

بررسی پایداری مقطع مستطیلی شفت ورودی ماشین تونل زنی تمام مقطع (TBM) با استفاده از مدل سازی عددی

پژوهشی

هومان ریحان پور^۱؛ مهدی نجفی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ مکانیک سنگ، دانشگاه یزد، homanraihanpoor@gmail.com

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، mehdinajafi@yazd.ac.ir

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

شماره صفحات: ۳۵۱ تا ۳۶۷

شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.23223111.1399.9.4.2.1

واژگان کلیدی	چکیده
شفت مستطیلی	حفاری تونل های مترو گاهی از داخل شفت قائم با سطح مقطع و عمق مناسب انجام می شود. این شفت
تحلیل پایداری TBM	برای مونتاژ و انتقال TBM، رفت و آمد کارکنان و ماشین آلات لازم استفاده می شود. چنانچه از شفت احداث
مدل سازی عددی	ایستگاه برای این منظور استفاده شود، مقطع شفت مستطیل خواهد بود، در غیر این صورت مقطع دایره نیز
	برای آن کار قابل استفاده است. در مواردی ناپایداری هایی در دیواره این شفت ها اتفاق افتاده است. هدف
	اصلی این تحقیق بررسی پایداری شفت های مستطیلی و دایروی به منظور ورودی دستگاه TBM است که در این تحقیق مسایل ناپایداری
	دیواره شفت بررسی شده است. ابزار مورد استفاده در این تحقیق روش های عددی به کمک نرم افزار FLAC3D است. نتایج مدل های عددی
	نشان داده است که میزان ریزش در دیواره شفت مستطیلی در راستای افقی با فاصله گرفتن از گوشه شفت مستطیلی در عمق افزایش می یابد؛
	همچنین تمرکز تنش در گوشه های شفت مستطیلی نسبت به دیواره های کناری بسیار زیاد است و به مرور زمان باعث ناپایداری می شود. علاوه
	بر این، میزان لنگر خمشی وارد شده به سیستم نگهداری زیاد است و سبب ناپایداری آن می شود که نیاز به المان های سازه ای برای کاهش
	لنگر را دارد.

۱- مقدمه

مونتاژ و شروع به کار در زیرزمین نیاز به طراحی محیطی دارد تا بتوان از آن جهت شروع به کار دستگاه TBM استفاده کرد. با توجه به کمبود فضا در محیط های شهری، طراحی و اجرای شفت (Shaft) یا همان چاه قائم به عنوان ورودی این دستگاه اهمیت فراوانی دارد.

قطر تونل های مترو در ایران ۹/۴ متر برای تونل های دو مسیره و ۶ متر برای تک مسیره است. معمولاً طول دستگاه TBM، 10 تا ۱۲ متر و طول سیستم پشتیبانی آن حدود ۱۰۰ متر است. یکی از مهم ترین مباحث بررسی

امروزه با توجه به افزایش جمعیت شهری، نیاز به توسعه حمل و نقل عمومی، به خصوص مترو، جهت جابجایی افراد و کاهش آلودگی ها برای کاهش ترافیک، رشد قابل توجهی پیدا کرده است. با افزایش فناوری های جدید، استفاده از ماشین های حفار مکانیزه جهت حفر تونل ها پیشرفت فراوانی نموده است. یکی از ماشین های مکانیزه جهت حفر تونل، ماشین تونل زنی تمام مقطع (TBM) است. این دستگاه به دلیل طول زیاد و وزن فوق العاده سنگینی که دارد، جهت

خاک در حین حفاری نتیجه گرفتند که میزان جابجایی در دیواره به هندسه حفاری بستگی دارد (Ou, et al., 2000). پاکباز و ایمان زاده در سال ۲۰۱۳ با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از گودبرداری انجام شده در ۵ ایستگاه مترو اهواز به این نتایج رسیدند که بیشترین میزان تغییر شکل جانبی بین ۰/۵ درصد تا ۰/۷ درصد ارتفاع حفاری شده است (Pakbaz, et al., 2013). کیم و همکاران در سال ۲۰۱۳ با انجام آزمون‌هایی روی شفت قایم نتیجه گرفتند که فشار جانبی زمین روی شفت دایره‌ای عمودی کمتر از سازه‌های دیگر است (Kim, et al., 2013). آبی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی چگونگی توزیع تنش در اطراف شفت‌ها با قطر بزرگ و همچنین بررسی مشکلات مربوط به آن در زمین نرم پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که شفت از پایداری مناسبی برخوردار است (Aye, et al., 2014). چو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی بزرگی و توزیع فشار جانبی روی یک شفت عمودی دایره‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که قوس بر پایداری شفت بسیار تأثیرگذار است؛ زیرا زمانی که سپر قوسی برای شفت در نظر گرفته شده است، فشار جانبی زمین در یک شفت عمودی ۸۰ درصد کمتر از حالت بدون استفاده از سپر قوسی است که وابستگی به هندسه شفت دارد (Cho, et al., 2015). جورجیانو و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی روش نگهداری شفت دایره‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداختند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داده است که با تغییر پارامترهای خاک ناحیه پلاستیک در کف شفت تغییر قابل توجهی کرده است؛ همچنین مقادیر تنش در اطراف شفت دایره‌ای با افزایش عمق افزایش یافته است (Georgiannou, et al., 2017). مفتاح و همکاران در سال ۲۰۱۸ توزیع فشار زمین روی شفت دایره‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی را بررسی کردند؛ نتایج نشان داده است که فشار جانبی زمین روی شفت دایره‌ای وابسته به زاویه اصطکاک داخلی و هندسه شفت است (Mefteh, et al., 2018).

در ایران برای حفر شفت به‌عنوان ورودی مونتاژ TBM بیشتر از شفت‌های مستطیلی استفاده کرده‌اند و در مواردی ناپایداری‌های زیادی در دیواره آن‌ها ایجاد شده است. بر این اساس هدف این تحقیق تحلیل پایداری دیواره شفت‌های

عوامل ناپایداری شفت‌های دسترسی به تونل است. اولین شرط برای پایدار ماندن یک شفت در حین حفاری وجود تعادل بین تمرکز تنش در نزدیکی دیواره چاه و مقاومت ساختار زمین اطراف آن است. ضرورت پایداری شفت برای مونتاژ دستگاه حفاری مکانیزه، انتقال کارکنان، تجهیزات، امداد و نجات و تخلیه مصالح حفاری شده به بیرون از تونل اهمیت دارد. تاکنون تحقیقاتی روی تحلیل پایداری شفت‌ها انجام شده است.

رستمی و همکاران در سال ۱۳۹۲ به بررسی پایداری شفت مستطیلی در خط ۷ متروی تهران با استفاده از نرم‌افزار *Plaxis 2D* پرداختند و سپس نشست زمین و تأثیر سختی محوری شمع‌ها و استرات روی تغییر شکل جانبی دیواره پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که بر اثر گودبرداری در خاک، وضعیت تنش در آن تغییر می‌کند و ممکن است، تغییر شکل‌ها و ناپایداری در آن به وجود آید. این تغییر شکل‌ها به صورت تغییر مکان جانبی در دیواره‌های گود، ناپایداری دیواره‌ها بر اثر برآمدگی و تورم در کف گود و همین‌طور به صورت نشست در نواحی مجاور گود خود را نشان می‌دهد (Rostami, et al., 2013). کاویانی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به کمک روش عددی تفاضل محدود، وضعیت پایداری شفت ورودی خط ۲ قطار شهری اصفهان بررسی نمودند. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان داده است که بررسی پایداری دیواره‌های شفت مستطیلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق جهت پایداری‌سازی شفت ورودی از سیستم‌های نگهداری بسیار قوی استفاده شده است (Kaveyani-Jazi, et al., 2017). باوس و چان در سال ۱۹۸۵ در مقایسه بین تغییر شکل دو شفت مستطیلی و دایره‌ای به این نتیجه رسیدند که شکل دایره‌ای شفت نسبت به عوامل زمین‌شناسی و تنش‌های اعمال شده دارای پایداری بیشتری است. در صورتی‌که شکل مستطیلی شفت به انواع رفتارها از جمله خمش و کشش بستگی دارد و با صرف‌نظر از شکل شفت، جابجایی و تنش‌ها به شرایط زمین‌شناسی و توده سنگ بستگی دارد. از این رو شفت دایره‌ای در شرایط نامطلوب زمین باید مورد استفاده قرار گیرد (Beus & chan, 1985). اوی و همکاران در سال ۲۰۰۰ به بررسی حرکت زمین و ریزش دیواره شفت پرداختند و با اندازه‌گیری جابجایی‌های

مسیر خط هفت متروی تهران و شفت F7 روی نقشه ماهواره‌ای نشان داده شده است (Sahel Consulting Engineering, 2015).

