بیش ازحد بحرانی است و تونل احتیاج به نگهداری اولیه دارد.

برای بررسی صحت تحلیل-های انجام شده از نرم افزار FLAC3D استفاده شد. برای این منظور از یک مدل که بعد سوم آن در جهت محور تونل برابر واحد در نظر گرفته شده و تمام گره-های آن در جهت محور تونل ثابت شده-اند، استفاده شد. برای بالا بردن دقت مقایسه ابعاد مدل FLAC3D برابر ابعاد مدل FLAC انتخاب شدند. نتیجه این تحلیل‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول(۳) جابجایی در نقاط شاخص تونل در مدل دو بعدی ساخته شده توسط نرم افزار FLAC3D در شرایط مختلف تنش در ناحیه شماره ۲.

جابجایی / نسبت K_S	در کف (cm)	در دیواره (cm)	در سقف (cm)
۱/۵	۳/۴	۳/۲۱	۴/۲۷

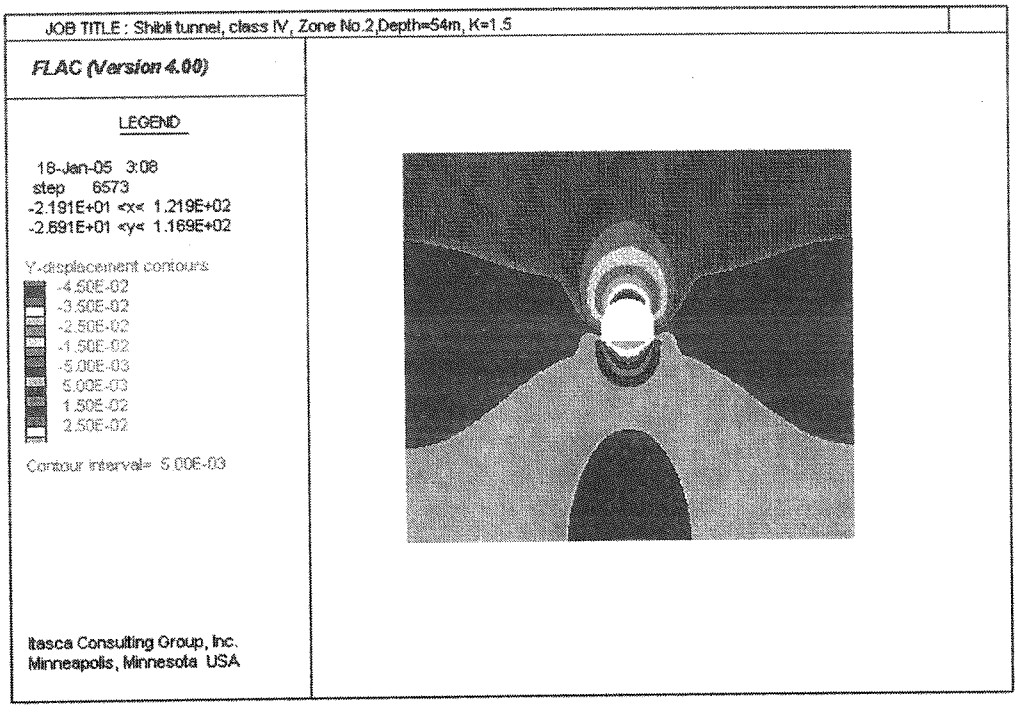
با مقایسه این نتایج با نتایج جدول (۲) مشاهده می شود که تطابق بسیار خوبی بین نتایج به دست آمده وجود دارد. بنابراین ثابت می-شود: اولا هردو نرم افزار از مدل ریاضی و روابط مشابهی برای تحلیل عددی استفاده می-نمایند و ثانیا مدل دو بعدی ساخته شده توسط نرم افزار FLAC3D صحیح است. بنابراین از این به بعد جهت مقایسه مدل دو بعدی و سه بعدی از مدل دو بعدی ساخته شده توسط نرم افزار FLAC3D

استفاده می‌شود. به منظور مقایسه ملموس‌تر نتایج، خروجی های تصویری هردو نرم افزار در حالت K_S=۱/۵، در شکل‌های ۵ تا ۸ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

