

تعیین پروفیل تغییر شکل طولی تونل‌های دارای نگهداری (SLDP) با روش عددی

علی حسین علی‌نژادی^۱؛ رضا رحمان‌نژاد^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد دانشگاه شهید باهنر کرمان،

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳

چکیده

با توجه به اهمیت ایمنی سازه‌های زیرزمینی، انتخاب مناسب پارامترهای نگهداری و تحلیل اندرکنش آن با زمین همواره یک مسئله مهم بشمار می‌رود. یکی از مؤلفه‌های مهم در طراحی تونل‌ها به روش همگرایی-همجواری منحنی پروفیل تغییر شکل طولی یا LDP است که بر اساس آن، موقعیت نصب نگهداری تعیین می‌شود. محققین زیادی جهت تعیین آن در حالت تونل فاقد نگهداری راه‌کارهای گوناگونی ارائه نموده‌اند.

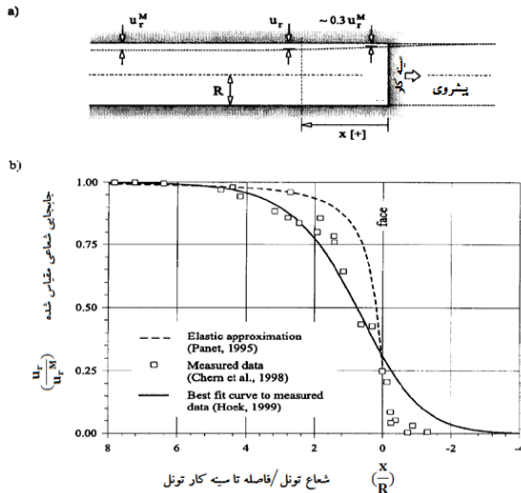
چنانچه نگهداری در تونل نصب گردد، شکل منحنی مزبور در فاصله بدون نگهداری بین سینه‌کار و لبه نگهداری تغییر کرده و جابجایی نهایی کاهش می‌یابد که در این مورد تحقیقات بسیار محدودی صورت گرفته است. در این تحقیق روشی برای رسم نمودار LDP برای تونل دارای نگهداری یعنی (SLDP) در شرایط جامع‌تر نسبت به تحقیقات قبلی ارائه شده است. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ تونلی غیردایروی دارای پوشش بتنی در محیط الاستوپلاستیک برای بازه RMR بین ۴۰ تا ۷۰، ارتفاع روباره ۱۰۰ الی ۳۰۰ مترو تحت تنش‌های هیدروستاتیک و غیرهیدروستاتیک مدل‌سازی عددی شد. به‌عنوان پارامترهای متغیر نگهداری سختی آن و فاصله بدون نگهداری انتخاب شد. از داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی که با ترکیب حالت‌های مختلف از پارامترهای فوق حاصل شد، پروفیل تغییر شکل طولی تونل نگهداری شده (SLDP) رسم گردید و سپس با استفاده از محاسبات آماری، روابطی برای تعیین SLDP ارائه شد.

تنش‌های غیر هیدروستاتیک، پوشش بتنی، سختی نگهداری، تنش غیر هیدروستاتیک، $FLAC^{3D}$ RMR,SLDPLDP

کلمات کلیدی

۱- مقدمه

جلوی تونل در فاصله حدود چهار برابر شعاع آن شروع و در هر فاصله x از سینه کار مقدار آن u_r است. هنگامی که فاصله x به میزان کافی بزرگ باشد، جابجایی شعاعی به حداکثر مقدار خود یا u_r^{\max} در فاصله حدود هشت برابر شعاع تونل می‌رسد. همچنین در سینه کار مقدار جابجایی‌ها حدود ۳۰٪ جابجایی‌های کل است [۳].



شکل ۱: (a) جابجایی شعاعی تونل در مجاورت سینه کار، (b) پروفیل تغییر شکل طولی و بهترین برازش بر آن [۳]

پنت^۴ (۱۹۹۵) رابطه زیر را بین جابجایی شعاعی و فاصله از پس از نصب نگهداری شکل منحنی پروفیل طولی و مقادیر جابجایی آن تغییر می‌کند. بنابراین، پس از نصب نگهداری استفاده از منحنی LDP منطقی نبوده و باید تأثیر سختی و فاصله نصب نگهداری را در رفتار این منحنی احتساب نمود.

بدین منظور ساتیریوس و ارداکوس^۷ در سال ۲۰۰۷، با تصحیح منحنی LDP برای تونل‌های دایروی نگهداری شده به رابطه‌ی زیر برای تعیین میزان تغییر شکل سینه کار در محیط الاستوپلاستیک و تحت شرایط تنش هیدروستاتیک دست یافت [۵]:

$$\frac{u(0)}{u(\infty)} = p_1 \left(\frac{R_p}{R} \right) + p_2 \quad (3)$$

که پارامترهای p_1 و p_2 وابسته به تنش‌های برجا و مقاومت فشاری نامحصور زمین بوده و (R_p/R) شعاع پلاستیک نرمالیزه شده تونل بدون نگهداری است.

جهانپوری و رحمان نژاد (۱۳۹۰) روشی برای رسم پروفیل تغییر شکل طولی تونل دارای نگهداری در محیط الاستیک ارائه

در حین حفاری تونل‌ها، ارزیابی اندرکنش نگهداری با توده سنگ امری ضروریست. این مهم با استفاده از روش همگرایی - همجواری قابل انجام است [۱]. روابط همگرایی - همجواری در شکل اصلی آن، رابطه بین فشار شعاعی داخلی و تغییر مکان شعاعی روی مرزهای تونل دایره‌ای در حال حفاری در یک محیط همسانگرد، همگن و الاستوپلاستیک در معرض تنش‌های بر جای هیدروستاتیک است. پروفیل تغییر شکل طولی تونل^۱ (LDP)، منحنی عکس‌العمل زمین^۲ (GRC) و منحنی مشخصه سیستم نگهداری^۳ (SCC) اجزاء اصلی روش همگرایی - همجواری هستند [۳]. محققان دیگری نیز در معرفی اجزاء و پیشرفت روش همگرایی - همجواری نقش داشته‌اند [۴].

