

تأثیر شرایط زهکشی در توزیع فشار آب حفره‌یی و تنش‌های پوشش در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی

میلاذ سوری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۵)
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۲/۲، ص. ۳۲-۲۵

حفاری تونل زیر سطح آب زیرزمینی در زمین‌های آبرفتی، باعث اندرکنش بلندمدت بین پوشش تونل و زمین اطراف می‌شود. در این مطالعه به منظور ارزیابی آثار به‌کارگیری زهکشی محیطی در تونل در توزیع فشار آب حفره‌یی و میزان بار وارد بر پوشش، مدل‌سازی عددی تونل واقع در زیر سطح آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار به روش تفاضل محدود انجام شده است. شرایط مرزی مختلفی از قبیل: تونل زهکشی شده، تونل زهکشی نشده، و سیستم زهکشی با نفوذپذیری متغیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثر پارامترهای هندسی تونل از قبیل: قطر و ارتفاع خاک روباره و همچنین تراز آب زیرزمینی مورد بررسی و آثار مخرب بسته شدن سیستم زهکشی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که با به‌کارگیری زهکشی محیطی در دیواره‌ی تونل، به چه میزان فشار آب وارد بر پوشش کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش عملکرد سیستم زهکشی در بلندمدت، بار فشار آب حفره‌یی وارد بر پوشش افزایش می‌یابد، لذا نرخ افزایش مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: پوشش تونل، زهکشی، فشار آب حفره‌یی، گرفتگی زهکش.

۱. مقدمه

انجام شده است. برای مثال در پژوهشی در سال ۱۹۹۳ نشان داده شده است که با رویکرد کشتان در تونل‌های عمیق، بارهای وارد بر پوشش تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده برابر هستند.^[۵] همچنین پژوهشگران دیگری با استفاده از روش المان محدود در تونل‌های عمیق نشان داده‌اند که تنش‌های پوشش در شرایط زهکشی شده تقریباً برابر ۷۵٪ شرایط اعمال فشار هیدرواستاتیک خواهد بود.^[۶] در مطالعه‌ی موردی که در سال ۲۰۰۱، بر روی خط ۵ متری شهر سنول انجام شده است،^[۷] با فرض شرایط جریان حالت پایا، نیروهای وارد بر پوشش تونل در حدود ۳۰٪ شرایط پوشش نفوذناپذیر به‌دست آمده‌اند.

مشکل زمان‌بر بودن مطالعات میدانی، به‌طور چشم‌گیری تعداد مدارک رفتارنگاری بلندمدت تونل را محدود کرده است. هر چند مطالعات میدانی مهمی در سال ۱۹۹۵ انجام شده است، که در آن مقادیر فشار کل خاک و آب اطراف پوشش سگمندی بتنی تونل با قطر ۵ متر و ارتفاع خاک روباره‌ی ۳۲ متر را که با سیستم سپری دوغابی حفاری شده بود، اندازه‌گیری و در نتایج آن اعلام شده است که سهم بزرگی از بار زمین از فشار آب بوده و مؤلفه‌ی تنش مؤثر خاک ناچیز گزارش شده است.^[۸] علاوه بر مشکل رفتارنگاری بلندمدت صحرائی، که پیش‌تر به آن اشاره شده است، پیچیدگی مسئله و عوامل متعدد تأثیرگذار در رفتار بلندمدت، مطالعات در این زمینه را محدود کرده است. در نتیجه مسائل طراحی مربوط به فشار آب حفره‌یی به‌صورت کیفی است و تحلیل عددی با توجه به امکان در نظر گرفتن

احداث تونل در زیر سطح آب زیرزمینی از جنبه‌های مختلفی حائز اهمیت است. وجود آب در زمین اطراف تونل مشکلاتی را در بر خواهد داشت. جریان ورودی آب به داخل تونل می‌تواند موجب توقف عملیات حفاری و همچنین افزایش هزینه‌ی عملیات شود. از شایع‌ترین آثار بلندمدت آب زیرزمینی، تراوش آب و فشار آب حفره‌یی خارجی وارد بر پوشش تونل هستند.^[۱] تراوش آب، مشکلات سازه‌یی و عملیاتی در سیستم نگهداری به‌خصوص در تونل‌های راه‌آهن و بزرگراهی به‌وجود می‌آورد. افزایش فشار آب حفره‌یی نیز تراوش آب و خرابی پوشش را تسریع می‌کند و باعث خرابی تونل می‌شود. مطالعه بر روی تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی پیش از این نیز توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است. در پژوهش‌هایی در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳، روابط تحلیلی برای تخمین نیروهای محوری، ممان‌های خمشی و تنش‌های ایجادشده در پوشش تونل‌های کم‌عمق واقع در زمین‌های اشباع و همچنین روابط مشابهی برای تونل‌های عمیق تحت شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است.^[۲] همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۰)، روابطی به‌منظور ارزیابی فشار آب حفره‌یی وارد بر پوشش تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی ارائه شده است.^[۳]

مطالعات دیگری نیز با استفاده از روش‌های عددی توسط برخی پژوهشگران

* نویسنده مسئول

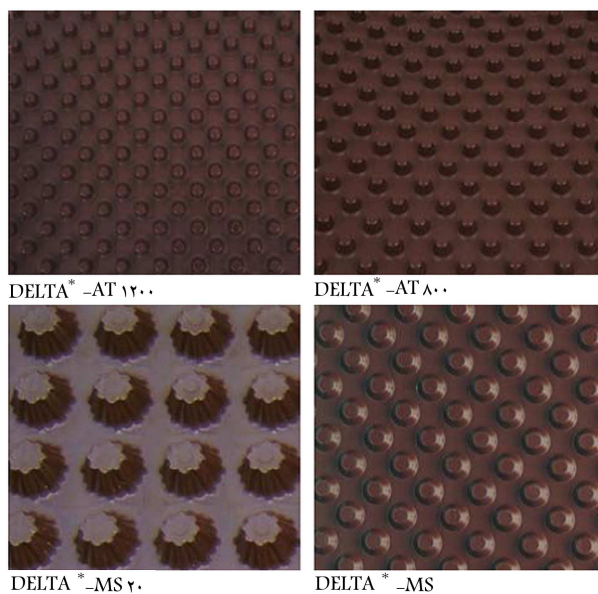
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۳، اصلاحیه (۱۳۹۳/۱۰/۲۰)، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۲۰.

