فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست
سال نهم، شماره ۳۲، پاییز ۱۳۹٤

مدل سازی عددی پوشش سگمنتی تونل انتقال آب گلاب به دلیل کاهش اثرات زیست محیطی

مهدی صانعی آرانی[۱]، میثم حکیمیان بیدگلی[۲]ومحمد امین وشادی آرانی[۳]

۱- دانش آموخته کارشناس ارشد مکانیک سنگ معدن سنگ آهک سنجده کاشان، sanei_mahdi@yahoo.com
۲- دانشجوی دکتری، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان
۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۹ تاریخ تصویب: ۹٤/۷/۲۱

چکیده

منابع آب کشور ایران به طور عمده در مناطق غرب، جنوب غربی و شمال ایران جریان دارد و مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی ایران از این منبع حیاتی بهره‌ی چندانی ندارند. کمبود آب آشامیدنی مناسب همواره از مسائل عمده‌ی شهرهای ایران مرکزی و شرق کشور است. به همین دلیل لزوم مطالعات طرح‌های انتقال آب بین حوزه‌ای مطرح می‌شود که برطرف کردن این نیاز با استفاده از روش‌های سنتی بسیار مشکل، زمان‌بر و پرهزینه است و در نتیجه از حفاری مکانیزه‌ی تونل و پوشش سگمنتی برای نگهداری استفاده می‌شود. از نظر زیست‌محیطی اگر قرار است آبی توسط لوله منتقل شود، به میزان قابل توجهی تخریب سطحی دارد و این مسئله، بیش از انتقال آب از طریق لوله، مشکلات زیست‌محیطی را به دنبال دارد. همچنین هزینه‌های زیست‌محیطی انتقال آب از طریق لوله، بیشتر از تونل است. در این مقاله پس از معرفی تمامی روش‌های طراحی سگمنت، پوشش سگمنتی تونل انتقال آب گلاب با استفاده از روش المان یکپارچه مدل‌سازی شد. ابتدا بارهای وارده بر پوشش سگمنتی پس از نصب در تونل توسط نرم‌افزار UDEC تعیین شد و این مقادیر بار بر روی سگمنت‌های مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS اعمال گردید. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی در سگمنت‌ها در شرایط مختلف تنش مربوط به سگمنت کف می‌باشد. بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده و معیارهای شکست، به دلیل بالا بودن تنش فشاری، احتمال ترک خوردگی در بتن سگمنت در مدل، قابل پیش‌بینی است که این نتایج کاملاً با مشاهدات در سگمنت‌های تونل گلاب انطباق دارد.

واژگان کلیدی: زیست محیطی، انتقال آب، پوشش سگمنتی، مدل‌سازی سه بعدی، روش عددی، تونل گلاب.

مقدمه

ایران به لحاظ آب و هوایی دارایی اقلیم خشک و نیمه خشک است، اگر چه اقلیم‌های دیگری نیز در کشور وجود دارد. کمبود آب آشامیدنی با کیفیت مناسب همواره از مسائل عمده‌ی شهرهای ایران مرکزی و شرق کشور است. ضمن آنکه بر اساس بررسی‌های کارشناسی انتظار می‌رود در آینده هیچ‌گونه منبع آبی دیگری در ایران مرکزی وجود نداشته باشد، به همین علت لزوم مطالعات طرح‌های انتقال آب بین حوزه‌ای مطرح شد. تاکنون هر زمان لوله‌ای از محلی انتقال یافته، یک باند حداقلی که به طور معمول ۲۰ متر است، برای تردد ماشین‌آلات، حفاری زمین، قرارگیری

لوله‌ها و سایر مسائل استفاده می‌شود که این اتفاقات، تبعات زیست‌محیطی بسیاری را به دنبال داشته و تخریب زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. از سوی دیگر، لوله نیمه عمری دارد و پس از مدتی پوسیده می‌شود و بدون شک به تعویض و ترمیم نیاز دارد که آن نیز ضایعات ویژه خود را برای محیط زیست به دنبال دارد. همچنین از نظر امنیتی، لوله نسبت به تونل، بیشتر دستخوش تعارضات امنیتی می‌شود و هزینه دائمی مصرف انرژی در انتقال آب از طریق لوله وجود دارد، زیرا لوله‌ها باید از ارتفاعات بسیار زیادی عبور کنند و هزینه پمپاژ آب در آن بسیار زیاد است. لوله‌ها باندی برای تردد دائمی در مسیر نیاز دارند و با توجه به اینکه بخشی از مسیر انتقال آب، مراتع غنی و جنگل بوده، با انتقال آب از طریق جنگل‌ها، هزینه‌ی اجرا و دیگر هزینه‌های آن سنگین‌تر است و شاید هزینه‌ی ابتدایی آن نسبت به تونل کمتر باشد، اما به هر حال باید هزینه‌های طولانی مدت را نیز درنظر گرفت. هزینه‌های سنگین و حجیم برای پمپاژ دائمی آب منطقی نیست اما متأسفانه در اثر فشارهای مختلف، تصمیماتی غیرفنی گرفته می‌شود. به همین دلیل بررسی انواع پوشش‌های سگمنتی، بررسی عملکرد پوشش و مدل‌سازی آن بیان می‌شود. پیش‌بینی کارشناسان از نیاز فعلی کشور به ساخت تونل‌های جدید شامل تونل‌های ترابری و تونل‌های آب‌بر، حدود ۳۰۰۰ کیلومتر است که برطرف کردن این نیاز با استفاده از روش‌های سنتی مانند چالزنی و انفجار بسیار مشکل، زمان‌بر و پرهزینه است. خصوصاً اینکه زمان‌بر بودن این تونل‌ها با این روش‌ها، اهداف استراتژیک آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در صنعت تونل‌سازی در دنیا بیانگر سرعت در اجرا و کیفیت مطلوب پروژه‌های تونلی مکانیزه نسبت به روش سنتی حفاری تونل است. استفاده از سیستم نگهداری پیش ساخته یکی از ملزومات این نوع حفاری است و طراحی صحیح و همراه با ایمنی بالا برای این قطعات بتنی، ازاهمیت زیادی برخوردار است. دراین مقاله انواع روش‌های تحلیل پوشش سگمنتی که طبق تقسیم‌بندی انجمن بین‌المللی تونل‌سازی شامل ٦ روش است (روش حل معادلات استاتیکی، روش مدل اسچالز و دودک، روش مدل مویرورود، روش تیر و فنر، روش پوسته و فنر و روش المان یکپارچه)، بررسی شد و در نهایت پوشش سگمنتی تونل انتقال آب گلاب با استفاده از روش المان یکپارچه در نرم‌افزار ABAQUS بصورت سه بعدی مدل‌سازی شد.

