

تحلیل عددی استاتیکی عملکرد زهکش چتری در تونل پوشش دار دایروی عمیق تحت تراوش پایدار

محمود هاشمی* (دانشیار)

علی حسین بالام (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی باقری نسب (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۱۳۳-۱۳۱، ص ۴، شماره ۱/۳، یادداشت فنی)

تراوش یکی از مسائل موجود در تونل‌هاست. این مسئله به دلیل اینکه فشار آب حفره‌ای یک نیروی اضافی را به پوشش تونل وارد می‌کند، اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا این نیروی تراوش اضافی، در خاک‌ها و سنگ‌های ضعیف و با نفوذپذیری کم می‌تواند عامل ناپایداری تونل شود. لذا نیاز به زهکشی در این تونل‌ها، حائز اهمیت ویژه‌ای است. سیستم‌های زهکشی کاربردی در تونل‌ها، انواع مختلفی دارد. از انواع رایج آن‌ها می‌توان به سیستم زهکش فیلتر محیطی و سیستم زهکش لوله‌ای اتصالی اشاره کرد. با این حال مطالعات نسبتاً کمی بر روی سیستم‌های زهکشی مذکور و عوامل مؤثر در آن‌ها، به خصوص برای سیستم زهکش لوله‌ای اتصالی، تا به حال انجام شده است. در این پژوهش، سیستم زهکش چتری به عنوان یک سیستم زهکشی جدید در تونل‌های تحت تراوش معرفی شده است. آرایش سیستم زهکشی ذکر شده برگرفته از ترکیب زهکش لوله‌ای اتصالی و الهام گرفته شده از نگه‌دارنده‌ی چتری فورپولینگ است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، عملکرد سیستم زهکشی ذکر شده به صورت تحلیل استاتیکی عددی در پوشش تونل دایروی عمیق تحت تراوش پایدار مورد بررسی قرار گرفته است. در این نوشتار با در نظر گرفتن ۳ پارامتر شاهد (کرنش اصلی مؤثر بیشینه در پوشش تونل، توزیع فشار آب حفره‌ای در سطح پوشش تونل به عنوان یک نوع بارگذاری مؤثر در طراحی پوشش تونل، و برآورد دبی حجمی زهکش‌ها) و بررسی کلیه مشخصات لوله‌ای زهکش مؤثر در عملکرد آن به ارائه یک آرایش بهینه برای سیستم زهکشی مذکور پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: زهکش چتری، تونل پوشش دار دایروی عمیق، تراوش پایدار، تحلیل عددی استاتیکی.

۱. مقدمه

نیست: ۱. در تونل‌های با قطر زیاد به علت حجم بالای مصالح مورد نیاز برای زهکشی کلی جداره‌ی تونل که باعث می‌شود از لحاظ اقتصادی دیگر توجیه‌پذیر نباشد؛ ۲. در تونل‌های با سطح مقطع غیر دایروی، به علت ملاحظات اجرایی دشوار برای زهکشی کامل جداره‌ی تونل؛ ۳. در تونل‌های تک‌لایه‌ی به علت لزوم اجرای نوع سیستم زهکش ذکر شده در بین پوشش موقتی و دائمی، به منزله‌ی نگه‌داری کامل سیستم زهکش فیلتر محیطی پیرامون دیواره‌ی تونل، که این امر باعث کاهش عمر مفید زهکش مذکور در هنگام کاربرد در تونل‌های تک‌لایه‌ی می‌شود.^[۱]

سیستم زهکشی مطرح شده در این پژوهش، سیستم زهکش چتری است. آرایش این نوع سیستم زهکش از ترکیب زهکش لوله‌ای اتصالی و نگه‌دارنده‌ی چتری فورپولینگ اقتباس شده است. فورپولینگ (پیش لوله‌گذاری)، یک روش پیش‌تحکیمی برای سازه‌های ضعیف است. سیستم زهکش چتری شامل نصب لوله‌های زهکش در جبهه‌ی تونل است. در این نوع سیستم زهکش، زهکشی فقط

