نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال ششم / شماره بیست و سوم / زمستان ۹۸

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
6th Year / No. 23 / March 2020

بررسی تأثیر هم‌زمان فشار داخلی آب و نیروی تراوش بر پوشش تونل‌های آب‌بر تحت‌فشار

امید توسلی[۱*]
اکبر مختار پور[۲]
عادل عساکره[۳]
علیرضا پیشکاری[۴]

چکیده

تونل تحت‌فشار از انواع سازه‌های زیرزمینی است، که به‌طور عمده در صنعت برق‌آبی و نیروگاه‌ها کاربرد ویژه‌ای داشته و طراحی و احداث آن‌ها با چالش‌های مهندسی فراوانی روبرو است. ازجمله این مشکلات، بروز نشت در اطراف تونل و فرسایش ناشی از فشار زیاد آب بوده، که با گذشت زمان منجر به ناپایداری و تخریب پوشش آن‌ها می‌گردد. هدف اصلی این مقاله، بررسی عددی تأثیر هم‌زمان فشار داخلی و نیروی تراوش آب در طراحی تونل‌های تحت‌فشار است. برای تحقق این امر، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D بر پایه روش اجزاء محدود، تونل‌های آب‌بر با سطوح مختلف آب زیرزمینی و سربارهای متفاوت، تحت اثر فشار داخلی و تراوش ناشی از آن، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در اثر هم‌زمانی فشار و تراوش، با افزایش نسبت تراز سطح آب به سربار تونل، از تغییر شکل کلی تونل کاسته شده و میزان تنش‌های وارده و کرنش‌های متناظر آن‌ها افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش نسبت عمق سربار به قطر تونل، میزان نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

تونل تحت‌فشار، تراوش آب، ارتفاع سربار، تراز آب زیرزمینی، روش اجزای محدود.

[۱] . استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، "mail to:o.tavasoli@iauet.ac.ir"
[۲]. دکتری مهندسی آب، عضو گروه علمی فنی و عمرانی، شهرداری تهران، ایران
[۳]. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
[۴]. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶

مقدمه

با گذشت زمان و پیشرفت علوم مهندسی، سازه‌های متفاوت با کاربردهای مختلف و متنوع پدیدار شده و هرکدام از این سازه‌ها، علوم گسترده‌ای نظیر ژئوتکنیک[۱]، هیدرولیک[۲]، مکانیک مواد و غیره را به خود اختصاص داده است. در کشورهای در حال توسعه، همواره سعی بر این بوده تا کمترین استفاده از منابع تجدیدناپذیر برای احداث و بهره‌برداری از این سازه‌ها و در نهایت خدمت‌رسانی به جوامع صورت پذیرد. در دهه‌های اخیر، این امر در تولید الکتریسیته برای پیشبرد اهداف صنعتی و انسانی نمود پیدا کرده و استفاده از نیروگاه آبی جهت تولید نیرو در کشورهای دارای سرمایه‌های آبی، امری اجتناب‌ناپذیر شده است. ازاین‌رو، استفاده کارآمد از این تکنولوژی، دانش ویژه‌ای را در حوزه هیدرولیک و ژئوتکنیک می‌طلبد. برای بکار انداختن و تولید توان لازم تجهیزات مکانیکی در نیروگاه‌های آبی، آب از پشت مخزن سد به‌وسیله تونل‌های انحرافی و شفت‌های مربوطه به سمت توربین‌ها و هسته مرکزی نیروگاه در پایین‌دست سد، هدایت می‌شود. اختلاف ارتفاع موجود بین ورودی و خروجی تونل باعث می‌گردد تا مقطع تونل به‌طور کامل توسط آب پر شده و به‌صورت تحت‌فشار عمل نماید. در این حالت، فشار وارده از جانب آب به‌عنوان فشار داخلی برای تونل محسوب می‌شود. این فشار داخلی برحسب هد ورودی و خروجی تونل، شیب مسیر، وجود کنترل‌کننده‌ها و شیرها متفاوت بوده و به دلیل ماهیت ساختگاه این سازه‌ها، پوشش بکار رفته در تونل باید علاوه بر تأمین پایداری تونل در برابر بارهای خارجی، از تراوش آب داخلی به بیرون نیز جلوگیری کند. به کار بردن پوشش‌های فولادی علاوه بر ایمنی مناسب، هزینه‌های گزافی را بر پروژه تحمیل کرده و تمایل طراحان بر این است که با بکار بردن پوشش‌های بتنی، ضمن کم کردن هزینه‌های احداث، ایمنی قابل قبولی برای سازه ایجاد نمایند (صالح زاده[۳]، ۲۰۰۸). بتن ازجمله موادی است که به‌طور کامل نفوذناپذیر نبوده و ازاین‌رو، با به وجود آمدن پتانسیل هیدرولیکی در آن، سیال با گذشت زمان از آن عبور خواهد کرد. در تونل‌های تحت‌فشار به دلیل فشار آب داخلی بالا و فشار ناشی از آب‌های زیرزمینی در بیرون تونل، گرادیان هیدرولیکی در اطراف پوشش شکل گرفته و بستر را برای تراوش آب و ظهور نیروهای تراوش مهیا می‌سازد. این مسئله موجب اعمال نیروهای حاصل از تراوش به سنگ و جداره تونل شده و باعث می‌گردد که درزه‌ها بازتر شوند و روند تراوش آب به بیرون از تونل را تسریع بخشند. ازاین‌رو اگر تراوش آب به خارج از تونل تحت‌فشار کنترل نگردد، در طولانی مدت سبب بروز خسارت در سازه خواهد شد. به این جهت بررسی توأمان فشار آب و تراوش در تونل‌های تحت‌فشار آب امری ضروری تلقی می‌شود (ویلیامز[۴]، ۱۹۹۷).

درگذشته مطالعاتی بر اساس روش‌های عددی و تحلیلی در خصوص تونل‌های تحت‌فشار انجام و نتایج آن‌ها ارائه‌شده است. موضوع فشار داخلی و تراوش آب در تونل‌های آبرسان موردتوجه بسیاری از پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده و تلاش زیادی برای بهبود عملکرد این سازه در برابر نیروهای تراوش انجام پذیرفته است. فهیمی فر و همکاران[۵] در سال ۲۰۱۴ مدلی برای تراوش و فشار آب منفذی در تونل‌های تحت‌فشار زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن اثر زوج هیدرومکانیکی[۶] توده‌سنگ ارائه دادند. در پژوهش ایشان، چندین الگوی تراوش برای مدل‌سازی تراوش و فشار آب حفره‌ای در تونل‌های زیر سطح آب معرفی گردیده و با استفاده از آن‌ها در تحلیل الاستوپلاستیک[۷] تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی، اثر مدل‌های مختلف تراوش بر عملکرد تونل بررسی گردید. بیان و همکاران[۸] در سال ۲۰۰۹ تأثیر هم‌زمان نیروی تراوش و تنش‌های وارده بر پوشش بتنی موجود در لوله‌های تحت‌فشار بالای آب را بررسی کردند. درصورتی‌که لوله‌های زیرزمینی تحت‌فشار آب بالا عمل نمایند، ترک‌ها اغلب در پوشش بتنی اتفاق می‌افتد که موجب جاری شدن آب درون لوله به بیرون خواهد شد. جهت مدل‌سازی اندرکنش مکانیکی و هیدرولیکی در فرآیند شکست، روش تاثیر زوج[۹] با توجه به روش اجزاء محدود الاستوپلاستیک سه‌بعدی در نظر گرفته شده و گسترش ترک و تأثیر آن بر نیروی تراوش و تنش‌های وارده نیز بررسی گردید. اولومید و مارنکو[۱۰] در سال ۲۰۱۲ به

