

تحلیل بار وارد بر سازه پوشش تونل‌های حفاری مکانیزه - مطالعه موردی تونل انتقال آب سد زاینده رود به کاشان

میثم جلالی^{۱*}؛ پروانه بیک^۲

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- پژوهشگر؛ دانشگاه دامغان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2018.5400.1300

واژگان کلیدی	چکیده
تونل بارسنگ سیستم نگهدارنده روش‌های تجربی روش‌های عددی	<p>به منظور برآورد بار سنگ وارد بر تونل‌ها روش‌های تجربی، تحلیلی یا عددی مورد استفاده مهندسیین طراح تونل می‌باشند. در برآورد بارسنگ به هر کدام از روش‌های مذکور بعضاً اختلاف زیادی بین نتایج حاصل از روش‌های مختلف مشاهده می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی روش‌های تجربی و عددی برآورد بارسنگ وارد بر سیستم نگهدارنده تونل‌های سگمنتال با استناد به داده‌های ابزار دقیق در تونل انتقال آب از سد زاینده رود به شهر کاشان می‌باشد. به این منظور تمامی روش‌های تجربی موجود در ادبیات فنی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین مدل‌سازی عددی در نرم‌افزارهای <i>SAP</i> و <i>PLAXIS-2D</i> انجام شده است. نتایج حاصل از روش‌های تجربی و عددی با نتایج حاصل از برداشت‌های میدانی و ابزاربندی مقایسه شده و نتایج آن مورد تفسیر و بررسی قرار گرفته است. نتایج نیروهای داخلی لاینینگ حاصل از تحلیل در نرم‌افزار <i>PLAXIS</i> و نتایج نیروهای داخلی در نرم‌افزار <i>SAP2000</i> (بر اساس بار سنگ حاصل از روش‌های تجربی) مورد بررسی، مقایسه و تفسیر قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی، برآورد حاصل از تحلیل در نرم‌افزار <i>Plaxis</i> برای تمام شرایط توده‌سنگ میزبان، نتایج نزدیک‌تری را به برداشت‌های میدانی نشان می‌دهد. با توجه به تحلیل، نتایج روش‌های گوتل و جتوا و همچنین گوتل و همکاران که مبنی بر سیستم طبقه‌بندی <i>RMR</i> هستند با استفاده از مقادیر <i>RMR Basic</i> به عنوان نزدیکترین تخمین به برداشت‌های میدانی در برآورد بارسنگ معرفی شده‌اند.</p>

۱- پیش‌گفتار

قبل از ایجاد یک فضای زیرزمینی در یک نقطه مشخص، برآیند نیروهای وارد بر آن نقطه صفر و نقطه مفروض دارای تعادل می‌باشد، اما هنگامی که یک سازه زیرزمینی حفر می‌گردد وضعیت تنش‌ها تغییر کرده و یک بی‌نظمی در رفتار مکانیکی ناحیه ایجاد می‌گردد (Zhu et al., 2016) و (Wittke et al., 2007). برای این منظور مهندسان برای حفظ پایداری یک سازه زیرزمینی سیستم‌های نگهداری را طراحی می‌کنند. اغلب دستورالعمل‌هایی که تاکنون برای

برآورد بار وارد بر سیستم نگهداری تونل‌ها ارائه شده است، مبنی بر سیستم‌های رده‌بندی مهندسی توده‌سنگ است. برآورد بار وارد بر یک سیستم نگهدارنده مهم‌ترین جزء طراحی آن است (Basirat et al., 2015). بار وارد بر سازه نگهداری تونل را می‌توان با روش‌های تحلیلی، عددی، مشاهده‌ای یا تجربی برآورد کرد (ITA, 2000) و (FHWA, 2009). یو و همکاران (۲۰۰۷) روش‌های موجود در برآورد بارسنگ وارد شده بر روی سیستم نگهدارنده را مقایسه کردند و یک روش سیستماتیک برای برآورد زون تنش آزاد شده در اطراف تونل پیشنهاد کردند (You et al., 2007). دیودی و همکاران

* نویسنده مسئول-شاهرود؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ پردیس مهندسی؛ دانشکده مهندسی عمران؛ طبقه سوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۲۲۰۵؛ دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹۲۲۰۵؛ رایانامه: mjalali@shahroodut.ac.ir

سینگ و همکاران (۱۹۹۲) نتایج حاصل از روش‌های پیشنهاد شده توسط روش‌های ترزاقی (۱۹۴۶)، دیر و همکاران (۱۹۷۰)، پروتودیاکونوف (۱۹۶۳)، اونال (۱۹۸۳) و بارتن و همکاران (۱۹۷۴) را با نتایج میدانی مقایسه کردند و مشاهده کردند که روش بارتن در زمین‌های مچاله شونده نتایج مطمئن‌تر و در شرایط غیرمچاله شونده نتایج نامطمئنی را برآورد می‌کند (Singh et al., 1992). گوئل و جتوا (۱۹۹۱) با مقایسه فشارهای نگهداری به‌دست‌آمده از ۳۰ تونل ابزاربندی شده و مقادیر تخمین زده شده از رابطه اونال (۱۹۸۳)، رابطه مزبور را برای استفاده در تونل‌های سنگی با سقف قوس‌دار بررسی کردند. نتایج مقایسه نشان داد که این رابطه برای تونل‌های سنگی مناسب نیست. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فشارهای نگهداری تخمین زده شده در شرایط زمین‌های مچاله شونده برای تمام ابعاد تونل‌ها مطمئن نمی‌باشد. ضمناً در خصوص زمین‌های غیر مچاله شونده، تخمین‌ها برای تونل‌های کوچک (قطر کمتر از ۶ متر) نامطمئن و دست پایین و برای تونل‌های بزرگ (قطر بیش از ۹ متر) محافظه‌کارانه و دست بالا خواهد بود (Goel & Jethwa, 1991). ویژگی بارز این تحقیق نسبت به تحقیقات انجام شده در این زمینه، مقایسه نتایج مربوط به روش‌های مختلف با نتایج برداشت‌های میدانی است.

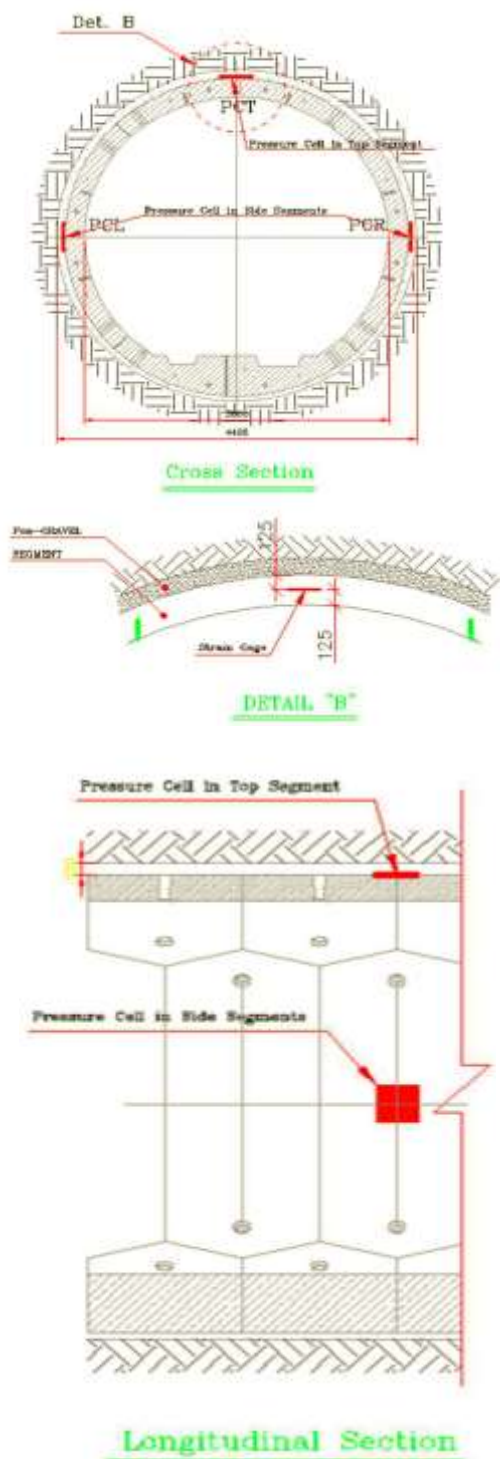
در تحقیق حاضر با استفاده از روش‌های تجربی و با بهره‌گیری از نرم افزارالمان محدود *Plaxis* بارسنگ به روش‌های تجربی و عددی برآورد شده است. در ادامه پوشش داخلی تونل با استفاده از نرم‌افزار *SAP2000* مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش بررسی نتایج روش‌های مختلف با نتایج بدست آمده از ابزاردقیق نصب شده در سگمنت تونل انتقال آب از سد زاینده رود به شهر کاشان (معروف به گلاب ۲) به منظور تعیین روش مناسب برآورد بارسنگ می‌باشد.