از جمله مسائل مطرح در تونل‌ها، بحث تراوش است. این مسئله از آنجایی که فشار آب حفره‌ی یک نیروی اضافی را به پوشش تونل وارد می‌کند، اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا فشار آب حفره‌ی باعث زوال سازه‌ی پوشش تونل و در نتیجه افزایش تراوش می‌شود. لذا نیاز به زهکشی در تونل‌ها، جایگاه ویژه‌ای دارد. سیستم‌های زهکشی مطرح در تونل‌ها، انواع مختلفی را شامل می‌شود. از انواع معمول آن‌ها می‌توان به سیستم زهکش فیلتر محیطی و سیستم زهکش لوله‌ای اتصالی اشاره کرد (شکل ۱).^[۱] با این حال مطالعات نسبتاً محدودی بر روی این سیستم‌های زهکشی و عوامل مؤثر در آن‌ها، به خصوص برای سیستم زهکش لوله‌ای اتصالی تا به حال انجام شده است. سیستم زهکش فیلتر محیطی در چند مورد قابل استفاده یا مقرون به صرفه

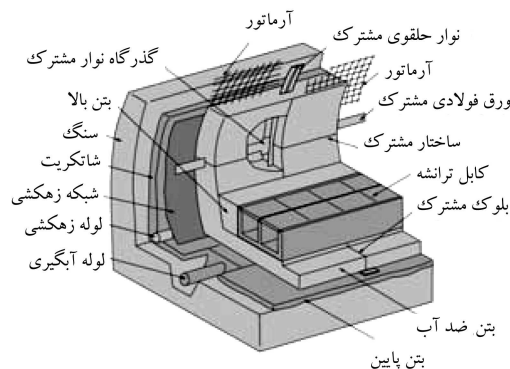
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۹/۹، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱/۱۶، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۷

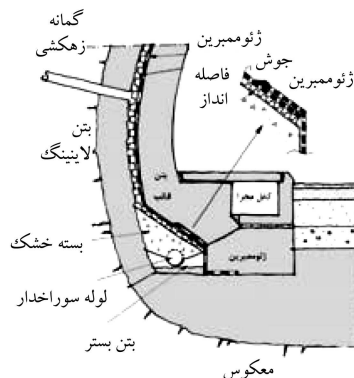
پرداخته و پارامترهای مختلفی از سیستم زهکش لوله‌ای اتصالی مانند: تعداد (تک و جفت) در مقطع جانبی تونل، طول، زاویه‌ی محیطی از تاج تونل، زوایای تمایل طولی و جانبی از سطح تونل، و فواصل طولی در امتداد تونل را بررسی کرده‌اند. این تذکر لازم است که این نوع سیستم زهکش، معایبی مانند گرفتگی لوله‌ها به علت رسوب ناشی از واکنش شیمیایی آب‌های زیرزمینی و مواد بتنی پوشش تونل نیز دارد. همچنین در سال ۲۰۱۳، [۲] به بررسی درمان اثر مذکور برای یک تونل قدیمی در کره براساس دو راهکار کوانتومی مبتنی بر اصل براونی مکانیک کوانتومی و مغناطیسی مبتنی بر تغییرشکل ذرات کربنات کلسیم پرداخته شده است.