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی لایه‌های خاکی این منطقه به پنج واحد زمین‌شناسی مهندسی (ET-1 تا ET-5) تقسیم شده است شکل ۲، مقطع زمین‌شناسی ایستگاه حفاری شفت را نشان می‌دهد. در جدول ۱، واحدهای زمین‌شناسی با توصیف نوع خاک آن نشان داده شده است (Sahel Consulting Engineering, 2015).

پارامترهای ژئومکانیکی خاک منطقه طبق بررسی‌ها و مطالعات نیز طبق جدول ۲، برای هر واحد خاکی تعیین شده است؛ همچنین بر اساس مطالعات هیدروژئولوژی شفت مورد مطالعه در تراز بالاتر از آب زیرزمینی قرار دارد.

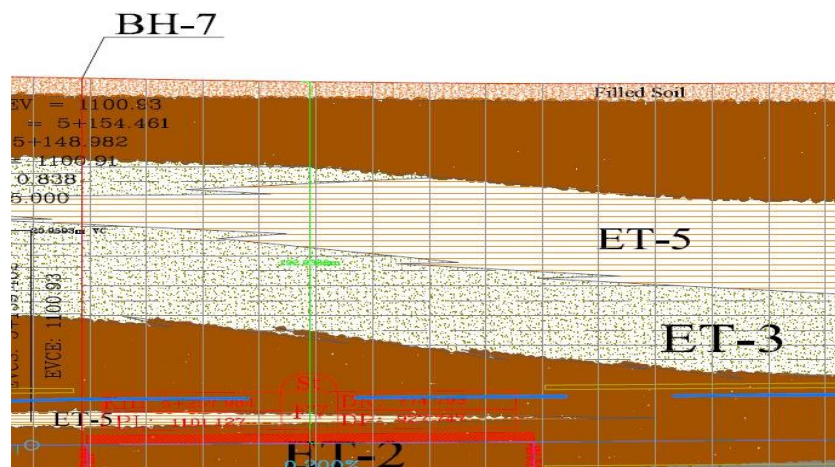
مستطیلی به‌عنوان ورودی TBM است. بر این اساس مدل‌سازی عددی شفت مورد نظر با نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی شده و توزیع تنش‌های اطراف آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این به منظور جامع بودن نتایج، تحلیل پایداری یک شفت دایره‌ای با ابعاد و سطح مقطع یکسان نیز انجام شده است.

۲- توصیف منطقه مورد مطالعه

مسیر جدید در نظر گرفته‌شده برای قطعه شرقی غربی خط ۱۷ متروی تهران از ایستگاه ۱۷ در حوالی تقاطع دو خیابان مولوی و شهید موسوی شروع شده و پس از عبور از میدان قیام و خیابان آیت ... سعیدی و عبور از بزرگراه امام علی در حوالی تقاطع خیابان شاه‌آبادی و بزرگراه شهید محلاتی به مسیر قبلی باز می‌گردد. مسیر شامل شش ایستگاه D7 تا ۱۷ و دارای طول تقریبی ۴/۵ کیلومتر است. در شکل ۱، موقعیت



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای از مسیر جدید خط هفت متروی تهران



شکل ۲- مقطع زمین‌شناسی واحد خاکی ایستگاه حفاری شفت

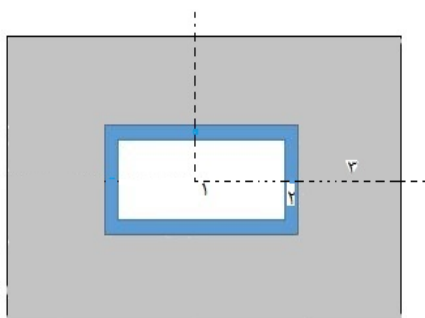
جدول ۱- واحدهای زمین‌شناسی در مسیر جدید خط ۷ متروی تهران (Sahel Consulting Engineering, 2015)

ET-5	ET-4	ET-3	ET-2	ET-1	واحد زمین‌شناسی مهندسی
سیلت رسی و رس‌سیلتی به همراه مقدار اندکی ماسه	ماسه رسی به همراه شن	ماسه رسی به همراه شن و به‌ندرت از رس‌ماسه‌ای	ماسه شنی زیاد به همراه سیلت و رس	شن ماسه‌ای، ماسه شنی	توصیف خاک
بیشتر از ۶۰	۲۲ تا ۳۴	۳۰ تا ۶۰	۱۲ تا ۳۰	۳ تا ۱۲	درصد عبوری از الک ۲۰۰
CL, ML & CLML (rarely CH)	SC, SM	SC, SM & CL	SC, SC-SM & GC	GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP	نوع خاک (USCS)

جدول ۲- پارامترهای ژئومکانیکی خاک منطقه (Sahel Consulting Engineering, 2015)

خاک دستی	ET-5	ET-4	ET-3	ET-2	ET-1	پارامتر ژئومکانیکی
۵	۳۱	۲۲	۳۰	۱۵	۱۴	چسبندگی خاک (کیلوگرم بر مترمربع)
۲۵	۲۸	۳۲	۳۳	۳۳	۳۴	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۸۵,۶۵	۳۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۷۵۰	۸۰۰	مدول الاستیک E (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
۰/۳	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۲	۰/۳	۰/۳	نسبت پواسون ν
۱۵۰۰	۱۷۰۰	۱۸۲۰	۱۹۰۰	۱۸۴۰	۱۸۶۰	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲ تا ۰	۱۹ تا ۱۰	-	۳۰ تا ۱۹	۳۸ تا ۳۰ و ۱۰ تا ۲	-	عمق (متر)

ایجاد شده برای شفت دایره‌ای در شکل ۵ و برای شفت مستطیلی شکل ۶، نشان داده شده است. مدل موهر-کلمب، با توجه به خاکی بودن منطقه مورد نظر به عنوان مدل رفتاری مناسب انتخاب شده است. خصوصیات لایه‌های خاکی شفت با توجه به جدول ۲، به صورت شکل ۷، به مدل اعمال گردیده است.

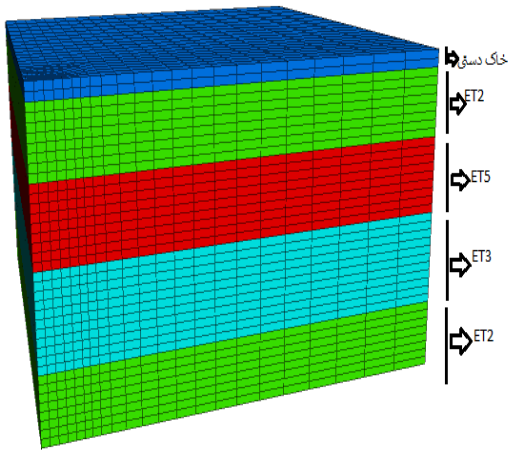


شکل ۳- نمای شماتیک سطح مقطع شفت مستطیلی و سیستم نگهداری اعمال شده. ۱- سطح مقطع شفت ۲- سیستم نگهداری ۳- سطح مقطع فضای اطراف شفت

۳- مدل‌سازی عددی

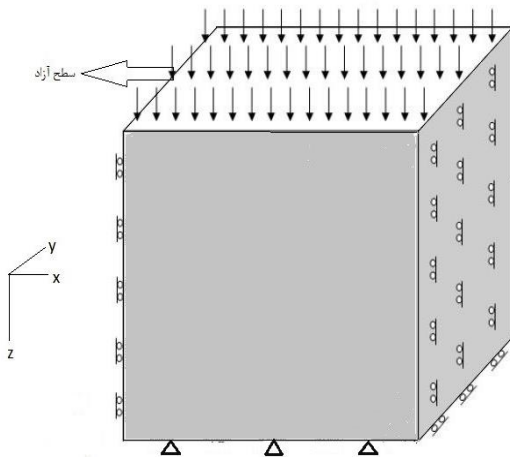
در این تحقیق با توجه به پیوسته بودن محیط، از نرم‌افزار *FLAC3D* استفاده شده است. با توجه به متقارن بودن هندسه برای مدل‌سازی هردو شفت، یکسان بودن خصوصیات و همچنین برای بالا بردن سرعت اجرای مدل‌سازی فقط یک‌چهارم از هندسه مدل‌سازی شده است. نمای شماتیک از سطح مقطع شفت مستطیلی و خاک اطراف آن در شکل ۳ و سطح مقطع شماتیک از شفت دایره‌ای به صورت شکل ۴، آورده شده است.