بحث و نتایج

روش های تحلیل ساختاری پوشش سگمنتی

روش حل معادلات استاتیکی یک روش ساده برای محاسبه‌ی نیروهای داخلی با استفاده از روابط ریاضی و بدون کامپیوتر است. این روش توسط انجمن بین‌المللی تونل‌سازی معرفی شده است و بیشتر ژاپنی‌ها تمایل به استفاده از این روش را دارند (JSCE, 1996).

نکته‌ی کلیدی و اساسی در این روش انتخاب یک مقطع برای آنالیز می‌باشد. در این روش درزه‌های بین سگمنت‌ها درنظر گرفته نمی‌شود ولی مقادیر بدست آمده می‌توانند معیار مناسبی برای مقایسه با روش عددی باشند. با این حال این روش مزایای بیشتری نسبت به برخی از روش‌های حل معادلات به فرم بسته دارد.

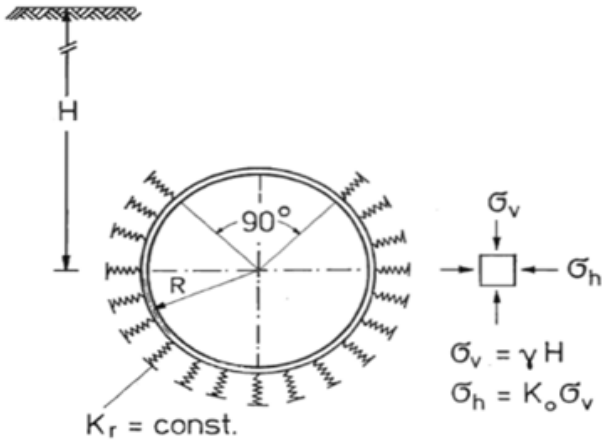
روش توانایی محاسبه‌ی ممان خمشی و نیروی برشی را در هر نقطه بر روی پوشش سگمنتی دارد در حالی‌که برخی از روش‌های حل معادلات به فرم بسته فقط می‌توانند بیش-ترین مقدار ممان خمشی که بر روی پوشش اتفاق می‌افتد را تعیین کنند (Duddeck & Erdmann 1982,).

روش مدل اسچالز و دودک

روش مدل اسچالز و دودک یک روش برای محاسبه‌ی ممان خمشی و نیروی محوری به صورت معادلات به فرم بسته می‌باشد که در سال ۱۹٦٤ توسط این دو نفر ارائه شد (Duddeck & Erdmann, 1982). این روش برای تونل‌هایی در عمق ($H \leq 4R$) و با مقطع کم دایره‌ای شکل و در زمین‌های نرم کاربرد دارد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، زمین‌های اطراف به صورت فنرهایی الاستیک و شعاعی مدل‌سازی می‌شوند و از تنش و یا پارامتر بار در راستای مماسی صرف‌نظر می‌شود. سختی این فنرها از رابطه‌ی ۱ بدست می‌آید (مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۲).

$$K_r = \frac{E}{R(1+\mathcal{V})}\Delta S.B \qquad (۱)$$

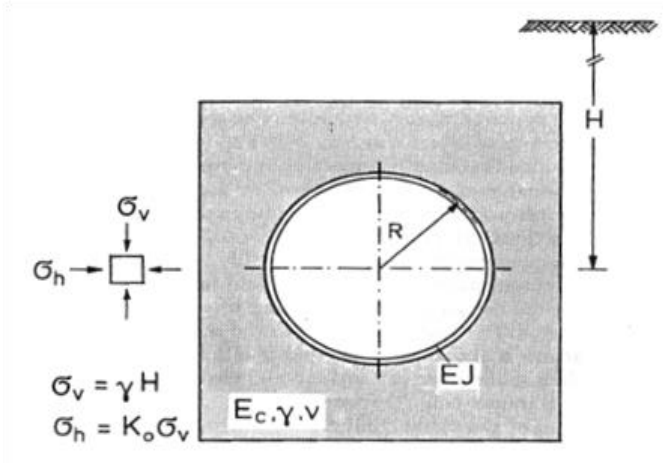
در این رابطه: K_r: ضریب سختی فنرهای تکیه‌گاهی، ΔS: طول قوسی از پوشش که توسط یک فنر تکیه‌گاهی نگه داشته می‌شود (طول یک المان)، B: عرض پوشش سگمنت می‌باشد.



این روش اولین گام محققین برای وارد کردن درزه‌ها در محاسبات طراحی محسوب می‌شود و تا پیش از آن معمولاً محققین مختلف از وارد کردن درزه‌ها در محاسبات صرف‌نظر می‌کردند. براین اساس مویروود در سال ۱۹۷۵ رابطه‌ی تجربی زیر را برای تعیین ممان اینرسی مؤثر رینگ سگمنتی معرفی کرد:

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^n * I \ , I_e < I \ , n > 4 \qquad (۲)$$

در این رابطه: I_e: مقدار ممان اینرسی مؤثر، I_j: مقدار ممان اینرسی مؤثر بر روی درزه‌ها، I: ممان اینرسی لایه‌ی نگهداری، n: تعداد سگمنت‌ها در یک حلقه می‌باشد. مدل مویروود با فرضیات الاستیک و ایزوتروپ بودن زمین بنیان دارد و بر اساس مدل کرنش صفحه‌ای پیوسته می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲- نمایی از مدل کرنش صفحه‌ای

در این روش، مویروود با بیان ممان اینرسی مؤثر برای لایه‌ی سگمنتال، از تأثیر مستقیم تعداد و آرایش درزه‌ها در محاسبات صرف‌نظر کرد و این مؤلفه‌های بنیادی را در آن وارد نکرد و فقط یک فرمول تجربی برای تخمین اثر درزه‌های طولی در رینگ‌های از هم مجزا معرفی کرد. به وسیله‌ی این فرمول می‌توان با کاهش سختی خمشی لایه‌ی سگمنتال، آن را با یک لایه‌ی صلب همگن جایگزین کرد. بیش‌ترین ممان خمشی محاسبه شده به وسیله‌ی این روش با بیش‌ترین ممان خمشی محاسبه شده برای حلقه‌های

مجزای درزه‌دار کاملاً هم‌خوانی دارد. در نهایت مویروود به این نتیجه رسید که برای تونل‌های با لایه‌ی سگمنتال کمتر از چهار درزه، درزه‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نیروی داخلی و استحکام لایه‌ی سگمنتال ندارند (Duddeck & Erdmann 1982). به هر حال این نظریه برای به دست آوردن ایده‌ی اولیه از نیروهای داخلی لایه‌ی سگمنتال کاملاً مفید است.

روش تیر و فنر: به روش تیر و فنر، روش ضریب عکس‌العمل زمین نیز گفته می‌شود. در این روش برای مدل کردن هر قطعه‌ی پوشش سگمنتی از المان تیر و برای مدل کردن درزه‌های طولی و محیطی از فنرها استفاده می‌شود. اما نکته‌ای که همواره مطرح است، سختی فنرهای مورد استفاده در مدل‌سازی می‌باشد. برای مدل‌سازی درزه‌های بین سگمنتی معمولاً از فنرهای چرخشی استفاده می‌شود. مدل ساده‌ی تئوریکی برای توصیف رفتار ممان–چرخش درزه‌های بین سگمنتی توسط جانسون در سال ۱۹۸۳ ارائه شده است. (Luttikholt, 2007).