در پژوهش دیگری (۲۰۰۶)، [۴] نیز با فرض تونل عمیق و رفتار زمین و نگه‌دارنده در محدوده‌ی کشسان، به بررسی اثر آب زیرزمینی در تنش‌ها و تغییرشکل‌های نگه‌دارنده‌ی موقت و دائمی تونل با و بدون وجود لایه‌ی زهکش بین آن‌ها پرداخته و نتایج به صورت راه‌حل‌های تحلیلی و مدل‌سازی‌های عددی ارائه شده است. همچنین محققان در سال ۲۰۰۹، [۵] با فرض کرنش نرم‌شونده‌ی هوک - براون، معادلات تئوری برای تحلیل تونل‌های زیر آب زیرزمینی به صورت هم‌زمان مکانیکی - هیدرولیکی ارائه کرده‌اند. معادلات مذکور حل بسته‌ی ندارند و یک راه‌حل عددی برای آن‌ها پیشنهاد و برنامه نویسی شده است. در سال ۲۰۰۶، [۶] نیز با فرض جریان پایدار آب زیرزمینی به یک تونل دایروی، به بررسی منحنی واکنش زمین در این حالت پرداخته و نتایج به صورت یک راه‌حل تحلیلی ارائه شد، که از طریق مدل‌سازی عددی نیز مورد تأیید قرار گرفته است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۰، [۷] با فرض جریان پایدار آب زیرزمینی به یک تونل دایروی، بزرگی نیروهای تراوش براساس شیب هیدرولیکی در اطراف تونل محاسبه و سپس به بررسی منحنی واکنش زمین در این حالت پرداخته شد و نتایج به صورت یک راه‌حل تحلیلی ارائه شده است، که از طریق مدل‌سازی عددی نیز مورد تأیید قرار گرفته است. همچنین پژوهشگرانی در سال ۲۰۰۴، [۸] نیروهای تراوش را از حل معادله‌ی حرکت آب از طریق مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار به دست آورده و سپس به تأثیر نرخ پیشرفت تونل در این حالت پرداخته‌اند. پژوهشگران دیگری (۲۰۰۸)، [۹] نیز از روش بسط سری در تئوری پتانسیل مختلط موسخلیشویلی برای محاسبه‌ی تنش و جابه‌جایی مختلط استفاده کرده و به تجزیه و تحلیل کشسان میدان تنش جابه‌جایی برای یک تونل دایروی حفر شده در اعماق زیاد تحت بارهای زمین و فشار داخلی پرداخته‌اند، که نتایج آن‌ها با برخی از شرایط خاص راه‌حل کیرش مطابقت داشته است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۴، [۱۰] با فرض تونل سطحی دایروی در یک ناحیه‌ی کشسان خمیری متخلخل اشباع، یک راه‌حل عددی هم‌زمان مکانیکی - هیدرولیکی برای محاسبه‌ی کرنش به روش اجزاء محدود پیشرفته ارائه شده است، که می‌توانست کرنش‌ها تا سطح زمین را مدل‌سازی کند، در حالی که اجزاء محدود استاندارد قادر به انجام آن نبوده است.

در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۲، [۱۱] با مدل‌سازی عددی به ارزیابی تعامل بلندمدت مکانیکی و هیدرولیکی در تونل‌های پوشش‌دار با پوشش سگمنت پرداخته شده است. پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۹، [۱۲] با تحلیل تئوری و مقایسه با استفاده از مدل‌سازی عددی، به بررسی تأثیر شرایط زهکش در توزیع فشار آب حفره‌ی تنش‌های پوشش نگه‌دارنده در تونل‌های زهکش پوشش‌دار پرداخته و در نهایت مطالعات انجام‌شده را در یک مورد واقعی بررسی کرده‌اند. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۸، [۱۳] به بررسی تئوری و تجربی فشار آب خارجی روی پوشش نگه‌دارنده‌ی تونل در زهکشی کنترل‌شده زیر سطح آب پرداخته شده است. پژوهشگری (۲۰۰۳)، [۱۴] نیز با فرض تونل عمیق و زمین کشسان متخلخل اشباع، راه‌حل تحلیلی برای اثر فشار آب حفره‌ی در نگه‌دارنده‌ی تونل با وجود بارهای استاتیکی و لرزه‌ی ارائه کرده است. همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۱۱)، [۱۵] با فرض جریان پایدار شعاعی و

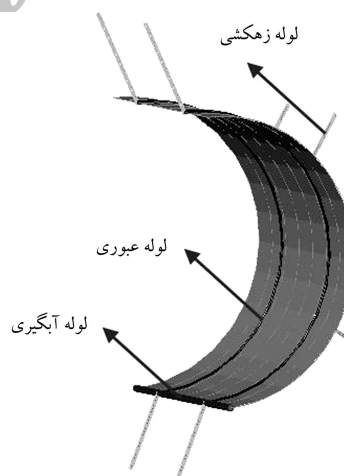


الف) سیستم زهکش فیلتر محیطی؛



ب) سیستم زهکش لوله اتصالی [۱].