۲- پروفیل تغییر شکل طولی تونل

این پروفیل تغییرات جابجایی محیط تونل در امتداد محور طولی آن است که به منظور ارزیابی پایداری و تعیین محل نصب نگهداری رسم می‌گردد.

شکل ۱ مقطع طولی از تونل بدون پوشش با شعاع R در مجاورت سینه کار را نشان می‌دهد. جابجایی‌ها در توده سنگ روابط متعددی برای رسم LDP پیشنهاد شده است. سینه کار در محیط‌های الاستیک پیشنهاد کرد [۳]:

$$\frac{u_r}{u_r^M} = 0.25 + 0.75 \left[1 - \left(\frac{0.75}{0.75 + x/R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

رابطه (۱) برای مقادیر مثبت x کاربرد دارد که در شکل ۱-b-۱ رسم گردیده است.

چرن^۵ و همکاران (۱۹۹۸) مقادیر همگرایی را در مجاورت سینه کار یک تونل در پروژه مغار نیروگاه مینگتام^۶ اندازه‌گیری کردند (شکل ۱-b-۱). بر اساس این داده‌ها، هوک (۱۹۹۹) بهترین رابطه‌ی علمی منطبق را به شرح زیر بین جابجایی شعاعی تونل و فاصله تا سینه کار پیشنهاد کرد [۳]:

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp \left(\frac{-x/R}{1.1} \right) \right]^{-1.7} \quad (2)$$

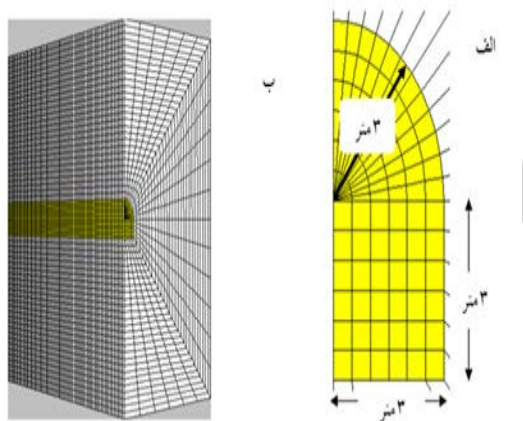
این رابطه برای توده‌های دارای رفتار الاستوپلاستیک کاربرد دارد. همچنین هر دو رابطه برای تونل‌های دایروی بدون پوشش و شرایط تنش هیدروستاتیک زمین ارائه شده است.

توده‌سنگ (MPa)، φ : زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ، σ_{cm} : مقاومت فشاری توده‌سنگ (MPa)، σ_t : مقاومت کششی توده‌سنگ (MPa)، K: مدول حجمی توده‌سنگ، G: مدول برشی توده‌سنگ است.

نسبت پواسون توده‌سنگ (v) در همه موارد مقدار ۰/۲۵ فرض و وزن مخصوص توده‌سنگ 0.27 MN/m^3 در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در این دست‌نوشته جهت رعایت اختصار فقط نتایج مربوط به عمق ۱۰۰ متر ارائه شده است.

۴- روش انجام کار

مدل‌سازی پروفیل تغییرشکل طولی در شرایط گوناگون ناشی از ترکیب پارامترهای معرفی شده در مرحله قبل، توسط نرم‌افزار FLAC^{3D} انجام گرفت [۸]. در مجموع ۸۶۴ مدل عددی ۳ بعدی ساخته شد. مدل‌ها در شرایط کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری ساخته شد (شکل ۲). ابعاد مناسب برای تمام مدل‌ها انتخاب شد (۵۰م * ۶۰ * ۳۰) و شرایط مرزی مبتنی بر جابجایی در مرزهای افقی و تحتانی مدل و تنش روباره برای مرز فوقانی اعمال شد.



شکل ۲: الف) مقطع عرضی تونل ب) نمایی سه‌بعدی از مدل ساخته شده

پس از رساندن مدل به تعادل اولیه، ابتدا تونل به اندازه ۳۰ متر به صورت تمام مقطع حفر و نگهداری نصب شد. سپس پیشروی تونل با طول حفاری متفاوت از ۱ الی ۵ متر متناظر با هر حالت خاص، مدل شد. نگهداری بکار رفته در مدل‌سازی از نوع بتن پاشیده یا بتنی در نظر گرفته شد که با المان شل^۹ مدل شد. محدوده تغییرات مدول یانگ بتن بین ۱۴Gpa تا ۲۸Gpa انتخاب و مقدار ضخامت بتن بین ۰/۱۵ و ۰/۴ متر و نسبت پواسون بتن در تمام شرایط ثابت و برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. لذا سختی نرمال نگهداری (K_{SN}) با توجه به مقادیر مربوط

دادند. به این صورت که بر روی پروفیل تغییرشکل طولی تونل دارای نگهداری منتج از مدل‌سازی عددی، نقاطی را در نظر گرفته و با استفاده از محاسبات آماری روابطی برای نقاط ارائه دادند [۶].