سختی این فنرها بیانگر مقاومت درزه در برابر چرخش است. مطابق این رابطه تا زمانی که درزه‌ها کاملاً به هم فشرده هستند، سختی چرخشی ثابت است و می‌توان آن را به صورت زیر بدست آورد (Luttikholt, 2007).

$$C_m = \frac{E.b^2.a}{12} \qquad (۳)$$

در این رابطه: E: مدول یانگ ناحیه‌ی تماس (بتن)

b: عرض ناحیه‌ی تماس

a: ارتفاع ناحیه‌ی تماس می‌باشد.

برای مدل کردن درزه‌های محیطی نیز از فنرهای جانبی استفاده می‌شود. معمولاً اتصال رینگ‌ها به وسیله‌ی فنرهای جانبی، که بیان کننده‌ی سختی برشی و حداکثر ظرفیت باربری اتصالات است، شبیه‌سازی می‌شود.

سختی برشی درزها به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر مدل می‌شود (Luttikholt, 2007).

$$C = \frac{G.A}{D} \qquad (٤)$$

G: مدل برشی درز

A: مساحت صفحه

D: ضخامت صفحه می‌باشد.

روش پوسته وفنر: در روش پوسته و فنر برای مدل کردن مشخصات مقاومتی سازه از المان‌های پوسته و برای مدل کردن بر هم کنش زمین با سازه و هم‌چنین درزه‌های طولی و محیطی از فنرها (مانند روش تیر و فنر) استفاده می‌شود. انتخاب المان پوسته به خاطر این است که این المان تمام نیروها و لنگرها را می‌تواند تحمل کند (یوسفیان دارانی و همکاران، ۱۳۸۹).

روش المان محدود: در این روش نیز برای بر هم کنش بین سازه‌ای سگمنتی و زمین از فنرهای شعاعی استفاده می‌شو د ولی درزه‌های بین سگمنتی به صورت دو سطح که دارای اصطکاک هستند، عمل می‌کنند. طبق مدل‌سازی که مو و چن در سال ۲۰۰۹، برای سگمنت‌ها به صورت سه بعدی با این المان انجام دادند ضریب اصطکاکی بین ۰/۳ و ۰/٤ برای دو سطح تماس بین سگمنت استفاده شد که در این صورت مدل‌سازی درزه‌های سگمنتی نیز واقعی‌تر بوده و به صورت مناسبی مدل‌سازی می‌شوند (Mo & Chen, 2009). با مدل‌سازی انواع مختلف درزهای سگمنت از لحاظ شکل و هندسه، می‌توان مزایا و معایب هرکدام را با شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس بررسی

نمود. تأثیر تعداد قطعات بتنی سگمنت در یک رینگ و تأثیر اتصالات (بولت) را نیز در رینگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (مجدی و عجم‌زاده، ۲۰۱۰). هم‌چنین رفتار سگمنت در دو بعد تحت شرایط لرزه‌ای به صورت عددی انجام شده است (نجوک و همکاران، ۲۰۱۵). **بر اساس مدل‌سازی‌هایی که بلوم در سال ۱۹۹۹ برای سگمنت با این روش انجام داد به این نتیجه رسید که مقادیر محاسبه‌ی شده‌ی تنش در این روش مدل‌سازی (نسبت به سایر روش‌ها) به مقادیر تنش اندازه‌گیری شده در سایت نزدیک‌تر می‌باشد. به طور کلی برای طراحی سگمنت در موارد عادی مدل‌سازی با سایر روش‌های معرفی شده کفایت می‌کند اما در مواردی که بارهای نامتقارن و غیریکنواخت بر پوشش وارد می‌شود و رفتار باربری درزه‌ها به شکل خاصی می‌باشد، تنها این روش مناسب است** (Klappers et al., 1999). **نتایج طبقه‌بندی مهندسی سنگ در مسیر تونل گلاب نشان داد که یکی از بحرانی‌ترین واحدهای سنگی مسیر تونل،** واحد سنگی فیلیت متامورفیکی است که این واحد سنگی دارای سنگ‌های لایه‌ای و مچاله شونده است . به همین لحاظ از نرم‌افزار محیط ناپیوسته UDEC استفاده شد. باتوجه به اینکه مدل درزه در همه جا برای حفاری در مواد با لایه‌بندی نزدیک به هم کاربرد دارد از این مدل به عنوان مدل رفتاری توده سنگ محیط استفاده شد(UDEC, Version 4.1). در مدل UDEC، محیط خارجی پوشش سگمنتی به ۷۲ نقطه تقسیم شد تا مقادیر بار اعمالی بر روی آنها محاسبه شود. جدول‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، سطوح ضعیف و شیستوزیته و خصوصیات درزه‌های محیط را نشان می‌دهد. در نهایت پس از اعمال شرایط مرزی، تعادل اولیه، حفر و تعادل نهایی مدل، بارهای وارده از زمین بر پوشش سگمنتی بدست آمد. شکل های ۳ و ٤ شرایط مرزی و منحنی نیروی نامتعادل‌کننده در مدل را نشان می‌دهند.

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۸۲)

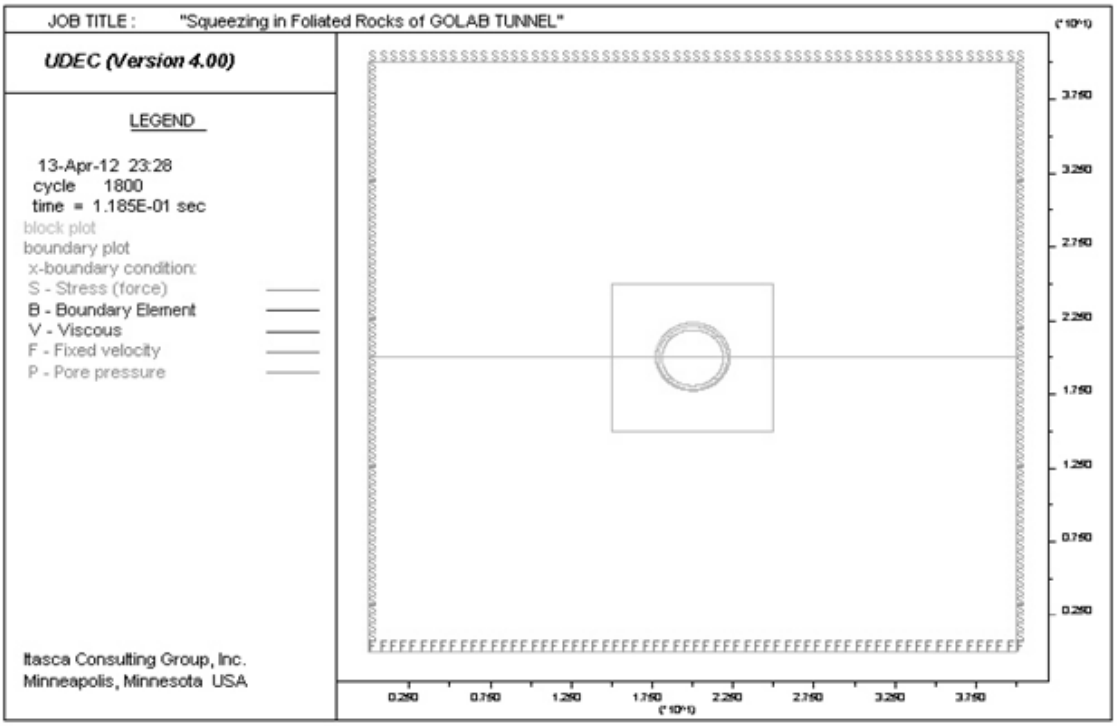
سرباره (۳۸۲ متر) و متراژ (۷۱۰۰)	
فیلیت	
پارامتر	**مقدار**
مدول دگرشکل پذیری (گیگا پاسکال)	۱/۵
مدول بالک (گیگا پاسکال)	۱/۵۵-۱/۲۲
مقاومت کششی (مگا پاسکال)	۰/۰۲۷
چسبندگی (مگا پاسگال)	۰/۷۵
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۵
ضریب پواسون	۰/۳
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۷۵۰
نسبت تنش برجا(K)	۰/۵