پیچیدگی‌های مدل می‌تواند به‌عنوان ابزار جایگزین برای ارزیابی این مسئله استفاده شود.

۲. پوشش تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی

معمولاً تونل‌ها به دو نوع پوشش اولیه و ثانویه احتیاج دارند. پوشش اولیه برای مقاومت در برابر بارهای وارده از زمین در حین حفاری طراحی می‌شود. پوشش‌های ثانویه باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند نیروهای ناشی از خرابی پوشش‌های اولیه، از بین رفتن مقاومت زمین، و همچنین تغییرات تنش‌های موجود در محیط اطراف تونل را تحمل کنند.^[۹] محافظت مؤثر پوشش بتنی در برابر تراوش آب زیرزمینی به شدت ضروری است. کیفیت پوشش و در نتیجه نفوذپذیری آن مطابق با نسبت آب به سیمان متغیر است. زمانی که این نسبت تغییر کند، پوشش بتنی از حالت نفوذناپذیر تبدیل به حالت نفوذپذیر و در حالت بحرانی‌تر، موجب ایجاد ترک خوردگی در پوشش بتنی می‌شود. همچنین فشار هیدرواستاتیک وارد بر پوشش نفوذناپذیر، تنش‌ها و کرنش‌های بزرگی را به سازه‌ی تونل تحمیل می‌کند. در بسیاری از موارد، زهکشی مؤثر توسط ورق‌های زهکش ساخته‌شده از پلاستیک پلیمرهایی مانند پلی‌اتیلن می‌تواند آسان و با هزینه‌ی کم از شدت مشکلات بکاهد (شکل ۱).^[۱۰]

در متون فنی، تعداد کمی از مطالعات به بارگذاری هیدرواستاتیکی پوشش ثانویه پرداخته‌اند. طراحی بار پوشش ثانویه به اندرکنش پوشش اولیه و ثانویه، مقاومت پوشش اولیه، و سیستم زهکشی بستگی دارد. دو مورد از شکست پوشش تونل، که با فشار آب حفاری وارد بر پوشش همراه بوده است، در پژوهشی در سال ۱۹۹۵،^[۱۱] گزارش شده است؛ که در هر دو مورد، تونل با پوشش اولیه و ثانویه بوده و شکست سازه‌ی فقط در پوشش ثانویه مشاهده شده است. در چند مورد خرابی، که در گذشته اتفاق افتاده است، برخی پژوهشگران مهم‌ترین منبع شکست در پوشش ثانویه‌ی تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی را فشار آب حفاری اعلام کرده‌اند.^[۱۲]



شکل ۱. انواع مختلف زهکش‌های ورقه‌ی.^[۱۰]

۳. ویژگی‌های عمومی مدل

در این نوشتار با استفاده از نرم‌افزار به روش تفاضل محدود،^[۱۳] که برای شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته براساس روش تفاضل محدود تهیه شده و همچنین با قابلیت تحلیل همبسته‌ی^۱ مکانیکی - هیدرولیکی است، رفتار هیدرومکانیکی تونل واقع در محیط آبرفتی اشباع مورد بررسی قرار گرفته است. این شرایط به‌عنوان متغیرهای اصلی در تحلیل استفاده شده است:

۱. پوشش زهکشی شده و زهکشی نشده،

۲. تغییرات نفوذپذیری سیستم زهکش در محیط تونل.

در ادامه، پس از معرفی هندسه‌ی مدل عددی و مشخصات به‌کاررفته در مصالح محیط و پوشش تونل در بخش ۴، نحوه‌ی مدل‌سازی در بخش ۵ و صحت‌سنجی مدل در بخش ۶، به‌منظور بررسی میزان کارایی زهکش در اعماق مختلف قرارگیری تونل با قطرهای مختلف و ترازهای مختلف آب زیرزمینی، نتایج تحلیل‌های هیدرولیکی - مکانیکی بر روی مدل‌های A تا F (جدول ۱) در قالب فشار آب حفاری (بخش ۱.۱.۷)، و تنش‌های وارد بر پوشش (بخش ۲.۰.۷) ارائه شده‌اند. مقایسه میان میزان کاهش که در اثر زهکشی در فشار آب حفاری و تنش‌های پوشش به‌وجود می‌آید، به‌عنوان معیاری برای تعیین کارایی زهکش در اعماق مختلف و ترازهای مختلف آب زیرزمینی استفاده شده است. همچنین در بخش ۳.۰.۷، نتایج حاصل از مدل‌سازی پدیده‌ی بسته‌شدن فیلتر^۲ در قالب توزیع فشار آب حفاری اطراف تونل و نمودار پیشرفت فشار آب حفاری ناشی از کاهش نفوذپذیری سیستم زهکشی تونل ارائه شده‌اند.

۴. هندسه‌ی مدل و مشخصات مصالح

مدل مورد بررسی، یک تونل دایروی واقع در محیط آبرفتی ماسه‌ی متراکم متوسط است. به‌دلیل متقارن بودن مقطع دایروی تونل، نیمی از تونل به‌منظور کاهش عملیات محاسباتی مدل‌سازی شده است. مرزهای کناری و پایینی مدل نفوذناپذیر هستند و هیچ‌گونه آبی از مرزهای کناری و پایینی به بیرون منتقل نمی‌شود. از جابه‌جایی افقی در امتداد مرزهای قائم و از جابه‌جایی قائم در امتداد مرزهای افقی پایینی ممانعت به‌عمل آمده است. در تمامی تحلیل‌ها، شرایط کرنش به‌صورت صفحه‌ی فرض شده است. شبکه‌ی المان‌ها و هندسه‌ی مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۳،

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل‌های عددی.

نام مدل	D (m)	(C/D)	(H/C)		
			۱	۲	۳
A	۶	۲	۰	۰٫۵	۱
B	۶	۳	۰	۰٫۵	۱
C	۶	۴	۰	۰٫۵	۱
D	۱۰	۲	۰	۰٫۵	۱
E	۱۰	۳	۰	۰٫۵	۱
F	۱۰	۴	۰	۰٫۵	۱

D: قطر تونل.

C: ارتفاع روباره،

H: ارتفاع تراز آب زیرزمینی روی تاج تونل.

جدول ۲. مشخصات مصالح خاک مدل.