۱. Geotechnics
۲. Hydraulic
۳. Salehzadeh
٤ Williams
٥ Fahimifar et al.
٦ Hydromechanic
٧ Elasto-plastic
٨ Bian et al.
٩ Coupling method
١٠ Olumide and Marenco

کمک روش اجزاء محدود، به طراحی بهینه تونل‌های تحت‌فشار بالای داخلی پرداخته و بیان کردند که بتن غیرمسلح پوشش تونل، تحت اثر فشارهای وارده، پایدار و مستحکم نبوده و نمی‌تواند مانع از تراوش آب به داخل تونل شوند. اثر نیروی تراوش در طراحی فشار تونل‌های تحت‌فشار داخلی بالای آب بررسی و انتشار ترک‌خوردگی و تأثیر پیش‌تنیدگی بر بتن غیرمسلح پوشش برای تراوش و فشار آب منفذی در تونل‌های تحت‌فشار زیر سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش اجزاء محدود و در نظرگرفتن اثر زوج هیدرومکانیکی مقایسه گردیده و نتایج نشان دادند که بین نتایج حاصل از مطالعات تجربی با روش پیشنهادی ایشان، تطابق مناسبی وجود دارد (اولومید[۱]، ۲۰۱۳). فهیمی فر و همکاران[۲] در سال ۲۰۱۳ عملکرد تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی را با در نظر گرفتن رفتار نرم کرنشی در ناحیه پلاستیک موردمطالعه قرار دادند. در پژوهش ایشان، تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی در شرایط تقارن محوری و کرنش صفحه‌ای بررسی و با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، روشی برای محاسبه توزیع فشار آب حفره‌ای، تنش و کرنش در اطراف تونل دایره‌ای حفر شده در سنگ پیشنهاد گردید. نتایج بدست آمده تأثیر زاویه اتساع، نمو کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک و شرایط آب زیرزمینی را به‌خوبی نشان داده است. سیمانجونتاک و همکاران[۳] در سال ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ به بررسی یک مدل اجزای محدود کرنش مسطح دوبعدی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی، هیدرولیکی و ظرفیت باربری تونل‌های تحت‌فشار قبل از اعمال تنش هنگام بتن‌ریزی پرداخته و توزیع تنش و تغییر شکل در توده سنگ درنتیجه حفاری تونل، نصب و نگهداری پوشش نهایی، پیش تشدید و فعال شدن فشار آب داخلی با روش تجزیه و تحلیل مرحله‌ای بدست آمده است. پرازلی و همکاران[۴] در سال ۲۰۱۴ پایداری جبهه تونل تحت شرایط تراوش جریان آب را مطالعه و بیان کردند که اگر گرادیان هیدرولیکی وارده بر جبهه تونل زیاد باشد، وقوع گسیختگی کششی بیشتر از شکست برشی است. همچنین برای تخمین توزیع هد هیدرولیکی در سطح جبهه تونل، یک روش حل تحلیلی را برای مقاومت در برابر فشار جریان تراوش ارائه کردند. ژو و همکاران[۵] در سال ۲۰۱۵ نیز نشان دادند که روش‌های تحلیلی و عددی که برای شبیه‌سازی اندرکنش هیدرومکانیکی از پوشش و سنگ اطراف آن استفاده می‌شود، به‌اندازه کافی اثرات ترک‌خوردگی و ارتباط بین آن‌ها را در نظر نگرفته و همچنین هنگامی‌که ترک‌ها تحت‌فشار بالای آب قرار می‌گیرند، جداشدگی پوشش بتنی از سنگ اطراف در شرایط خاص به دلیل تنش‌های وارده اتفاق می‌افتد. ایشان با ارائه روشی مبتنی بر جابجایی معادل برای محاسبه اندرکنش هیدرومکانیکی در تونل‌های انتقال آب، نتیجه گرفتند که تنش بدست آمده از روش جدید و داده‌های مشاهده شده، به خوبی مطابقت داشته است. داداشی و همکاران[۶] در سال ۲۰۱۷ به مدل‌سازی و بررسی تونل تحت‌فشار سد گتوند در جنوب‌غربی ایران، با استفاده از روش اجزای محدود و با توجه به رفتار همگن، ایزوتروپیک و رفتار الاستیک توده سنگ و پوشش بتنی آن پرداختند. به‌منظور در نظر گرفتن اندرکنش و اثرات هیدرومکانیکی بر روی پوشش بتن مسلح و توده سنگ اطراف آن، از تحلیل فشار آب حفره‌ای-تنش استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فشار آب داخلی بالابر روی پوشش بتن مسلح و توده‌سنگ تأثیر قابل‌توجهی بر تغییر ضریب نفوذپذیری، فشار پلاستیک و پس‌ازآن جریان نفوذ دارد. ژانگ و همکاران[۷] در سال ۲۰۱۸ با هدف ارائه یک راه‌حل مستقیم برای ارزیابی تعداد و عرض ترک پوشش، یک الگوریتم عددی برای شبیه‌سازی روند ترک‌خوردگی تقویت‌شده ارائه دادند. نتایج عددی نشان می‌دهند که با افزایش فشار آب، ترک‌های پوشش به تدریج ظاهر شده و عرض آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین فشار آب وارد بر سطح ترک‌ها، تأثیر فراوانی بر مکانیسم ترک‌خوردگی پوشش داشته و نبایستی نادیده گرفته شوند، به‌طوری‌که این پارامتر باعث کاهش تعداد ترک‌های نهایی شده و به‌طور قابل‌توجهی عرض آن‌ها را افزایش می‌دهد.

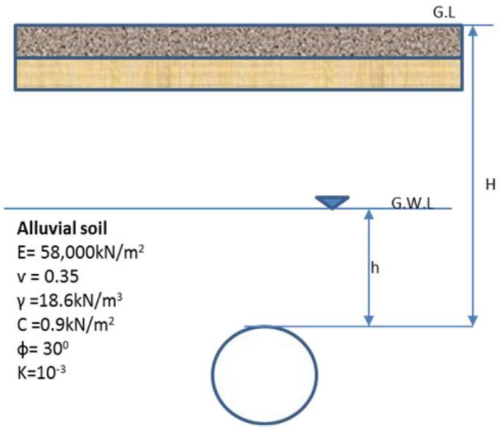
نکته مهم در طراحی تونل‌های آب‌بر این است که بایستی کلیه نیروها و لنگرهای به وجود آمده و همچنین تغییر شکل‌های متناظر آن‌ها به دقت مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد، که به این مسائل در پژوهش‌های گذشته پرداخته

۱.Olumide
۲.Fahimifar et al.
۳.Simanjuntak et al.
۴.Perazzelli et al.
۵.Zhou et al.
۶.Dadashi et al.
۷.Zhang et al.

نشده و جایگاه این مسئله در ادبیات فنی، موضوع بسیار نادر و حائز اهمیت است. در این پژوهش، نیروها، لنگرها و تنش‌های وارده بر پوشش جداری تونل تحت‌فشار و همچنین تغییر شکل‌های آن در راستای عمود بر محور تونل بر اثر تأثیر توأمان فشار داخلی و نیروی تراوش آب با استفاده روش اجزاء محدود سه‌بعدی و با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف ارتفاع سربار به قطر تونل و تغییرات سطح آب زیرزمینی به ارتفاع سربار موردبررسی و مطالعه قرار داده شده است.