هدف این تحقیق ارائه روش رسم پروفیل تغییر شکل طولی تونل دارای نگهداری که آن را SLDP^A می‌نامیم، است. به منظور افزایش دامنه کاربرد مسئله، مقطع تونل غیردایروی، محیط الاستوپلاستیک و میدان تنش برجا هیدروستاتیک و غیر هیدروستاتیک در نظر گرفته شده است. همچنین مقایسه‌ای بین منحنی SLDP و LDP صورت گرفته و ویژگی‌های منحنی SLDP بیان می‌گردد.

۳- خصوصیات ژئومکانیکی مدل

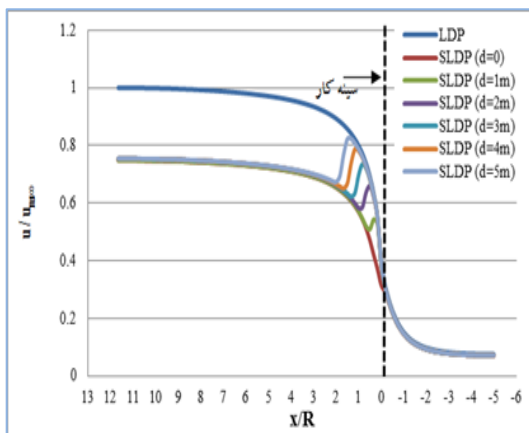
برای حل مسئله، تونلی با مقطع D شکل که در محیط دارای رفتار الاستوپلاستیک قرار دارد، فرض شد (شکل ۲). سه عمق ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر و همچنین سه میدان تنش‌های برجا دارای نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر ۰/۱، ۵ و ۱/۵ در نظر گرفته شد.

توده‌سنگ‌هایی که RMR آن‌ها در ۴۰ تا ۷۰ بازه قرار دارد، دارای کیفیت متوسط بوده و نیاز به نگهداری بدون تمهیدات ویژه دارند. توده‌سنگ‌های دارای RMR بزرگ‌تر از ۷۰ عموماً نیازی به نگهداری ندارند و توده‌سنگ‌های دارای RMR کوچک‌تر از ۴۰ جزء زمین‌های سست و ریزشی هستند که بایستی با روش‌های خاص حفر و نگهداری گردند [۷]. بنابراین خصوصیات ژئومکانیکی انتخابی برای توده‌سنگ مربوط به چهار نوع توده‌سنگ دارای RMR از ۴۰ تا ۷۰ است. با توجه به اینکه چنین توده‌سنگ‌هایی دارای رفتار الاستوپلاستیک است، از معیار شکست موهر-کولمب در حل مدل عددی استفاده شد. خصوصیات ژئومکانیکی لازم، از روابط موجود بین RMR و این خصوصیات به دست آمد:

$c = 0.005(RMR - 1)$	(Bieniawski, 1989)	(۱)	(۷)
$\varphi(^{\circ}) = 0.5RMR + 4.5$	(Bieniawski, 1989)	(۱)	(۸)
$\sigma_{cm} = 0.5e^{0.008RMR}$	(Trueman, 1988)	(۱)	(۹)
$E_m = 0.16RMR$			(۱۰)
$RMR < 50$	(Rahmannejad&masoumi,2007)	(۱۰-۱)	
$E_m = 0.052(RMR - 50)^2 + 8, RMR \geq 50$			(۱۱)
$\sigma_t = \frac{\sigma_{cm}}{10}$		(۱)	(۱۲)
$K = \frac{E_m}{3(1-2\nu)}$		(۱)	(۱۳)
$G = \frac{E_m}{2(1+\nu)}$		(۱)	(۱۴)

که E_m : مدول تغییرشکل توده‌سنگ (GPa)، c: چسبندگی

می‌شود. طبق شکل در چنین سنگ‌های ضعیفی مقدار جابجایی نهایی روی محور قائم در این حالت نسبت به شکل ۴ تقریباً نصف شده است که تأثیر نگهداری را در ایجاد پایداری در سنگ‌های ضعیف و بر روی منحنی پروفیل تغییرشکل طولی نشان می‌دهد. بعلاوه نصب نگهداری منجر به افت کل منحنی (کاهش جابجایی‌ها) به سمت پائین نسبت به حالت بدون نگهداری است که تأثیر آن حتی در جلوی سینه‌کار نیز مشاهده می‌شود. همچنین کوهان ایجادشده در فاصله بدون نگهداری ویژگی دیگر این منحنی است.



شکل ۴: پروفیل SLDP برای فواصل مختلف بدون نگهداری (d) و RMR=70

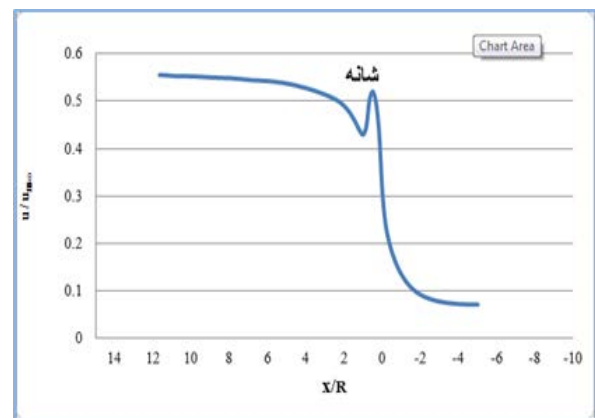
از مقایسه نمودارهای SLDP به دست آمده مشخص شد میزان جابجایی‌ها در تونل قبل و بعد از نصب نگهداری و همچنین میزان خمش حداکثر در فاصله‌ی بدون نگهداری متأثر از RMR است. به عبارت دیگر، افزایش RMR باعث کاهش میزان جابجایی‌ها و خمش حداکثر در فاصله‌ی بدون نگهداری می‌گردد.