۲- رفتارسنجی و ابزار بندی

مقایسه داده‌های اندازه‌گیری با نتایج حاصل از محاسبات طراحی منجر به ساخت تونل موفق از نظر فنی و اقتصادی می‌شود (Middle et al., 2014). در تونل گلاب ۲ بار وارد بر سیستم نگهدارنده با استفاده از ابزار فشارسنج اندازه‌گیری می‌شود. این ابزار بار وارده از طرف محیط میزبان بر سیستم

(۲۰۱۴) یک رابطه تجربی را جهت برآورد فشار وارد بر پوشش تونل در شرایط غیر مچاله شونده ارائه کردند و نتایج حاصل از آن را با روش‌های تجربی موجود بر اساس سیستم N و Q مقایسه کردند و مشاهده نمودند که این رابطه تطابق خوبی با روابط موجود دارد (Dwivedi et al., 2014). افشار و همکاران (۲۰۱۵) عوامل مؤثر بر بارسنگ را مورد بررسی قرار دادند و یک سیستم وزنی برای تأثیر هر پارامتر بر روی بارسنگ ارائه کردند و مشاهده کردند دو عامل بهم ریختگی ($D > 0.4$) و کیفیت توده‌سنگ که از GSI به ویژه GSI باقی مانده محاسبه می‌شود، بارسنگ را کنترل می‌کنند (Afshar et al., 2015). دهکردی و همکاران (۲۰۱۳) بر اساس انرژی کرنش پس از شکست باقی مانده به انرژی کرنش قبل از شکست یک روش تجربی به منظور برآورد بارسنگ ارائه نمودند (Dehkordi et al., 2013). بصیرت و همکاران (۱۳۹۴) بار سنگ وارد بر پوشش بتنی تونل شماره ۱ آزادراه رودبار- منجیل را تخمین زدند و مشاهده کردند که مقادیر محاسبه شده توسط روش‌های تجربی بیشتر از سایر روش‌ها می‌باشد و در روش عددی نیز، با توجه به زون پلاستیک‌شدگی کم در بالای تونل، مقدار کمتری برای بارسنگ برآورد می‌شود (Basirat et al., 2015). مومیوند و یاورزاده (۱۳۸۷) فشار وارد بر سیستم نگهدارنده را برای ۳ تونل انحراف آب با روش‌های تجربی برآورد کردند. نتایج مطالعات نشان داد که فشار وارد بر سیستم نگهدارنده به ۲ روش بارتن و ترزاقی بیش‌تر از سایر روش‌های دیگر است و در روش بارتن فشار وارد بر سیستم نگهدارنده با افزایش قطر ثابت است (Yavarzadeh & Moomivand, 2008). آیین نامه مهندسی ارتش امریکا روابطی را جهت برآورد حداقل بارسنگ وارد بر سیستم نگهدارنده در تونل‌های دایره‌ای، زون‌های خردشده، تونل‌های نعل آسی و زمین‌های مچاله شونده ارائه نموده است و روابط حل بسته‌ای را در این خصوص ارائه نکرده اند (USACE, 1997). دستورالعمل (ITA (2000)، استاندارد (JSCE (2007) و راهنمای (DAUB(2005) به نحوه برآورد فشار وارد بر سیستم نگهدارنده در محیط‌های سنگی اشاره‌ای نکرده‌اند.

در تحقیقات ذکر شده در قسمت قبل، تنها روش‌های مختلف برآورد بارسنگ با یکدیگر مقایسه شده است و مقایسه آنها با نتایج برداشت‌های میدانی کمتر صورت گرفته است.



شکل ۲- موقعیت نصب فشارسنج‌های پروژه گلاب ۲ (Imensazan, 2015)

نگهدارنده را نشان می‌دهد. در موقع نصب باید سعی شود که این ابزار با حداقل پوشش بتن در جداره خارجی سگمنت و به صورت کاملاً تراز و ثابت نصب گردد. شکل ۱ سلول فشار به کار رفته در تونل گلاب ۲ را نشان می‌دهد و در شکل ۲، موقعیت نصب فشارسنج‌ها نشان داده شده است.

۳- روش‌های تجربی برآورد بار سنگ

این روش‌ها بر پایه مشاهدات محلی، تعیین پارامترهای مهندسی در محل احداث پروژه و مقایسه آن‌ها با تجربیات گذشته استوار می‌باشند (Abbasi Jashoghani, 2011). متداول‌ترین روش، تئوری بار سنگ ترزاقی است که بر اساس عرض و ارتفاع تونل مقدار بار سنگ را پیشنهاد کرده است (Terzaghi, 1946). سال‌ها بعد دیر و همکارانش در سال ۱۹۷۰ سیستم طبقه‌بندی ترزاقی را با وارد کردن پارامتر RQD به‌عنوان ابزار سنجش کیفیت سنگ اصلاح کردند (Deere et al., 1970). سینگ و همکاران (۱۹۹۵)، فشار وارد بر نگهداری اندازه‌گیری شده در تونل‌ها و مغارها را با مقادیر به‌دست‌آمده از تئوری ترزاقی مقایسه کرده و مشاهده کردند که برخلاف نظریه ترزاقی، فشار وارد بر نگهداری در تونل‌ها و مغارهای سنگی، مستقیماً با افزایش ابعاد فضای حفاری افزایش نمی‌یابد (Singh et al., 1995). محققین روابط مختلفی را بر اساس سیستم RMR و Q به منظور تخمین بار وارد بر سیستم نگهداری و مهندسین ارتش آمریکا حداقل مقدار بار وارد بر سیستم نگهدارنده را معرفی کرده‌اند (USACE, 1997). در جدول ۱ روابط تجربی برآورد بار سنگ ارائه شده است.



شکل ۱- سلول فشار مورد استفاده در پروژه گلاب ۲ زمان بتن ریزی داخل قالب سگمنت

جدول ۱- روابط تخمین بارسنگ وارد بر سیستم نگهدارنده

مرجع	ارائه دهنده	رابطه	رده‌بندی مهندسی
Terzaghi (1946)	Terzaghi (1946)	$H_p = K(B + H_t)$ $P_v = \gamma H_p$	
Yavarzadeh & Moomivand, (2008)	Protodyakonov	$H_p = \frac{b}{2f}$ $b = B + 2H_t \left(\tan 45 - \frac{\phi}{2} \right)$ $P = \frac{2}{3} \gamma H_p$	بر اساس قوس فشار
Goel et al. (1995)	Unal (1983)	$H_p = \frac{B}{f}$ $P = \frac{2}{3} \gamma H_p = \frac{100\gamma B}{3\sigma_c}$	
Goel and Jethwa (1991)	Goel and Jethwa (1991)	$P_v = \frac{100 - RMR}{100} \gamma$	
Goel et al. (1995)	Goel et al. (1995)	$P_v = \frac{7.5B^{0.1}H^{0.5} - RMR}{20RMR}$	تخمین بار سنگ بر اساس RMR
Goel et al. (1995)	Goel et al. (1995)	$P_{el}(RMR) = (2.32 - 0.035RMR + 0.001H + 0.03a)/10$ $P_{sq}(RMR) = \frac{f(RMR)}{12} 10^{\frac{1.8H^{0.4}a^{0.1}}{RMR^{1.2}}}$	
Grimstad & Barton (1993)	Barton et al. (1974)	$P_{roof} = \frac{2}{3} Q^{\frac{-1}{3}}$ $n > 3$	
Grimstad & Barton (1993)	Barton et al. (1974)	$P_{roof} = \frac{2}{3} \times \frac{\sqrt{J_n}}{J_r} Q^{\frac{-1}{3}}$ $n \leq 3$	تخمین بار سنگ بر اساس سیستم Q
Goel et al. (1995)	Bhasin & Grimstad (1996)	$P_v = \frac{40B}{J_r} Q^{-0.33}$	
Goel et al. (1995)	Goel et al. (1995)	$P_{el}(N) = \frac{0.12H^{0.1}a^{0.1}}{N^{0.33}} - 0.038$ $P_{sq}(N) = \frac{f(N)}{30} 10^{\frac{H^{0.6}a^{0.1}}{50N^{0.33}}}$	
USACE (1997)	USACE	$P_v = 0.3\gamma H_t$ $P_v = 0.6\gamma H_t$	

گلاب ۲، تنوع لیتولوژی زیادی وجود ندارد. بخش‌های ابتدایی تونل در واحدهای کنگلومرایی و پس از آن در واحدهای شیلی قرار دارد (Imensazan, 2014).

۵- انتخاب مقاطع تحلیلی برای انجام تحقیق

از آنجا که هدف اصلی تحقیق حاضر مقایسه نتایج با داده‌های برداشت‌های میدانی است، مقاطع انتخابی در کیلومترهای

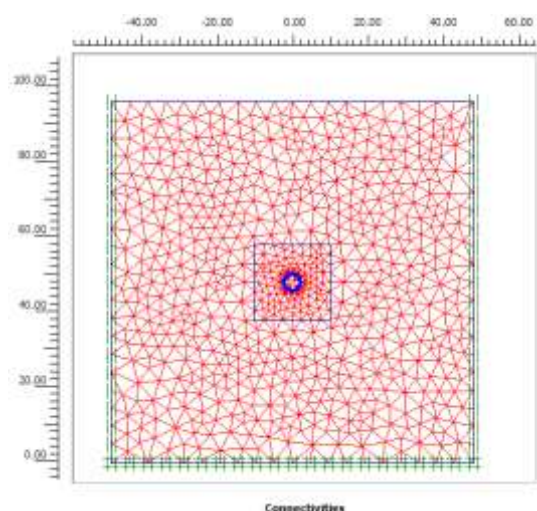
۴- معرفی پروژه تونل انتقال آب از سد زاینده‌رود به کاشان (گلاب ۲)

پروژه گلاب ۲ به منظور انتقال آب از سد تنظیمی پایین دست زاینده‌رود به شهرهای میمه و کاشان در حال احداث است. این تونل با طولی در حدود ۱۷٫۵ کیلومتر در بخش شمال شرقی پهنه سندانج- سیرجان قرار دارد. در مسیر تونل

محاسبات توسط نرم‌افزار انجام می‌گیرد. مدل موهر-کولمب برای تحلیل اولیه استفاده شده است.

در این مدل پنج پارامتر ورودی را شامل می‌شود که می‌توانند از آزمایشات روی نمونه‌های خاک بدست آیند. قبل از نصب سیستم نگهداری توده‌سنگ، محیط اطراف فضای حفاری شده دچار جابجایی و تغییرشکل و در نتیجه آزادسازی بخشی از تنش اولیه زمین و کاهش بار وارد بر سیستم نگهداری نصب شده، خواهد شد. میزان این جابجایی و آزادشدگی تنش‌ها تابعی از فاصله از سینه کار از سیستم نگهداری نصب شده و روش اجرا می‌باشد. در کنار روش‌های زمان بر و پیچیده سه بعدی برای مدل‌سازی این پدیده و طراحی سیستم نگهداری، استفاده از روش‌های مدل‌سازی دوبعدی رایج نیز قابل انجام است (Khojasteh, 2016). برای در نظر گرفتن جابجایی توده‌سنگ قبل از نصب سیستم نگهداری و اعمال تأثیر آن در مدل دو بعدی، از روش‌های تجربی استفاده شده است.