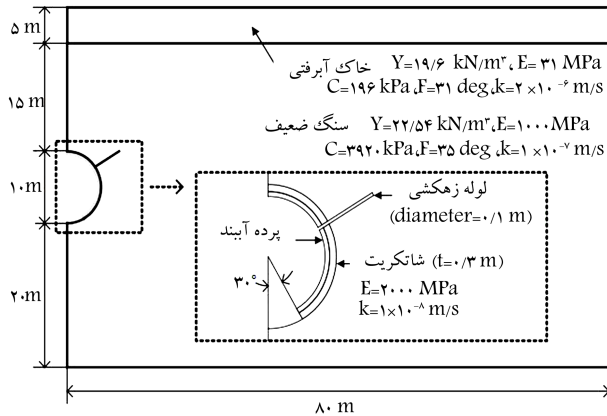
شکل ۱. سیستم‌های زهکشی معمول در تونل‌های تحت تراوش.



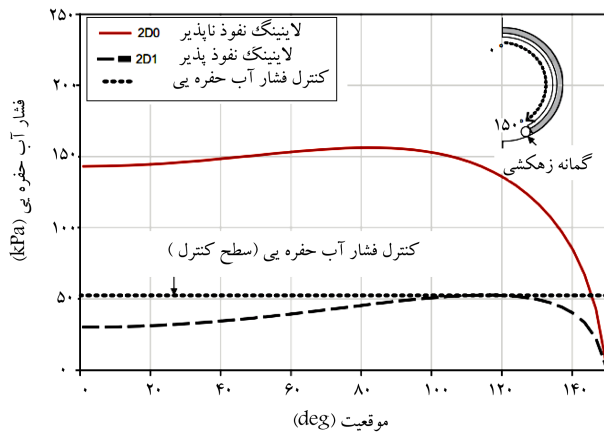
شکل ۲. سیستم زهکش چتری.

از طریق لوله‌ها صورت می‌پذیرد. آب زهکشی‌شده از طریق لوله‌های عبوری به لوله‌ی آبیگری جهت تخلیه از تونل انتقال داده می‌شود. این تذکر لازم است که سیستم زهکش چتری، هیچ‌کدام از محدودیت‌های ذکر شده برای سیستم زهکش فیلتر محیطی را ندارد. در شکل ۲، نمونه‌ی از سیستم زهکش چتری به همراه اجزاء اصلی آن به صورت شماتیک نشان داده شده است.

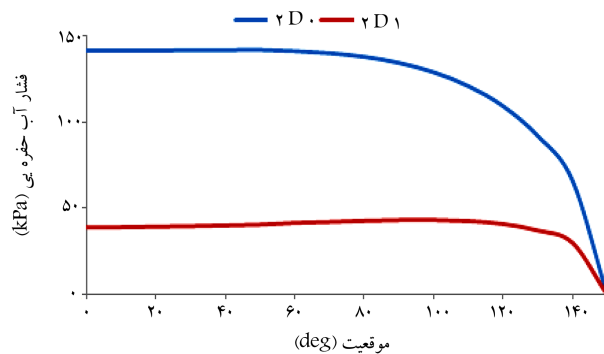
پژوهشگران در پژوهشی در سال ۲۰۰۹، [۲] به بررسی کنترل فشار آب حفره‌ی و رفتار هیدرولیکی در پوشش تونل زیر سطح آب زیرزمینی با استفاده از سیستم زهکش لوله‌ی اتصالی به صورت عددی با استفاده از برنامه‌ی اجزاء محدود MIDAS-GTS



شکل ۳. مدل شین و همکاران. [۲]



الف) نتایج شین و همکاران [۲]



ب) مدل سازی در نرم افزار.