نوع مصالح	ماده‌ی متراکم متوسط	
مدول کشسانی	E (Mpa)	۵۰
ضریب پواسون	ν	۰٫۳
مدول برشی	G (Mpa)	۱۹٫۲
مدول حجمی	K (Mpa)	۴۱٫۷
زاویه‌ی اصطکاک	ϕ	۳۳
چگالی خشک	λ_d (t/m ^۳)	۱٫۷
چگالی اشباع	λ_{sat} (t/m ^۳)	۲
نفوذپذیری	k (m/s)	۱۰ ^{-۶}

جدول ۳. مشخصات پوشش اولیه.

بتن	مصالح پوشش	
مدول کشسانی	E (Mpa)	۱۵
ضریب پواسون	ν	۰٫۲
چگالی	λ (t/m ^۳)	۲
ضخامت	t (m)	۰٫۲

جدول ۴. مشخصات پوشش نهایی.

بتن	مصالح پوشش	
مدول کشسانی	E (Mpa)	۲۵٫۷
ضریب پواسون	ν	۰٫۲
چگالی	λ (t/m ^۳)	۲٫۵
ضخامت	t (m)	۰٫۴

داده شده است، در مدل‌های عددی، ۳ پارامتر H ، C و D در مقادیر مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و آثار آن در پارامترهای خروجی سنجیده شده است.

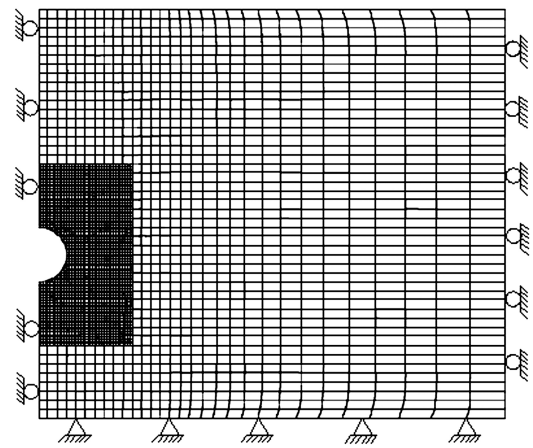
۵. مراحل مدل‌سازی

مراحل ساخت مدل شامل: گام‌های حفاری و نصب پوشش با استفاده از کم و اضافه کردن المان‌ها در گام‌های مدل‌سازی صورت‌گرفته و شرایط اولیه‌ی آب زیرزمینی به صورت فشارهیدرواستاتیک به مرزهای خارجی مدل وارد شده است. مراحل شبیه‌سازی به این صورت انجام شده است:

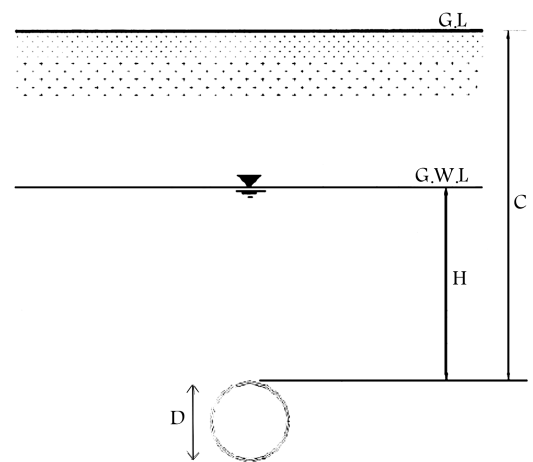
الف) مشخصات مصالح خاکی مطابق جدول ۲، تنش‌های اولیه، فشار آب حفره‌ی اولیه، و شرایط مرزی تکیه‌گاهی ذکر شده به مدل اعمال شده و مدل تحت این تنش‌ها به تعادل رسیده است.

ب) حفاری کامل تونل با حذف المان‌های داخلی هندسه‌ی تونل انجام شده و در ادامه، پوشش اولیه که شامل یک لایه‌ی شاتکریت با مشخصات ذکر شده در جدول ۳ است، نصب شده است. در این حالت فرض شده است که با زهکشی، تراز آب زیرزمینی تا زیرکف تونل پایین آورده شود و بعد از نصب پوشش نهایی، تراز آب به جای اولیه‌ی خود بازگردد.

ج) بعد از به تعادل رسیدن مدل، پوشش بتنی نهایی، که با استفاده از ترکیب المان‌های ۴ و المان جامد ۵ شبیه‌سازی شده و مشخصات آن در جدول ۴ آمده است، نصب شده است. چگالی بتن $\rho = 2500$ (kg/m^۳) است. مقاومت بتن



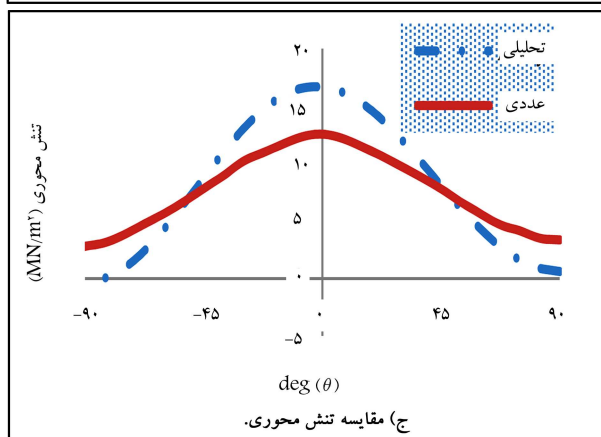
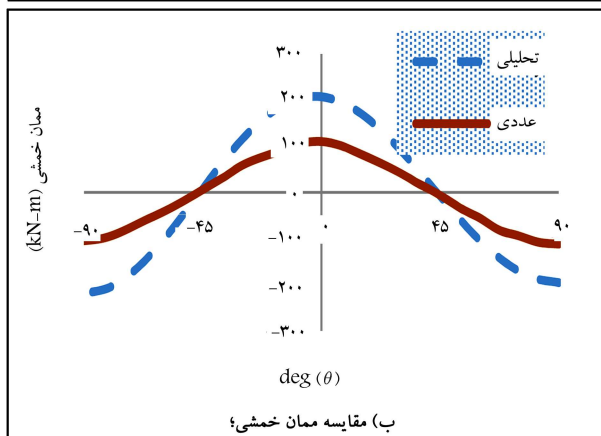
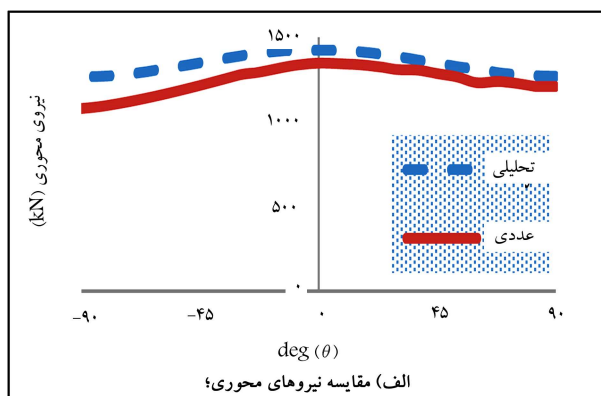
شکل ۲. مشخصات هندسی مدل‌های عددی.