بررسی عددی رفتار تونل تحت‌فشار داخلی و صحت سنجی آن

در این قسمت، جهت مطالعه تأثیر توأمان فشار داخلی و نیروی تراوش آب بر رفتار تونل‌های تحت‌فشار و مطالعه مدل‌های موردنظر، از روش عددی اجزاء محدود با مدل‌سازی در نرم‌افزار PLAXIS3D استفاده شده است. به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، هندسه تونل، بارگذاری، شرایط مرزی و اولیه منطبق با ابعاد ارائه‌شده در پژوهش اولومید و مارنکو[۱] (۲۰۱۲) و لی و نام[۲] (۲۰۰۶) لحاظ گردیده و نتایج بدست‌آمده با یکدیگر مقایسه شدند. ایشان یک مدل تحلیلی و عددی دوبعدی کرنش مسطح جهت طراحی بهینه تونل‌های بتنی تحت‌فشار داخلی ارائه کرده و میزان نشت و آب ازدست‌رفته در اثر ترک‌های ایجادشده در پوشش و نیروی تراوش ناشی از آن با بررسی یک مطالعه موردی تونل واقعی ارزیابی نمودند. تونل موردنظر با قطر داخلی ۶ متر و ارتفاع سربار ۲۰۰ متر بوده، که با استفاده از دستگاه حفار مکانیزه تونل در کشور ترکیه حفاری شده است. محیط اطراف تونل از سنگ با رفتار الاستوپلاستیک فرض گردیده و همچنین مصالح پوشش تونل دارای رفتار الاستیک بوده است. هندسه تونل مورد بررسی و نتایج نیروی محوری و تنش‌های محاسبه شده در پژوهش ایشان در حالت اعمال فشار داخلی به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۱): هندسه تونل موردمطالعه در پژوهش اولومید و مارنکو۱ (۲۰۱۲)

جدول (۱): نتایج نیروی محوری و تنش‌های محاسبه شده در پژوهش‌های گذشته

H/D	h/H	نیروی محوری (kN)		تنش (kN/m^2)	
		(لی و نام، ۲۰۰۶)	(اولومید و مارنکو، ۲۰۱۲)	(لی و نام، ۲۰۰۶)	(اولومید و مارنکو، ۲۰۱۲)
۲	۰/۵	۹۷	۱۰۰	۳۵۰	۳۷۰
۲	۱/۰	۱۵۶	۱۶۰	۵۶۶	۵۹۰
۲	۱/۵	۲۱۶	۲۲۰	۷۶۴	۷۸۶
۳	۰/۵	۱۲۷	۱۲۸	۴۶۰	۴۷۰
۳	۱/۰	۲۱۶	۲۲۰	۷۸۶	۷۹۱
۳	۱/۵	۳۰۵	۳۱۲	۱۰۸۰	۱۰۹۵
۴	۰/۵	۱۵۶	۱۶۰	۵۷۱	۵۸۶
۴	۱/۰	۲۷۶	۲۸۰	۱۰۱۰	۱۰۱۸
۴	۱/۵	۳۹۵	۴۰۲	۱۴۰۲	۱۱۴۱

شایان ذکر است احتمال کسب نتایج واقعی در تحلیل دوبعدی این مسائل در حالت کرنش مسطح نیز ممکن بوده، ولی در طبیعت بدین دلیل که کلیه پدیده‌ها در فضای سه‌بعدی روی می‌دهند، لذا کاهش ابعاد این رویدادها به‌منظور تحلیل و بررسی آن‌ها همراه با فرضیه‌های تسهیل‌کننده و درنتیجه پیدایش خطا است. به همین علت مدل‌سازی سه‌بعدی با مقیاس واقعی این‌گونه مسائل، منجر به دستیابی نتایج دقیق‌تری می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، تونل آب‌بر دارای شعاع ۳ متر بوده و با در نظر گرفتن نسبت سربار به قطر تونل برابر ۲ و نسبت سطح آب به سربار معادل ۰/۵، نتایج نیروی محوری و تنش کل محاسبه و استخراج گردید. محیط سنگی اطراف تونل دارای مدل رفتاری موهر-کولمب بوده و به‌صورت زهکشی شده عمل

۱. Olumide and Marenco
۲. Lee and Nam

می‌نماید. پس از تکمیل ساخت هندسه مدل، مطابق شکل (۲)، محیط مدل با استفاده از المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌ای و با در نظر گرفتن اندازه المان‌ها به‌صورت ریز، مش‌بندی شده است. آنالیز حساسیت بر روی عوامل مؤثر ازجمله اندازه المان‌ها و مش‌بندی پوشش تونل و محیط اطراف آن پس از طی فرآیند تکرار و کنترل، صورت پذیرفته و درنهایت بهترین اندازه مش‌بندی که منجر به استخراج پاسخ‌های دقیق شده، برای انجام تحلیل‌ها انتخاب گردیده است؛ بنابراین، با توجه به اینکه محدوده اطراف جداره تونل مطالعه موردبررسی قرار گرفته، لذا اندازه المان‌ها در نواحی نزدیک به جداره تونل، به‌صورت مش‌بندی ریزتر اعمال‌شده، به‌طوری‌که تعداد کل المان‌های مورداستفاده جهت مش‌بندی مدل، ۲۱۵۷۰ المان بوده است. سپس شرایط مرزی و اولیه شامل تراز آب زیرزمینی و حالت تنش‌های اولیه اعمال گردید. فاصله مرزهای مدل باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که تأثیری بر روی نحوه توزیع تنش در اطراف تونل نداشته باشد ((اولومید و مارنکو[۱]، ۲۰۱۲) و (داداشی و همکاران[۲]، ۲۰۱۷))؛ بنابراین ابعاد مدل شامل طول، عرض و ارتفاع محیط اطراف تونل به ترتیب معادل ۲۴ و ۱۰ برابر قطر تونل مدل‌سازی شده است. درجات آزادی تمامی گره‌های کف مدل در سه جهت به‌صورت گیردار بوده و در مرزهای جانبی نیز جهت جابجایی در راستای قائم به‌صورت تکیه‌گاه غلتکی عمل می‌نمایند. مدل‌سازی و تحلیل مسئله موردمطالعه دارای چندین مرحله است. اولین مرحله، شامل شبیه‌سازی تنش‌های برجا ناشی از وزن توده مصالح محیط اطراف تونل است، به‌طوری‌که تنش موردنظر بایستی از روابط حاکم بر محاسبه تنش در توده خاک تبعیت کرده و نشست سطح زمین باید در محدوده نزدیک به صفر باشد. عملیات حفاری تونل در محیط در گام بعدی صورت می‌گیرد. بدین منظور قسمتی از مقطع که تونل در آن احداث می‌شود، به‌صورت ساخت مرحله‌ای تمام مقطع از مدل حذف گردیده و به عبارتی، آزادسازی تنش و جابجایی‌هایی متناظر آن در سنگ اتفاق می‌افتد. پس‌ازآن، پوشش بتنی تونل به ضخامت ۳۰ سانتیمتر دورتادور مقطع حفاری را مدل کرده و برای ایجاد سطح تماس بین سنگ و بتن و تعیین خصوصیات مکانیکی المان سطح تماس، دو رفتار مماسی و نرمال بین فصل مشترک سنگ و بتن در نظر گرفته می‌شود. مشخصات مکانیکی مصالح تونل و محیط اطراف آن در جدول (۲) آورده شده است. مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی پوشش بتنی با توجه به آیین‌نامه ACI-31808 انتخاب گردیده است. در گام نهایی نیز، فشار هیدرواستاتیکی داخل تونل به پوشش اطراف تونل وارد شده، که این فشار بسته به عمق قرارگیری تونل نسبت به دریچه‌های ورودی از مخزن و خروجی آن و همچنین شیب تونل متفاوت است. در آنالیز و طراحی تونل‌های با سطح مقطع دایره‌ای، اندرکنش سنگ و سازه و همچنین کنترل نفوذ آب باید موردتوجه باشد. اندرکنش سنگ با بتن، در پوشش‌های نازک و بار شعاعی با استفاده از روابط ساده‌شده و غشاءهای نازک عملی است. اگر شعاع متوسط پوشش بتنی a، فشار خارجی P_r، ضخامت t و فشار داخلی P_i باشد، با فرض E_c برای مدول یانگ و V_c برای ضریب پوآسن، تنش محیطی در پوشش از رابطه زیر بدست می‌آید (اشلیس[۳]، ۱۹۸۶):

$$\sigma_t = (P_i - P_r)\frac{a}{t} \qquad (۱)$$

جابجایی نسبی در جهت شعاعی، در شرایط کرنش ساده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta a}{a} = (P_i - P_r)\left(\frac{a}{t}\right)((1 - V_c^2)/E_c) = (P_i - P_r) \times K_c \qquad (۲)$$