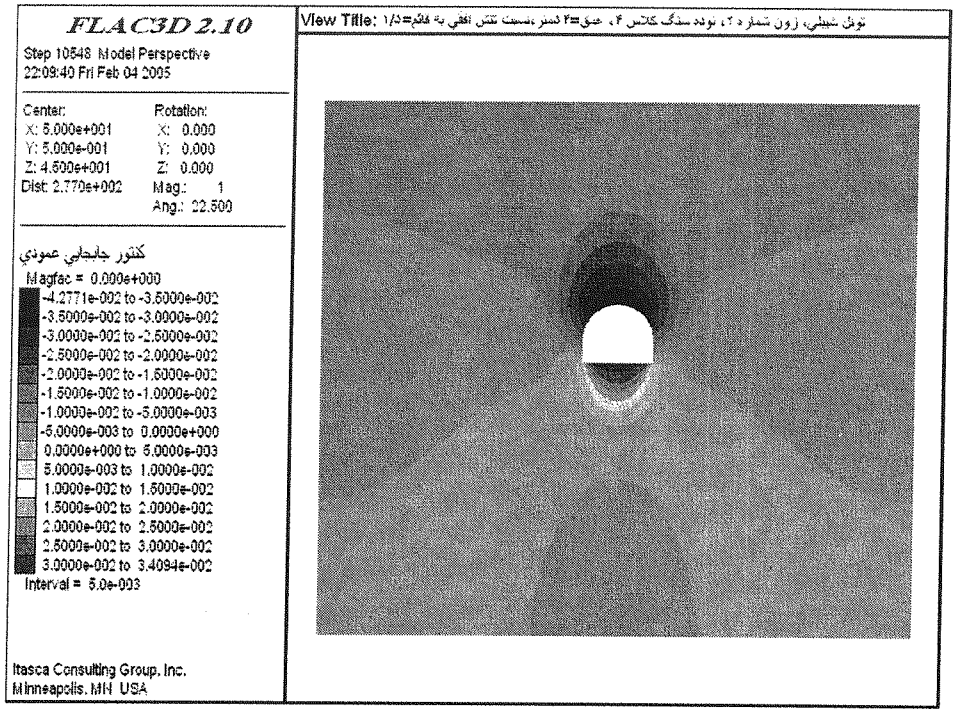
برای بررسی دقیق‌تر در این ناحیه از تحلیل سه بعدی توسط نرم افزار FLAC3D استفاده شد. برای این کار از یک مدل سه بعدی که مش بندی آن در مقطع مانند مش بندی مدل دوبعدیFLAC3D ذکر شده است، استفاده شد. به دلیل تقارن تونل در محور مرکزی، تونل به صورت نیمه مدل شد. بعد سوم در جهت محور تونل برابر ۶۰ متر در نظر گرفته شد. مدل با همان مشخصات چندین بار مورد تحلیل قرار گرفت و در هر تحلیل طول پیشروی به ترتیب ۶۰، ۳۰، ۱۰ و۲ متر در نظر گرفته شد. پس از هر مرحله پیشروی مدل به تعادل رسانده شد و جابجایی‌های حداکثر در تونل در نقاط سقف، دیواره و کف اندازه گیری شد. برای این منظور از یک تابع فیش (Fish function) برای اجرای مراحل مختلف حفاری استفاده شد.

شکل (۹) تغییرات جابجایی نهایی با تغییرات طول پیشروی در هر سیکل را برای موقعی که ضریب K_S=۱/۵ است، نشان می دهد. با مقایسه این شکل و جدول (۳) مشاهده می‌شود که جابجایی‌ها در حالتی که پیشروی برابر ۶۰ متر است (کل تونل در یک مرحله حفر می شود) برابر حالت دو بعدی می‌باشد. دلیل حصول این نتیجه آن است که در این حالت تاثیر پیشرفت سینه کار حفاری در مدل سه بعدی وجود ندارد و کل تونل در یک مرحله حفاری شده است. با کاهش مقدار پیشروی در هر سیکل، مقدار جابجایی نهایی در مدل نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه آن است که با کاهش مقدار پیشروی در هر سیکل، تعداد دفعاتی که توده سنگ تحت تاثیر تمرکز تنش ناشی از پیشروی سینه کار حفاری قرار می‌گیرد، بیشتر می‌شود. در شکل (۹) مقادیر جابجایی نهایی سقف تونل با پیشروی ۲، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ متر در هر سیکل پیشروی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در سنگ‌های ضعیف چنانچه تاثیر پیشروی سینه کار حفاری در مدل اعمال شود، جابجایی‌ها نسب به مدل دو بعدی افزایش پیدا می‌کند و در غیر اینصورت جابجایی‌ها برابر جابجایی‌های مدل دو بعدی می‌شوند.