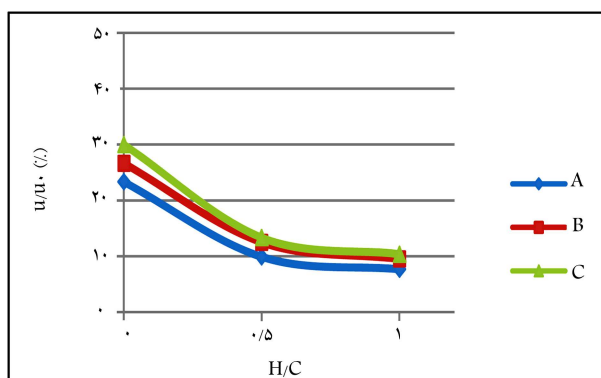
شکل ۳. محل قرارگیری تونل و موقعیت تراز آب زیرزمینی.

محل قرارگیری تونل و موقعیت تراز آب زیرزمینی در مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. فاصله‌ی بین تونل حفاری شده و مرزهای خارجی به منظور حذف آثار مرزی مدل، ۴ الی ۵ برابر بزرگ‌تر از قطر تونل در نظر گرفته شده است. رفتار مصالح ماسه‌ی متراکم متوسط، کسسان خمیری در نظر گرفته شده و از مدل رفتاری موهر-کلمب در مدل‌سازی استفاده شده است. برای مدل‌سازی پوشش‌های اولیه و نهایی نیز از مدل کسسان استفاده شده است. همچنین شرایط جریان آب زیرزمینی حالت پایا^۳ برای تمامی مراحل تحلیل همبسته لحاظ شده است. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای خاک و پوشش‌های اولیه و نهایی به ترتیب در جدول‌های ۲ الی ۴ ارائه شده است.

با تغییر ارتفاع روباره، تنش‌های وارد بر پوشش تونل و توزیع فشار آب زیرزمینی اطراف تونل دست‌خوش تغییر می‌شوند. برای حساسیت‌سنجی این عامل مهم از نسبت $(\frac{D}{B})$ استفاده می‌شود، که در آن C ارتفاع روباره و D قطر تونل است. آفت و خیز تراز آب زیرزمینی در طول مسیر تونل و در طی فصول مختلف سال و همچنین سال‌های پرباران و کم‌باران، سبب تغییر شرایط ژئوتکنیکی خاک اطراف تونل می‌شود، که نیاز به بررسی عامل مهمی مثل تراز آب زیرزمینی را پُررنگ می‌سازد. بدین منظور و جهت حساسیت‌سنجی این عامل، نسبت $(\frac{H}{C})$ تعریف شده است، که در آن H ارتفاع تراز آب زیرزمینی روی تاج تونل و C ارتفاع روباره است. ترازهای در نظر گرفته شده برای موقعیت سطح آب زیرزمینی شامل: سطح زمین، نصف ارتفاع روباره، و تراز تاج تونل هستند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج روش عددی و روش تحلیلی (مدل C۳).



شکل ۵. تغییرات پارامتر $\left(\frac{u}{u_0}\right)$ در میانه‌ی تونل با قطر ۶m.

، $E = 15100 \sqrt{f'_c}$ (ACI۳۱۸) که با توجه به رابطه‌ی $f'_c = 300$ (kg/m^2) مدول کشسانی آن $E = 2757 \times 10^{11}$ Pa به دست آمده و نسبت پواسون آن نیز $\nu = 0.2$ در نظر گرفته شده است.

د) در آخرین مرحله از مدل‌سازی، تراز آب به مکان اولیه باز می‌گردد. در حالت تونل زهکشی‌شده، یک لایه المان جامد در اطراف تونل، که نفوذپذیری آن تا 10^{-2} (m/s) افزایش یافته است، به همراه یک لوله‌ی زهکش در پایین تونل به عنوان سیستم زهکشی در نظر گرفته شده و فشار آب حفره‌ی در محیط لوله، برابر صفر قرار داده شده است. در حالت تونل زهکشی‌نشده، دیواره‌ی تونل به صورت نفوذناپذیر عمل کرده و تمام بار فشار هیدرواستاتیک ناشی از حضور آب در اطراف سیستم سازه‌ی به آن اعمال شده است. در انتها کل مجموعه، تحت تحلیل همبسته مکانیکی - هیدرولیکی قرار گرفته است.

۶. صحت‌سنجی مدل

بعد از انجام مراحل مدل‌سازی به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، مقادیر نیروی محوری، ممان خمشی، و تنش محوری حاصل از تحلیل عددی با مقادیر به دست آمده از روابط تحلیلی ارائه شده توسط بوبت^[۲] برای تونل‌های واقع در زمین‌های اشباع مقایسه شده‌اند. در شکل ۴، هم‌خوانی خوبی بین نتایج تحلیل عددی و روابط تحلیلی مشاهده می‌شود. خاطرنشان می‌شود هموارتر بودن منحنی‌های تحلیل عددی در نتیجه‌ی مدل‌سازی رفتار مصالح خاکی به صورت کشسان خمیری است. در حالی که جهت سهولت، این رفتار در روابط تحلیلی بوبت^[۲] به صورت کشسان فرض شده است.