برای فشار داخلی P_i و ویژگی‌های سنگ شامل E_r و V_r، جابجایی نسبی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{P_r(1 + V_r)}{E_r} = P_r . K_r \qquad (۳)$$

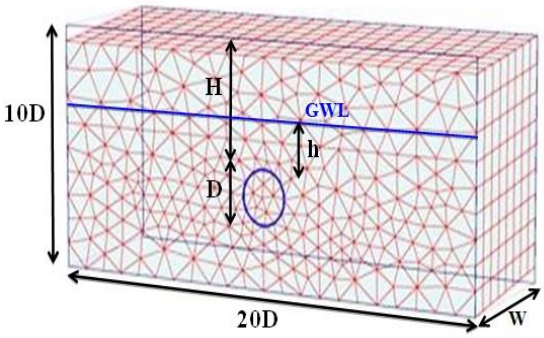
با مساوی قرار دادن دو معادله بالا، P_r بدست می‌آید:

$$P_r = P_i \frac{K_c}{(K_c + K_r)} \qquad (۴)$$

به‌این‌ترتیب، بار خالص وارد بر پوشش، $Pi - Pr$ تنش محیطی (مماسی) و جابجایی نسبی پوشش بدست می‌آید؛

۱. Olumide and Marenco
۲.Dadashi et al.
3. Schleiss

بنابراین مقدار فشار داخلی تونل در تمامی مراحل این پژوهش در حدود ۲/۵ بار در نظر گرفته‌شده است. لازم به توضیح است که بتن به‌طور کامل نفوذناپذیر نیست و به دلیل تشکیل حفرات، دارای نفوذپذیری بسیار کمی است. ازاین‌رو، آب در اثر وجود فشار هیدرواستاتیکی داخل و خارج تونل، می‌تواند از این منافذ عبور نماید. نفوذپذیری سنگ یکپارچه بدون درزه در محدوده بین ۱ متر بر ثانیه (نفوذپذیر کامل) تا $۱۰^{-۱۲}$ متر بر ثانیه (نفوذناپذیر) تغییر می‌کند ((نشریه شماره ۳۰۹، ۱۳۸۴) و (اشلیس[۱]، ۱۹۸۶)). فشار آب حفره‌ای در پشت پوشش و در تماس با سنگ به‌صورت تنش اولیه در نرم‌افزار با در نظر گرفتن مقدار ضریب نفوذپذیری سنگ برابر $۱۰^{-۶}$ متر بر ثانیه و ضریب نفوذپذیری پوشش بتنی معادل $۱۰^{-۸}$ متر بر ثانیه محاسبه شده است.



شکل (۲): مشخصات هندسی تونل و محیط اطراف آن در پژوهش حاضر

جدول (۲): مشخصات مصالح مورداستفاده در تحلیل‌ها

مشخصات	E (GPa)	n	g (kN/m³)	f (°)	C (kN/m²)
پوشش تونل	۲۰	۰/۲۲	۲۴	۴۰	۱۰۰۰
سنگ	۱۰	۰/۲۰	۲۶	۴۰	۱۰۰۰

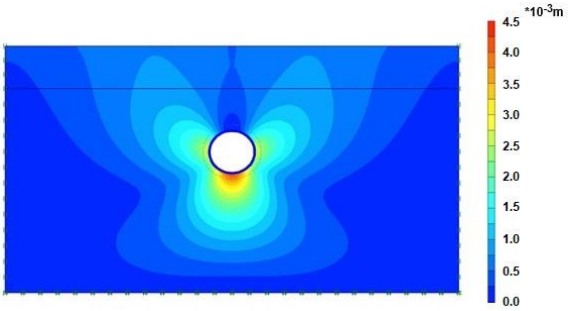
صحت سنجی مدل برای نیروی محوری و تنش در پوشش تونل برای کلیه حالت‌های مختلف با مقالات مرجع انجام گردیده و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است. لذا مشخص گردید که میزان اختلاف در نتایج بدست آمده با مقالات مرجع کمتر از ۵ درصد می‌باشد، که نتایج آن فقط برای حالت H/D و h/H به ترتیب معادل ۲ و ۰/۵، در جدول (۳) آورده شده است.

۱. Schleiss

با توجه به عمق قرارگیری تونل و ارتفاع سربار وارد بر آن و همچنین سطح تراز آب زیرزمینی معادل نصف ارتفاع سربار در بالای تاج تونل، حداکثر نیروی محوری وارد بر پوشش برابر ۹۷/۰۳ کیلو نیوتن بوده و تنشی معادل ۳۷۱/۸۲ کیلوپاسکال را تحمل نموده و بیشینه تغییر شکل در زیر پوشش تونل اتفاق افتاده و مقدار آن مطابق شکل (۳)، برابر ۴/۲۹ میلی‌متر محاسبه گردید؛ بنابراین، با توجه به نتایج بدست آمده از این مطالعه و مقایسه آن‌ها با نتایج پژوهش‌های گذشته، استنباط می‌گردد که تطابق قابل‌قبول و بسیار مناسبی وجود داشته و مدل‌سازی صحیح بوده است.

جدول (۳): مقایسه نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با پژوهش‌های گذشته

پژوهش	H/D	h/H	نیروی محوری (kN)	تنش (kN/m²)
لی و نام[۲] (۲۰۰۶)	۲/۰	۰/۵	۹۷	۳۵۰
اولومید[۳] (۲۰۱۳)			۱۰۰	۳۷۰
مطالعه حاضر			۹۷/۰۳	۳۷۱/۸۲



شکل (۳): جابجایی محاسبه‌شده برای تونل در مطالعه حاضر برای حالت H/D و h/H به ترتیب معادل ۲ و ۰/۵

بررسی عددی اثر توأمان فشار داخلی و نیروی تراوش آب در تونل‌های تحت‌فشار

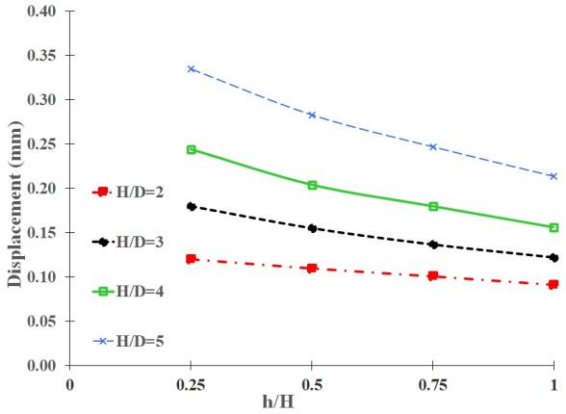
در این قسمت، تأثیر نیروی تراوش آب و فشار داخلی تونل‌های آب‌بر با مطالعه بر روی تونل انتقال آب به قطر ۶ متر و با نسبت‌های مختلف سربار به قطر تونل (H/D) برابر ۲، ۳، ۴ و ۵ انجام گردیده که برای هر یک از این نسبت‌ها، تراز مختلف سطح آب با و بدون در نظر گرفتن تراوش آب