جدول۲- پارامترهای سطوح ضعف و شیستوزیته (Mises, 1913)

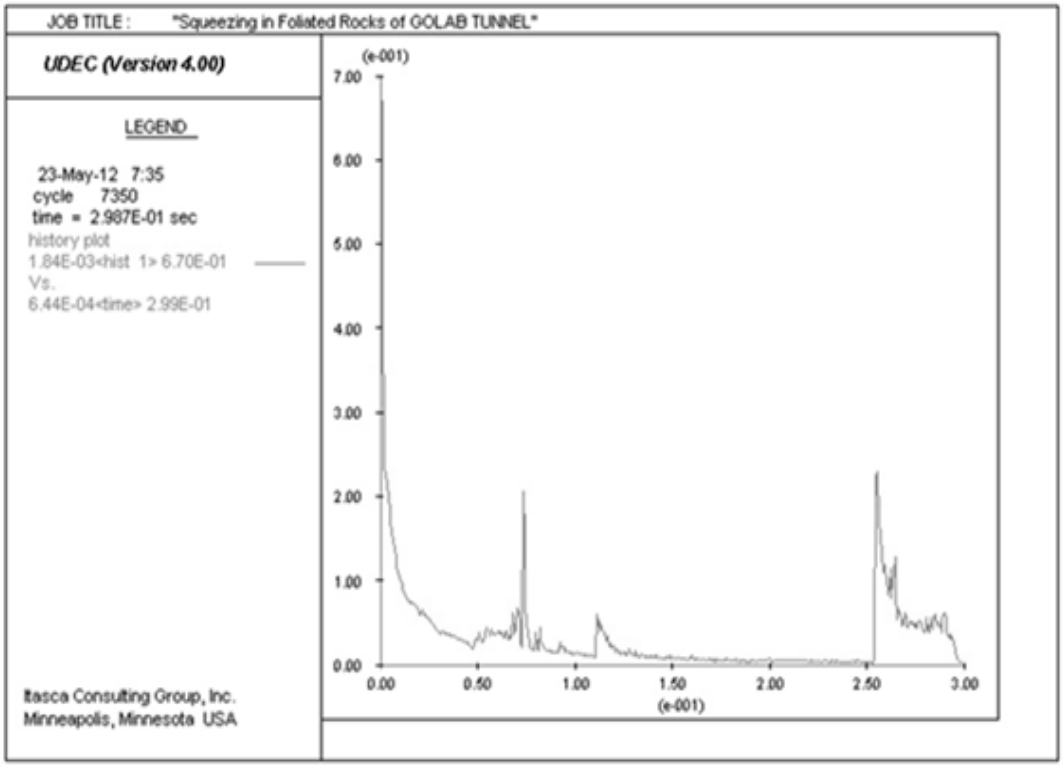
فیلیت	
پارامتر	**مقدار**
زاویه شیستوزیته	٤٠
مقاومت کششی (مگا پاسکال)	۰/۰۰۱
چسبندگی (مگا پاسکال)	۰/۱
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	١٤
زاویه اتساع (درجه)	۲

جدول۳- پارامترهای ژئومکانیکی درزه‌های محیط (Mises, 1913)

درزه‌های محیط				
j_{kn}	j_{ks}	j_{coh}	j_{ten}	j_{fric}
(MPa/m)$۱۰^{۳}$	(MPa/m)۵×۱۰^{۲}	(MPa/m)۹	(MPa/m)۰/۱	۱۰ درجه



شکل۳- شرایط مرزی اعمال شده در مدل



شکل٤- نیروی نامتعادل در مدل

مشخصات سگمنت در مدل ABAQUS : سگمنت‌های لاینینگ تونل انتقال آب گلاب هگزاگونال است ولی در مدل‌سازی به دلیل اینکه سگمنت‌های هگزاگونال تشکیل یک رینگ کامل را نمی‌دهند، مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS به صورت مستطیلی مدل‌سازی شده است. همچنین سگمنت‌ها و مش‌های هشت‌گرهی شش وجهی در نرم‌افزار به صورت یک رینگ ٤ قطعه‌ای شکل، سه‌بعدی مدل‌سازی شده‌اند. پارامترهای هندسی و مکانیکی سگمنت در جدول ٤ آورده شده است.

جدول ٤- مشخصات هندسی و مکانیکی سگمنت

عرض سگمنت	۱/۳ متر
ضخامت سگمنت	۲۵ سانتی متر
مقاومت فشاری سگمنت	۳۰ مگا پاسکال
مدول الاستیسیته‌ی سگمنت	۲۵گیگا پاسکال