شکل ۴. کنترل فشار آب حفره‌یی.

برابر α درجه باشد، نام‌گذاری نمادین این آرایش از لوله‌ها به صورت NnLlDdAa است. در شکل ۵، نحوه‌ی نام‌گذاری نمادین آرایش لوله‌های زهکش، در سیستم زهکش چتری ارائه شده است. همان‌گونه که بیان شده است، از جمله پارامترهای مؤثر در لوله‌های زهکش، سیستم زهکش چتری زاویه و فاصله‌ی لوله‌های زهکش است. لذا از نرم‌افزار قوی آباکوس، در مدل‌سازی سه‌بعدی محیط‌های پیوسته بر پایه‌ی روش عددی اجزاء محدود مشابه پژوهش انجام شده، [۲] در این پژوهش برای مدل‌سازی استفاده شده است.

همچنین با توجه به پژوهش شین و همکاران، [۲] یک مدل پایه برای سیستم

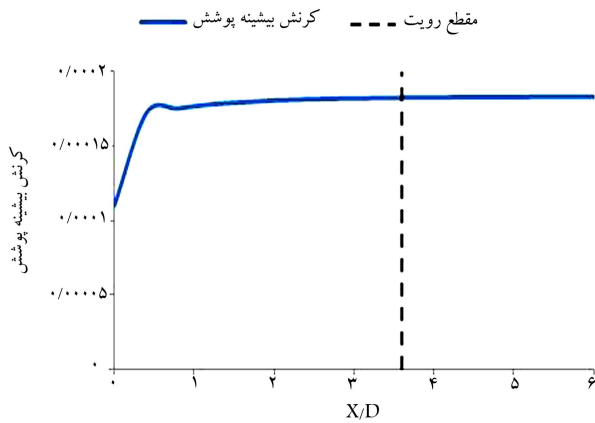
زهکشی کامل، یک راه‌حل تئوری برای منحنی واکنش زمین با بتن پاشیده شده و پیچ سنگ تزریق شده ارائه و نتایج خود را با مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی کرده‌اند. همچنین در سال ۲۰۰۴، [۱۶] نیز با استفاده از تئوری و تعادل حدی به بررسی تنش مؤثر و با تجزیه و تحلیل عددی به بررسی نیروی تراوش روی پایداری جبهه‌ی تونل مسلح شده با لوله‌های تزریق چند مرحله‌یی پرداخته شده است. پژوهشگران با فرض جریان پایدار به مطالعه‌ی نیروهای تراوش اعمال شده روی پوشش نگه‌دارنده‌ی تونل و جبهه‌ی تونل در تونل‌های سطحی پرداخته‌اند. [۱۷] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۷، [۱۸] با فرض حالت پایدار جریان و تونل دایروی یک راه‌حل تحلیلی دقیق برای برآورد نفوذ آب زیرزمینی به تونل ارائه شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، [۱۹] نیز به بررسی حالت پایدار جریان آب زیرزمینی به یک تونل دایروی پرداخته شده است. همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۰۸)، [۲۰] با فرض حالت پایدار جریان و تونل دایروی، یک راه‌حل تحلیلی برای دو شرط مرزی فشار آب حفره‌یی صفر و هد کل ثابت، برای برآورد جریان آب زیرزمینی به تونل زهکش به دست آورده‌اند. پژوهشگران دیگری (۲۰۱۰)، [۲۱] نیز با استفاده از تحلیل تئوری و مقایسه با مدل‌سازی عددی به تأثیر کاهش هدایت هیدرولیکی اطراف یک تونل در برآورد نرخ جریان آب زیرزمینی پرداخته‌اند.