۲. Lee and Nam
۳. Olumide

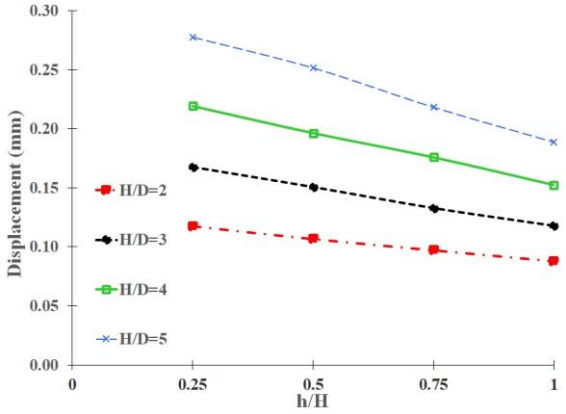
در تونل‌ها به ازای نسبت‌های مختلف ارتفاع تراز آب زیرزمینی به سربار (h/H) معادل ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ ارزیابی شده است.

تغییر شکل پوشش در تونل‌های تحت‌فشار

پس از انجام محاسبات، تغییر شکل پوشش جداره تونل در انتهای تحلیل‌ها و بر اساس بیشترین جابجایی بدست آمده، در شکل‌های (۴) و (۵) در حالت‌های اعمال فشار داخلی آب و تأثیر هم‌زمان نیروی تراوش و فشار داخلی نمایش داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت تراز سطح آب به سربار تونل، تغییر شکل کلی تونل روند نزولی داشته، یا به‌عبارت‌دیگر با نزدیک شدن تراز سطح آب زیرزمینی به سطح زمین، تغییر شکل تونل کاهش‌یافته است. علت این مسئله، کاهش پتانسیل هیدرولیکی برای فرار آب به خارج از تونل است. درواقع هد آب زیرزمینی در خارج تونل نسبت به فشار آب داخل آن، بیشتر است. درنتیجه نیروی تراوش توانایی لازم برای جابجایی محیط اطراف تونل را ندارد. برای تونل با نسبت ارتفاع تراز آب به عمق سربار معادل ۰/۲۵، میزان بیشینه جابجایی نهایی برابر ۰/۱۱۹ میلی‌متر محاسبه‌شده و با افزایش این نسبت به ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱، تغییر شکل نسبی تونل به ترتیب به مقدار ۹، ۱۶ و ۲۴ درصد کاهش‌یافته است. لذا در اثر تغییرات نسبت تراز سطح آب زیرزمینی به سربار، از میزان تغییر شکل‌های ایجادشده در تونل تا ۲۴ درصد نسبت به حالت بدون تراوش کاسته می‌شود. همچنین در تونل‌های با نسبت متفاوت سربار به قطر تونل با ثابت بودن تراز آب زیرزمینی، روند کاهشی در میزان جابجایی نهایی آن‌ها مشاهده گردیده است، به‌طوری‌که در نسبت برابر ۳، بیشینه مقدار کاهش تغییر شکل نسبی تونل در حدود ۳۲ درصد محاسبه‌شده و در نسبت‌های ۴ و ۵ نیز بیشترین درصد تغییر شکل نسبی برابر ۳۳ و ۳۶ درصد است. از سوی دیگر، مطابق شکل (۵)، با افزایش نسبت سربار به قطر تونل، در میزان تغییر شکل‌های بدست‌آمده روند افزایشی مشاهده شده و در نسبت h/H=0.5، با افزایش نسبت عمق تونل به ۳، ۴ و ۵، میزان تغییر شکل یا جابجایی نسبی آن نسبت به مدل با نسبت عمق ۲، به ترتیب ۳۳/۵، ۵۱ و ۶۲ درصد افزایش پیدا کرده است.



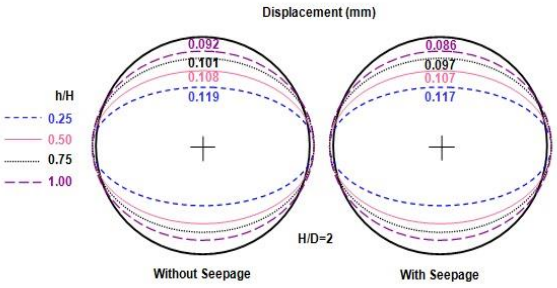
شکل (۴): نمودار تغییر شکل پوشش تونل در حالت اعمال فشار داخلی



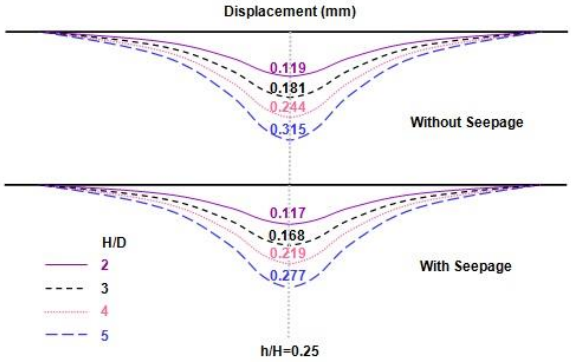
شکل (۵): نمودار تغییر شکل پوشش تونل در حالت تأثیر هم‌زمان فشار داخلی و نیروی تراوش

شکل (۶) تغییرات بیشینه تغییر شکل تونل به ازای H/D=2 و نسبت‌های متفاوت h/H و شکل (۷) نیز تغییرات بیشینه جابجایی پوشش را برای h/H=0.25 و نسبت‌های مختلف ارتفاع سربار به قطر تونل نشان می‌دهند. از نتایج استنباط می‌گردد که در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش و فشار داخلی، تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد. علت این مسئله این است که در شرایط یکسان و با افزایش نسبت H/D، تنش مؤثر در اطراف جداره تونل به دلیل اثر زوج هیدرومکانیکی آب و سنگ افزایش‌یافته و این موضوع روند تراوش آب به خارج تونل و درنتیجه نیروی تراوش آب را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش ارتفاع سربار و استقرار تونل در اعماق پایین‌تر نسبت به سطح زمین، گستره و توزیع تغییر شکل ایجاد شده و کرنش‌های ناشی از آن، به سمت سطح زمین کاهش یافته و از دامنه تأثیر تغییر شکل‌ها بر محیط کاسته می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، میزان اختلاف تغییر شکل تونل در اثر حالت

فشار و حالت هم‌زمانی فشار و تراوش، با افزایش نسبت سربار به قطر تونل، افزایش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که در نسبت معادل ۵، میزان اختلاف به حدود ۱۱ درصد رسیده و همچنین در صورت افزایش نسبت تراز سطح آب به سربار تونل از ۰/۲۵ به ۱، میزان اختلاف تغییر شکل‌ها روند نزولی به خود گرفته است.