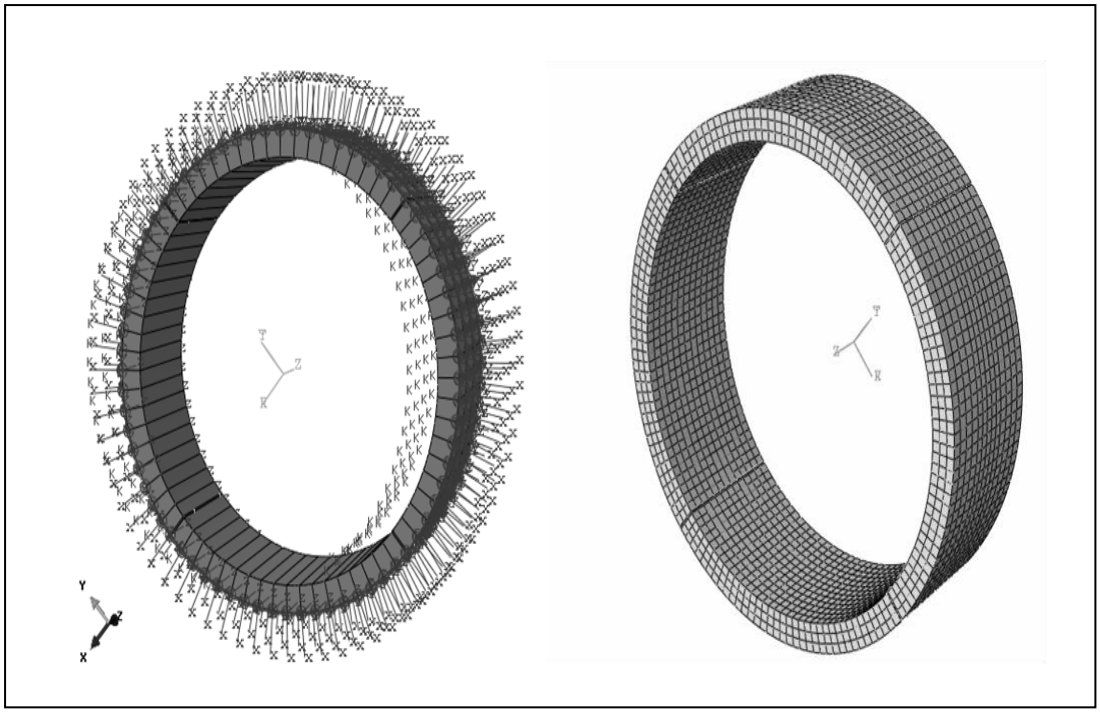
مدل‌سازی درزه‌های سگمنت: پس از قرارگرفتن ٤ قطعه‌ی سگمنتی روی یکدیگر در نرم‌افزار، درزه‌هایی بین سگمنت‌ها در یک رینگ ایجاد می‌شود که باید رفتار این درزه‌ها شبیه‌سازی شود. برای مدل‌سازی درزه‌های سگمنت شبیه به واقعیت، دو حرکت در راستای مماسی و نرمال بین دو سطح در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه بتن‌ها در سطوح تماس در راستای نرمال در یکدیگر نفوذ نمی‌کنند از رفتار Hard contact استفاده شده است که

اجازه نفوذ دو سطح بتن تحت بار به آنها داده نمی‌شود هم‌چنین برای رفتار مماسی بین دو سطح نیز از ضریب اصطکاکی برابر ۰/۳۵ استفاده شده است.

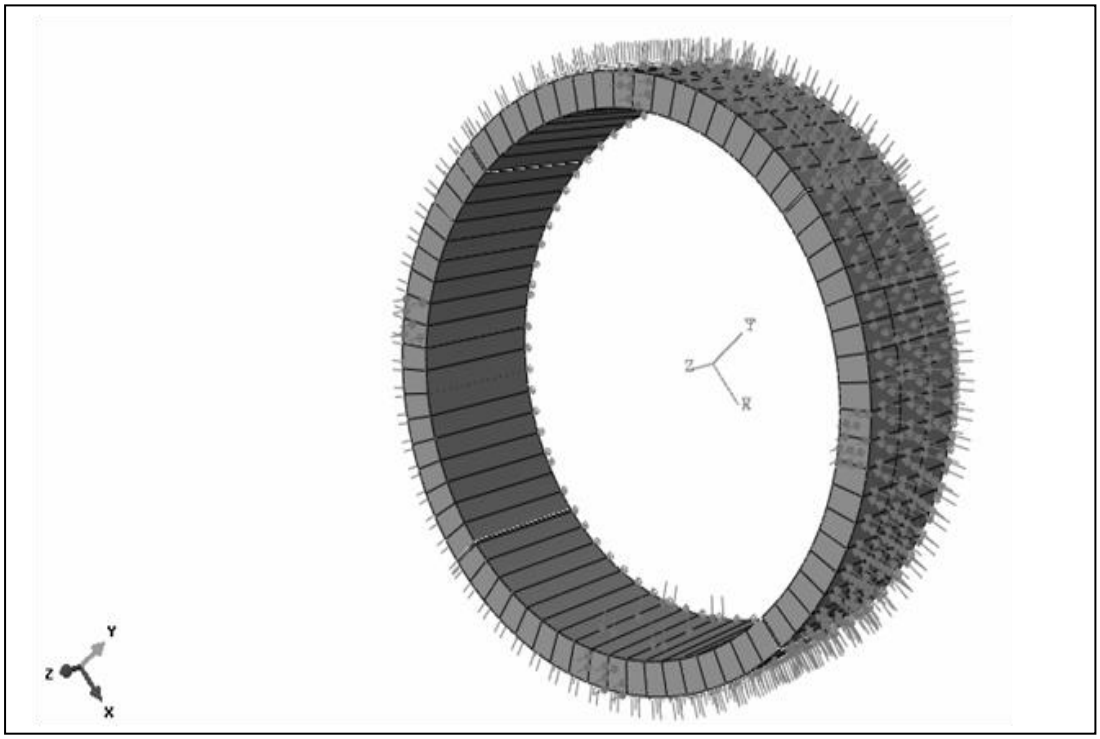
رفتار زمین اطراف: برای مدل‌کردن زمین از فنرهای شعاعی در اطراف سطح خارجی سگمنت استفاده شده است که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید. از آن جایی که مقاومت کششی زمین در حد صفر است، طرح این فنرها به گونه‌ای است که قادر به تحمل نیروهای فشاری می‌باشد، در حالی‌که نیروهای کششی را تحمل نمی‌کنند. این خصوصیات موجب می‌شود در حالی که زمین مانند یک حائل تکیه‌گاهی سیستم نگهداری را در بر گرفته است، هیچ‌گونه محدودیتی برای اعمال نیروهای وارده بر سگمنت ایجاد نمی‌کند. در واقع این فنرها مبین برهم کنش زمین و سیستم نگهداری هستند. با توجه به اینکه مقادیر بار نرمال وارده بر پوشش سگمنتی در نرم‌افزار UDEC در ۷۲ نقطه در اطراف پوشش به دست آمد، رینگ سگمنتی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS نیز به ۷۲ قسمت تقسیم‌بندی شد. بنابراین ΔS طول قوسی به اندازه ۵ درجه نسبت به مرکز تونل خواهد داشت و عرض سگمنت نیز که برابر با ۱.۳ متر است به سه قسمت تقسیم شده، در نتیجه B برابر ۰.٤۳ متر می‌باشد. با توجه به داده‌های فوق مقادیر ثابت سختی این فنرها مطابق رابطه‌ی ۱ بدست می‌آید.

شرط مرزی و اعمال بار: یکی از سطوح رینگ که در راستای طول تونل است، ثابت نگه داشته شده (جابه‌جایی صفر) و مقادیر بار وارده بر اطراف پوشش سگمنتی که در نرم‌افزار UDEC محاسبه شده بود بر روی رینگ وارد شد که در شکل ٦ ارائه شده است.