المان بندی و ابعاد مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. در جدول ۳ مشخصات توده‌سنگ‌هایی که ایستگاه‌های ابزار دقیق (جدول ۲) در آنها قرار دارند و در جدول ۴ مشخصات مهندسی لاینینگ به کار رفته در مدل‌سازی عددی ارائه شده است. در جدول ۵ پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف ذکر شده است.



شکل ۳- ابعاد کلی مدل تونل و نحوه المان‌بندی (درجه بندی قائم و افقی برحسب متر است)

انتخاب شده که ابزاربندی در آن انجام شده است. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی انجام گرفته، شرایط هندسی تونل و نحوه اجرای آن، انتخاب ایستگاه‌های فشارسنج به شرح جدول ۲ انجام شده است (Imensazan, 2015).

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های نصب ابزار دقیق (مقاطع)

شماره ایستگاه	کیلومتر تراژ	عمق (m)	واحد سنگی	واحد زمین شناسی مهندسی
S1	۰۰+۷۸۰	۲۷۶	شیل	Dshl
S2	۰۰+۹۹۰	۲۵۹	شیل	Dshl
S3	۰۱+۰۶۴	۲۵۳٫۵	شیل	Dshl
S4	۰۳+۱۶۰	۱۷۹	شیل	CZ
S5	۰۴+۰۷۲	۱۶۵٫۵	شیل گرافیتی	CZ
S6	۰۵+۵۱۹	۱۴۸	شیل گرافیتی	Msh

۶- مدل‌سازی عددی

هدف از انجام مدل‌سازی در این تحقیق مقایسه بار وارد بر سیستم نگهدارنده و همچنین نیروهای داخلی سیستم نگهدارنده با نتایج حل بسته و برداشت‌های میدانی است. *plaxis* یک نرم‌افزار کامپیوتری است که بر اساس روش اجزای محدود، آنالیز تنش - کرنش و پایداری را انجام می‌دهد (Brinkgreve, 2002). قدم اول در انجام مدل‌سازی، ساخت هندسه مدل است. حداقل زون تأثیر یک حفره زیرزمینی تا سه تا چهار برابر قطر آن برآورد شده است در صورتی که ابعاد مدل بیشتر از این مقدار باشد تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن کاهش خواهد یافت (Witke et al., 2007). در این تحقیق ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شده که فاصله مرز مدل از جداره تونل، ۱۰ برابر ابعاد تونل باشد. پس از ساخت مدل هندسی، شرایط مرزی و خواص مصالح مورد استفاده تعیین می‌شود. سپس هندسه تعریف شده توسط نرم افزار به المان‌های اجزا محدود تقسیم‌بندی شده و شبکه‌ای از المان‌ها (مش) ایجاد می‌شود. در ادامه شرایط اولیه پروژه تعریف و پس از تعیین فازهای محاسباتی و تعریف روش آنالیز با توجه به نوع نتیجه مدنظر،

ارزیابی روش‌های برآورد بارسنگ وارد بر تونل‌های حفاری مکانیزه-مطالعه موردی تونل انتقال آب سد ...: ص ۱۹-۳۶

جدول ۳- مشخصات توده‌سنگ استفاده شده در مدل‌سازی

parameter	Name	Dshl	Msh	CZ	unit
Material beh.	Type	Drained	Drained	Drained	-
Dry rock weight	γ_{dry}	26.88	26.78	26.78- 26.88	kN/m^3
Wet rock weight	γ_{wet}	26.98	26.88	26.98- 26.88	kN/m^3
Young's modulus	E_{ref}	2.3×10^6	6×10^5	9×10^5	kN/m^3
Poisson's ratio	ν	0.27	0.28	0.21	-
Cohesion	C_{ref}	700	400	300	kN/m^3
Friction angle	ϕ	36	31	21	degree
Interface strength	R_{inter}	0.5	0.5	0.5	-

جدول ۴- مشخصات لاینینگ استفاده شده در مدل‌سازی

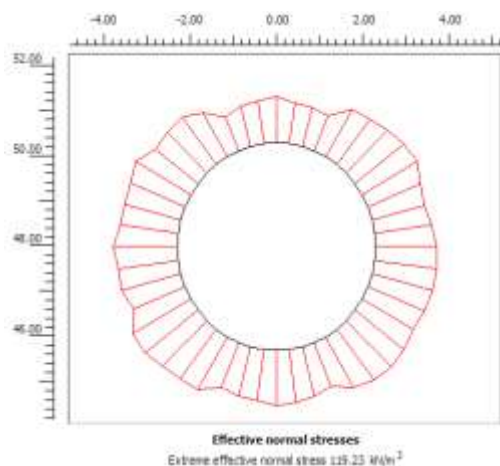
Parameter	Name	value	unit
Type of behaviour	Material type	Elastic	-
Normal stiffness	EA	6.925×10^6	kN/m
Flexural rigidity	EI	3.607×10^4	kNm^2/m
Equivalent thickness	D	0.25	M
Weight	w	6.25	$kN/m/m$
Poisson's ratio	ν	0.2	-

جدول ۵- پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مختلف

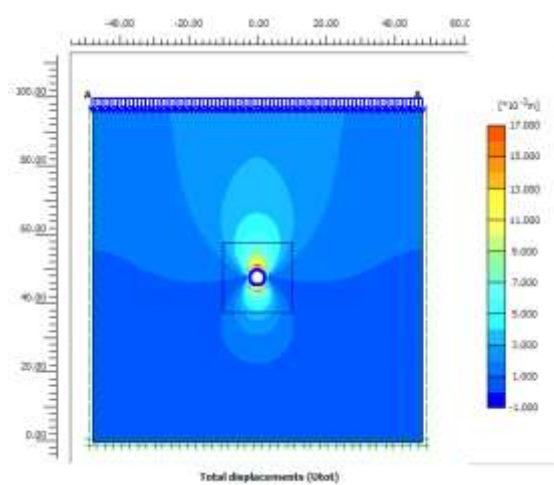
چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	N	Q	RMR		واحد	ایستگاه
				۸۹	Basic		
۰٫۷	۳۶	۴٫۵	۱٫۱	۵۰	۵۵	K_{km}	S1
۰٫۷	۳۶	۴٫۵	۱٫۱	۵۰	۵۵	K_{km}	S2
۰٫۷	۳۶	۴٫۵	۱٫۱	۵۰	۵۵	K_{km}	S3
۰٫۳	۲۱	۰٫۰۸	۰٫۰۰۸	۱۸	۲۸	CZ	S4
۰٫۳	۲۱	۰٫۰۸	۰٫۰۰۸	۱۸	۲۸	CZ	S5
۰٫۴	۳۱	۱٫۴	۰٫۲۳	۳۲	۴۲	K_{km}^m	S6

منظور حفظ اختصار، کانتورهای جابجایی، دیاگرام‌های تنش مؤثر و نیروهای داخلی سایر ایستگاه‌ها آورده نشده است.

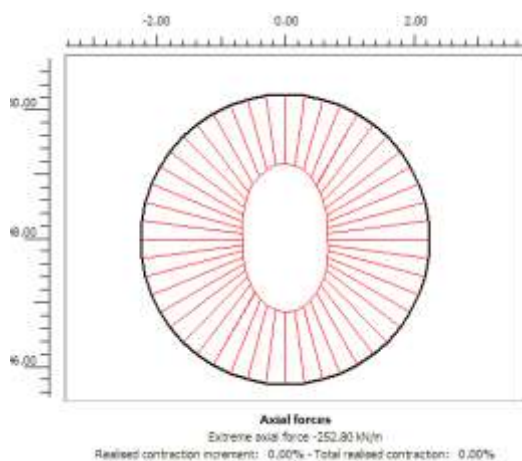
شکل ۴ تغییرات جابجایی و شکل ۵ و شکل ۶ دیاگرام‌های تنش مؤثر وارد بر لاینینگ و نیروهای داخلی لاینینگ را برای ایستگاه S1 نشان می‌دهند. به



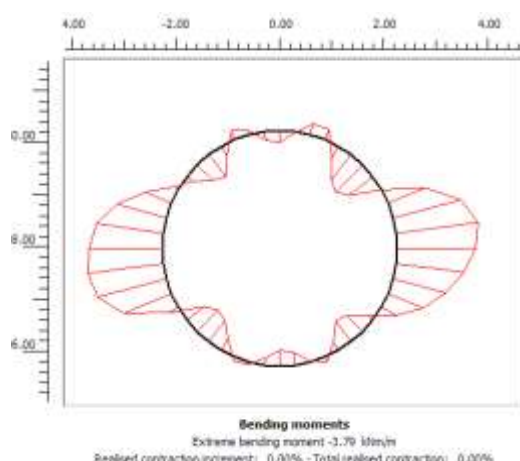
شکل ۵- تنش مؤثر وارد بر سیستم نگهدارنده برای ایستگاه S1



شکل ۴- تغییرات جابجایی در ایستگاه S1



شکل ۶- نیروهای داخلی سیستم نگهدارنده ایستگاه S1



در روش‌های تجربی، روش پروتودیاکونوف کم‌ترین و روش ترازقی بیش‌ترین مقدار بار را محاسبه می‌کنند و در روش‌های مبتنی بر سیستم Q ، با کاهش مقدار Q بار سنگ به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. روش اونال، با توجه به نظر گوئل و جتوا برای تونل‌های سنگی با قطر کمتر از ۶ متر، مقادیر دست پایینی را نسبت به فشار اندازه‌گیری شده توسط فشارسنج برآورد می‌کند. همچنین نتایج بدست آمده از روابط گوئل و همکاران (۱۹۹۵) نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده در شرایط غیر مچاله‌شونده ($S1, S2, S3$) نسبت به عمق، حساسیت و تغییرات کمی دارند در حالی که در شرایط مچاله‌شونده ($S4, S5$) با تغییر عمق مقادیر بدست آمده