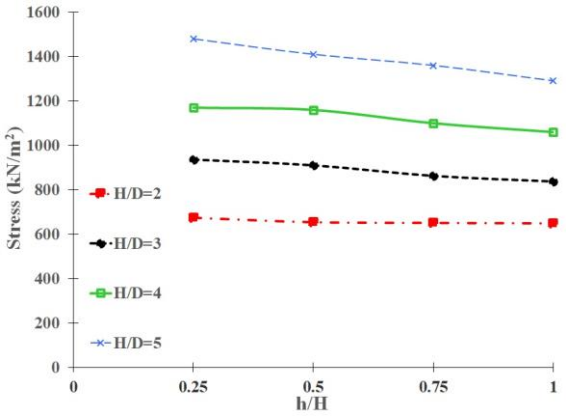
شکل (۶): بیشینه تغییر شکل تونل به ازای H/D=2 و نسبت‌های متفاوت ارتفاع تراز آب به سربار



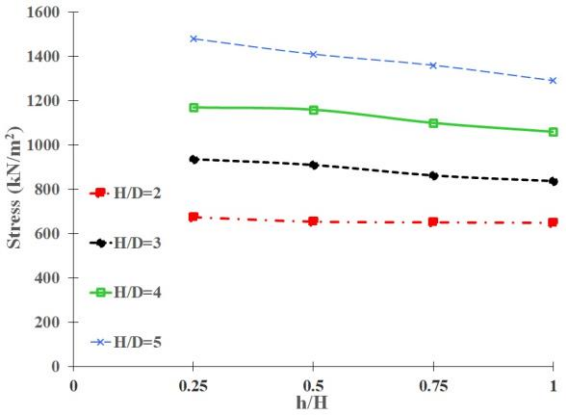
شکل (۷): بیشینه تغییر شکل تونل به ازای h/H=0.25 و نسبت‌های متفاوت ارتفاع سربار به قطر تونل

تنش وارده بر پوشش تونل‌های تحت‌فشار و کرنش‌های متناظر آن

نمودار توزیع تنش‌های وارده بر تونل موردمطالعه به ترتیب تحت اثر فشار و حالت هم‌زمانی نیروی تراوش و فشار داخلی در شکل‌های (۸) و (۹) قابل مشاهده می‌باشند. با مقایسه نتایج بدست آمده می‌توان بیان کرد که در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار داخلی آب، از مقادیر تنش وارده بر پوشش تونل با افزایش نسبت سطح تراز آب به ارتفاع سربار، کاسته شده و همچنین با افزایش ارتفاع سربار بالای تونل، به دلیل زیادشدن تنش‌های ژئواستاتیک ناشی از وزن توده مصالح بالای تاج، تنش‌های وارده به جداره نیز بیشتر می‌گردد، به‌طوری‌که در نسبت معادل ۵، میزان اختلاف نسبی به‌طور میانگین به ۲ درصد رسیده است؛ بنابراین این نکته قابل‌ذکر است که تغییر ارتفاع قرارگیری تونل نسبت به سطح زمین اثر قابل‌توجهی بر تنش‌های وارده داشته و تأثیر آن نسبت به تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی فراوان است.



شکل (۸): نمودار تنش وارده بر پوشش تونل در حالت اعمال فشار داخلی



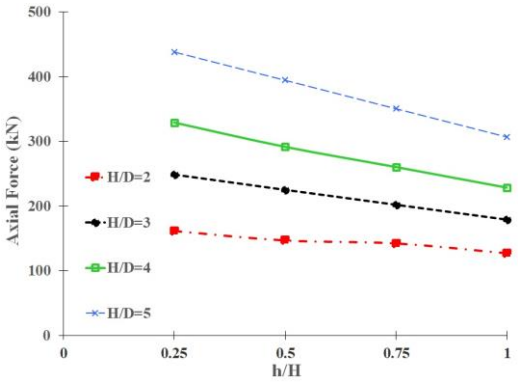
شکل (۹): نمودار تنش وارده بر پوشش تونل در حالت تأثیر هم‌زمان فشار داخلی و تراوش آب

با توجه به نتایج محاسبه شده و روی دادن تغییر شکل‌ها در محدوده الاستیک، در خصوص کرنش نیز چنین می‌توان استنباط نمود که در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش و فشار، کرنش کل روند نزولی و کرنش برشی روند افزایشی را نسبت به حالت اثر فشار داشته است. همچنین میزان کرنش کل و کرنش برشی با افزایش در یک نسبت مشخص سربار به عمق تونل، با بالا رفتن سطح تراز آب و افزایش نسبت آن به سربار، کرنش کل و کرنش برشی کاهش

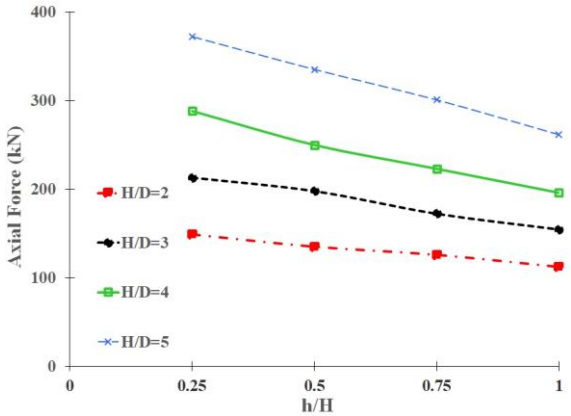
می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت عمق سربار به قطر تونل یا به عبارتی استقرار تونل در اعماق پایین‌تر، میزان کرنش کلی و برشی به دلیل افزایش تنش‌های وارده بر جداره تونل افزایش‌یافته است.

نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی وارده بر پوشش تونل‌های تحت‌فشار

نتایج نمودار نیروی محوری وارد بر پوشش تونل موردمطالعه در راستای محور آن به ترتیب تحت اثر فشار داخلی آب و هم‌زمانی نیروی تراوش و فشار داخلی مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، نشان می‌دهند که در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار وارد بر تونل، میزان نیروهای محوری وارده، کاهش‌یافته و همچنین با افزایش تراز سطح آب زیرزمینی، برخلاف روند افزایشی نیروی داخلی تحت اثر زیادشدن نسبت H/D، نیروی محوری کاهش‌یافته است. با زیادشدن ارتفاع آب زیرزمینی، فشار هیدرواستاتیکی خارجی وارد بر پوشش باعث تعدیل تنش‌های پوشش ناشی از فشار هیدرولیکی داخلی می‌شود. به عبارت ساده‌تر، فشار هیدرولیکی داخل تونل در جهت بازشدگی و فشار هیدرواستاتیک خارجی باعث بسته شدن سطح مقطع می‌گردد، که این موضوع باعث به وجود آمدن توازن نیرو در پوشش خواهد شد.

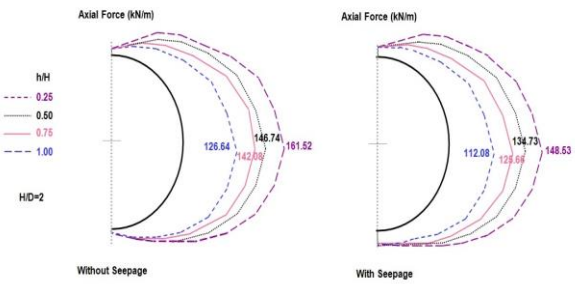


شکل (۱۰): نمودار نیروی محوری وارد بر پوشش تونل در حالت اعمال فشار داخلی آب



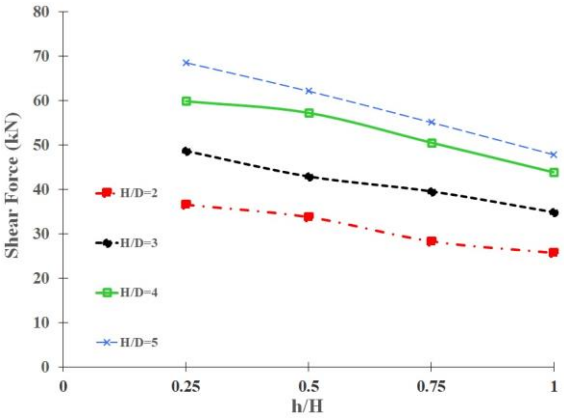
شکل (۱۱): نمودار نیروی محوری وارد بر پوشش تونل در حالت تأثیر هم‌زمان فشار داخلی و تراوش آب