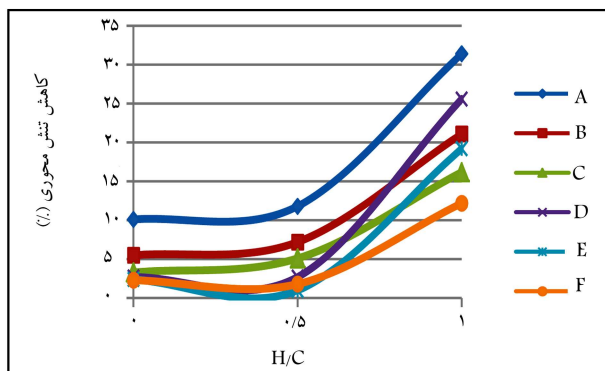
۷. نتایج تحلیل‌های انجام شده

در ادامه، نتایج تحلیل در قالب تغییرات فشار آب حفره‌ی وارد بر پوشش ثانویه ناشی از سیستم زهکشی، در قطرهای و عمق‌های مختلف تونل به همراه ترازهای مختلف آب زیرزمینی، تغییرات تنش‌های ایجاد شده در پوشش، و تغییرات توزیع فشار آب حفره‌ی ناشی از کاهش عملکرد سیستم زهکشی در زمین اطراف تونل ارائه شده‌اند.

۷.۱. تغییرات فشار آب وارد بر پوشش در اثر زهکشی

به منظور مقایسه‌ی کارایی لایه‌ی زهکش در مدل‌های مختلف، در شکل ۵ میزان تغییرات پارامتر فشار آب حفره‌ی نرمالیزه شده $\left(\frac{u}{u_0}\right)$ در میانه‌ی تونل که در آن، u فشار آب حفره‌ی در شرایط تونل زهکشی‌شده و u_0 فشار آب حفره‌ی در حالت هیدرواستاتیک و تونل زهکشی‌نشده است، نمایش داده شده است ($D = 6\text{m}$). مشاهده می‌شود که در هر یک از مدل‌های A، B و C با بالا رفتن تراز آب زیرزمینی (H) از تراز تاج تونل تا میانه‌ی عمق روباره، به ازاء ارتفاع روباره‌ی ثابت، کارایی زهکش افزایش یافته و میزان کاهش در فشار آب حفره‌ی بیشتر شده است. در ادامه‌ی بالا رفتن سطح آب زیرزمینی تا سطح زمین یا کاهش ارتفاع روباره، میزان کاهش پارامتر $\left(\frac{u}{u_0}\right)$ روند کاهشی دارد. با وجود این، بیشترین کاهش در فشار آب حفره‌ی مربوط به موقعیت تراز آب زیرزمینی در سطح زمین است.

با مقایسه‌ی مدل‌های A، B و C جهت ارزیابی اثر ارتفاع روباره (C) ملاحظه می‌شود که بیشترین میزان کاهش در مدل A۳ مشاهده شده و فشار آب در حالت زهکشی‌شده کمتر از ۸٪ حالت هیدرواستاتیک بوده است. این امر نشان‌دهنده‌ی آن



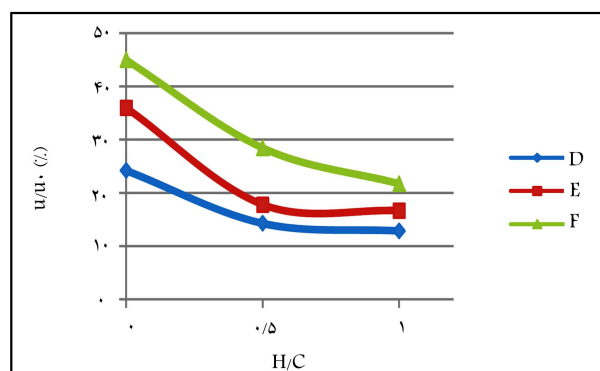
شکل ۷. مقادیر بیشینه‌ی کاهش در تنش محوری ناشی از زهکشی.

بیشترین میزان کاهش تنش محوری در مدل A۳ و به میزان ۳۲٪ نسبت به تنش در حالت زهکشی نشده مشاهده شده است. خاطرنشان می‌شود که با بالاترین تراز آب زیرزمینی از میانه‌ی عمق روباره تا سطح زمین، روند کاهش قابل ملاحظه است. با مقایسه‌ی مقادیر کاهش تنش محوری در مدل‌های با ضریب $(\frac{C}{D})$ برابر، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر تونل، میزان کاهش تنش محوری، کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه‌ی مقادیر کاهش تنش محوری در مدل‌های با ضریب $(\frac{H}{C})$ برابر، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق تونل، میزان کاهش تنش محوری، کاهش می‌یابد.

۳.۷. خرابی سیستم زهکشی

پوشش ثانویه باید تمام بارهای اضافی، که بعد از نصب به وجود می‌آیند، را تحمل کند. کاهش مقاومت زمین، خزش و تغییر در شرایط آب زیرزمینی منابع بالقوه برای ایجاد بار هستند. اگر هیچ بار اضافی به وجود نیاید، پوشش ثانویه باید فقط وزن خودش را تحمل کند، که این حالت فقط در زمین‌های کاملاً خشک و یا تونل‌هایی با سیستم زهکشی کاملاً کارآمد و بدون نقص اتفاق می‌افتد.^[۱] در تونل‌هایی که پوشش اولیه و ثانویه با سیستم زهکشی جدا شده‌اند، یک لایه‌ی ژئوتکستایل سوراخ‌دار^۶ به‌عنوان فیلتر استفاده می‌شود. معمولاً در تونل‌های با سیستم زهکشی، تجمع ذرات ریز انتقال می‌یابد و فشردگی ژئوتکستایل در اثر وزن روباره به‌عنوان عوامل اختلال در عملیات زهکشی به‌شمار می‌روند. کاهش ظرفیت زهکشی در نتیجه‌ی تجمع ذرات ریز در مسیرهای زهکشی در پوشش اولیه و یا فیلتر باعث افزایش فشار آب حفره‌ی در پوشش تونل می‌شود. کاهش نفوذپذیری سیستم زهکشی در نتیجه‌ی تجمع ذرات ریز طی دو مکانیسم اتفاق می‌افتد: ۱. ذرات درشت‌تر از سائز حفره‌های فیلتر که در دهانه‌ی حفره‌ها گیر می‌کنند و مساحت سطح مقطع قابل استفاده برای جریان سیال را کاهش می‌دهند؛ ۲. ذرات کوچک‌تر از سائز حفره‌ها که با تجمع تدریجی در دهانه‌ی حفره‌های فیلتر باعث کاهش تدریجی شعاع حفره‌ها می‌شوند.^[۱۴]

در ادامه‌ی این پژوهش، پدیده‌ی بسته‌شدن فیلتر با کاهش نفوذپذیری سیستم زهکشی تونل مدل‌سازی شده است. این تذکر لازم است که در این پژوهش، کاهش نفوذپذیری زهکشی به‌صورت یکسان در محیط تونل لحاظ شده است. هر چند عملاً خرابی و گرفتگی زهکشی در طول محیط تونل متفاوت و وابسته به موقعیت سوراخ‌های زهکشی و شرایط پوشش است. همچنین نقص در کارایی زهکشی، در اثر فشردگی زهکشی و در نتیجه‌ی کاهش نفوذپذیری آن نیز اتفاق می‌افتد. مدل در نظر گرفته‌شده برای تحلیل مسئله‌ی گرفتگی زهکشی، مدل C۳ جدول ۱



شکل ۶. تغییرات پارامتر $(\frac{u}{u_c})$ در میانه‌ی تونل با قطر ۱۰ m.