شعاع مقطع دایروی ۶/۲ متر و ابعاد طول ۶ متر و عرض ۵ متر برای شفت مستطیلی مدل‌سازی شده است و برای نزدیک شدن مدل به واقعیت و کم کردن تأثیر مرزها بر مدل ابعاد مدل را در بازه ۸ تا ۱۰ برابر شعاع شفت دایره‌ای و طول شفت مستطیلی در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل با ۶۲ متر در راستای طول و عرض و با عمق ۳۸ متر ایجاد شده است. هندسه

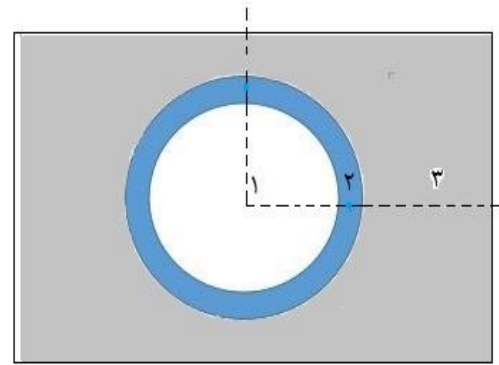


شکل ۷- اعمال خصوصیات و ایجاد لایه‌بندی خاک

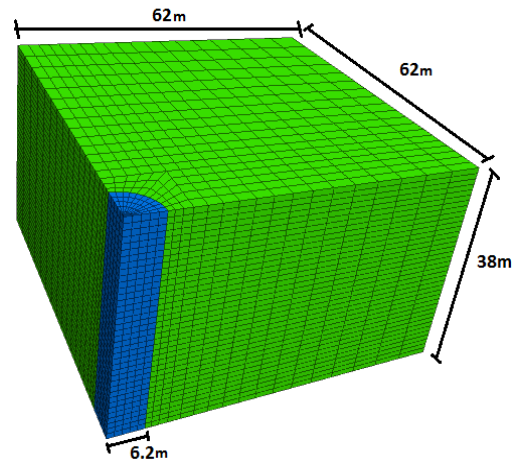
به دلیل ناممکن بودن در مدل کردن کل منطقه، مرزهای مدل شفت را در هر دو طرف در راستای X و Y به صورت تکیه‌گاه غلتکی ثابت فرض شده است. در راستای Z در کف مدل ثابت گردیده است؛ اما سطح بالای مدل در راستای Z به دلیل اعمال نیروها و تنش‌ها از سطح آزاد قرار داده شده که در شکل ۸، نمای شماتیک از ثابت کردن مرزها نمایش گردیده است. میزان نیروی وارده ناشی از وزن ساختمان‌ها، ترافیک جاده‌ها و تجهیزات حفاری $2/4$ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است (*Sahel Consulting Engineering, 2015*) که به سطح مدل اعمال می‌شود.



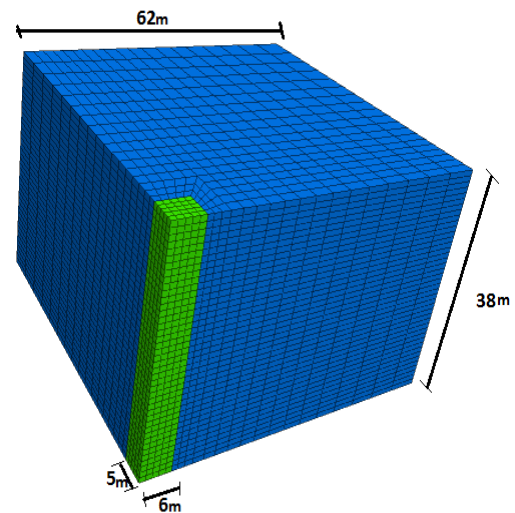
شکل ۸- اعمال شرایط مرزی با ثابت کردن تمام وجه‌ها به جز بالای مدل



شکل ۴- نمای شماتیک از سطح مقطع شفت دایره‌ای و سیستم نگهداری و فضای اطراف شفت



شکل ۵- هندسه ایجادشده برای شفت دایره‌ای



شکل ۶- هندسه ایجادشده برای شفت مستطیلی

جدول ۳- خصوصیات ژئومکانیکی سیستم نگهدارنده (بتن درجا)

چگالی (Kg/m ³)	نسبت پواسون	مدول الاستیک (G Pa)	ضخامت (m)
۲۵۰۰	۰/۲	۲۶	۰/۴۵

۳-۱- تفسیر نتایج

برای شفت مستطیلی کنتور جابجایی افقی در جهت x در شکل ۹، نشان داده شده است. این میزان جابجایی به میزان ۳/۰۵۷ سانتی‌متر است و در جهت y بیشترین جابجایی به دست آمده از کنتور جابجایی (شکل ۱۰ برابر ۴/۴ سانتی‌متر) در عمق میانی در دیواره شفت مستطیلی مشاهده شده است که باعث شکم‌دادگی دیواره شده است. میزان جابجایی‌های افقی دیواره شفت دایره‌ای در شکل ۱۱، بعد از حفاری کامل شفت نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور حداکثر جابجایی در دیواره شفت به مقدار ۱/۲۶ سانتی‌متر (در انتهای شفت) و ۰/۹ سانتی‌متر در عمق ۲۸ متری است. این میزان جابجایی در دیواره شفت از مقدار جابجایی مجاز ارایه شده توسط لانگ (۲ درصد ارتفاع شفت) (Long, 2001) کمتر است.

میزان جابجایی‌های افقی دیواره شفت برای دو حالت دایره‌ای و مستطیلی در شکل ۱۲، نشان داده شده است. کم شدن میزان جابجایی در عمق ۲۸ متری و بعد از آن با افزایش جابجایی به دلیل تغییرات در مدول الاستیسیته بین دو لایه خاکی است؛ زیرا مدول الاستیسیته نسبت مستقیمی با جابجایی دارد.

از عوامل تأثیرگذار بر ناپایداری دیواره شفت، تنش‌های ایجاد شده در اثر حفاری است که در طولانی‌مدت به دلیل تمرکز در ناحیه خاص از شفت امکان ناپایداری برای دیواره آن را در پی دارد. تمرکز تنش در گوشه شفت مستطیلی از نوع تنش فشاری است. پیش‌بینی می‌شود، تمرکز تنش به مرور زمان بسته به عوامل محیطی دچار ناپایداری‌هایی در شفت مستطیلی شود (شکل ۱۳).

در سال‌های اخیر کرنش بحرانی به‌عنوان مهم‌ترین شاخص برای ارزیابی پایداری و مچاله شونده‌گی تونل‌ها و شفت‌ها مورد توجه قرار گرفته است. کرنش بحرانی یک خاصیت انیزوتروپی است و به خواص سنگ بکر و درزه‌ها در

نسبت تنش‌های افقی به تنش قائم و مقدار تنش‌های افقی در جهت x و y با استفاده از معادله ۱ تا ۳ محاسبه شده و به مدل اعمال شده است (Itasca, 2012).

$$\sigma_{zz} = \rho g z \quad (1)$$

$$k = 1 - \sin(\varphi) \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = k\sigma_{zz} \quad (3)$$

که در این روابط g شتاب گرانشی زمین، ρ چگالی خاک، z عمق از سطح زمین و k نسبت تنش افقی به قائم و φ زاویه اصطکاک داخلی خاک برحسب درجه است.