شکل (۱۲)، تغییرات نیروی محوری وارد بر پوشش تونل در راستای عمود بر محور آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروی محوری وارده در تاج و کف تونل دارای مقادیر کمینه بوده و بیشینه مقدار آن در محدوده میانی راستای عمود بر محور آن به وجود می‌آید و در حالتی که نیروی تراوش و فشار داخلی به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته‌شده، دارای مقادیر کمتری نسبت به اعمال فشار داخلی است. این موضوع با توجه به جهت‌گیری المان‌های پوشش قابل توجیه است. به عبارتی، المان‌هایی که در حد میانی قرار دارند، تحت نیروی خالص فشاری قرار دارند و بافاصله گرفتن از کناره‌ها ترکیب نیروهای فشاری و کششی به وجود آمده، باعث کاهش تنش‌های محوری در پوشش می‌گردند. همچنین با قرارگیری در تاج تونل به دلیل اینکه تونل با در نظرگیری سرباره موجود بر آن، درجه آزادی بیشتری نسبت به کناره‌ها دارد، در اثر بارهای هیدرولیکی جابجا شده و نیروهای داخلی کمتری در پوشش به وجود خواهد آمد.

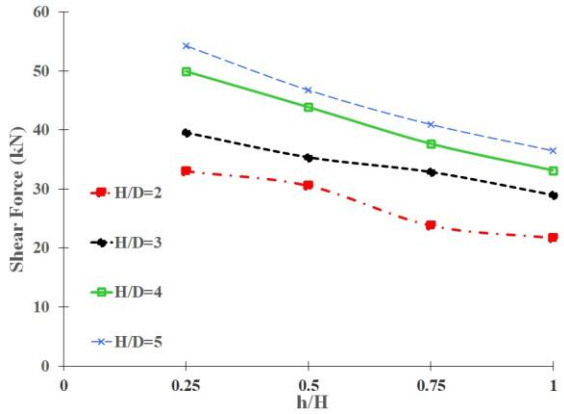


شکل (۱۲): نمودار تغییرات نیروی محوری وارد بر پوشش تونل در راستای عمود بر محور آن

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، نمودار نیروهای برشی در پوشش تونل‌ها به ترتیب تحت اثر فشار و فشار و تراوش توأمان، نمایش داده‌شده و نتیجه می‌گردد که در صورت اعمال فشار و تراوش هم‌زمان بر تونل، میزان نیروهای برشی وارده بر پوشش تونل کاهش‌یافته است. همچنین با افزایش تراز سطح آب زیرزمینی، نیروی برشی کاهش‌یافته و این در حالی است که نیروی برشی تحت اثر زیادشدن نسبت H/D، افزایش‌یافته است. همان‌طور که در قبل گفته شد، فشارهای هیدرولیکی خارجی (فشار آب پشت پوشش) باعث کاهش تنش‌های رخ‌داده در پوشش به دلیل فشار داخلی آب است.

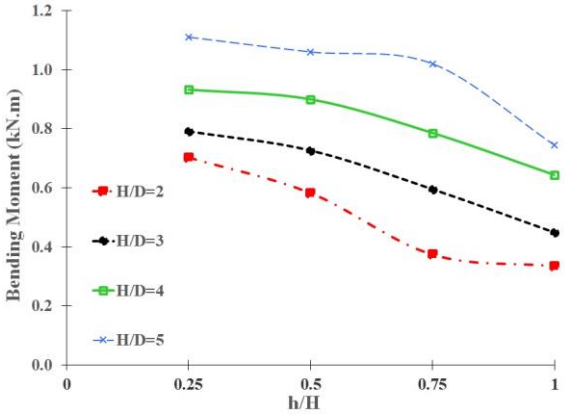


شکل (۱۳): نمودار تغییرات نیروی برشی وارد بر جداره تونل در حالت اعمال فشار داخلی

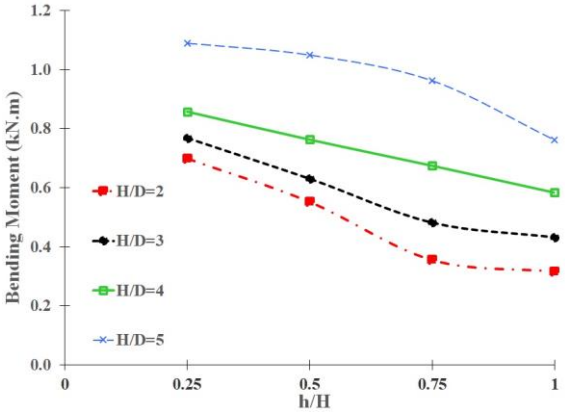


شکل (۱۴): نمودار تغییرات نیروی برشی وارد بر جداره تونل در حالت تأثیر هم‌زمان فشار داخلی و تراوش آب

نمودار تغییرات لنگر خمشی وارد بر جداره تونل در دو حالت اعمال فشار داخلی آب و هم‌زمانی تأثیر نیروی تراوش و فشار آب به ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) آورده شده است. با مقایسه نمودارها و نتایج بدست آمده، می‌توان بیان نمود که در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار داخلی وارد بر پوشش تونل، میزان لنگر خمشی وارده روند کاهشی به خود گرفته است. به‌طوری‌که با کاهش ارتفاع سربار روی تونل، از مقادیر لنگر خمشی وارده به دلیل کاهش تنش قائم وارده بر تاج و جداره ناشی از سربار کاسته می‌شود. همچنین با افزایش تراز سطح آب زیرزمینی، برخلاف روند افزایشی که لنگر خمشی تحت اثر زیادشدن نسبت H/D پیدا می‌کند، لنگر خمشی کاهش یافته است.



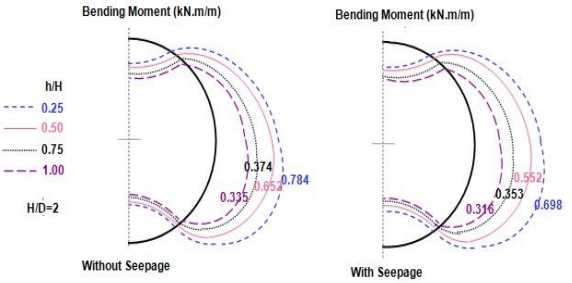
شکل (۱۵): نمودار تغییرات لنگر خمشی وارد بر جداره تونل در حالت اعمال فشار داخلی



شکل (۱۶): نمودار تغییرات لنگر خمشی وارد بر جداره تونل در حالت تأثیر هم‌زمان فشار داخلی و تراوش آب

همان‌طور که در شکل (۱۶) دیده می‌شود، لنگر خمشی اعمالی بر جداره تونل در محدوده نیمه میانی راستای عمود بر محور آن، بیشتر واردشده و مقادیر لنگر در محدوده تاج نیز از کف تونل کمتر است. همچنین با توجه به توزیع لنگر در جداره می‌توان بیان نمود که بیشینه لنگر خمشی وارده نیز در محدوده یک‌چهارم تحتانی جداره روی‌داده است. با

توجه به توضیحات شکل (۱۲)، به دلیل نحوه قرارگیری المان‌های پوشش و نیز میزان درجه آزادی پوشش (در کف، کناره‌ها و تاج)، میزان توزیع نیروها و لنگرهای داخلی متفاوت خواهد بود، به‌گونه‌ای که لنگر رخ‌داده در تاج به دلیل ایجاد جابجایی‌های بیشتر در این قسمت، تلاش‌های داخلی کمتری را در پوشش باقی می‌گذارند.