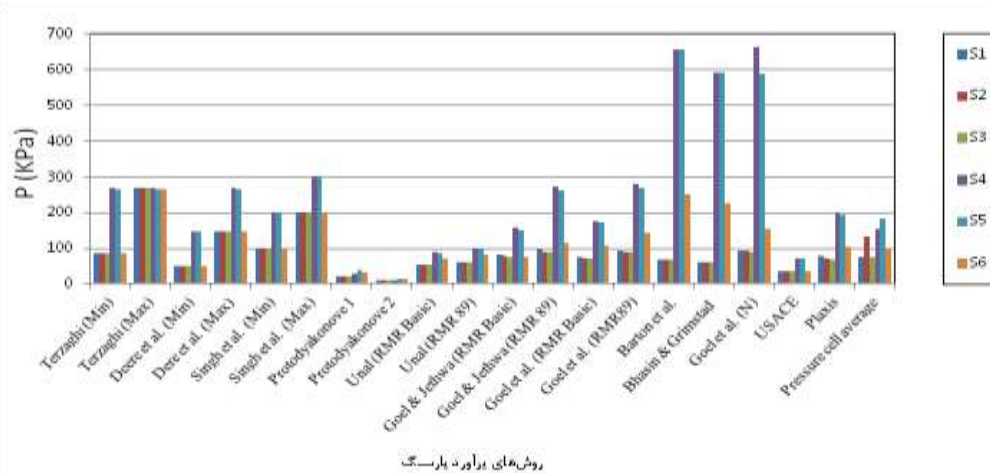
۷- برآورد بار وارد بر سیستم نگهدارنده با استفاده از روش‌های تجربی و عددی

در این بخش به بررسی و مقایسه بار سنگ به دست آمده با استفاده از روش‌های تجربی، عددی و نتایج ثبت شده از فشارسنج نصب شده در سگمنت پرداخته می‌شود. خواص ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی که مقاطع تحلیلی در آنها واقع شده است به عنوان پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۶ و شکل ۷ نتایج حاصل از روش‌های مختلف و مقدار میانگین ثبت شده از فشارسنج درون سگمنت برای مقاطع مختلف را نشان می‌دهد.

ارزیابی روش‌های برآورد بار سنگ وارد بر تونل‌های حفاری مکانیزه-مطالعه موردی تونل انتقال آب سد ...: ص ۱۹-۳۶

جدول ۷ مقایسه نتایج روش‌های مختلف را ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر برآورد شده از روش‌های گوئل و همکاران (۱۹۹۵) و گوئل و جتوا برای مقادیر *RMR Basic* در تمام شرایط توده‌سنگ (مچاله‌شونده و غیرمچاله‌شونده) به نتایج نرم‌افزار *Plaxis* نزدیک‌تر است.

تغییرات و حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده در ایستگاه‌های *S1, S3* و نظریه سنگ و همکارانش در سال ۱۹۹۲ مشاهده می‌شود که رابطه بارتن در توده‌سنگ‌های با کیفیت و غیرمچاله‌شونده نتایج نزدیک‌تری را به نتایج فشارسنج برآورد می‌کند و در توده‌سنگ‌های مچاله‌شونده و ضعیف نتایج نامطمئنی را محاسبه می‌کند



شکل ۷- تخمین بار سنگ به روش‌های مختلف برای ایستگاه‌های ابزار دقیق نصب شده

جدول ۶- تخمین بار سنگ به روش‌های تجربی و عددی بر حسب KPa

ایستگاه	S6	S5	S4	S3	S2	S1	روش برآورد
ترزاقی	۸۵-۲۶۷,۱۴	۲۶۷,۱۴	۲۶۸	۸۵,۳-۲۶۸	۸۵,۳-۲۶۸	۸۵,۳-۲۶۸	
دیر و همکاران	۴۸,۵۷-۱۴۵,۷	۱۴۵,۷-۲۶۷,۱۴	۱۴۶,۲۳-۲۶۸	۴۸,۷۴-۱۴۶,۲۳	۴۸,۷۴-۱۴۶,۲۳	۴۸,۷۴-۱۴۶,۲۳	
سینگ و همکاران	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	
پروتودیاکونوف (روش اول)	۳۲,۸۴	۳۷,۷	۲۷,۰۳	۲۲,۹۸	۲۲,۹۸	۲۲,۹۸	
پروتودیاکونوف (روش دوم)	۱۵,۸۸	۱۵,۸۸	۱۱,۳۸	۱۱,۳۸	۱۱,۳۸	۱۱,۳۸	
اونال (<i>RMR Basic</i>)	۷۰,۴۳	۸۷,۴۳	۸۷,۷۴	۵۴,۸۴	۵۴,۸۴	۵۴,۸۵	
اونال (<i>RMR 89</i>)	۸۲,۵۷	۹۹,۵۷	۹۹,۹۲	۶۰,۹۳	۶۰,۹۳	۶۰,۹۳	
گوئل و جتوا (<i>RMR Basic</i>)	۷۶,۳۱	۱۵۰,۳۵	۱۵۸,۳۶	۷۶,۲۳	۷۷,۵۹	۸۱,۷۱	
گوئل و جتوا (<i>RMR 89</i>)	۱۴۵,۷۸	۲۶۱,۶۵	۲۷۴,۱۱	۸۸,۸۵	۹۰,۳۵	۹۴,۸۹	
گوئل و همکاران (<i>RMR Basic</i>)	۱۰۶,۵۸	۱۷۳,۲۴	۱۷۶,۷۹	۷۱,۶۳	۷۲,۱۸	۷۳,۸۸	
گوئل و همکاران (<i>RMR 89</i>)	۱۴۱,۵۸	۲۷۰,۳۸	۲۷۹,۸۶	۸۹,۱۳	۸۹,۶۸	۹۱,۳۸	
بارتن	۲۵۹,۸۷	۶۵۶,۰۲	۶۵۶,۰۲	۶۹,۲۲	۶۹,۲۲	۶۹,۲۲	
باسین و گرمستند	۲۵۵,۸۸	۵۹۴,۰۳	۵۹۳,۰۴	۶۲,۵۷	۶۲,۵۷	۶۲,۵۷	
گوئل و همکاران	۱۵۴,۰۴	۵۵۸,۵	۶۶۲,۷۲	۹۱,۰۲	۹۱,۳	۹۲,۱۳	
USACE	۳۶,۳۱	۷۲,۶۳	۷۲,۹	۳۶,۴۵	۳۶,۴۵	۳۶,۴۵	
Plaxis	۱۰۷,۵۴	۱۷۶,۱۳	۱۹۸,۸۹	۶۸,۳	۷۱,۵۶	۷۸,۵۵	
مقدار میانگین ثبت شده توسط فشارسنج	۱۰۰,۳۷	۱۸۳,۳۸	۱۵۲,۵۸	۷۶,۰۳	۱۳۲,۳۳	۷۵,۶۷	

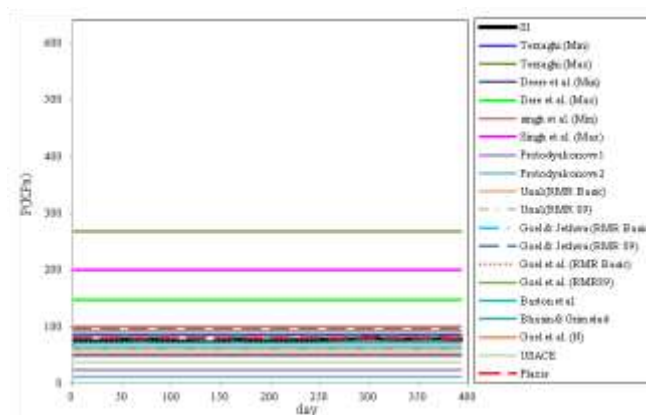
جدول ۷- مقایسه نتایج حاصل از روش‌های عددی و تجربی

نسبت نتایج Plaxis به نتایج روش‌های تجربی						ایستگاه
S6	S5	S4	S3	S2	S1	روش برآورد
۱٫۲۱ - ۰٫۳۸	۰٫۷۲	۰٫۷۴	۰٫۸۰ - ۰٫۲۵	۰٫۸۴ - ۰٫۲۷	۰٫۹۲ - ۰٫۲۹	توزاقي
۲٫۱۲ - ۰٫۷۰	۱٫۳۲ - ۰٫۷۲	۱٫۳۶ - ۰٫۷۴	۱٫۴۰ - ۰٫۴۷	۱٫۴۷ - ۰٫۴۹	۱٫۶۱ - ۰٫۵۴	دیر و همکاران
۱٫۰۳ - ۰٫۵۱	۰٫۹۶ - ۰٫۶۴	۰٫۹۹ - ۰٫۶۶	۰٫۶۸ - ۰٫۳۴	۰٫۷۲ - ۰٫۳۶	۰٫۷۸ - ۰٫۳۹	سینگ و همکاران
۳٫۰۴	۵٫۰۹	۷٫۳۶	۲٫۹۷	۳٫۱۱	۳٫۴۲	پروتودیاکونوف (روش اول)
۶٫۴۸	۱۲٫۰۹	۱۷٫۴۷	۶	۶٫۲۹	۶٫۹	پروتودیاکونوف (روش دوم)
۱٫۴۶	۲٫۱۹	۲٫۲۷	۱٫۲۴	۱٫۳۰	۱٫۴۳	اونال (RMR Basic)
۱٫۲۴	۱٫۹۳	۱٫۹۹	۱٫۱۲	۱٫۱۷	۱٫۲۹	اونال (RMR 89)
۱٫۳۵	۱٫۲۷	۱٫۲۵	۰٫۸۹	۰٫۹۲	۰٫۹۶	گوئل و جتوا (RMR Basic)
۰٫۸۹	۰٫۷۳	۰٫۷۲	۰٫۷۷	۰٫۷۹	۰٫۸۳	گوئل و جتوا (RMR 89)
۰٫۹۶	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۰٫۹۵	۰٫۹۹	۱٫۰۶	گوئل و همکاران (RMR Basic)
۰٫۷۳	۰٫۷۱	۰٫۷۱	۰٫۷۶	۰٫۸	۰٫۸۶	گوئل و همکاران (RMR 89)
۰٫۴۱	۰٫۲۹	۰٫۳	۰٫۹۸	۱٫۰۳	۱٫۱۳	بارتن
۰٫۴۵	۰٫۳۲	۰٫۳۳	۱٫۰۹	۱٫۱۴	۱٫۲۵	باسین و گرمستد
۰٫۶۷	۰٫۳۲	۰٫۳	۰٫۷۵	۰٫۷۸	۰٫۸۵	گوئل و همکاران (N)
۲٫۸۳	۲٫۶۴	۲٫۷۳	۱٫۸۷	۱٫۹۶	۲٫۱۵	USACE