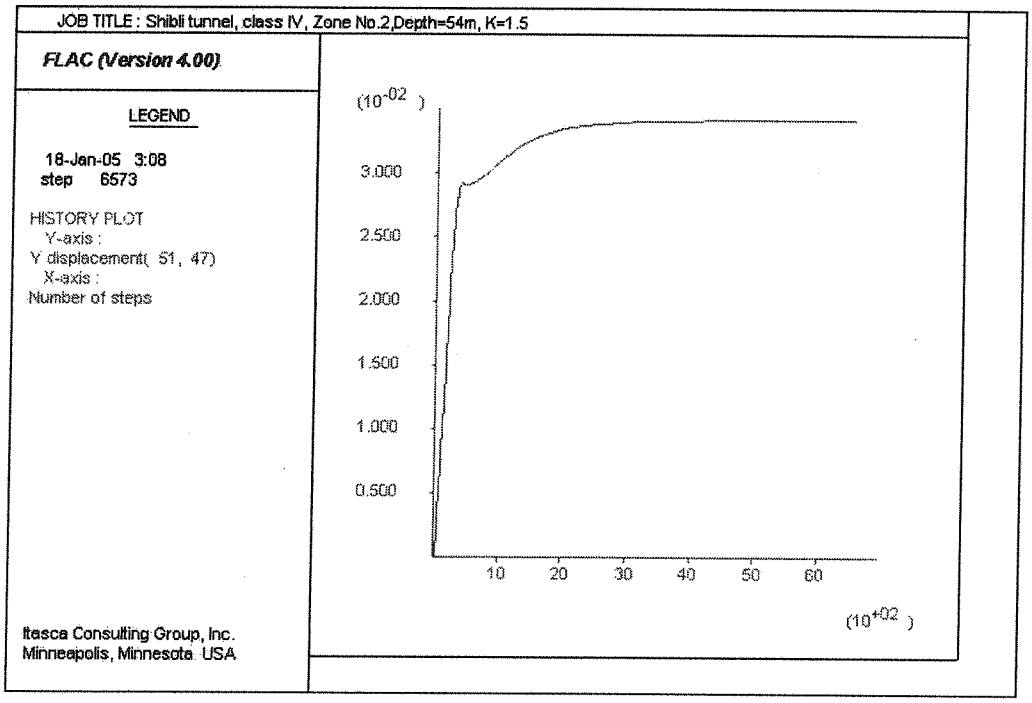
همانطور که در شکل ۱۰ مشخص شده است، محدوده تاثیر سینه کار حفاری ۵ برابر قطر تونل است.



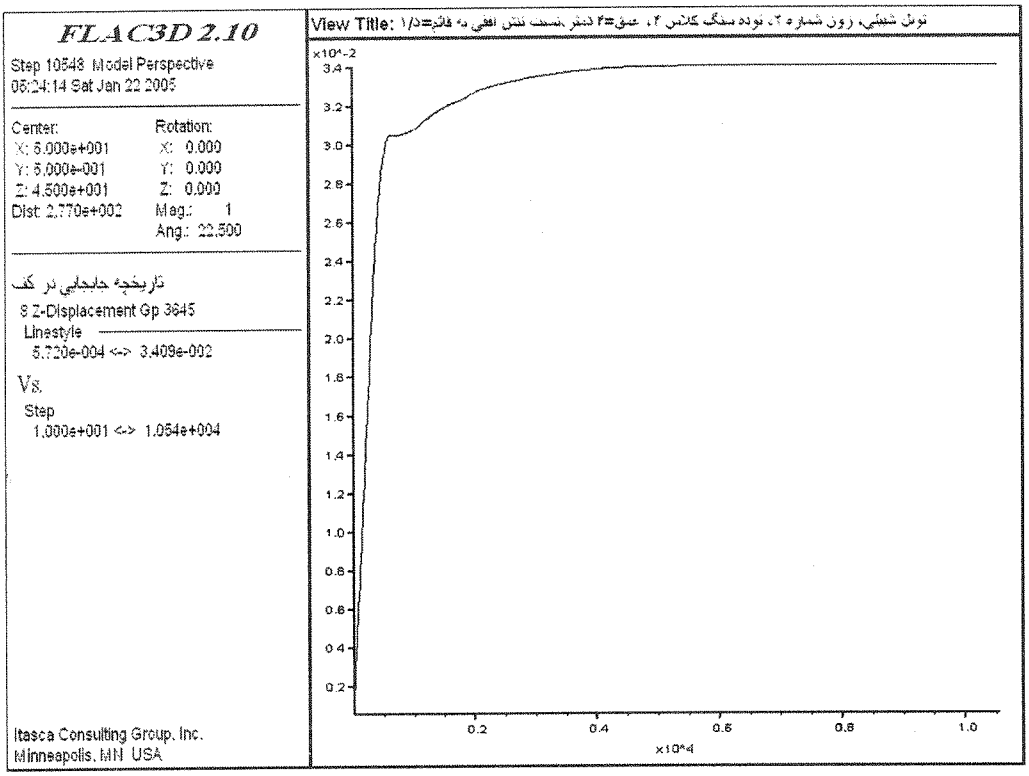
شکل(۵) خطوط میزان جابجایی عمودی در مدل دوبعدی FLAC