۲. مدل‌سازی عددی

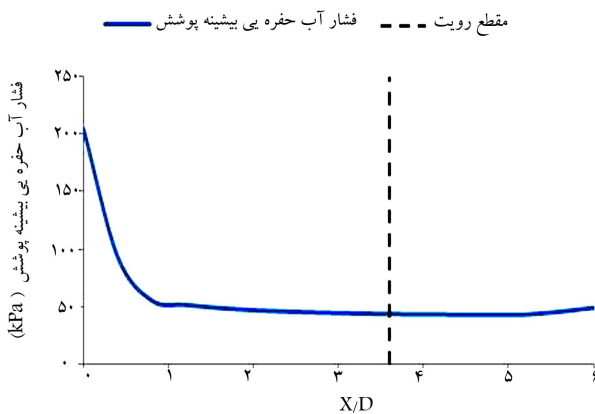
گام اول در هر پژوهش عددی، صحت‌سنجی نرم‌افزار مورد استفاده به منظور اعتبارسنجی کد استفاده شده در نرم‌افزار و قابلیت مدل‌سازی کاربر استفاده‌کننده از نرم‌افزار است. لذا در این پژوهش به منظور صحت‌سنجی، از پژوهشی که شین و همکاران (۲۰۰۹)، [۲] بر روی زهکش لوله‌ی انصالی برای تعیین سطح کنترل فشار آب حفره‌یی انجام داده‌اند، استفاده شده است. آن‌ها مطابق شکل ۳ برای مدل دو بعدی خود، ابعاد و مشخصات مصالح را برای مدل رفتاری کشسان خمیری متخلخل اشباع خود در نظر گرفته‌اند. همچنین آن‌ها با در نظر گرفتن شرط مرزی هد کل صفر برای مرزهای بالا، پایین و سمت راست مدل، اقدام به تحلیل هم‌زمان مکانیکی - هیدرولیکی تحت تراوش پایدار مدل کرده‌اند. آن‌ها به منظور دست‌یابی به یک مدل بهینه برای سیستم زهکش لوله‌ی انصالی، در گام اول اقدام به تعیین سطح کنترل فشار آب حفره‌یی بر روی پوشش کرده‌اند. روش کار آن‌ها به این ترتیب بوده است که برای پوشش، دو شرط را فرض کرده‌اند: ۱. در حالت پوشش نفوذناپذیر، زهکشی فقط از طریق سیستم زهکش معکوس در 30° انتهایی تونل صورت می‌پذیرد؛ ۲. در حالت پوشش نفوذپذیر، زهکشی علاوه بر سیستم زهکش معکوس، از طریق سیستم زهکش فیلتر محیطی واقع در فاصله‌ی بین شانکریت و پوشش نیز صورت می‌پذیرد.

در شکل ۴، کنترل فشار آب حفره‌یی بر روی پوشش حاصل از نتایج شین و همکاران، [۲] و مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، می‌توان اذعان داشت که صحت‌سنجی در نرم‌افزار به‌طور مطلوبی صورت پذیرفته است.

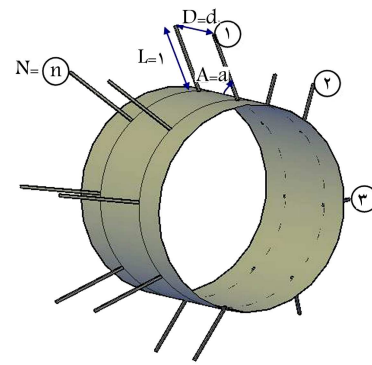
پارامترهای مؤثر در لوله‌های زهکش سیستم چتری شامل: تعداد، طول، فاصله، و زاویه است. لذا به منظور معرفی یک آرایش خاص از لوله‌های زهکش سیستم زهکشی چتری، از یک نام‌گذاری نمادین بدین صورت استفاده شده است که اگر تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل برابر n ، طول لوله‌ها برابر l متر، فاصله‌ی بین لوله‌ها در طول تونل برابر d متر و زاویه‌ی بین لوله‌ها و محور طولی تونل



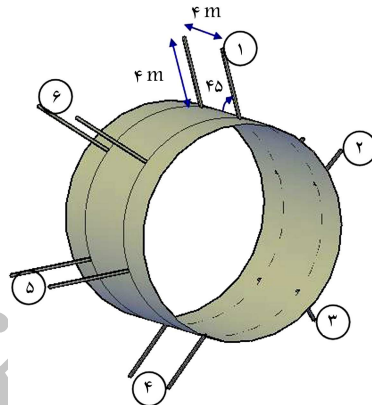
شکل ۸. کرنش بیشینه پوشش.