فشار وارد بر لاینینگ، در قیاس با نتایج حاصل از فشارسنج نصب شده در سگمنت تونل مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل‌های ۸ تا ۱۳ نتایج روش‌های مختلف با نتایج ثبت شده از فشارسنج نصب شده در سقف سگمنت را نشان می‌دهد.

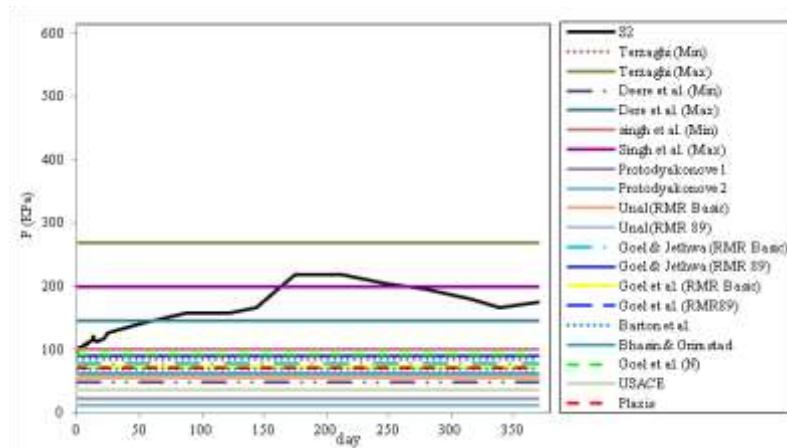
۸- مقایسه نتایج ایزاردقیق با نتایج حاصل از روش‌های مختلف

نتایج حاصل از روش‌های تجربی و روش‌های عددی در برآورد

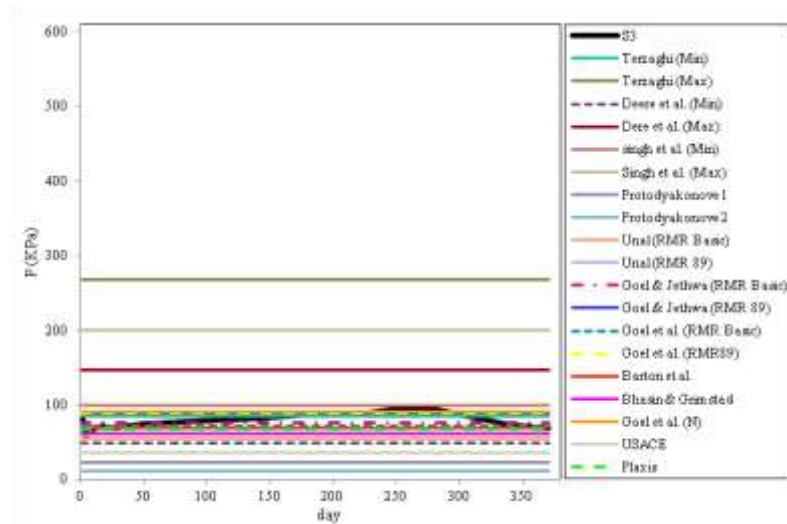


شکل ۸- مقایسه نتایج روش‌های مختلف با نتایج فشارسنج نصب شده در تاج تونل در ایستگاه S1

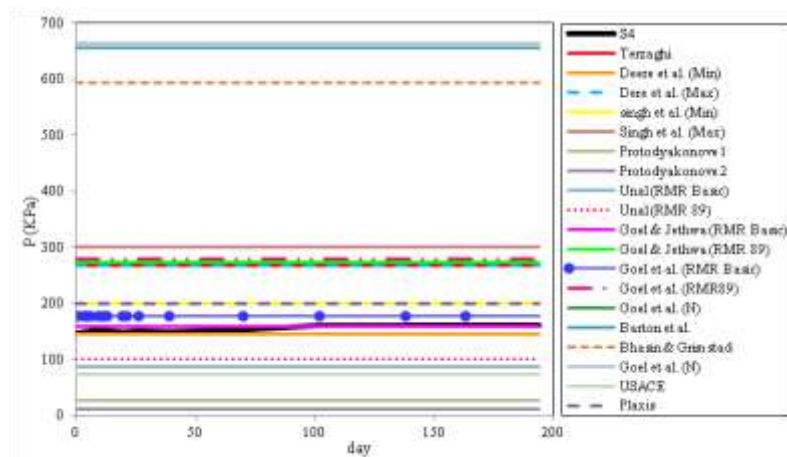
ارزیابی روش‌های برآورد بارسنگ وارد بر تونل‌های حفاری مکانیزه-مطالعه موردی تونل انتقال آب سد ...: ص ۱۹-۳۶



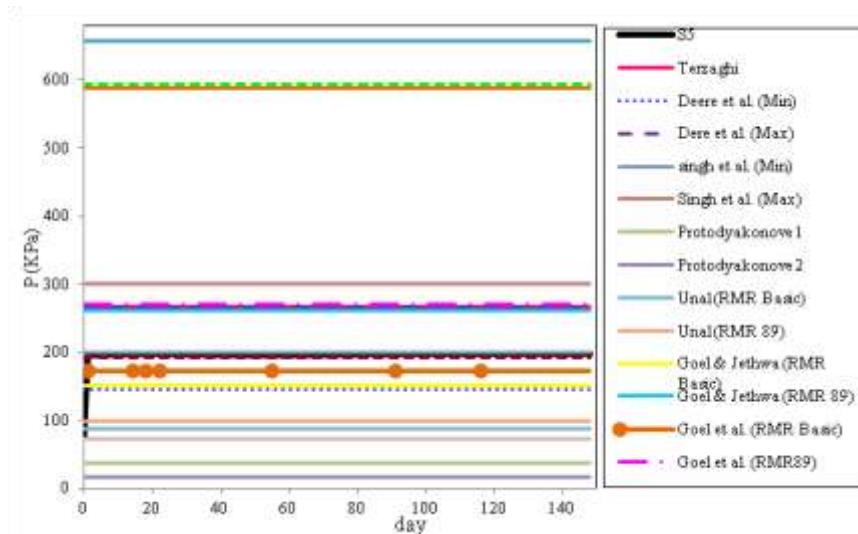
شکل ۹- مقایسه نتایج روش‌های مختلف با نتایج فشارسنج نصب شده در تاج تونل در ایستگاه S2



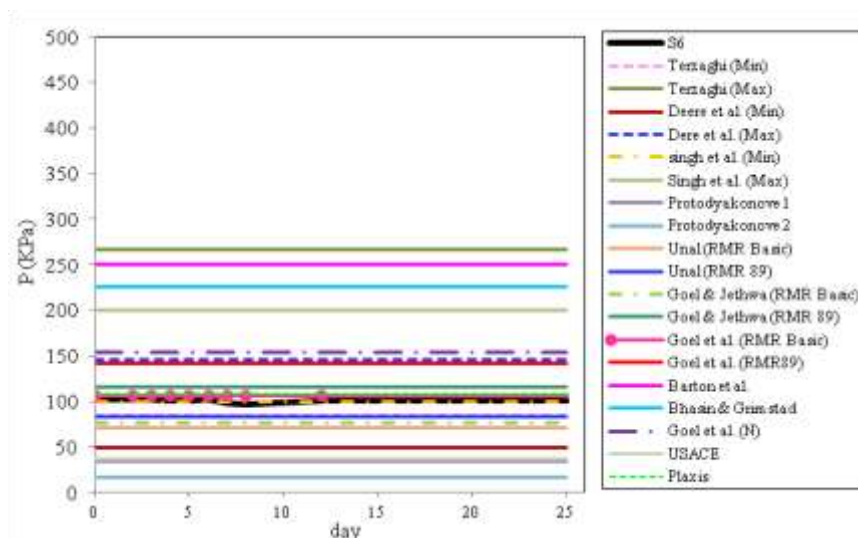
شکل ۱۰- مقایسه نتایج روش‌های مختلف با نتایج فشارسنج نصب شده در تاج تونل در ایستگاه S3



شکل ۱۱- مقایسه نتایج روش‌های مختلف با نتایج فشارسنج نصب شده در تاج تونل در ایستگاه S4



شکل ۱۲- مقایسه نتایج روش‌های مختلف با نتایج فشارسنج نصب شده در تاج تونل در ایستگاه S5



شکل ۱۳- مقایسه نتایج روش‌های مختلف با نتایج فشارسنج نصب شده در تاج تونل در ایستگاه S6

می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۸، روش گوئل و جتوا، گوئل و همکاران برای مقادیر *RMR Basic* و نتایج حاصل از روش عددی (*Plaxis*) در تمام شرایط زمین (مچاله‌شونده و غیرمچاله‌شونده) مقادیر نزدیک‌تری را با نتایج فشارسنج برآورد می‌کنند. اختلاف نتایج در ایستگاه S2 می‌تواند ناشی از شرایط زمین‌شناسی در محدوده نصب ابزار باشد.