همچنین میزان خمش حداکثر در فاصله‌ی بدون نگهداری و تغییرشکل نهایی پس از نصب نگهداری متأثر از دو عامل فاصله‌ی بدون نگهداری و سختی نگهداری است. نکته جالب توجه دیگر در مورد منحنی‌های SLDP این واقعیت است که در تمام حالات میزان جابجایی تونل در فاصله فاقد نگهداری بیش از جابجایی نهایی تونل در فاصله دور از سینه‌کار است که لزوم توجه به پایداری تونل در این فاصله، مخصوصاً اگر پیشروی تونل دچار وقفه شود را ضروری می‌نماید.

به مدول یانگ و ضخامت بتن، سختی نرمال در بازه ۱۰۰۰MPa تا ۴۰۰۰MPa فرض شد [۱۱].

۵- محاسبه پروفیل تغییرشکل طولی تونل نگهداری شده (SLDP)

پس از اجرای مدل‌های عددی، به منظور رسم پروفیل تغییرشکل طولی تونل نگهداری شده (SLDP)، جابجایی شعاعی مربوط به تمام گره‌های موجود در تاج، در امتداد محور تونل استخراج و نمودارهای SLDP رسم گردید. همان‌طور که در شکل ۳ به صورت شماتیک مشاهده می‌شود، پروفیل تغییرشکل طولی مربوط به تونل نگهداری شده نیز نموداری شبیه به LDP است با این تفاوت که در فاصله‌ی بدون نگهداری یک خمش اتفاق می‌افتد و نمودار در این فاصله حالت کوهانی شکل^۱ به خود می‌گیرد. در حالتی که فاصله فاقد نگهداری وجود نداشته باشد (d=0)، کوهان منحنی از بین رفته و به همان منحنی LDP تبدیل گشته که دارای جابجایی نهایی کمتری است. در شکل ۴ پروفیل SLDP برای فواصل مختلف بدون نگهداری (d) در شرایط RMR=70، نسبت تنش افقی به قائم برابر ۰/۵، $K_{SN}=1000$ Mpa و عمق ۱۰۰ متر ارائه شده است. نقطه‌ی صفر محور افقی نشانگر محل سینه‌کار و قسمت منفی و مثبت به ترتیب نشانگر جلوی سینه‌کار (حفر نشده) و پشت سینه‌کار (حفرشده) است. به علت کیفیت مناسب توده‌سنگ تفاوت جابجایی نهایی در دو حالت با و بدون نگهداری فاحش نیست.



شکل ۳: پروفیل تغییرشکل طولی (SLDP)

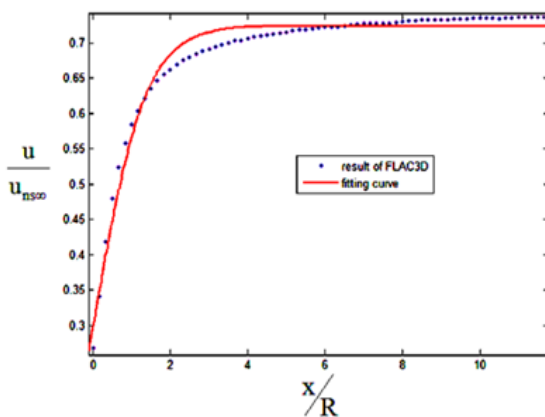
پروفیل تغییرشکل طولی تونل دارای نگهداری در شرایط مثال بالا ولی دارای کیفیت ضعیف (RMR=40) در شکل ۵ مشاهده

۶- ارائه رابطه برای نمودار SLDP

برای یافتن رابطه‌ای برای نمودارهای SLDP از نرم‌افزار مطلب استفاده گردید. با توجه به اینکه نمودار SLDP دارای شکل خاصی است که برازش مناسبی بر روی آن صورت نمی‌گیرد، لذا ابتدا این نمودار به قسمت‌های مختلفی تقسیم شد. از قسمت مربوط به جلوی سینه‌کار (حفر نشده) صرف‌نظر کرده و فقط روابط قسمت‌های مربوط به پشت سینه‌کار تونل (حفر شده) به دست آمد. مراحل کار در ادامه شرح داده شده است.

۶-۱- ارائه رابطه برای نمودار SLDP بافاصله بدون نگهداری صفر (d=0)

نمودار SLDP در حالتی که فاصله‌ی بدون نگهداری وجود ندارد (d=0) دارای شکل مشابه LDP است (شکل ۶)



شکل ۶: منحنی SLDP منتج از مدل‌سازی عددی و منحنی برازش شده برای حالت (d=0)

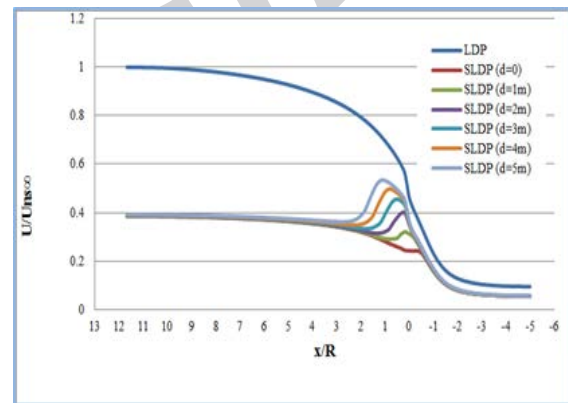
بر اساس برازش‌های مختلفی که بر روی داده‌های حاصل از مدل‌سازی انجام شد، رابطه (۱۲) که مشابه رابطه هوک رابطه (۲) است، با ضریب همبستگی ۰/۹۵ انتخاب شد [۱۲]:

$$\frac{u}{u_{ns\infty}} = \left[c + \exp\left(\frac{-x/R}{a}\right) \right]^b \quad (12)$$

$u_{ns\infty}$: جابجایی نهایی در حالت بدون نگهداری، u : جابجایی در فاصله‌ی x از سینه‌کار تونل، x : فاصله از سینه‌کار تونل، R : شعاع قوس فوقانی تونل. ضرایب a ، b و c از جداول زیر به دست می‌آیند.