است که وجود لایه‌ی زهکشی بین پوشش اولیه و نهایی در تونل‌های نسبتاً کم عمق کارآمدتر است و تا حد زیادی از فشار آب وارد بر پوشش نهایی می‌کاهد. روند تغییرات پارامتر $(\frac{u}{u_c})$ در مدل‌های D، E و F نیز که مربوط به تونل با قطر ۱۰ متر در اعماق مختلف است (شکل ۶)، همانند تونل با قطر ۶ متر است و بالاترین تراز آب، کاهش بیشتر فشار را در اثر زهکشی به همراه دارد. به‌علاوه، کارایی زهکشی در تونل‌های با عمق کمتر، بیشتر بوده و این موضوع در تونل با قطر بزرگ‌تر ملموس‌تر است.

همچنین میزان کاهش فشار آب حفره‌ی در ناحیه‌ی میانه‌ی تونل در نتیجه‌ی زهکشی در تونل‌های با قطر بیشتر، کمتر است (کارایی کمتر زهکشی)؛ و بیشترین میزان کاهش در مدل D۳ مشاهده شده است، که فشار آب در حالت زهکشی‌شده کمتر از ۱۳٪ حالت هیدرواستاتیک خواهد بود.

به‌طورکلی با در نظر گرفتن جدول ۱، مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۶ و دیگر تحلیل‌های انجام‌شده، این نتایج قابل استنتاج است:

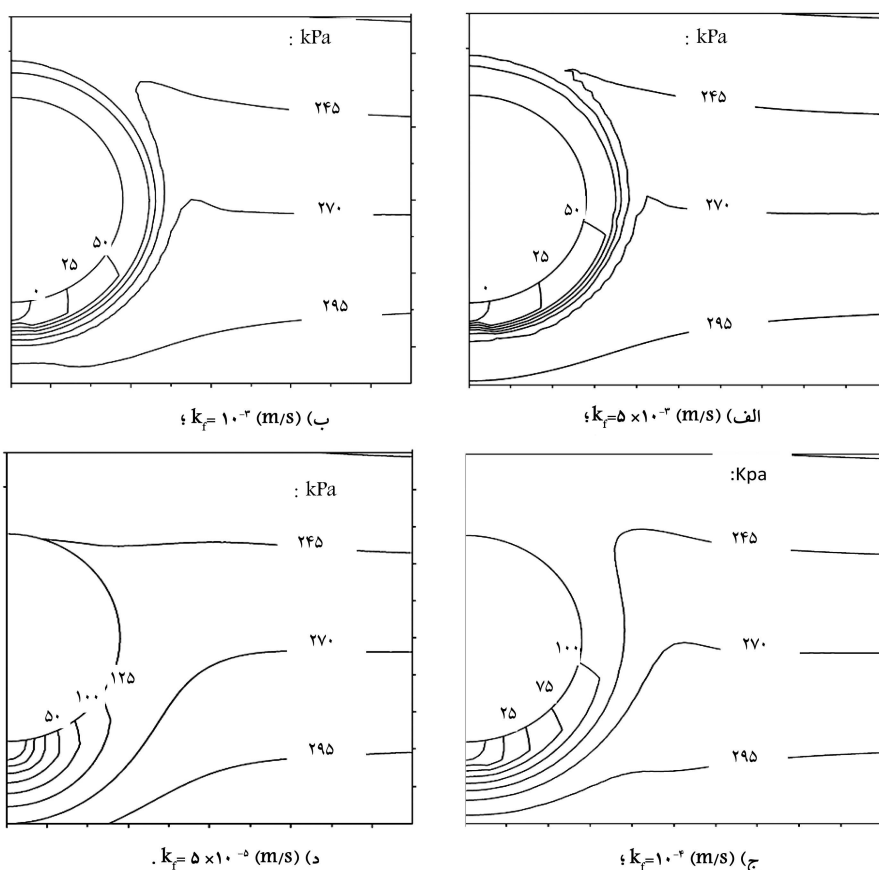
با مقایسه‌ی مقادیر فشار آب حفره‌ی در مدل‌های با نسبت $(\frac{C}{D})$ برابر، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر تونل، میزان کاهش فشار آب حفره‌ی در تاج و میانه‌ی تونل کاهش یافته است. کاهش کارایی زهکشی در اثر افزایش قطر تونل ناشی از افزایش مسیر زهکشی است.

در هر یک از مدل‌ها، با بالاترین تراز آب زیرزمینی، کارایی زهکشی در قسمت تاج و میانه‌ی تونل بیشتر است و میزان کاهش بیشتری در فشار آب حفره‌ی نسبت به حالت زهکشی نشده به‌ازاء ترازهای آب زیرزمینی بالاتر مشاهده می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل افزایش دبی ورودی به سیستم زهکشی در اثر افزایش فشار آب حفره‌ی و استفاده‌ی بهینه از ظرفیت تخلیه‌ی فیلتر باشد.

با مقایسه‌ی مقادیر فشار آب حفره‌ی در مدل‌های با نسبت $(\frac{H}{C})$ برابر، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق تونل، میزان کاهش فشار آب حفره‌ی در تاج و میانه‌ی تونل کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر، کارایی زهکشی در تونل‌های کم عمق‌تر بیشتر است و با افزایش عمق تونل، تأثیر عملکرد لایه‌ی زهکشی کمتر است. این نتیجه توسط روابط تحلیلی ارائه‌شده توسط بوبت،^[۱] نیز تأیید شده است.