گراف‌های ثبت شده در ایستگاه‌های S4، S5 و S6 نشان می‌دهند که این محدوده تقریباً به مرحله تثبیت رسیده است که این موضوع می‌تواند نشان دهنده به تعادل رسیدن مجدد تنش‌های نتایج فشارسنج با نتایج حاصل از روش‌های مختلف، مقدار میانگین محیطی تونل باشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی نتایج ثبت شده از فشارسنج با نتایج روش‌های مختلف مقایسه شده است. جدول ۸ مقایسه بین مقدار میانگین فشار ثبت شده توسط فشارسنج با نتایج روش‌های مختلف را ارائه

جدول ۸- مقایسه نتایج روش‌های مختلف برآورد بار سنگ با میانگین مقدار ثبت شده توسط فشارسنج نصب شده در تاج تونل

S6	S5	S4	S3	S2	S1	ایستگاه
						روش برآورد
۱,۱۸ - ۰,۳۸	۰,۶۹	۰,۵۷	۰,۸۹ - ۰,۲۸	۱,۵۵ - ۰,۴۹	۰,۸۹ - ۰,۲۸	ترزاقی
۲,۰۷ - ۰,۶۹	۱,۲۶ - ۰,۶۹	۱,۰۴ - ۰,۵۷	۱,۵۶ - ۰,۵۲	۲,۷۲ - ۰,۹۰	۱,۵۵ - ۰,۵۲	دیر و همکاران
۱,۰ - ۰,۵	۰,۹۲ - ۰,۶۱	۰,۷۶ - ۰,۵۱	۰,۷۶ - ۰,۳۸	۱,۳۲ - ۰,۶۶	۰,۷۶ - ۰,۳۸	سینگ و همکاران
۲,۹۷	۴,۸۶	۵,۶۴	۳,۳	۵,۷۶	۳,۲۹	پروتودیاکونوف (روش اول)
۶,۳۲	۱۱,۵۵	۱۱,۴۱	۶,۶۸	۱۱,۶۳	۶,۶۵	پروتودیاکونوف (روش دوم)
۱,۴۳	۲,۱	۱,۷۴	۱,۳۹	۲,۴۱	۱,۳۸	اونال (RMR Basic)
۱,۲۱	۱,۸۴	۱,۵۳	۱,۲۵	۲,۱۷	۱,۲۴	اونال (RMR 89)
۱,۳۱	۱,۲۲	۰,۹۶	۱,۰	۱,۷	۰,۹۳	گوئل و جتوا (RMR Basic)
۰,۸۶	۰,۷	۰,۵۶	۰,۸۶	۱,۴۶	۰,۸	گوئل و جتوا (RMR 89)
۰,۹۴	۱,۰۶	۰,۸۶	۱,۰۶	۱,۸۳	۱,۰۲	گوئل و همکاران (RMR Basic)
۰,۷۱	۰,۶۸	۰,۵۵	۰,۸۵	۱,۴۸	۰,۸۳	گوئل و همکاران (RMR 89)
۰,۴	۰,۲۸	۰,۲۳	۱,۱	۱,۹۱	۱,۰۹	بارتن
۰,۴۴	۰,۳۱	۰,۲۶	۱,۲۱	۲,۱۱	۱,۲۱	باسین و گرمستد
۰,۶۵	۰,۳۱	۰,۲۳	۰,۸۴	۱,۴۵	۱,۸۲	گوئل و همکاران
۲,۷۶	۲,۵۲	۲,۰۹	۲,۰۹	۳,۶۳	۲,۰۸	USACE
۰,۹۷	۰,۹۶	۰,۷۷	۱,۱۱	۱,۸۵	۰,۹۶	Plaxis

استفاده شده است که قابلیت اعمال رفتار غیر خطی را داشته و می‌توان مشخصات آن را به گونه‌ای مدل نمود که در هنگام وقوع کشش در فنرهای شعاعی نیروی آن صفر شده و هنگام فشار، مقاومت فشاری از خود نشان دهد. بعد از حل مدل نیروهای محوری و لنگر خمشی محاسبه شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۴ نمای کلی هندسه پوشش تونل ساخته شده است.



شکل ۱۴- هندسه مدل ساخته شده در SAP2000

مقادیر بار سنگ تخمین زده شده از روابط تجربی به عنوان بار خارجی در نرم‌افزار SAP2000 اعمال شده و نیروهای محوری و ممان سیستم نگهدارنده حاصل از بارهای خارجی محاسبه و منحنی ممان - نیرو رسم شده است. و

۹- بررسی نیروهای داخلی سیستم نگهدارنده

یکی از روش‌های متعارف در تحلیل سازه‌های تونلی استفاده از مدلسازی به روش تیر-فنر به همراه بارگذاری سنگ حاصل از روش‌های حل بسته است (Chapman et al., 2010).

در این قسمت نیروهای داخلی لاینینگ تونل با استفاده از مدل تیر-فنر محاسبه می‌شود. برای این منظور از بار سنگ محاسبه شده از روش‌های تجربی استفاده شد. به منظور مدلسازی از نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. در این تحقیق ۱۰۶ مدل در نرم‌افزار SAP2000 ساخته شده است. پوشش داخلی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و به طول یک متر و با مقاومت ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است و توده سنگ اطراف پوشش نگهداری با استفاده از فنرهای شعاعی و مماسی مدل شده‌اند. سختی فنرهای بکار رفته برای مدلسازی با استفاده از روابط بسیار ساده که از نظریه وینکلر مشتق شده‌اند، محاسبه شده است (Barpi et al., 2011):

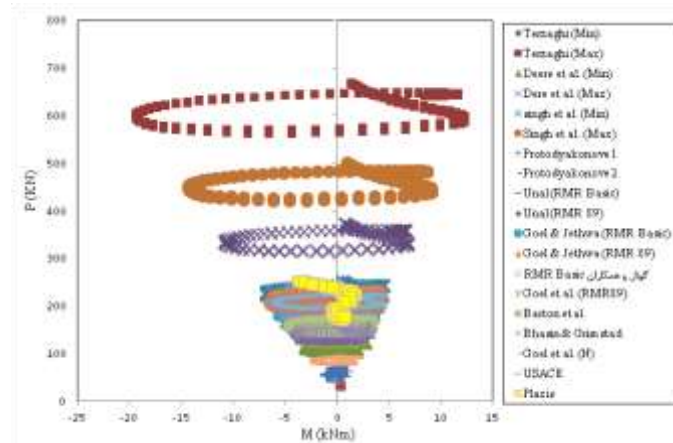
$$K_r = \frac{E_{rock} mass}{R_{eq} \cdot (1+\nu)} \quad (۱)$$

$$K_t = \frac{1}{3} K_n \quad (۲)$$

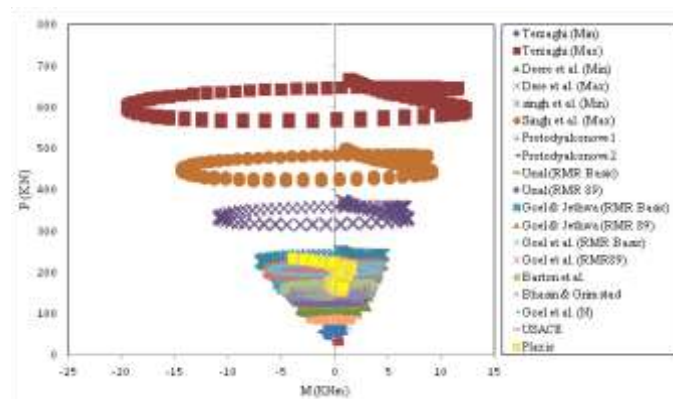
در این مدل سازی از تحلیل استاتیکی غیر خطی

از تحقیق بررسی یا طراحی طرح سازه ای لایننگ نمی باشد و لذا بحثی از ضرایب افزایش بار یا ترکیب های بارگذاری به میان نیامده است.

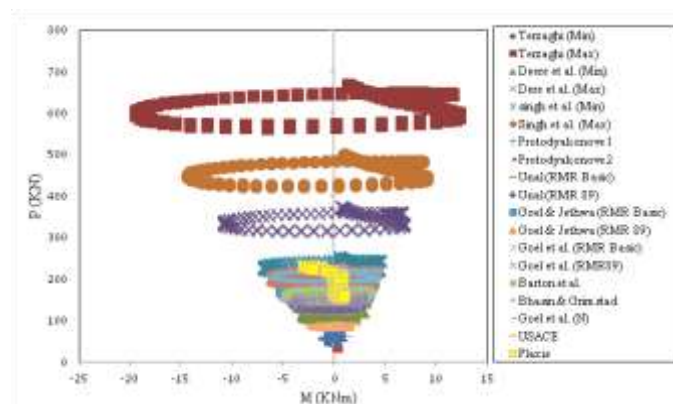
نتایج آن با نتایج نرم‌افزار *Plaxis* مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. شکل های ۱۵ تا ۲۰ منحنی ممان نیرو حاصل از دو نرم افزار را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است هدف از این قسمت



شکل ۱۵- منحنی ممان - نیرو حاصل از نرم‌افزارهای *Plaxis* و *SAP2000* برای ایستگاه S1