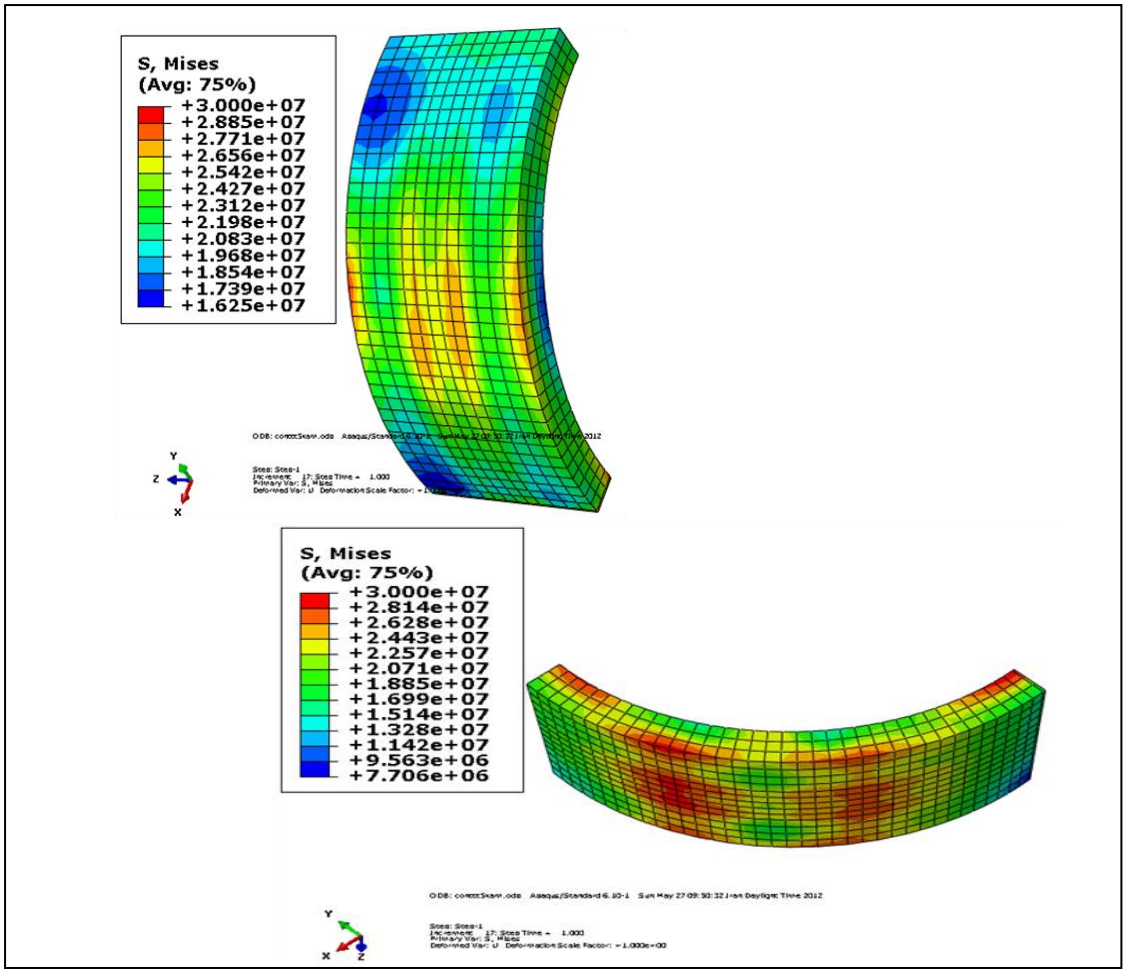
به منظور بررسی واکنش قطعات سگمنتی و امکان شکست در آنها تحت بار وارده از معیار شکست ون–میزز استفاده شد. این معیار شکست در صفحه‌ی تنش سه‌بعدی به صورت استوانه‌ای است که شعاع دایره‌ی استوانه‌ای شکل برابر $\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y$ و σ_y مقاومت فشاری است(Mises, 1913). در شکل ۷، کنتورهای تنش در سگمنت کف، سگمنت دیواره سمت چپ و سگمنت دیواره سمت راست نشان داده شده است. هم‌چنین شکل ۸ جابه‌جایی ایجاد شده در رینگ سگمنتی را با مقیاس ۲۰ برابر نشان می‌دهد. کنتورهای تنش در سگمنت‌های کف، دیواره‌ی سمت راست و چپ نشان‌دهنده‌ی شکست در آنها تحت بار وارده به ازای این نسبت تنش برجا در منطقه می‌باشد، چون مقادیر تنش ایجاد شده در سگمنت‌ها بیرون از محدوده‌ی استوانه‌ی معیار شکست ون– میزز قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در نرم‌افزار از دو مدل رفتاری الاستیک برای قسمت خطی بتن و مدل رفتاری پلاستیک برای قسمت غیرخطی آن استفاده شده است. علت عدم تقارن کنتورهای تنش در سگمنت‌های دیواره‌ی سمت چپ و راست، قرارگرفتن تنش‌ها در محدوده‌ی پلاستیک می‌باشد که این حالت در نتایج به دست آمده از زون‌های پلاستیک ایجاد شده در نرم‌افزار UDEC نیز مشخص است، در حالی‌که تنش‌ها در محدوده‌ی الاستیک برای هر دو دیواره‌ی سمت چپ و راست در تقارن هستند که در شکل ۹ نشان داده شده است.



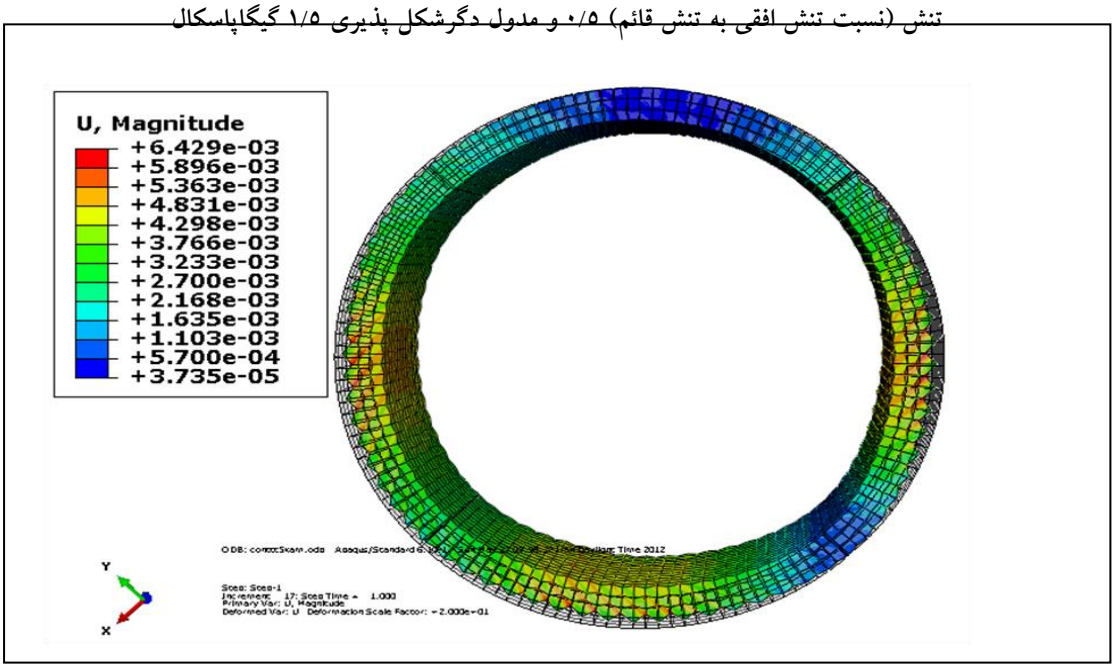
شکل۵- مش‌بندی در تونل و فنرهای تکیه‌گاهی زمین در اطراف پوشش بتنی