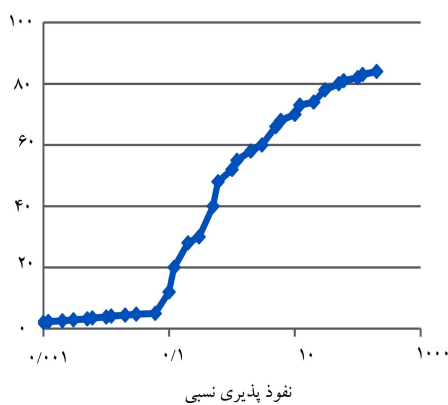
۲.۷. تغییرات تنش‌های وارد بر پوشش در اثر زهکشی

مقادیر بیشینه‌ی کاهش در تنش محوری پوشش، ناشی از کاهش فشار آب حفره‌ی در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج مشابهی برای نیروی محوری و لنگر خمشی پوشش قابل ارائه است. مشابه بخش قبل، روند کلی تغییرات نشان می‌دهد که با بالا آمدن تراز آب زیرزمینی، میزان کاهش در تنش محوری افزایش یافته است، که



شکل ۸. تغییرات توزیع فشار آب حفره‌یی اطراف تونل در نفوذپذیری‌های مختلف.

فشار آب حفره‌یی نرمالیزه شده (u/u_0)



شکل ۹. تغییرات فشار آب حفره‌یی وارد بر پوشش ثانویه با نفوذپذیری‌های نسبی مختلف.

گرفته شده است. به منظور ارزیابی فشار آب حفره‌یی تولیدشده در اثر تغییر نفوذپذیری نسبی، مقدار فشار آب حفره‌یی بلندمدت روی پوشش (u) توسط فشار آب حفره‌یی اولیه‌ی هیدرواستاتیک (u_0) ، نرمالیزه و تغییرات آن در برابر تغییرات نسبت $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right)$ در شکل ۹ نشان داده شده است. ضریب $r \cdot k_g$ بیانگر جریان ورودی آب زیرزمینی به تونل و ضریب $t_f k_f$ بیانگر ظرفیت تخلیه‌ی زهکش است. به عبارت دیگر، مقادیر کوچک ضریب بی‌بعد $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right)$ ، نشان‌دهنده‌ی بزرگی ظرفیت تخلیه‌ی سیستم زهکشی و مقادیر بزرگ آن، نشان‌دهنده‌ی ظرفیت کم سیستم زهکشی نسبت به

قطر تونل: ۶ متر، عمق روباره ۲۴ متر و تراز آب زیرزمینی در سطح زمین) است. در شکل ۸، تغییرات توزیع فشار آب حفره‌یی اطراف تونل در نفوذپذیری‌های مختلف نشان داده شده است.

شکل ۸ الف، توزیع فشار آب حفره‌یی با زهکش کارآمد را در شرایطی که $k_f = 5 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}$ است، نشان می‌دهد. سرانجام با پیشرفت گرفتگی زهکش (شکل ۸ د)، نفوذپذیری زهکش به $k_f = 5 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ می‌رسد و زهکش تقریباً اثر خود در کاهش فشار آب محیطی اطراف تونل را از دست می‌دهد. در حالت الف، بار وارد بر پوشش ثانویه کم است (شکل ۸ الف)؛ ولی در حالت د، این بار قابل ملاحظه و تأثیرگذار در طراحی پوشش ثانویه خواهد بود (شکل ۸ د).

عملاً، نرخ جریان ورودی به داخل تونل و فشار آب حفره‌یی وارد بر پوشش تونل وابسته به نفوذپذیری نسبی بین پوشش و توده‌ی خاک اطراف است. بنابراین در این قسمت، سری تحلیل‌های پارامتریک با مقادیر مختلف نسبت $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right)$ که در آن، k_g نفوذپذیری زمین اطراف، K_f نفوذپذیری زهکش، r شعاع تونل، و t_f ضخامت فیلتر هستند، انجام شده است. به عبارت دیگر، نفوذپذیری نسبی بین پوشش و زهکش با تأثیر شعاع تونل و ضخامت فیلتر به صورت نسبت $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right)$ تعریف شده است، که بسیار مهم‌تر از نفوذپذیری زهکش به تنهایی است.

در این پژوهش، از این ضریب بی‌بعد ذکرشده، به منظور برآورد فشار آب حفره‌یی پشت پوشش ثانویه در شرایط کاهش ظرفیت فیلتر استفاده شده است. بدین منظور برای نفوذپذیری زمین اطراف مقادیر $k_g = 10^{-8} \approx 10^{-8} \text{ (m/s)}$ ، برای نفوذپذیری زهکش مقادیر $k_f = 5 \times 10^{-2} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ ، برای شعاع تونل $r = 3 \approx 5 \text{ (m)}$ و برای ضخامت فیلتر $t_f = 0.5 \approx 1 \text{ (cm)}$ در نظر

- وجود لایه‌ی زهکشی بین پوشش اولیه و نهایی در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی تا حد زیادی از فشار آب وارد بر پوشش نهایی می‌کاهد. فشار آب در شرایط زهکشی‌شده، تا بیشینه‌ی ۹۲٪ نسبت به فشار آب هیدرواستاتیک (تونل زهکشی‌نشده) کاهش می‌یابد ($\frac{u}{u_0} = 0.08$).
- کاهش فشار آب حفره‌ی باعث کاهش تنش‌های محوری ایجادشده در پوشش ثانویه و بیشترین میزان کاهش به میزان ۳۲٪، نسبت به تنش‌ها در حالت زهکشی‌نشده ارزیابی می‌شود.
- در ترازهای آب زیرزمینی بالاتر، به دلیل افزایش دبی ورودی به سیستم زهکشی و استفاده‌ی بهینه از ظرفیت تخلیه‌ی فیلتر، لایه‌ی زهکشی عملکرد بهتری نشان می‌دهد.
- در تونل‌های کم‌عمق، لایه‌ی زهکشی عملکرد مؤثرتری از خود نشان می‌دهد.
- در تونل‌های با قطر کم نیز لایه‌ی زهکشی عملکرد مناسب‌تری دارد. کاهش کارایی زهکشی در اثر افزایش قطر تونل می‌تواند ناشی از افزایش مسیر زهکشی باشد.
- کاهش ظرفیت فیلتر ناشی از کاهش نفوذپذیری یا کاهش ضخامت منجر به افزایش بار فشار آب حفره‌ی وارد بر پوشش، کاهش جریان شعاعی به سمت تونل و کاهش دبی تخلیه‌شده در سیستم زهکشی می‌شود. برای نسبت‌های $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right) \leq 0.1$ مقدار فشار آب حفره‌ی وارد بر پوشش ثانویه کوچک است و می‌توان شرایط زهکشی مؤثر را در عمل فرض کرد؛ در حالی که برای نسبت $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right) = 100$ ، فشار هیدرواستاتیک به پوشش وارد می‌شود. نسبت $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right)$ نفوذپذیری نسبی بین پوشش و زهکشی با تأثیر شعاع تونل و ضخامت فیلتر است.