قبل از حفاری شفت کل مدل به تعادل رسیده است و سپس میزان جابجایی‌ها صفر شده است. سپس مدل حفاری شده و سیستم نگهداری مورد استفاده در شفت‌های مورد بررسی که شمع بتنی درجا است (شمع‌ها با قطر ۱۱۰۰ میلی‌متر با فاصله مرکز به مرکز ۲ متر) به شفت اعمال شده است. در این تحقیق به جای مدلسازی شمع در مدل از ضخامت معادل سیستم نگهداری بتنی استفاده شده است تا بهتر بتوان وضعیت پایداری در نقاط مختلف شفت را مورد بررسی قرار داد. تعیین ضخامت معادل بر اساس روابط ۴ تا ۶ صورت گرفته است (Carranza & diedrichs, 2009).

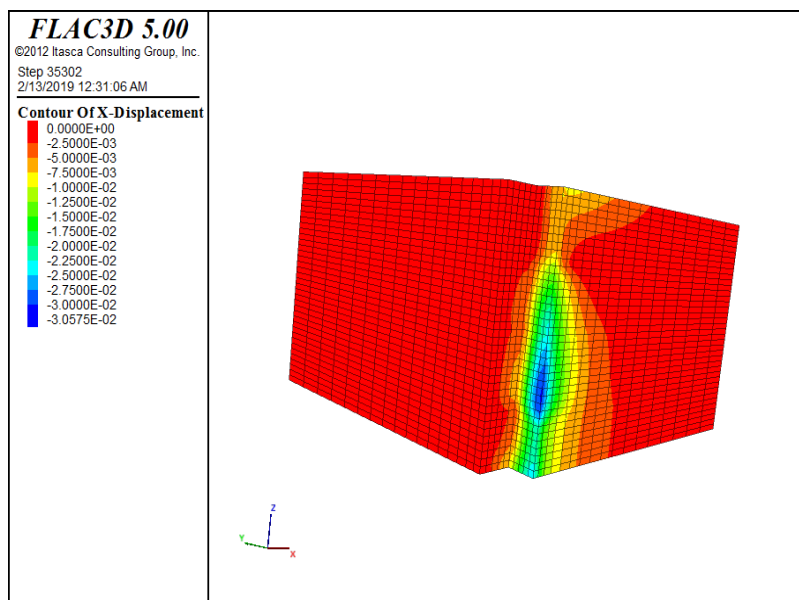
$$EA = E'A' \rightarrow E \frac{\pi D^2}{4} = E'(d' \times 1) \quad (4)$$

$$EI = E'I' \rightarrow E \frac{\pi D^4}{64} = E' \frac{1 \times d'^3}{12} \quad (5)$$

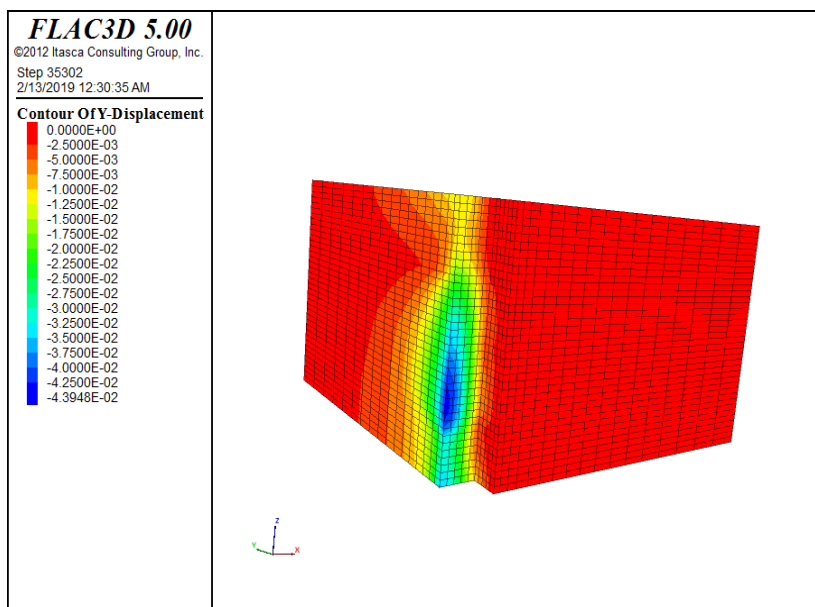
$$d = \frac{3D^2}{4} \quad (6)$$

در روابط بالا E مدول الاستیک شمع درجا، E' مدول الاستیک بتن معادل، A مساحت شمع، A' مساحت بتن معادل، I ممان اینرسی شمع، I' ممان اینرسی بتن معادل، D قطر شمع و d ضخامت معادل بتن است. با انجام محاسبات مقدار قطر به دست آمده بر فاصله شمع‌ها تقسیم گردید و ضخامت معادل ۴۵ سانتی‌متر محاسبه شده است. نحوه حفاری شفت‌ها در مدل عددی به این صورت است که پس از هر ۱ متر حفاری، سیستم نگهداری بتن درجا به سطح داخلی شفت اعمال می‌شود و سپس مدل به تعادل می‌رسد. خصوصیات سیستم نگهداری در جدول ۳، نشان داده شده است.

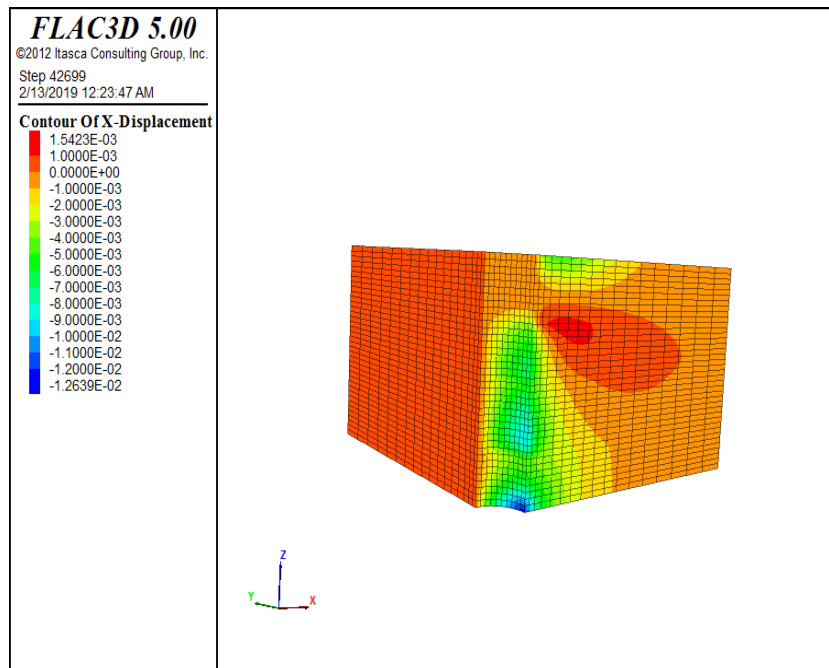
توده سنگ بستگی دارد. میزان کرنش بحرانی برای شفت مستطیلی در شکل ۱۴، نشان داده شده است.