جدول ۱: مقادیر ضرایب a و b در رابطه (۱۲) برای عمق ۱۰۰ متر [۱۲]

k	K_{SN} (MPa)	a	d^*	b
۰/۵	۱۰۰۰	$a = \frac{d^*}{RMR^{1.7}}$	۱۰۸۵	-۱/۲۲
	۲۰۰۰		۱۲۱۰	
	۳۰۰۰		۱۱۱۱	
	۴۰۰۰		۱۱۴۱	
۱	۱۰۰۰	$a = \frac{d^*}{RMR^2}$	۳۰۲۲	-۱/۵۰
	۲۰۰۰		۳۳۹۱	
	۳۰۰۰		۳۶۲۰	
	۴۰۰۰		۳۸۰۴	
۱/۵	۱۰۰۰	$a = \frac{d^*}{RMR^{1.7}}$	۱۳۸/۸	-۲/۱۵
	۲۰۰۰		۱۴۵/۲	
	۳۰۰۰		۱۴۹/۹	
	۴۰۰۰		۱۴۶/۴	



شکل ۵: پروفیل تغییر شکل طولی تونل دارای نگهداری برای

جدول ۲: مقادیر ضریب c در رابطه (۱۲) برای عمق ۱۰۰ متر [۱۲]

k	RMR	K_{SN} (GPa)			
		۱	۲	۳	۴
۰/۵	۴۰	۲/۱۸	۲/۶	۳	۳/۲۵
	۵۰	۱/۶۴	۱/۸۷	۲/۰۵	۲/۲۲
	۶۰	۱/۴	۱/۵۵	۱/۶۳	۱/۷۲
	۷۰	۱/۲۸	۱/۳۳	۱/۳۷	۱/۴۱
۱	۴۰	۲/۸۴	۳/۵۴	۴	۴/۳۵
	۵۰	۱/۹۵	۲/۳	۲/۵۸	۲/۸
	۶۰	۱/۵	۱/۶۳	۱/۷۵	۱/۸۶
	۷۰	۱/۲۴	۱/۲۸	۱/۳۲	۱/۳۵
۱/۵	۴۰	۲/۶۷	۳/۲۹	۳/۷۲	۴/۰۸
	۵۰	۲/۰۴	۲/۵۶	۲/۹۵	۳/۲۸
	۶۰	۱/۵۵	۱/۷۹	۱/۹۷	۲/۱۲
	۷۰	۱/۲۸	۱/۳۸	۱/۴۴	۱/۴۸

سنگ‌های ضعیف (RMR=40)

۲-۶- ارائه رابطه برای SLDP با فواصل متفاوت بدون نگهداری (d#0)

$$\frac{u_i}{u_{ns\infty}} = a \times \exp\left(\frac{d}{R}\right) + c \quad (13)$$

u_i : جابجایی در نقطه‌ی i است که $i=1$: مربوط به لبه‌ی نگهداری، $i=2$: مربوط به خمش حداکثر، $i=1$: مربوط به سینه‌کار تونل است. $u_{ns\infty}$: جابجایی نهایی تونل فاقد نگهداری، d : طول فاصله‌ی بدون نگهداری، R : شعاع قوس تونل است. مقدار ضرایب a و c از جداول ۳ به دست می‌آید.

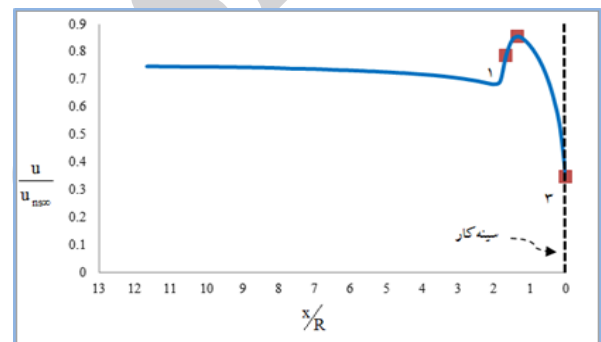
در حالتی که فاصله بدون نگهداری وجود دارد، در این فاصله خمشی به شکل کوهان در نمودار SLDP اتفاق می‌افتد. به منظور یافتن رابطه مناسب برای این قسمت از نمودار SLDP، سه نقطه به صورت زیر بر روی آن در نظر گرفته شد (شکل ۷): نقطه ۱: لبه‌ی نگهداری، نقطه ۲: محل خمش حداکثر روی کوهان و نقطه ۳: سینه‌کار تونل. برازش‌های صورت گرفته نشان داد که در هر کدام از نقاط ۱، ۲ و ۳ تغییرات نسبت تغییرشکل در تونل نگهداری شده به تغییرشکل نهایی تونل فاقد نگهداری ($u/u_{ns\infty}$) برحسب تغییرات نسبت طول نگهداری نشده به شعاع قوس تونل (d/R)، از یک معادله نمایی (رابطه ۱۳) با ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۹۲ پیروی می‌کند (شکل ۸).