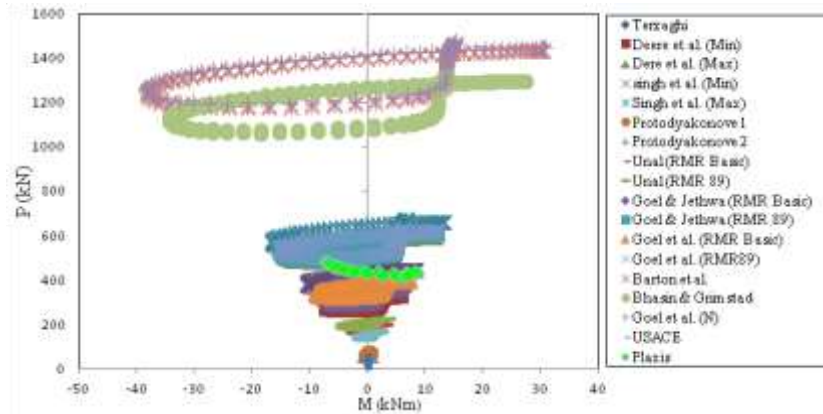


شکل ۱۶- منحنی ممان - نیرو حاصل از نرم‌افزارهای *Plaxis* و *SAP2000* برای ایستگاه S2



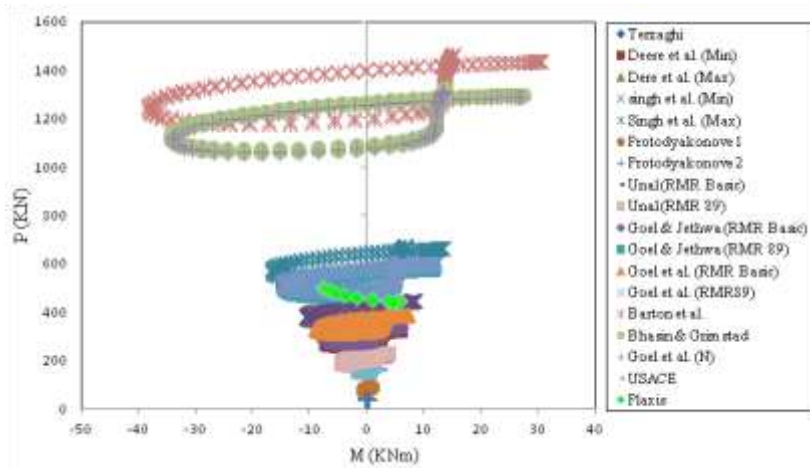
شکل ۱۷- منحنی ممان - نیرو حاصل از نرم‌افزارهای *Plaxis* و *SAP2000* برای ایستگاه S3

ارزیابی روش‌های برآورد بارسنگ وارد بر تونل‌های حفاری مکانیزه-مطالعه موردی تونل انتقال آب سد ...: ص ۱۹-۳۶

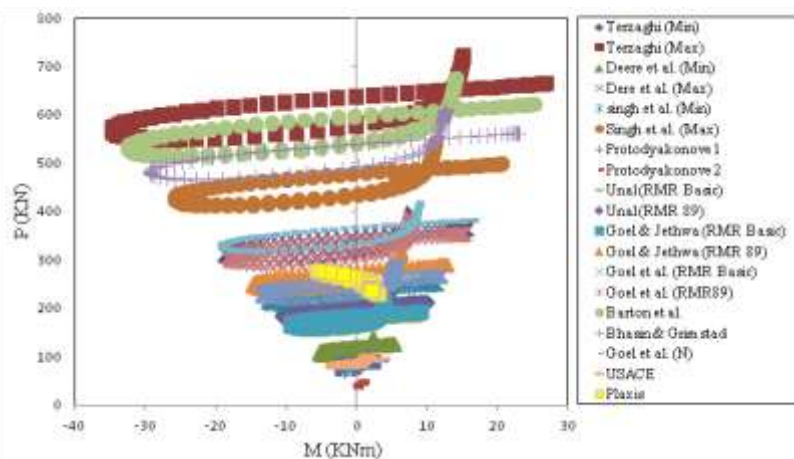


6

شکل ۱۸- منحنی ممان - نیرو حاصل از نرم‌افزارهای SAP2000 و Plaxis برای ایستگاه S4



شکل ۱۹- منحنی ممان - نیرو حاصل از نرم‌افزارهای SAP2000 و Plaxis برای ایستگاه S5



شکل ۲۰- منحنی ممان - نیرو حاصل از نرم‌افزارهای SAP2000 و Plaxis برای ایستگاه S6

نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

با توجه به نتایج بدست آمده از روش‌های تجربی در برآورد بار سنگ، روش پروتودیاکونوف کم‌ترین و روش ترزاقی بیش‌ترین مقدار بار را محاسبه می‌کنند و در روش‌های مبتنی بر سیستم Q ، با کاهش مقدار Q بار سنگ به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در برآورد بار سنگ، روش اوانال با توجه به نظر گوئل و جتوا برای تونل‌های سنگی با قطر کمتر از ۶ متر مقادیر دست‌پایینی را نسبت به فشار اندازه‌گیری شده توسط فشارسنج، برآورد می‌کند.

نتایج بدست آمده از روابط گوئل و همکاران (۱۹۹۵) نشان می‌دهد که مقادیر بار سنگ برآورد شده در شرایط غیر مچاله‌شونده (ایستگاه‌های $S1, S2, S3$) که در یک واحد زمین‌شناسی مهندسی قرار دارند نسبت به عمق حساسیت و تغییرات کم و در شرایط مچاله‌شونده (ایستگاه‌های $S4, S5$) با تغییر عمق مقادیر بدست آمده تغییرات و حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهند.

با مقایسه نتایج روش‌های تجربی و عددی مشاهده می‌شود که مقادیر بار سنگ برآورد شده از روش‌های گوئل و همکاران (۱۹۹۵) و گوئل و جتوا برای مقادیر $RMR Basic$ در تمام شرایط توده‌سنگ (مچاله‌شونده و غیر مچاله‌شونده) به نتایج نرم‌افزار $Plaxis$ نزدیک‌تر است.

مقایسه نتایج روش‌های مختلف برآورد بار سنگ با نتایج ثبت شده از فشارسنج نشان می‌دهند که روش گوئل و جتوا، گوئل و همکاران برای مقادیر $RMR Basic$ و نتایج حاصل از روش عددی ($Plaxis$) در تمام شرایط زمین (مچاله‌شونده و غیر مچاله‌شونده) مقادیر نزدیک‌تری را با نتایج فشارسنج برآورد می‌کنند.

با توجه به نتایج نیروهای محوری به دست آمده از روش‌های مختلف در نرم افزار $SAP2000$ با نرم‌افزار $Plaxis$ مشاهده می‌شود که نیروی محوری حاصل از روش‌های گوئل و همکاران و گوئل و جتوا مبتنی بر سیستم $RMR (RMR 89, RMR Basic)$ به نتایج نرم‌افزار $Plaxis$ در تمام ایستگاه‌ها و شرایط زمین‌شناسی مختلف نزدیک است.

نتایج روش‌های گوئل و جتوا و همچنین گوئل و

با توجه به شکل‌های ۱۵ تا ۲۰، نتایج حاصل از مدل سازی در نرم‌افزار $Plaxis$ نشان دهنده لنگر خمشی کم‌تری در سازه لاینینگ تونل نسبت به نتایج حاصل از نرم‌افزار $SAP2000$ می‌باشد. در ایستگاه‌های $S1, S2, S3$ روش‌های ترزاقی، دیر و همکاران و سینگ و همکاران در حالت max و در ایستگاه‌های $S4, S5$ روش‌های بارتن، باسین و گرمستد و گوئل و همکاران (N) نیروی محوری و لنگر خمشی بالایی را می‌دهند. در ایستگاه $S6$ علاوه بر روش‌های مذکور روش گوئل و همکاران ($RMR 89$) نیز نیروی محوری و لنگر خمشی بالایی را محاسبه می‌کند. روش‌های پروتودیاکونوف، دیر و همکاران در حالت min و $USACE$ در تمامی ایستگاه‌ها نیروی محوری و لنگر خمشی کمی را برآورد می‌کنند.

در ایستگاه‌های $S1, S2, S3$ نیروی محوری حاصل از روش‌های مبتنی بر طبقه‌بندی RMR و در ایستگاه‌های $S4, S5$ نیروی محوری حاصل از روش‌های سینگ و همکاران، دیر و همکاران در حالت min و روش ترزاقی به نیروی محوری به دست آمده از نرم‌افزار $Plaxis$ نزدیک است. در ایستگاه $S6$ روش سینگ min روش‌های گوئل و همکاران (RMR) و روش گوئل و جتوا نیروی محوری نزدیک به نیروی محوری حاصل از نرم‌افزار $Plaxis$ را محاسبه می‌کنند.

به طور کلی نیروی محوری حاصل از روش‌های گوئل و همکاران و گوئل و جتوا مبتنی بر سیستم $RMR (RMR 89, RMR Basic)$ به نتایج نرم‌افزار $Plaxis$ در تمام ایستگاه‌ها و شرایط زمین‌شناسی مختلف نزدیک است و نتایج روش‌های ترزاقی و روش‌های مبتنی بر سیستم Q نتایج دورتری را محاسبه می‌کنند و توصیه می‌شود در هنگام استفاده از آنها دقت شود.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش‌های تجربی و با بهره‌گیری از نرم‌افزارالمان محدود $Plaxis$ بار سنگ به روش‌های تجربی و عددی محاسبه و با نتایج بدست آمده از ابزار دقیق نصب شده در سگمنت تونل انتقال آب از سد زاینده رود به شهر کاشان مقایسه شد. همچنین نتایج نیروهای داخلی لاینینگ حاصل از تحلیل در نرم افزار $PLAXIS$ و نتایج نیروهای داخلی در نرم‌افزار $SAP2000$ (بر اساس بار سنگ حاصل از روش‌های تجربی) مورد بررسی، مقایسه و تفسیر قرار گرفتند. مهمترین

۱۱- تشکر و قدردانی

از حمایت و راهنمایی‌های شرکت مهندسی مشاور ایمن‌سازان و شرکت مهندسی سراج ابزار تشکر و قدردانی می‌شود.

۱۲- سیاهه نمادها

سیاهه نمادها در جدول ۹ آورده شده است.