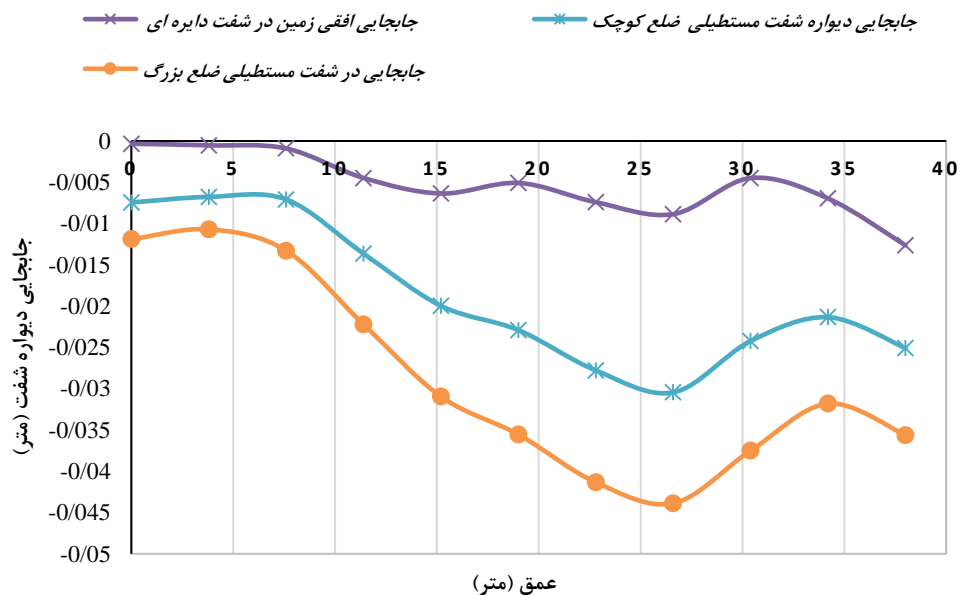
شکل ۹- کنتور جابجایی در جهت X در دیواره شفت مستطیلی



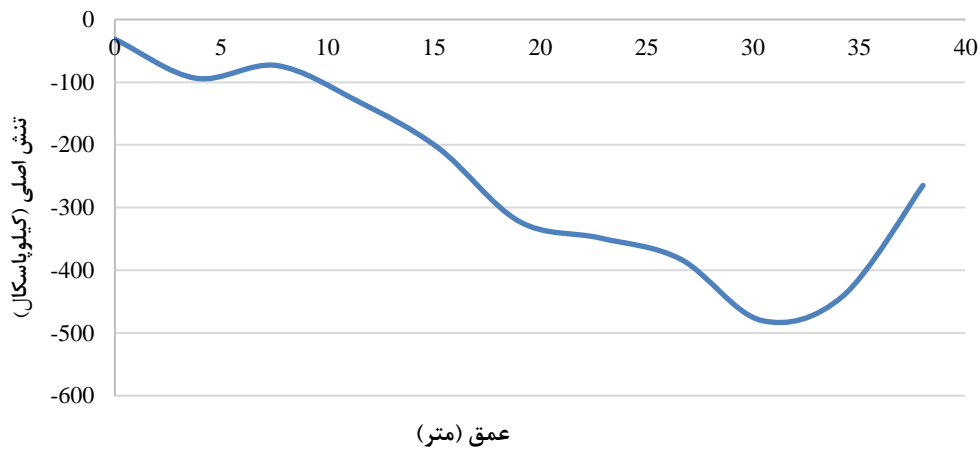
شکل ۱۰- کنتور جابجایی در جهت Y در دیواره شفت مستطیلی



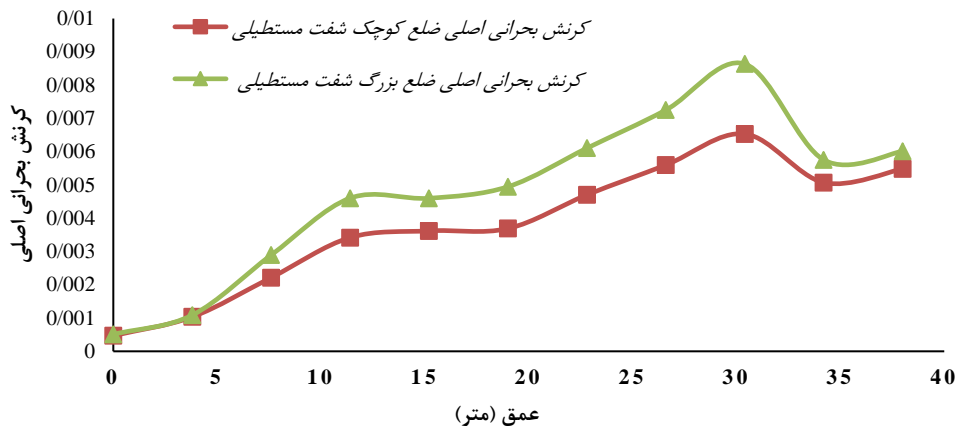
شکل ۱۱- جابجایی افقی در شفت دایره‌ای



شکل ۱۲- جابجایی افقی در شفت مستطیلی و دایره‌ای



شکل ۱۳- تنش اصلی در شفت مستطیلی



شکل ۱۴- کرنش بحرانی در شفت مستطیلی

هشدار خطر ۲ به عنوان مینا برای طراحی و پایداری سیستم

نگهدارنده حفاریات ارائه شده است (Sakurai, 1983).

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0/25 \text{ Log } E - 0/85 \quad \text{تراز بالا} \quad (7)$$

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0/25 \text{ Log } E - 1/22 \quad \text{تراز میانی} \quad (8)$$

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0/25 \text{ Log } E - 1/59 \quad \text{تراز پایین} \quad (9)$$

که در این روابط E مدول یانگ توده سنگ سالم ($\frac{kgf}{cm^2}$)

و ε_c کرنش بحرانی در حالت مقاومت فشاری تک‌محوره

است. در نهایت میزان جابجایی با کرنش بحرانی به دست

آمده از روش مجاز ساکورایی در تراز هشدار خطر، با استفاده

از رابطه ۱۰ به دست می‌آید.

۳-۲- تحلیل پایداری

ساکورایی در سال ۱۹۸۶ برای بررسی پایداری سیستم‌های

نگهداری در اطراف فضای حفاری شده در زمین، روشی را با

توجه به میزان کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است؛ این روابط

از طریق نتایج آزمایش‌های تک‌محوره و مطالعات تجربی

ارایه شده است. در معادلات (۷ تا ۹) به ترتیب تراز هشدار

خطر ۱، تراز هشدار خطر ۲ و تراز هشدار خطر ۳ دسته‌بندی

گردیده است که معادلات تراز هشدار خطر ۱ و ۳ به عنوان

حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی را نشان می‌دهند و تراز

در شفت دایره‌ای بیشترین جابجایی مجاز برای دیواره با محاسبه از طریق روش ساکورایی به میزان ۷/۹ سانتی‌متر است؛ میزان اختلاف بین جابجایی مجاز در شفت دایره‌ای با میزان جابجایی رخ داده در مدل‌سازی بسیار بیشتر است و نشان از پایداری خوب دیواره است (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه جابجایی با جابجایی مجاز ساکورایی در شفت دایره‌ای

وضعیت	جابجایی مجاز ساکورایی (cm)	جابجایی به دست آمده از مدل‌سازی (cm)	لایه‌بندی در عمق
پایدار	۱۲	۰/۰۱	خاک دستی
پایدار	۷/۱	۰/۰۱	ET2
پایدار	۸/۶	۰/۰۵	ET5
پایدار	۷/۹	۱	ET3
پایدار	۷/۱	۱/۲	ET2

در شکل ۱۵، کنتور کرنش برشی بحرانی شفت مستطیلی نشان داده شده است که بیشترین میزان کرنش برشی بحرانی ۰/۰۱۱۷۳۹ است. مقدار کرنش برشی بحرانی محاسبه شده از رابطه ساکورایی برابر با ۰/۰۱۴۹۶ است. در این حالت هم سیستم پایدار است، اما به دلیل اختلاف کم بین روش عددی و روش محاسبه، شفت مستطیلی در آستانه ناپایداری قرار دارد و سیستم نگهداری می‌تواند در بلند مدت ناپایدار گردد.

خروجی کنتور کرنش برشی بحرانی برای شفت دایره‌ای به صورت شکل ۱۶ است. با توجه به شکل مذکور بیشترین مقدار کرنش برشی بحرانی ۰/۰۰۴۴۰۱۷ است که در لایه‌بندی ET5 ایجاد شده است. کرنش برشی بحرانی محاسبه شده با استفاده از رابطه ساکورایی مقدار ۰/۰۱۸۸۰۷ است که با توجه به کمتر بودن میزان کرنش برشی بحرانی مدل‌سازی عددی با اختلاف زیاد از کرنش برشی بحرانی که از طریق معادله محاسبه شده، نشان از پایداری دیواره شفت دایره‌ای دارد.