جدول ۳: مقادیر ضریب a در رابطه (۱۳) برای لبه نگهداری ($i=1$) در عمق ۱۰۰ متر [۱۲]

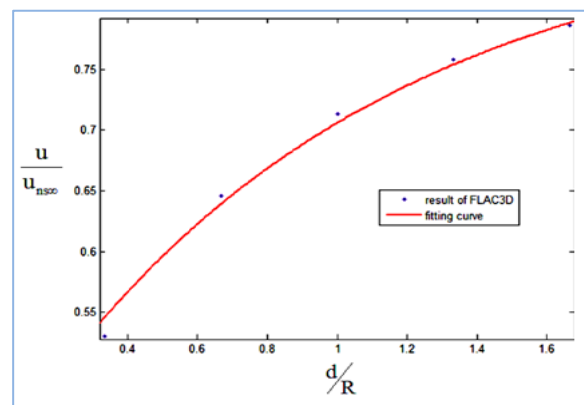
		RMR					
		۴۰	۵۰	۶۰	۷۰		
$k=0.5$	K_{SN} (GPa)	۱	-۰/۲۵	-۰/۳۳	-۰/۳۸	-۰/۴۳	
		۲	-۰/۲۳	-۰/۳	-۰/۳۶	-۰/۴۲	
		۳	-۰/۲	-۰/۲۸	-۰/۳۵	-۰/۴۱	
		۴	-۰/۱۹	-۰/۲۷	-۰/۳۳	-۰/۴	
$i=1$	$k=1$	K_{SN} (GPa)	۱	-۰/۲۵	-۰/۳۶	-۰/۴۶	-۰/۴۸
			۲	-۰/۲۱	-۰/۳	-۰/۳۹	-۰/۴۷
			۳	-۰/۱۸	-۰/۲۷	-۰/۳۴	-۰/۴۶
			۴	-۰/۱۵	-۰/۲۴	-۰/۳۱	-۰/۴۴
$k=1.5$	K_{SN} (GPa)	۱	-۰/۲۴	-۰/۳۶	-۰/۴۸	-۰/۵۵	
		۲	-۰/۱۸	-۰/۲۹	-۰/۴۱	-۰/۴۸	
		۳	-۰/۱۵	-۰/۲۴	-۰/۳۵	-۰/۴۳	
		۴	-۰/۱۲	-۰/۲۱	-۰/۳۱	-۰/۳۹	

جدول ۴: مقادیر ضریب a در رابطه (۱۳) برای نقطه خمش حداکثر ($i=2$) در عمق ۱۰۰ متر [۱۲]

RMR	$i=2$		
	$k=0.5$	$k=1$	$k=1.5$
۴۰	-۰/۴	-۰/۵۴	-۰/۶۲
۵۰	-۰/۴۳	-۰/۵۹	-۰/۶۶
۶۰	-۰/۴۸	-۰/۵۸	-۰/۷
۷۰	-۰/۵۳	-۰/۶۲	-۰/۶۸



شکل ۷: منحنی (SLDP) برای فاصله‌ی بدون نگهداری ۵ متر در شرایط تنش هیدروستاتیک و $RMR=70$ و $K_{SN}=1000MPa$ و عمق ۱۰۰ متر



شکل ۸: منحنی نمایی برازش شده بر تغییرات $u/u_{ns\infty}$ برحسب d/R مربوط به لبه‌ی نگهداری در شرایط تنش هیدروستاتیک، $RMR=70$ و $K_{SN}=1000MPa$ و عمق ۱۰۰m

جدول ۵: مقادیر ضریب a در رابطه (۱۳) برای سینه‌کار تونل (i=۳) در عمق ۱۰۰ متر [۱۲]

		RMR				
		۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	
i=3	k=0.5	1	-۰/۰۹	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۱
		2	-۰/۱۲	-۰/۰۷	-۰/۰۴	-۰/۰۲
		3	-۰/۱۳	-۰/۰۸	-۰/۰۵	-۰/۰۲
		4	-۰/۱۳	-۰/۰۹	-۰/۰۵	-۰/۰۳
	k=1	1	-۰/۰۹	-۰/۰۷	-۰/۰۴	-۰/۰۳
		2	-۰/۱۱	-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۰۴
		3	-۰/۱۲	-۰/۰۹	-۰/۰۶	-۰/۰۴۵
		4	-۰/۱۳	-۰/۱	-۰/۰۷	-۰/۰۵
	k=1.5	1	-۰/۱۲	-۰/۱۱	-۰/۰۸	-۰/۰۵
		2	-۰/۱۳	-۰/۱۲	-۰/۰۹	-۰/۰۶
		3	-۰/۱۴	-۰/۱۳	-۰/۱	-۰/۰۶
		4	-۰/۱۵	-۰/۱۳	-۰/۱	-۰/۰۷

جدول ۶: مقادیر ضریب c در رابطه (۱۳) برای عمق ۱۰۰ متر [۱۲]

$$c = \alpha \times K_{SN}^{0.1} + f$$

		RMR ۴۰	RMR ۵۰	RMR ۶۰	RMR ۷۰	
i=1	k=0.5	e	-۰/۴۴	-۰/۴۳	-۰/۳۳	-۰/۱۹
		f	۱/۳۶	۱/۵۲	۱/۴۳	۱/۲۳
	k=1	e	-۰/۴۸	-۰/۵۷	-۰/۵۷	-۰/۲۲
		f	۱/۳۳	۱/۷۱	۱/۸۷	۱/۳۲
	k=1.5	e	-۰/۴۷	-۰/۶۵	-۰/۷۱	-۰/۵۳
		f	۱/۲۳	۱/۷۴	۲/۰۴	۱/۸۵
i=2	k=0.5	e	-۰/۲۵	-۰/۲۶	-۰/۲۲	-۰/۱۳
		f	۱/۱	۱/۲۶	۱/۲۸	۱/۱۸
	k=1	e	-۰/۲	-۰/۲۶	-۰/۲۲	-۰/۱۲
		f	۰/۹۹	۱/۲۳	۱/۲۷	۱/۲۲
	k=1.5	e	-۰/۱۶	-۰/۲۳	-۰/۲۹	-۰/۱۵
		f	۰/۸۸	۱/۱	۱/۳۴	۱/۱۸
i=3	k=0.5	e	-۰/۱۲	-۰/۱۰	-۰/۰۸	-۰/۰۳
		f	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۴۶
	k=1	e	-۰/۰۵	-۰/۰۶	-۰/۰۵	-۰/۰۲
		f	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۳۹
	k=1.5	e	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۰۴	-۰/۰۱
		f	۰/۲۴	۰/۳	۰/۳۲	۰/۲۷