همکاران که مبنای بر سیستم طبقه‌بندی *RMR* هستند با استفاده از مقادیر *RMR Basic* به عنوان نزدیکترین تخمین به برداشت‌های میدانی در برآورد بارسنگ معرفی می‌شوند. شایان ذکر است نتایج تحقیق حاضر بر اساس داده‌های میدانی این پروژه حاصل شده است و نیاز به تحقیقات بیشتری در این خصوص لازم است.

جدول ۹-سیاهه نمادها

شرح	واحد	نماد
ارتفاع بارسنگ	<i>m</i>	<i>H_P</i>
ضریب ترزاقی	-	<i>K</i>
عرض تونل	<i>m</i>	<i>B</i>
ارتفاع تونل	<i>m</i>	<i>H_t</i>
فشار وارد بر سیستم نگهدارنده	<i>KPa</i>	<i>P_v</i>
وزن واحد حجم	<i>kN/m³</i>	<i>γ</i>
عرض گنبد سهمی	<i>m</i>	<i>b</i>
زاویه اصطکاک	-	<i>φ</i>
مقاومت فشاری تک محوری	<i>Kg/cm³</i>	<i>σ_c</i>
امتیاز توده سنگ	-	<i>RMR</i>
عمق تونل	<i>m</i>	<i>H</i>
شعاع تونل	<i>m</i>	<i>a</i>
ضریب تصحیح همگرایی	-	<i>f(RMR)</i>
سیستم کیفی تونل‌سازی	-	<i>Q</i>
ضریب تعداد دسته درزه	-	<i>J_n</i>
ضریب زبری سطح درزه	-	<i>J_r</i>
تعداد دسته درزه	-	<i>n</i>
سیستم کیفی تونل‌سازی بدون تنش	-	<i>N</i>
ضریب تصحیح همگرایی	-	<i>f(N)</i>
سختی نرمال (شعاعی)	<i>Kg/cm²</i>	<i>K_r</i>
مدول الاستیسیته توده سنگ	<i>Kg/cm³</i>	<i>E_{rock mass}</i>
شعاع معادل تونل	<i>m</i>	<i>R_{eq}</i>
نسبت پواسون	-	<i>ν</i>
سختی مماسی	<i>Kg/cm²</i>	<i>K_t</i>
فشار نهایی وارد بر سیستم نگهدارنده در شرایط غیر مچاله شونده	<i>MPa</i>	<i>P_{el(RMR)}</i>
فشار نهایی وارد بر سیستم نگهدارنده در شرایط مچاله شونده	<i>MPa</i>	<i>P_{sq(RMR)}</i>
فشار نهایی وارد بر سیستم نگهدارنده در شرایط غیر مچاله شونده	<i>MPa</i>	<i>P_{el(N)}</i>
فشار نهایی وارد بر سیستم نگهدارنده در شرایط مچاله شونده	<i>MPa</i>	<i>P_{sq(N)}</i>

۱۳- مراجع

- Abbasi Jashoghani, M. (2011). "Parametric Analysis of Support System- Rock Mass Interaction Considering the Effect of Relative Stiffness Between the Ground and Lining". M.s.c Thesis of Civil Engineering. Tafresh University
- Afshar, T., Sharifzadeh, M., Rostami, J. (2014). "Estimation of Rock Load for Tunnels with Different Disturbance Factors". 15th Australasian Tunnelling Conference.
- Barpi, F., Barbero, M., & Peila, D. (2011). "Numerical modelling of ground-tunnel support interaction using bedded-beam-spring model with fuzzy parameters". *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 27, 71-87.
- Basirat, R., Hassani, R., Mahmoodian, N. (2015). "Rock Load Estimation for Designing of Rock Tunnels Permanent Lining (Case Study: Manjil- Rudbar Freeway Tunnel 1". 11th Iranian and 2th Regional Tunnelling Conference " Tunnel and Future"
- Brinkgreve, R. B. J. (2002). "PLAXIS 2D (version 8) [software]". Finite Element Code for Soil and Rock Analyses
- Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2010). "Introduction to tunnel construction (Vol. 3)". CRC Press.
- Deere, D. U., Peck, R. B., Parker, H., Monsees, J. E., & Schmidt, B. (1970). " Design of tunnel support systems". *Highway Research Record*, No. 339, 26-33.
- Dehkordi, M.S., Shahriar, K., Moarefvand, P. & Gharouninik, M., (2013). "Application of the strain energy to estimate the rock load in squeezing ground condition of Eamzade Hashem tunnel in Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 6(4): p. 1241-1248.
- Dwivedi, R. D., Singh, M., Viladkar, M. N., & Goel, R. K. (2014). "Estimation of support pressure during tunnelling through squeezing grounds". *Engineering Geology*, 168, 9-22.
- Federal Highway Administration (FHWA), (2009). " Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-civil Elements". US Department of Transportation, National Highway Institute, FHWA-NHI-09-01.
- German Committee for Underground Construction (DAUB) (2005). "Recommendations for static Analysis of Shield Tunnelling Machines".
- Goel, R. K., Jethwa, J. L., & Paithankar, A. G. (1995). " Indian experiences with Q and RMR systems". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(1), 97-109.
- Goel, R.K., Jethwa, J.L., (1991). " Prediction of Support pressure using RMR Classification". *Proc. Indian Geotechnical Conf.,Surat, India*.
- Grimstad, E. and Barton, N. (1993). "Updating the Q-System for NMT". *Proc. Int. Symp. On Sprayed Concrete - Modern use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Fagernes, (eds Kompen, Opsahl and Berg).Oslo: Norwegian Concrete Assn
- Imensazan Consultant Engineers Institute. (2014). " Engineering Geology Report of Golab 2 Tunnel"
- Imensazan Consultant Engineers Institute. (2014). " Instrumentation Report of Golab 2 Tunnel"
- ITA (International Tunneling Association) (2000). "Guidelines for the design of shield tunnel lining". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3): p. 303-331.
- Japan Society of Civil Engineers(JSCE) (2007). " Standard specifications for tunneling 2006 shield tunnels" Tunnel Engineering Committee, The Standard Specifications for Tunneling Subcommittee.

- Khojaste, R. (2016). "Evaluation of Fuzzy Multy Criteria Decision Making Method for The Selection of Initial Support of the Spillway Tunnel of Rogun Damm and Powerhouse Projrct". M.S.C Thesis of Geology Engineering, Damghan university
- Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2014). "Handbook of Tunnel Engineering II: Basics and Additional Services for Design and Construction". John Wiley & Sons.
- Singh, B., Jethwa, J. L., & Dube, A. K. (1995). "A classification system for support pressure in tunnels and caverns". *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 1(1), 13-24.
- Singh, B., Jethwa, J. L., Dube, A. K., & Singh, B. (1992). "Correlation between observed support pressure and rock mass quality". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7(1), 59-74.
- Terzaghi, K. (1946). "Introduction to tunnel geology". *Rock tunnelling with steel supports*, 17-99.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE), (1997). "Tunnels and Shafts in Rock". Department of the Army, DC, p. 20314-1000
- Wittke, W., C. Erichsen, and J. Gattermann, (2007). "Geotechnical Engineering in Research and Practice Publications". WBI GmbH, Henricistr. 50, 52072 Aachen, Germany.
- Yavarzadeh, S., Moomivand, H. (2008). "Comparison between Estimating Pressure on Tunnel Support System using Empirical Methods". 2th Iranian Mine Engineering Conference
- You, K., M.Sagong, and J.S. Lee, (2007). "Estimation of rock load for the design of 2-arch tunnel lining". *Underground Space- the 4th Dimension of Metropolises – Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds) p. 785 -789*
- Zhu, H., Chen, M., Zhao, Y., & Niu, F. (2016). "Stability Assessment for Underground Excavations and Key Construction Techniques". Springer.

Analysis of Lining Load of Mechanized Tunnels - A Case Study of Zayanderood Dam to Kashan Water Conveyance Tunnel

Meysam Jalali¹; Parvaneh Beik²

1. Assistant Professor; Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology
2. Researcher, Damghan University

Received: 12 Feb 2017; Accepted: 11 Oct 2017

Keywords

Tunnel
Rock load
Support system
Empirical methods
Numerical method

Extended Abstract

Summary

When an underground space is drilled, the state of stresses is changed and a disturbance is created in the mechanical behavior of the surrounding area. Stability of an underground space is provided by support systems. One of the most important loads in designing tunnel support system is environmental rock/soil loads. To estimate the rock load, various methods have been introduced such as empirical, analytical and numerical methods, which are based on the engineering classification of rocks. The aim of this study is to evaluate empirical and numerical methods of estimation of rock load on the segmental tunnel support system according to the instrumentation data in the tunnel for transferring water from Zayanderood dam to the city of Kashan. The results of the numerical simulations, carried out in this study, are similar to the results of the field data.

Introduction

In order to estimate the rock load on tunnels, empirical, analytical or numerical methods are useable for tunnel design engineers. In the empirical methods, based on local observations, the required parameters in the project are obtained. And then, compared with those from past experience, and finally, based on the conclusions, and the forces are determined. In the numerical methods, based on analysis stress, displacement and plastic zone are determined and rock load is calculated. The most important advantage of these numerical methods is their capability for the simultaneous determination of the load on support system and deformation occurred in the rock mass. In estimation of the rock load by each of these methods, sometimes large differences can be observed between the estimation results from different methods.

Methodology and Approaches

In this research, all the relevant experimental methods available in the literature were evaluated. Numerical modeling was made using SAP2000 and PLAXIS-2D software packages. The results of empirical and numerical methods were compared with the results of field work and instrumentation and then, the results were analyzed and interpreted. The internal forces, determined by each of the PLAXIS and SAP2000 software packages, were compared based on the results obtained from experimental methods, and then, interpretation of the final results was made.

Results and Conclusions

Based on the results of numerical simulations, estimates and analyses made by the Plaxis software for all host rock mass conditions, we found that the results of the numerical simulations were similar to the results of the field data. According to the analysis, the results based on RMR classification system, basic values were found as the closest approximation to the field data for estimation of rock load.