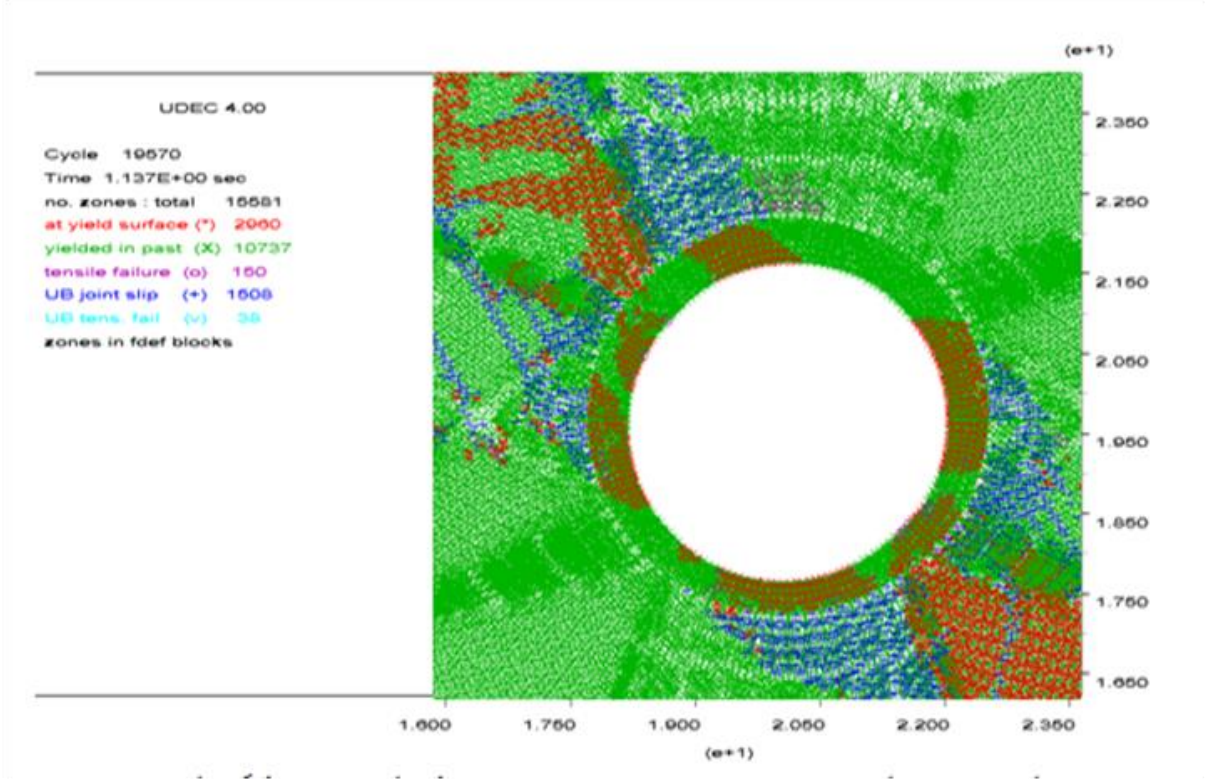
شکل٦- شرایط مرزی و اعمال بار به رینگ سگمنتی در مدل



شکل۷- کنتورهای تنش در سگمنت دیواره‌ی سمت چپ، دیواره‌ی سمت راست و کف (تنش برحسب پاسگال) به ازای نسبت تنش (نسبت تنش افقی به تنش قائم) ۰/۵ و مدول دگرشکل پذیری ۱/۵ گیگاپاسکال

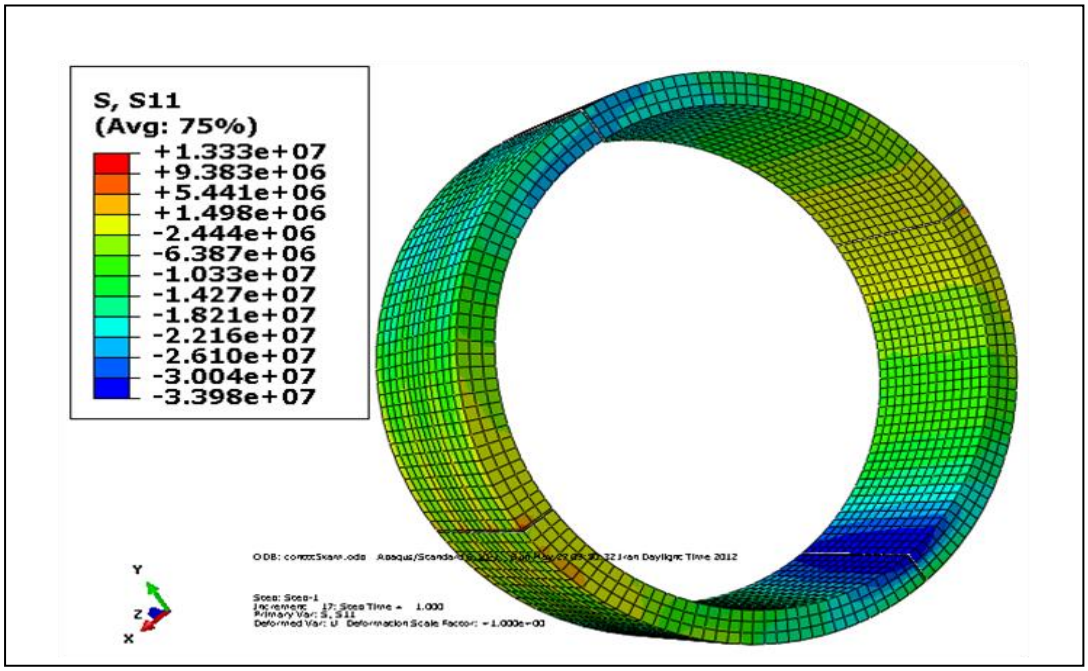


شکل۸- کنتورهای جابه‌جایی در رینگ سگمنتی به ازای نسبت تنش ۰/۵ و مدول دگرشکل پذیری



شکل۹- زون پلاستیک ایجاد شده در مدل به ازای نسبت تنش ۰/۵ و مدول دگرشکل پذیری ۱/۵ گیگاپاسکال

شکل ۱۰ حداکثر تنش کششی ایجاد شده در رینگ سگمنتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل نیز مشخص است مقادیر تنش کششی پایین می‌باشد. با قرار دادن حداقل درصد تسلیح، سگمنت در برابر تنش پایدار می‌ماند که این نشان‌دهنده درستی نتایج مدل‌سازی با مشاهدات در تونل گلاب می‌باشد.