۳-۶- تعیین مختصات متناظر با محور افقی برای خمش حداکثر

همان‌طور که قبلاً اشاره شد محل سینه‌کار تونل همان نقطه‌ی صفر محور افقی نمودار SLDP و طول بدون نگهداری (d)، همان مختصات متناظر با لبه‌ی نگهداری است. از آنجایی که موقعیت لبه نگهداری مشخص است، لذا تنها مختصات متناظر با محور افقی برای نقطه خمش حداکثر بایستی مشخص گردد.

$$\frac{x}{R} = a \times \left(\frac{d}{R}\right) + c \quad (14)$$

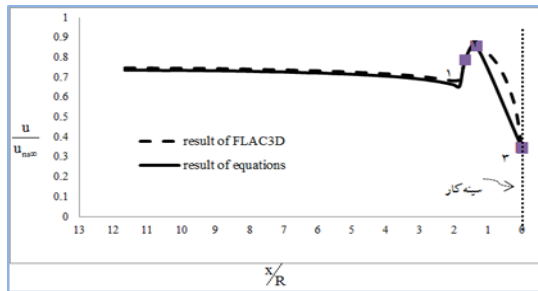
x: فاصله‌ی نقطه‌ی خمش حداکثر از سینه‌کار تونل است.

ضرایب a و c از جدول زیر به دست می‌آید.

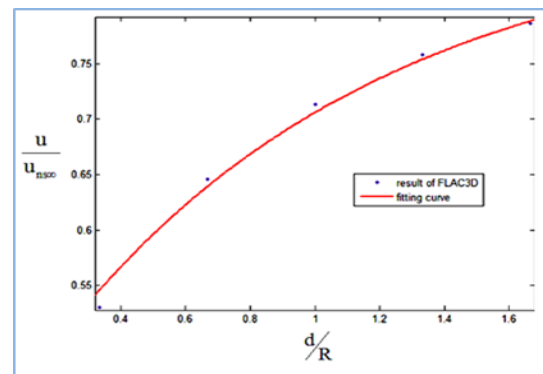
تحقیقات انجام‌شده نشان داد که تغییرات نسبت فاصله از سینه‌کار تونل به شعاع قوس فوقانی تونل برای نقطه خمش حداکثر (x/R) بر حسب تغییرات نسبت طول نگهداری نشده به شعاع قوس فوقانی تونل (d/R)، از یک معادله چندجمله‌ای درجه یک (رابطه ۱۴) با ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۹۵ پیروی می‌کند (شکل ۹).

جدول ۷: مقادیر ضرایب a و c در رابطه (۱۴) برای عمق ۱۰۰ متر [۱۲]

k	RMR	C				
		a	K _{SN} =1GPa	K _{SN} =2GPa	K _{SN} =3GPa	K _{SN} =4GPa
۰/۵	۴۰	۰/۷۸	-۰/۲۱۳	-۰/۲۱۳	-۰/۳۱۳	-۰/۳۱۳
	۵۰	۰/۷۸	-۰/۱۱۳	-۰/۱۱۳	-۰/۱۴۷	-۰/۱۴۷
	۶۰	۰/۷۸	-۰/۰۱۳	-۰/۰۱۳	-۰/۰۴۷	-۰/۰۴۷
	۷۰	۰/۷۸	۰/۰۵۳	-۰/۰۵۳	-۰/۰۵۳	-۰/۰۲۰
۱	۴۰	۰/۵	.	.	-۰/۰۳۳	-۰/۰۶۷
	۵۰	۰/۶	۰/۱	.	-۰/۰۳۳	-۰/۰۳۳
	۶۰	۰/۷	۰/۱	-۰/۰۳۳	-۰/۰۳۳	.
	۷۰	۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
۱/۵	۴۰	۰/۳۵	۰/۰۸۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱۷
	۵۰	۰/۶	۰/۰۳۳	-۰/۰۶۷	-۰/۰۶۷	-۰/۰۶۷
	۶۰	۰/۶۲	۰/۱۱۳	۰/۰۸	۰/۰۴۷	۰/۰۱۳
	۷۰	۰/۶۸	۰/۱۲	۰/۰۸۷	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳



شکل ۱۰: مقایسه نمودار SLDP از حل عددی و منتج از روابط پیشنهادی



شکل ۹: منحنی برازش شده بر تغییرات x/R بر حسب d/R مربوط به خمش حداکثر در شرایط تنش هیدروستاتیک و $RMR=70$ و $K_{SN}=1000MPa$ و عمق ۱۰۰ متر