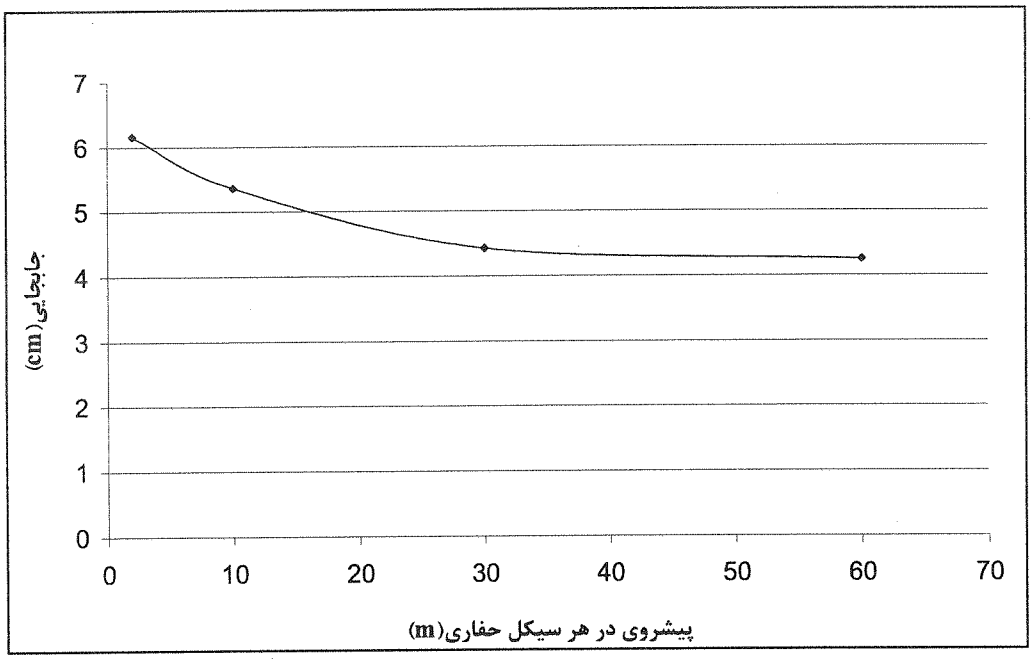
شکل(۶) خطوط میزان جابجایی عمودی در مدل دوبعدی FLAC3D.