شکل۱۰- کنتورهای تنش کششی در رینگ سگمنتی به ازای نسبت تنش ۰/۵ و مدول دگرشکل پذیری ۱/۵ گیگاپاسکال

نتیجه‌گیری

در حفاری تونل‌ها، با توجه به زمان‌بر بودن و پرهزینه بودن روش‌های سنتی، همچنین اثرات زیست محیطی بیشتر در روش انتقال آب توسط لوله، روش مکانیزه حفاری تونل‌ها توسعه یافته است و استفاده از سیستم‌های نگهداری پیش‌ساخته (پوشش سگمنتی) یکی از ملزومات این نوع حفاری است. در این مقاله انواع روش‌های تحلیل ساختاری پوشش سگمنتی بررسی شد. آن‌چه باید در انتخاب کلیه روش‌های معرفی شده مورد توجه قرار گیرد، مدل کردن درزه‌های یک رینگ سگمنتی به شکل مناسب است. در نهایت با استفاده از مناسب‌ترین و جدیدترین روش (المان محدود)، پوشش سگمنتی تونل انتقال آب گلاب مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی سگمنت‌های کف و دیواره‌ی محدوده‌ی فیلیت از تونل گلاب دچار ترک خوردگی می‌شوند که بدلیل خاصیت مچاله شوندگی و لایه‌دار بودن سنگ‌های این محدوده است و بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی در سگمنت‌ها، در شرایط مختلف تنش، مربوط به سگمنت کف می‌باشد. همچنین براساس مدل-سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار ABAQUS، مقادیر تنش کششی ایجاد شده در رینگ سگمنتی پایین بود ولی به دلیل بالا بودن تنش فشاری، براساس برخی معیارهای شکست مانند ون- میزز، احتمال وجود ترک خوردگی در سگمنت پیش‌بینی می‌شود که این نتایج کاملاً با مشاهدات در سگمنت‌های تونل گلاب انطباق دارد.

منابع

-**صالح زاده، ح.، (۱۳۸۸)**، "طراحی و مهندسی تونل و شفت در سنگ"، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص)، قرب نوح(ع)، ص ۲۷-۳۰.

- **مجدی، ع.، عجم‌زاده، ح.، (۱۳۸۹)**، "بهینه‌سازی تعداد سگمنت‌های بتنی بعنوان پوشش نگهداری تونل در یک رینگ و ارزیابی اتصالات بین سگمنتی و بین رینگی در ظرفیت باربری تونل‌ها (مطالعه‌ی موردی تونل خط ٤ متروی تهران)"، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ص ۱۷-۲٦.

- **مؤسسه‌ی مهندسین مشاور ایمن سازان، (۱۳۸۹)**، "گزارش طراحی سگمنت تونل انتقال آب گلاب"، ص ٤۸-٦۰.

- **یوسفیان دارانی، ع.، رحمان نژاد، ر.، گل پیرایی، و.، (۱۳۸۹)**،" تحلیل ساختاری پوشش سگمنتال با استفاده از مدلسازی عددی سه بعدی توسط المان های پوسته (مطالعه‌ی موردی قطعات ۳ و٤ تونل انتقال آب قمرود)"، اولین همایش ملی سازه- زلزله- ژئوتکنیک، مازنداران ، بابلسر، ص ۵۸-٦۹.

- **Duddeck, H., Erdmann, J., (1982),** "Structural Design Models for Tunnels", Universitat Braunschweig, Germany, pp 128-136.

- **Japan Society of Civil Engineers, (1996),** Japanese Standard for Shield Tunnelling, The third edition, Tokyo, pp 345-358.

-**Klappers, C., Gruebl, F., Ostermeier, B., (1999),** "Structural Analysis of Segmental lining – Coupled Beam and Spring Analyses Versus 3D FEM Calculations with shell Element", Tunneling and Underground Space Technology, Vol21, Issues 3-4, pp 475-489.

-**Luttikholt, A., (2007),** "Ultimate State Analysis of a segmental Tunnel Lining-Result of full-Scale tests Compared to finite element analysis", M.S.c.Thesis, Faculty of Civil Engineering and GeoSciences Delft University of Technology, pp 185-197.

-**Mises, R., (1913),** "Mechanik der festen Korper im plastisch deformablen Zustand", Gottin. Nachr, Math. Phys., vol. 1, pp 582–592.

-**Mo, H.H., Chen, J.S., (2009),** "Numerical study on crack problems in segments of shield tunnel using finite element method", Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, pp 91–102.

-**Ngoc-Anh, D., Daniel, D., Pierpaolo. O., Irini, D., (2015),** "2D numerical investigation of segmental tunnel lining under seismic loading", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 72, pp 66–76.

Numerical modeling of segmental lining of Golab water conveyance tunnel due to reduced environmental impact

Sanei Arani. M.[1], Hakimiyan Bidgoli. M.[2], Veshadi Arani. M. A.[3]

1- Graduate Master of rock mechanic, limestone quarry of Senjedeh, Kashan,

2- 2- PhD Candidiate, Department of Mining, Faculty of Engineering, University of Kashan

3- PhD Candidiate, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir university of technology (Tehran Polytechnic)

Abstract

Lack of proper drinking water is a major problem in the Central and Eastern cities of the country. Therefore, the necessity of water transmission projects are posed and since meeting these needs using traditional methods are very difficult, time-consuming and costly; so the mechanized excavation of tunnels and segmental lining are used. The water transferred through the pipes has significant surface destruction. That would result in serious environmental problems. Also, transferring water through the pipes is more expensive than the tunnel. In this paper, after introducing all procedures of segments design, segmental lining of Golab water conveyance tunnel using finite element was modeled. Firstly, loads on segmental lining was determined by UDEC software after installation in tunnel. Then, these amounts of load on the segments used for modeling was applied in ABAQUS software. Results obtained by 3D modeling software showed that the greatest amount of displacement of segments under different stress conditions concerns to the bottom segment. Based on the performed modeling, due to the high compressive stress, the crack is only seen in segment concrete and these results are totally in compliance with Golab tunnel segments observations.

keywords: environmental, water conveyance, Segmental lining, 3D modeling, Numerical method, Golab tunnel.