بر این اساس در عمل می‌توان از نمودار شکل ۹ برای تخمین فشار آب حفره‌ی روی پوشش نهایی تونل در حالتی که میزان گرفتگی زهکشی براساس کاهش دبی برآورد شده است، استفاده کرد.

در این نوشتار تأثیر شرایط زهکشی در توزیع فشار آب حفره‌ی و تنش‌های پوشش در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی در شرایط استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر بررسی شرایط مذکور در حالت دینامیکی توسط مؤلفان در حال بررسی است. [۱۵]

پانویس‌ها

1. coupled analysis
2. clogging
3. steady-state flow
4. structural element
5. solid element
6. needle-punched nonwoven geotextile

منابع (References)

1. Chungsik, Yoo "Interaction between tunneling and groundwater- numerical investigation using 3 dimen-

جریان ورودی آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ی وارد بر پوشش است.

تغییرات مقادیر فشار آب حفره‌ی مطابق آنچه در شکل ۹ نشان داده شده است، بیانگر حساسیت پارامتر $\left(\frac{u}{u_0}\right)$ نسبت به مقادیر نفوذپذیری، قطر تونل و ضخامت فیلتر است. مشاهده می‌شود که برای نسبت‌های $0.1 \leq \left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right)$ ، مقدار فشار آب حفره‌ی وارد بر پوشش ثانویه، کوچک است و می‌توان شرایط زهکشی مؤثر را در عمل فرض کرد. این تذکر لازم است که مقدار فشار آب حفره‌ی در قسمت میانی تونل با کاهش نفوذپذیری زهکشی و افزایش نسبت $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right)$ تا 0.1 ، تا 11% فشار آب حفره‌ی اولیه‌ی هیدرواستاتیک افزایش می‌یابد. با کاهش بیشتر نفوذپذیری زهکشی، شیب تغییرات فشار آب حفره‌ی به نحو چشم‌گیری افزایش می‌یابد و در حالت $\left(\frac{r \cdot k_g}{t_f k_f}\right) = 100$ تا 83% ، فشار هیدرواستاتیک به پوشش وارد می‌شود. بنابراین می‌توان از شکل ۹ برای تخمین فشار آب حفره‌ی روی پوشش ثانویه‌ی تونل، در حالتی که میزان کاهش نفوذپذیری زهکشی برآورد شده است، استفاده کرد.

به لحاظ عملی جهت برآورد میزان کاهش نفوذپذیری زهکشی، می‌توان عملکرد زهکشی در طول عمر بهره‌برداری تونل را با بررسی کاهش دبی ورودی به سیستم زهکشی در اثر گرفتگی زهکشی نسبت به شرایطی که زهکشی کاملاً مؤثر عمل می‌کند، سنجید.

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر استفاده از زهکشی محیطی در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی و میزان کارایی این نوع زهکشی‌ها در اعماق مختلف قرارگیری تونل با قطرهای متفاوت و ترازهای مختلف آب زیرزمینی، تحلیل‌های همبسته‌ی هیدرولیکی - مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار به روش تفاضل محدود بر روی تونل زیر سطح آب زیرزمینی انجام شده است، تا آثار عملکرد زهکشی در توزیع فشار آب حفره‌ی و میزان بار وارد بر پوشش مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین تغییرات فشار آب وارد بر پوشش ناشی از بسته‌شدن زهکشی مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به این شرح هستند:

sional stress- pore pressure coupled analysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **131**(2), pp. 240-250 (2005).

2. Bobet, A. "Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **127**(12), pp. 1258-1266 (2001).
3. Bobet, A. "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **18**(4), pp. 377-393 (2003).
4. Shin, J.H. "Analytical and combined numerical methods evaluating pore water pressure on tunnels", *Geotechnique*, **60**(2), pp. 141-145 (2010).

5. Atkinson, J.H. and Mair, R.J. "Loads on leaking and watertight tunnel linings, sewers and buried pipes due to groundwater", *Geotechnique*, **33**(3), pp. 341-344 (1983).
6. Schweiger, H.F., Pottler, P.K. and Steiner, H. "Effect of seepage forces on the shotcrete lining of a large undersea cavern", *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, pp. 1503-1508 (1991).
7. Lee, I.M. and Nam, S.W. "The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**(1), pp. 31-40 (2001).
8. Inokuma, A. and Ishimura, T. "Earth pressure acting on shield driven tunnels in soft ground", *In Proceedings of the International Conference on Underground Construction in Soft Ground*, New Delhi, India, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 221-224 (1995).
9. Shin, J.H., Potts, D.M. and Zdravkovic, L. "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil", *Can. Geotech. J.*, **42**(6), pp. 1585-1599 (2005).
10. Dorken GmbH and Co. KG, *Technical Guide Civil Engineering and Tunnel Construction*, Wetterstrase, **58**, D-58313 Herdecke (2010).
11. Ferreira, A.A. "Cracks and repairing of the Carvalho Pinto road tunnel (Brazil)", *Exchange of Correspondence with Health and Safety Executive*, UK (1995).
12. Lee, Y.N., Byun, H.K. and Shin, O.J. "Cracking of subway tunnel concrete lining and its repair", *In Proceedings of the North American Conference Nat '96 and 22nd General Assembly International Tunneling Association*, Washington, D.C., pp. 21-24 (1996).
13. Itasca Consulting Group, Inc. FLAC, *Universal Finite Difference Code*, Version 4.00 (2002).
14. Hajra, M.G., Reddi, L.N., Glasgow, L.A., Xiao, M. and Lee, I.M. "Effects of ionic strength on fine particle clogging of soil filters", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**(8), pp. 631-639 (2002).
15. Soori, M. "Numerical modelling of tunnel lining under the groundwater table", M.Sc thesis, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2012). (In Persian)