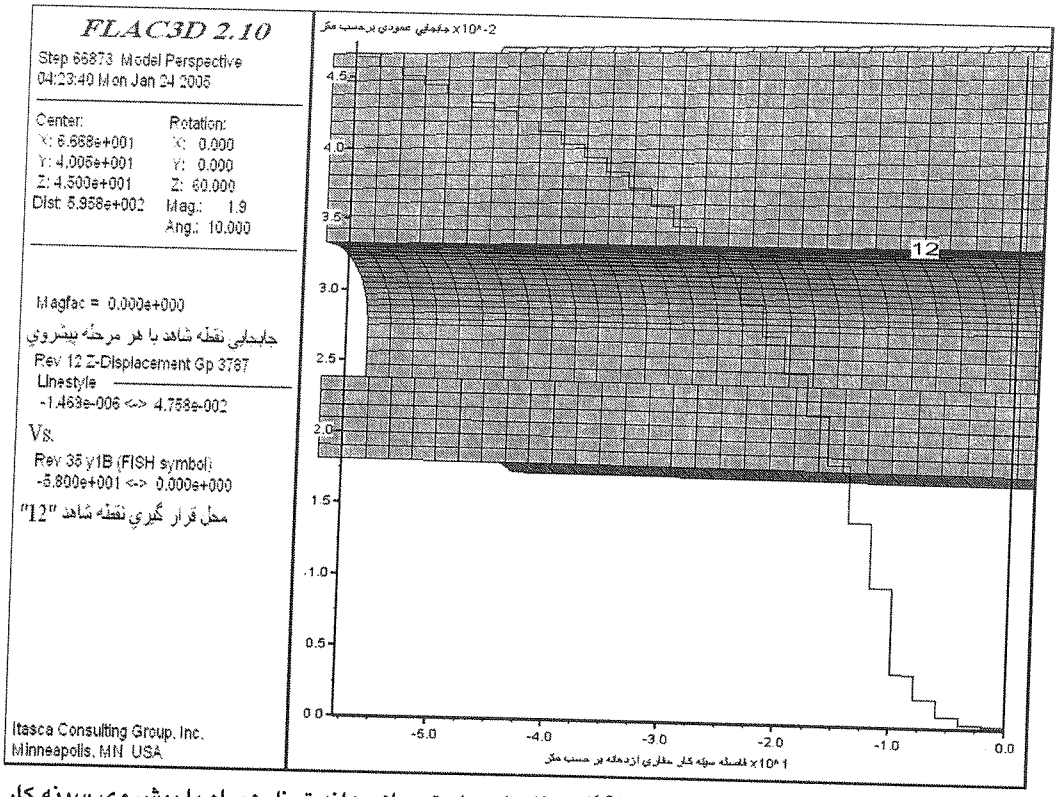
شکل(۷) جابجایی عمودی در نقطه شاخص کف تونل در مدل دو بعدی FLAC.



شکل(۸) جابجایی عمودی در نقطه شاخص کف تونل در مدل دو بعدی FLAC3D.



شکل(۹) تغییرات جابجایی نهایی در مدل با تغییرات پیشروی در هر سیکل.



شکل(۱۰) منحنی جابجایی قائم نقطه شاهد (12) در فاصله ۱۰ متری از دهانه تونل همراه با پیشروی سینه کار حفاری(حفاری از راست به چپ و بدون نگهداری است، نرخ پیشروی در هر سیکل ۲m).

۸- نتیجه گیری

۱- مقایسه مدلسازی دوبعدی و سه بعدی در حالت الاستوپلاستیک انجام شده نشان می‌دهد که در سنگهای ضعیف در صورتیکه در مدل سه بعدی پیشرفت سینه کار حفاری در نظر گرفته شود، جابجایی در دیواره تونل نسبت به حالت دو بعدی بیشتر می‌شود و جابجایی در یک نقطه مفروض به فاصله سینه کار حفاری از آن نقطه وابسته است.

۲-میزان پیشروی در هر مرحله بر روی جابجایی نهایی در دیواره تونل تاثیر دارد، بطوری که با کاهش پیشروی در هر سیکل جابجایی نهایی افزایش می‌یابد.

۳-استفاده از مدلسازی سه بعدی اطلاعات ارزشمندی را درباره جابجایی و تنش در اطراف فضاهای زیر زمینی ارائه می‌دهد ولی استفاده از این مدلسازی بسیار زمانبر و پر هزینه است. بنابراین، در تصمیم گیری برای استفاده از مدلسازی سه بعدی در پروژه های عملی بایستی عامل زمان در نظر گرفته شود.

۹- تقدیر و تشکر

لازم است از دوستان گرانقدر آقایان مهندس نوروزی و مهندس اشجاری بخاطر کمک در کسب اطلاعات اولیه و راهنمائی‌های ارزشمندشان تشکر شود.

۱۰- مراجع

[۱] گزارش "زمین شناسی تونل شیبلی"، ۱۳۸۱، شرکت مشاورین رهاب، معاونت ساخت و توسعه راه آهن.

[۲] گزارش "بررسی های ژئوتکنیکی تونل شیبلی"، ۱۳۸۲، شرکت مشاورین رهاب، معاونت ساخت و توسعه راه آهن.

[3] Sakuni S., 1997, "Lessons Learned from field measurements in tunnlling", Tunnelling and underground space technology, vol.12 No.4, pp 453-460.

[4] Shunsuke Sakurai, Akutagava S., Takeuchi K., 200 'Modern Tunnelling Science and Technology', A.A.Balkema, Tokyo, p 1165

[5] Unlu T., Gercek H., Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 18 (200) 547–553