علاوه بر موارد بیان شده به منظور تحلیل پایداری از نرم‌افزار *Spcolumn* که جهت طراحی و تحلیل سازه‌های بتنی در کارهای عمرانی مورد استفاده شده است. بر این اساس با استفاده از این نرم‌افزار ایجاد یک شبکه تقویت شده

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (10)$$

که در آن u_c جابجایی مجاز بر حسب متر و a شعاع فضای حفر شده بر حسب متر است. در این روش شرایط پایدار ماندن و مناسب بودن سازه نگهبان این است که میزان جابجایی به دست آمده از مدل‌سازی عددی کمتر از مقدار جابجایی مجاز باشد. در غیر این صورت سازه ناپایدار خواهد شد.

علاوه بر این روش به دلیل قرارگیری مدل در معرض تنش سه محوره برای تحلیل پایداری از کرنش برشی بحرانی استفاده می‌شود که از طریق معادله ۱۱ به دست می‌آید (Jaky, 1944).

$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_c \quad (11)$$

که در آن γ_c میزان کرنش برشی بحرانی، ν نسبت پواسون و ε_c کرنش بحرانی است. برای بررسی میزان پایداری اگر مقدار کرنش برشی بحرانی به دست آمده از مدل‌سازی کمتر از کرنش برشی بحرانی در معادله شد؛ سازه پایدار است.

در این تحقیق ابتدا تراز هشدار خطر ۲ که جابجایی مجاز را نشان می‌دهد برای لایه‌بندی خاک در مسیر شفت با استفاده از مدول الاستیک هر لایه خاکی به دست آمده است.

در مورد شفت مستطیلی مقدار بیشترین جابجایی مجاز برای دیواره با محاسبه از روش ساکورایی ۶/۳ است که در شفت مستطیلی اختلاف بین جابجایی مجاز محاسبه شده با میزان جابجایی مشاهده شده در دیواره کم است که نشان از امکان ناپایداری در اثر گذشت زمان است (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه جابجایی با جابجایی مجاز ساکورایی در شفت مستطیلی

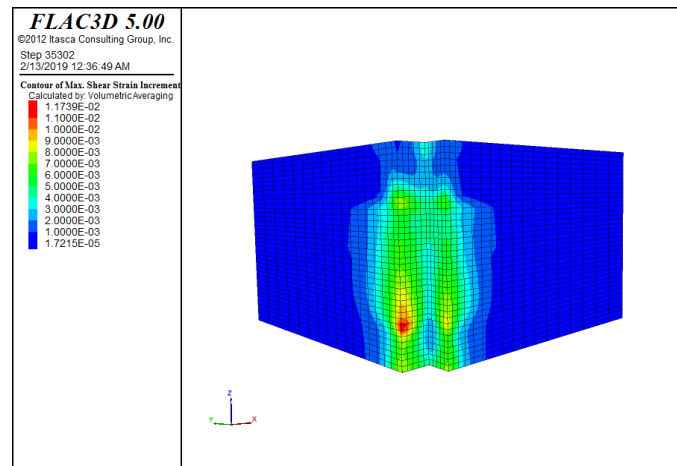
وضعیت	جابجایی مجاز ساکورایی (cm)	جابجایی به دست آمده از مدل‌سازی (cm)	لایه‌بندی در عمق
پایدار	۱۰	۱/۰۵	خاک دستی
پایدار	۵/۷	۱/۲۵	ET2
پایدار*	۶/۹	۳/۴	ET5
پایدار*	۶/۳	۴/۴	ET3
پایدار*	۵/۷	۳	ET2

*به نظر می‌رسد با گذشت زمان ناپایدار گردند

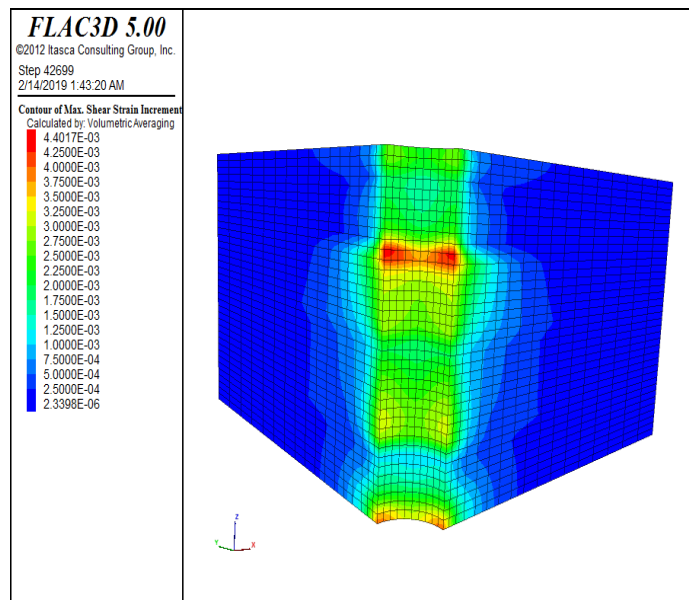
شده است؛ همچنین میزان نیروی محوری برای شفت دایره‌ای در شکل ۱۹ و برای شفت مستطیلی در شکل ۲۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۸، می‌توان بیان کرد که میزان لنگر در گوشه شفت و جداره‌های شفت مستطیلی دارای بیشترین مقدار است. از طرفی میزان لنگر باعث ناپایداری در سیستم نگهدارنده می‌شود؛ همچنین نیروهای محوری در شفت مستطیلی در گوشه آن دارای بیشترین مقدار است.

بتنی تحلیل شده است، سپس دیاگرام بین نیرو و لنگر خمشی ($p-m$) ترسیم شده است. بر اساس خروجی‌های گرفته شده از نیروی محوری و بیشترین لنگر خمشی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار *FLAC3D* و قراردادن آن در دیاگرام مربوطه، می‌توان در مورد پایداری سیستم نگهداری قضاوت کرد.

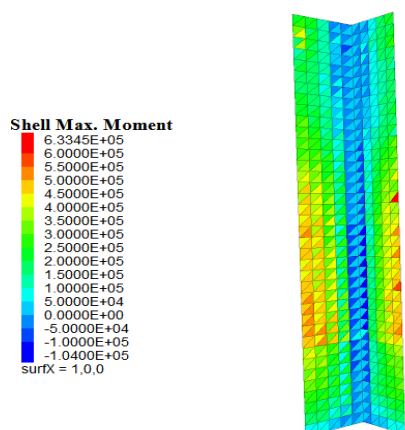
لنگرهای ایجادشده در سازه نگهدارنده برای دو شفت دایره‌ای و مستطیلی در شکل ۱۷ و شکل ۱۸، نشان داده



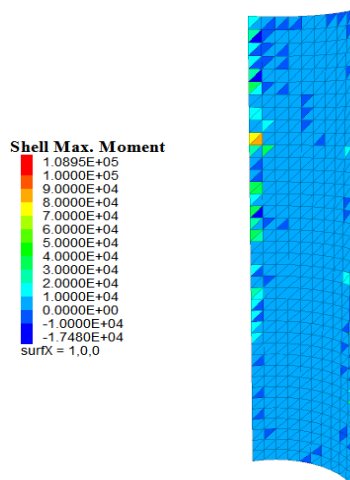
شکل ۱۵- کرنش برشی بحرانی شفت مستطیلی



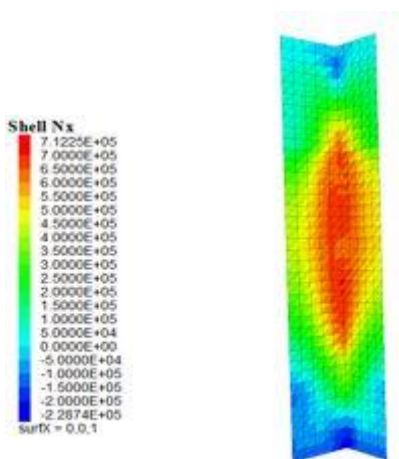
شکل ۱۶- کرنش برشی بحرانی شفت دایره‌ای



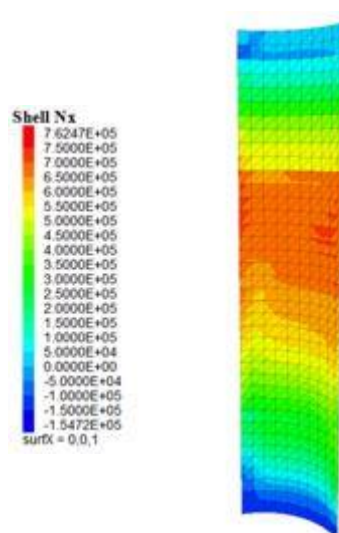
شکل ۱۸- بیشترین لنگر خمشی وارد بر شفت مستطیلی