شکل (۱۶): نمودار تغییرات لنگر خمشی وارد بر جداره تونل در راستای عمود بر محور آن

همان‌طور که از نتایج ارائه شده استنباط می‌گردد، با افزایش عمق تونل و بیشتر شدن ارتفاع سربار روی آن، نیروی برشی و لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل به دلیل افزایش فشار همه‌جانبه، روند افزایشی داشته است. همچنین در اثر بالا رفتن سطح تراز آب نسبت به تاج تونل، فشار هیدرواستاتیک آب افزایش یافته و موجب کاهش تنش مؤثر وارد بر جداره تونل گردیده، که در این حالت فشار بالابرنده وارد بر پوشش افزایش یافته و در اثر اعمال نیروی تراوش هم‌زمان، نیروی برشی و لنگر خمشی ایجاد شده، کاهش یافته است. نکته قابل ذکر دیگر این است که روند و نرخ تغییرات نیروی برشی و لنگر خمشی با تغییرات نسبت h/H در تمامی نسبت‌های مختلف H/D تقریباً یکسان است. به‌طوری‌که تا نسبت h/H برابر ۰/۷۵، نرخ کاهشی دارای روندی مشابه بوده و پس از آن هر چه مقادیر H/D افزایش می‌یابد، روند کاهشی مقادیر لنگر خمشی به علت تأثیر هم‌زمانی تنش‌های ناشی از سربار، فشار هیدرواستاتیک و فشار داخلی تونل، بیشتر شده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، با مدل‌سازی تونل‌های آب‌بر تحت‌فشار و بررسی رفتار آن‌ها در اثر هم‌زمانی اعمال فشار داخلی و نیروی تراوش آب، تغییرات نسبت ارتفاع سربار به قطر تونل و همچنین نسبت تراز آب زیرزمینی به ارتفاع سربار، در نظر گرفته‌شده و تأثیر آن‌ها بر تغییر شکل و کرنش‌ها، نیروی محوری و برشی و همچنین لنگر خمشی پوشش داخلی تونل بررسی‌شده است. ابتدا صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار در مقایسه نتایج با پژوهش‌های گذشته انجام گردیده و بعد از حصول اطمینان از صحت و تطابق نتایج، به بررسی رفتار پوشش تونل‌های تحت‌فشار پرداخته شد. پس از انجام تحلیل‌ها و مقایسه نتایج بدست آمده برای تونل‌های تحت اثر فشار و نیروی تراوش هم‌زمان، می‌توان نتیجه گرفت که:

۱- با افزایش نسبت تراز سطح آب به سربار تونل، تغییر شکل کلی تونل روند نزولی داشته، یا به‌عبارت‌دیگر با نزدیک شدن تراز سطح آب زیرزمینی به سطح زمین، تغییر شکل تونل تا حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع سربار و استقرار تونل در اعماق پایین‌تر، گستره و توزیع تغییر شکل ایجادشده و کرنش‌های ناشی از آن‌ها، به سمت سطح زمین کاهش یافته و از دامنه تأثیر تغییر شکل‌ها در محیط کاسته می‌شود.

۲- در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار داخلی وارد بر تونل، میزان تنش‌های وارده بر پوشش آن افزایش پیدا کرده است. همچنین میزان اختلاف تنش در پوشش تونل تحت اثر حالت فشار و نیروی تراوش و حالت فشار هم‌زمان، با افزایش نسبت H/D بیشتر می‌شود.

۳- میزان کرنش‌ها با افزایش در یک نسبت مشخص سربار به عمق تونل، با بالا رفتن سطح تراز آب و افزایش نسبت آن به سربار، کاهش‌یافته، ولی با افزایش نسبت عمق سربار به قطر تونل، مقادیر آن افزایش می‌یابد.

۴- در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار داخلی وارد بر پوشش تونل، میزان نیروهای وارده بر آن کاهش‌یافته و با افزایش تراز سطح آب زیرزمینی، مقادیر نیروهای محوری و برشی و همچنین لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل کاهش می‌یابد.

مراجع

۱- نظام فنی و اجرایی، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی جمهوری اسلامی ایران (۱۳۸۴)، راهنمای طراحی سازه‌ای تونل‌های آب‌بر- نشریه شماره ۳۰۹.

2- Bian. K. Xiao. M. Chen. J. 2009. Study on coupled seepage and stress fields in the concrete lining of the underground pipe with high water pressure. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 24.pp. 287-295.

3- Dadashi, E. Noorzad, A. Shahriar, K. and Goshtasbi, K. (2017). "Hydro-mechanical interaction analysis of reinforced concrete lining in pressure tunnels". Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 69, pp.125-132.

4- Fahimifar, A. Ghadami. H. Ahmadvand. M. 2014. Elasto-Plastic Analysis of Tunnels below Groundwater Table, Considering Seepage Effect. Vol. 10, No. 4.

5- Fahimifar, A. Ghadami. H. Ahmadvand. M. Abdolmaleki. A. 2013. Analysis of Underwater Tunnels Considering Strain-Softening Behavior in Plastic Zone. Tunneling & Underground Space Engineering. Vol. 1. No. 1. pp. 13-28.

6- Lee, I. Nam, S.W. 2006. Seepage force considerations in tunelling. Internartional symposium on underground excavation and tunelling, Bangkok, Thailand. pp. 21-27

7- Olumide, A. B. Marenco. M. 2012. A Finite Element Model for Optimum Design of Plain Concrete Pressure Tunnels under High Internal Pressure. International Journal of Science and Technology. Vol. 1. No. 5. pp. 216-223.

8- Olumide. A.B. 2013. Numerical Coupling of Stress and Seepage in the Design of Pressure Tunnel under to High Internal Water Pressure. International Journal of Engineering and Technology. Vol. 3. No. 3. pp. 235-244.

9- Perazzelli, P. Leone. T. Anagnostou. G. 2014. Tunnel face stability under seepage flow conditions. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 43.pp. 459-469.

10- Salehzadeh, H. 2008. Engineering and design tunnels and shafts in rock, Sahel Consulting Engineering Co.

11- Schleiss, A.J. (1986). "Design of pervious pressure tunnels", International Journal of Water Power and Dam Construction, Vol. 38, No. 5, pp. 21-26.

12- Simanjuntak, T.D.Y.F. Marence, M. Mynett, A.E. and Schleiss, A. (2013), "Mechanical–hydraulic interaction in the cracking process of pressure tunnel linings", International Journal on Hydropower and Dams, Vol. 20, pp. 112-119.

13- Simanjuntak, T.D.Y.F. Marence, M. Schleiss, A. and Mynett, A.E. (2012). "Design of pressure tunnels using a finite element model". International Journal on Hydropower & Dams, Vol. 19, pp.98-105.

14- Williams, O. 1997. Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock. Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC 20314-1000.

15- Zhang, W. Dai, B. Liu, Z. and Zhou, C. (2018). "Numerical algorithm of reinforced concrete lining cracking process for pressure tunnels". Engineering Computations.

16- Zhou, Y. Su, K. and Wu, H. (2015), "Hydro-mechanical interaction analysis of high pressure hydraulic tunnel", Tunnelling & Underground Space Technology, Vol. 47, pp. 28-34.