۷- روش استفاده از روابط ارائه شده برای رسم نمودار SLDP

برای رسم نمودار SLDP در حالت وجود فاصله‌ی بدون نگهداری ($d \neq 0$)، در ابتدا با رابطه (۱۲)، نمودار SLDP در حالتی که فاصله بدون نگهداری وجود ندارد ($d=0$) را رسم نموده، بعد با استفاده از رابطه (۱۳) میزان جابجایی نقاط لبه‌ی نگهداری، خمش حداکثر و سینه کار تونل را به دست آورده و سپس توسط رابطه (۱۴) مختصات متناظر با محور افقی (فاصله از سینه کار) را برای نقطه خمش حداکثر تعیین می‌شود. در گام بعد با داشتن مختصات نقاط سه‌گانه معرفی شده نمودار SLDP، منحنی را رسم نموده و بخشی از نمودار که مربوط به حالت بدون نگهداری است را حذف کرده تا منحنی SLDP به دست آید. در شکل ۱۰ برای شرایط تنش هیدروستاتیک، فاصله بدون نگهداری برابر با ۵ متر، $RMR=70$ ، $K_{SN}=1000MPa$ و عمق ۱۰۰ متر منحنی SLDP با روش پیشنهادی و مدل‌سازی عددی ارائه شده که مقایسه آن با حل عددی نشانگر کارایی روش پیشنهادی رسم منحنی SLDP است.

۸- نتیجه گیری

پروفیل تغییرشکل طولی نمایانگر تغییرات جابجایی در محیط تونل در امتداد محور طولی است. بر اساس این ابزار، طرح می‌تواند لزوم نصب نگهداری و موقعیت مناسب آن را تعیین کند. در صورت نصب نگهداری شکل منحنی مزبور و کمیت آن تغییر می‌نماید. روابط رایج تعیین LDP تأثیر وجود نگهداری را بر منحنی مزبور برای تونل‌های در حال اجرا در نظر نمی‌گیرند. تحقیقات اندک موجود برای رسم پروفیل تغییرشکل طولی تونل دارای نگهداری نیز برای شرایط محدودی صادق است. در این تحقیق تغییرات کیفی و کمی پروفیل تغییرشکل طولی تونل غیردایروی دارای نگهداری (SLDP) در محیط الاستوپلاستیک، تحت شرایط تنش غیرهیدروستاتیک و زمین باکیفیت متفاوت از نظر امتیاز RMR ، بررسی شد. چنانچه نگهداری در لبه سینه کار نصب گردد، روند منحنی مشابه منحنی LDP، ولی مقادیر جابجایی در طول منحنی دستخوش افت شده که میزنانان بسته به سختی نگهداری و کیفیت توده سنگ (RMR) است. در شرایط وجود فاصله بدون نگهداری، منحنی جابجایی در این فاصله دچار افزایش شده و حالت کوهانی شکل پیدا می‌کند. میزان جابجایی در فاصله بدون نگهداری در شرایط خاص می‌تواند قابل توجه بوده و بیش از جابجایی نهایی تونل باشد.

جهت رسم منحنی در تمام فاصله پشت سینه کار روابطی ارائه شده که موقعیت نقاط شاخص پروفیل را در سینه کار تونل، محل کوهان، لبه نگهداری و در فاصله دور از سینه کار ارائه می‌دهد.

۹- مراجع

- determination of critical factor of safety for underground rock caverns. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 639798 Singapore, Singapore.
- [10] Rahmancejad, R., Masumi, H., 2007. New Empirical Relations for Determining of Rock Mass Modulus of Deformation, proceeding of 2nd Inter. conference of Design and Building of Underground Constructions, May 22-24, Ekaterenburg, Russia.
- [۱۱] هوک و براون. سازه‌های زیرزمینی در سنگ، ترجمه: احمد فهمی‌فر. (۱۳۷۶) تهران، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک راه و ترابری.
- [۱۲] علی حسین علی‌نژادی، رضا رحمان نژاد (۱۳۹۲). تحلیل پروفیل تغییرشکل طولی تونل نگهداری شده (SLDP) در محیط‌های الاستوپلاستیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [13] ironmental Protection (pp. 27-34). Albena: International Scientific GeoConference. ISBN: 9549181812 & 9789549181814.
- [14] Jalali, S. E., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. Safety Science, 49(5), 664-669. DOI:10.1016/j.ssci.2010.12.015.
- [15] Singh, B., & Goel, R. K. (2006). Tunnelling in Weak Rocks. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V. ISBN-13:978-0-08-044987-6.
- [1] Oreste, P. P. (2003). Analysis of Structural Interaction in Tunnels using the Convergence-Confinement Approach, Tunneling and Underground Space Technology, vol. 18, pp. 347-363.
- [2] Antiga, A., Chiorboli, M., & Coppola, P. (2007). Convergence-Confinement Method Limit of Application of the Closed form Solutions Compared with Numerical Models. In ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO: TUN 2007). Vienna.
- [3] Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C. (2000). Application of Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy Hoek-Brown Failure Criterion. Tunneling and Underground Space Technology, Vol.15, No. 2, pp.187-213.
- [4] AFTES, French Association for Underground Works. (2001). Recommendation on the Convergence-Confinement Method. Paris: AFTES
- [5] Vardakos, S. (2007). Back-analysis Method for Optimal Tunnel Design. Blacksburg, Virginia. PHD thesis.
- [۶] محمد جهانپوری، رضا رحمان نژاد (۱۳۹۰). تحلیل پروفیل تغییرشکل طولی تونل نگهداری شده (SLDP). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [7] Harrison, J. P., & Hudson, J. A. (2000). Engineering rock mechanics-an introduction to the principles. Access Online via Elsevier.
- [8] Itasca Consulting Group, 2000; FLAC3D User's, Version 2.
- [9] Wengang, Z., Anthony, T. C. (). Reliability assessment on ultimate and serviceability limit state and
- 1 Longitudinal Deformation Profile
2 Ground Reaction Curve
3 Support Characteristic Curve
4 Panet
5 Chern
6 Mingtam
7 Sotirios Vardakos
8 Supported Longitudinal Deformation Profile
9 Shell
10 Hump shape