شکل ۱۷- بیشترین لنگر خمشی ایجادشده در شفت دایره‌ای



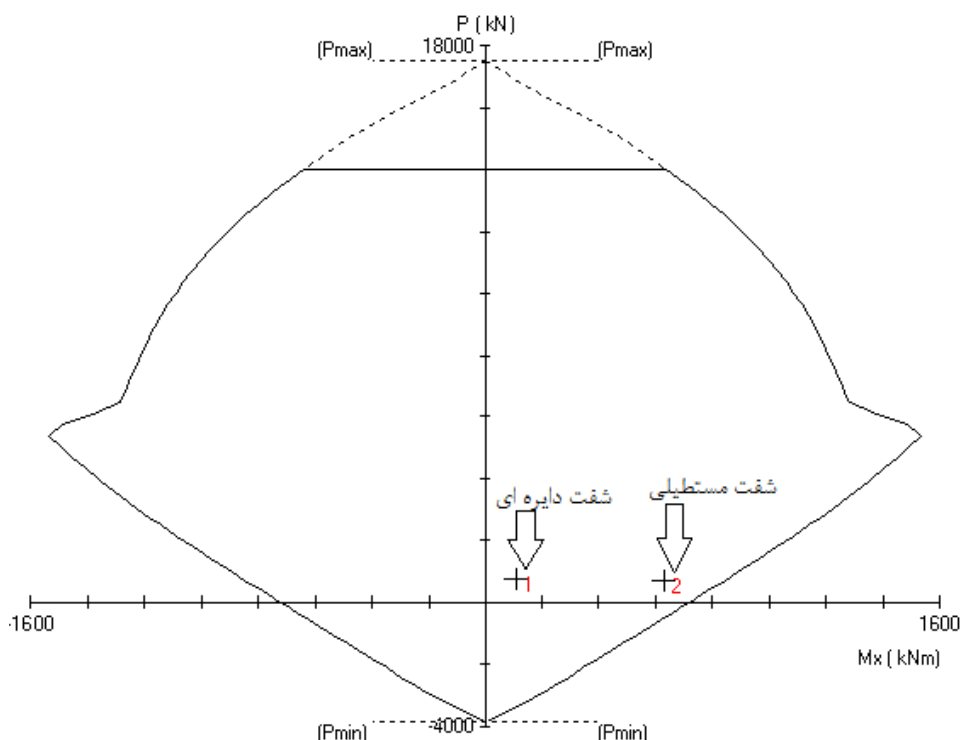
شکل ۲۰- نیروی محوری وارد بر شفت مستطیلی



شکل ۱۹- نیروی محوری وارد بر شفت دایره‌ای

خمشی و نیروی محوری حاصل از خروجی مدل‌سازی عددی، به ترتیب نقطه ۱ برای شفت دایره‌ای و نقطه ۲ برای شفت مستطیلی است. به دلیل قرارگیری هر دو نقطه مذکور در دیاگرام مشاهده می‌شود که هر دو شفت در حالت پایداری قرار دارند، اما شفت مستطیلی نزدیک به مرز ناپایداری قرار دارد.

دیاگرام نیروی محوری و لنگر خمشی در شکل ۲۱، ترسیم شده است و خروجی‌های مربوط به بیشترین نیروی محوری و بیشترین گشتاور خمشی از سازه نگهبان در مدل عددی برای دو شفت در جدول ۶، آورده شده است. با توجه به دیاگرام و قرار دادن بیشترین گشتاور



شکل ۲۱- دیاگرام (P-Mx)

در شکل ۲۲، میزان جابجایی دیواره در ضخامت‌های مختلف سیستم نگهداری شفت مستطیلی ترسیم شده است. با توجه به شکل‌های مذکور روشن است که با افزایش ضخامت، جابجایی کاهش یافته است؛ همچنین در ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، میزان جابجایی‌ها مقادیر بیشتری دارد.

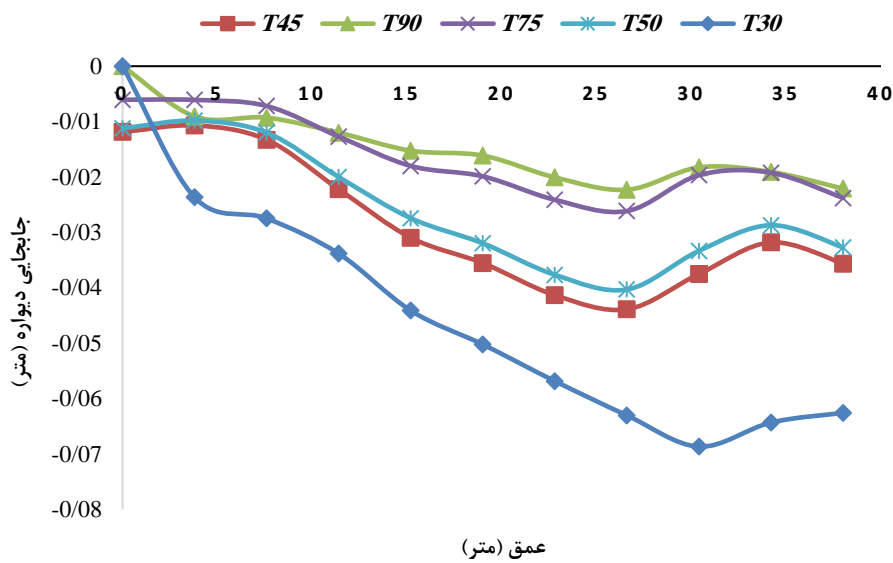
در شکل ۲۳، میزان جابجایی دیواره در ضخامت‌های مختلف سیستم نگهداری شفت دایره‌ای ترسیم شده است. با توجه به شکل مذکور میزان تغییرات جابجایی دیواره با افزایش ضخامت سیستم نگهداری کاهش می‌یابد. کاهش تغییرات جابجایی در ضخامت‌های مختلف بتن اختلاف چندانی با هم ندارند. از این‌رو ضخامت ۳۰ سانتی‌متری به عنوان ضخامت بهینه و مناسب‌تر معرفی شده است؛ همچنین در مرز لایه‌ها به دلیل تفاوت در میزان مدول الاستیک حرکت دیواره بیشتر می‌شود.

جدول ۶- میزان نیروی محوری و لنگر در شفت‌ها

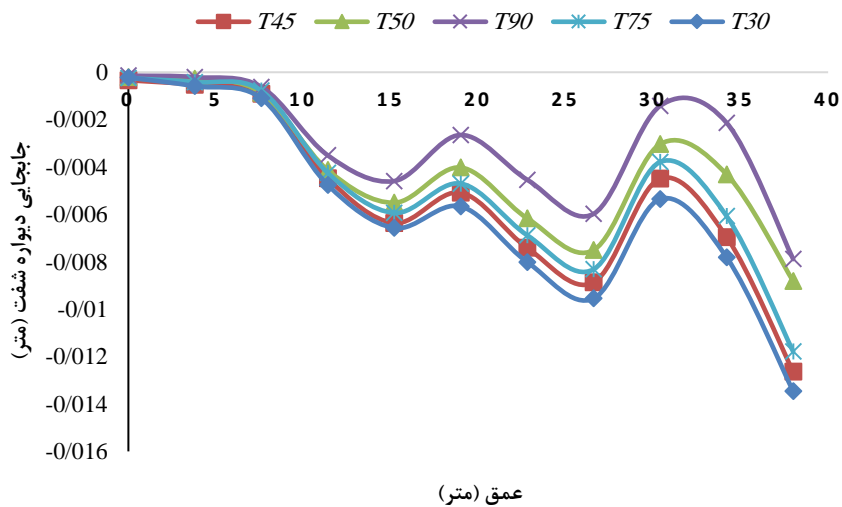
شفت	ماکزیمم نیروی محوری (KN)	ماکزیمم لنگر (KNm)
دایره‌ای	۷۶۲	۱۰۸
مستطیلی	۷۱۲	۶۳۳

۳-۳- تحلیل حساسیت با تغییر ضخامت سیستم نگهداری

به منظور بررسی تاثیر ضخامت سیستم نگهداری بر پایداری شفت‌ها، سایر شرایط ثابت فرض شده است و فقط میزان ضخامت در مدل‌های عددی تغییر داده شده است. بر این اساس در این تحلیل ضخامت‌های ۳۰، ۴۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۰ سانتی‌متر سیستم نگهداری در هر دو شفت دایره‌ای و مستطیلی مدل‌سازی شده است.



شکل ۲۲- جابجایی در دیواره بزرگ شفت مستطیلی در ضخامت متغییر سازه بتنی



شکل ۲۳- جابجایی دیواره در شفت دایره‌ای در ضخامت‌های متغییر سازه بتنی

یکسان با سطح مقطع برابر صورت گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل است:
 بررسی میزان جابجایی‌های افقی در دیواره هر دو شفت دایره‌ای و مستطیلی نشان داد که در حالت دایره‌ای بیشترین میزان جابجایی افقی ۱/۲۶ سانتی‌متر و در شفت مستطیلی بیشترین مقدار جابجایی دیواره ۴/۳۹ سانتی‌متر

۴- نتیجه‌گیری

تحلیل پایداری دیواره شفت ورودی ماشین تونل‌زنی تمام مقطع (TBM) از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق در نرم‌افزار *FLAC3D* مدل‌سازی عددی شفت‌های مستطیلی و دایره‌ای برای خط ۷ متروی تهران در شرایط

است. ۲/۸ برابر نسبت به دیواره شفت است که با گذشت زمان می تواند باعث ناپایداری گردد. میزان جابجایی افقی در شفت مستطیلی با فاصله گرفتن از گوشه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش جابجایی در عمق زیاد که در بیشترین فاصله افقی از گوشه شفت قرار دارد؛ به وقوع می‌پیوندد. در شفت مستطیلی با فاصله از گوشه شفت مستطیلی لنگرهای خمشی با فاصله از گوشه شفت مستطیلی افزایش می‌یابد. از این رو نیاز به المان‌های سازه‌ای جهت کاهش لنگر وجود دارد. کرنش برشی بحرانی شفت مستطیلی با اختلاف کمی از کرنش برشی بحرانی مجاز قرار دارد که نشان از قرار گرفتن در آستانه ناپایداری است. در شفت مستطیلی تمركز تنش در گوشه‌های شفت بسیار کم است. تمركز تنش پس از حفاری پیرامون شفت دایره‌ای در شفت مستطیلی تمركز تنش در گوشه‌های شفت

۵- مراجع

- Aye. T.T., Tong M.S.Y., K.H. Yi, Arunasoruban E., (2014). Design and construction of large diameter circular shafts. Underground Singapore.
- Beus, M.J. and Chan, S.S.M., (1985). Field measurement and finite- element modelling of circular and rectangular shaft shapes in the coeur d'Alene mining district, Idaho. Bureau of Mines Report of Investigations, RI8972, 1985, United States Department of the Interior.
- Carranza-Torres, C., & Diederichs, M. (2009). Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(5), 506-532.
- Cho, J., Lim, H., Jeong, S., Kim, K. Y., (2015). Analysis of lateral earth pressure on a vertical circular shaft considering the 3D arching effect. *Tunnelling and Under Ground Space Technology*, 48, 11-19.
- Georgiannou, V. N., Serafis, A., Pavlopoulou, E. M., (2017). Analysis of a vertical segmental shaft using 2D & 3D finite element codes. *International Journal of GEOMATE*. Vol.13, Issue 36, pp.138-146.
- Itasca Consulting Group, Inc; FLAC 3D, (2015). Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D Dimensions, Users Manual.
- Jáky, J. (1944). A nyugalmi nyomás tényezője (The coefficient of earth pressure at rest). *Magyar Mérnök és Építész Egylet Közlönye (Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers)*.
- Kaveyani-Jazi, MA., Mosafa, M., Noreyan beygdeli, M., (2017). Design of support system for TBM shaft in Esfahan Metro line2. *Civill engineering architecture and urban development conference, Shahid beheshti university. Tehran, Iran (In Persian)*.
- Kim, K.Y., Lee, D.S., Cho, J.Y., Jeong, S.S., (2013). The effect of erching pressure on a vertical circular shaft. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 37, 10–21.
- Long, M., (2001). Database for Retaining Wall Ground Movements Due to Deep Excavation. *ASCE*, Vol. 127(3), 203-224.
- Meftah, A., Benmebarek, N., Benmebarek, S., (2018). Numerical study of the active earth pressure distribution on cylindrical shafts using 2D finite difference code. *J. Appl. Eng. Sci. Technol.* 4(2): 123-128.

- Ou, C. Y., Liao, J. T., & Cheng, W. L. (2000). Building response and ground movements induced by a deep excavation. *Geotechnique*, 50(3), 209-220.
- Pakbaz, M. S., Imanzadeh, S., & Bagherinia, K. H. (2013). Characteristics of diaphragm wall lateral deformations and ground surface settlements: Case study in Iran-Ahwaz metro. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 109-121.
- Rostami, V., Gholamnejad, J., Mosavi, S.E., (2013). Stability analysis of TBM shaft in Tehran Metro line 7 using numerical modeling. The first national geotechnics conferences, Ardabil (In Persian)
- Sahel consulting Engineering, (2014). Geological and geotechnical engineering report of Tehran Metro line 7. (In Persian).
- Sakurai, S., (1983), Direct strain evaluation technique in construction of underground opening, In proc 22 U.S. symp, Rock Mech. Boston, pp. 278-282.

Stability analysis of rectangular shaft for TBM portal using numerical modeling

H. Reyhanpoor¹; M. Najafi²

1-MSc Graduated in Rock Mechanics; Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, homanraihanpoor@gmail.com

2-Associate Professor; Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, mehদিনajafi@yazd.ac.ir

Received: 25 Oct 2020; Accepted: 12 Jun 2021
DOR: 20.1001.1.23223111.1399.9.4.2.1

Keywords

Rectangular shaft
TBM
Stability analysis
Numerical modeling

Extended Abstract

Summary

In some cases, a vertical shaft with a high cross-sectional area and a suitable depth as a portal for the assembly of a TBM drilling rig, the transfer of staff and equipment is required. If the shaft is used for this purpose, the cross-section of the shaft will be rectangular; otherwise, the cross-section of the circular shaft can also be used. In Iran, rectangular cross-section shafts as TBM portals have been used more comparatively. The main objective of this research is to investigate the stability of rectangular shaft for TBM machine using finite difference method in FLAC3D software.

Introduction

Because of the lack of space in urban environments, the design and implementation of the shaft or the vertical well as a portal for the assembly of a TBM drilling rig is very important. One of the most important issues in investigation of the causes of instability is tunnel access shafts. The first condition for a shaft to remain stable during excavation is a balance between the stress concentration near the shaft walls and the strength of the surrounding rocks/soil. The need for shaft stability is important for the assembly of the mechanized drilling rig, the transfer of staff, equipment, rescue and the discharge of excavated soil material.

Methodology and Approaches

In Iran, rectangular cross-section shafts as TBM portals have been used more comparatively. In some cases, many cases of instability occur in the shaft walls. Therefore, the purpose of this study is to stability analysis of a rectangular shaft as the TBM portal using finite difference method in FLAC3D software. Therefore, the stress distribution, displacement and shear strains around the shaft are investigated. In addition, the stability analysis of a circular shaft has been performed.

Results and Conclusions

The results of numerical models show that the value of displacement in the horizontal direction increases with the distance from the corner of the rectangular shaft in depth. Moreover, the stress concentration in the rectangular shaft corners is very high in comparison to the side walls and will eventually become unstable. In addition, in a rectangular shaft, the amount of bending moment is applied to the support system and causes the shaft to be unstable, thus it is required to reduce the moment. According to the numerical modeling results, the rectangular shaft is close to the instability threshold.