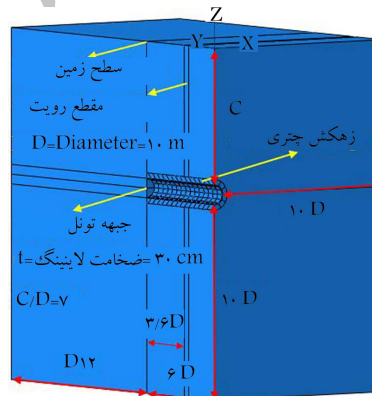
شکل ۹. فشار آب حفره بی بیشینه پوشش.



شکل ۵. مدل NnLlDdAa.



شکل ۶. مدل پایه.



شکل ۷. ابعاد مدل.

شکل ۷ در نظر گرفته شده است. مطابق شکل مذکور، مقطعی به فاصله $3/6D$ از جبهه‌ی تونل در فاصله‌ی بین دو زهکش متوالی به عنوان مقطع رویت در نظر گرفته شده است، که در این پژوهش از این مقطع، برای قرارت خروجی‌های پایدارشده‌ی موردنیاز در مدل سه‌بعدی استفاده شده است.

در شکل ۸، کرنش بیشینه در دیواره‌ی پوشش برای مدل پایه نشان داده شده است. این تذکر لازم است که X/D بیانگر فاصله‌ی بی‌بعدشده از جبهه‌ی تونل نسبت به قطر تونل است. با توجه به شکل مذکور نتیجه می‌شود که کرنش بیشینه در سطح داخلی پوشش در قسمت دیواره‌ی تونل، با فاصله‌گرفتن از زهکش‌های جبهه‌ی تونل به میزان 6.5% افزایش می‌یابد. همچنین کرنش بیشینه در دیواره‌ی پوشش، در مقطع رویت به مقدار پایدار خود میل کرده است.

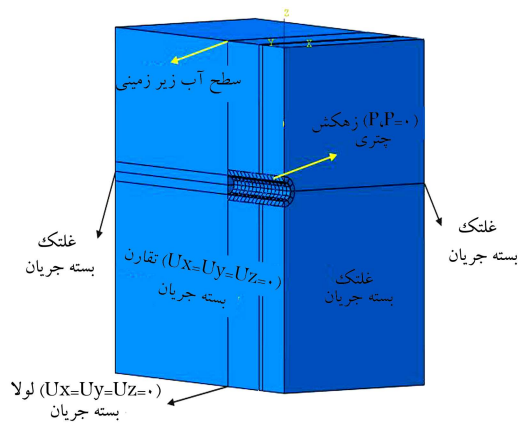
در شکل ۹، فشار آب حفره‌ی پوشش در فاصله‌ی بین دو زهکش بالایی تونل برای مدل پایه نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور نتیجه می‌شود که فشار آب حفره‌ی پوشش در پوشش با فاصله‌گرفتن از زهکش‌های جبهه‌ی تونل به میزان 79% کاهش می‌یابد. همچنین فشار آب حفره‌ی پوشش در مقطع رویت به مقدار پایدار خود میل کرده است.

در شکل ۱۰، دبی حجمی در پشت جبهه‌ی تونل برای مدل پایه نشان داده شده است، که مطابق آن 10 نتیجه می‌شود که دبی حجمی در پشت جبهه‌ی تونل با فاصله‌گرفتن از زهکش‌های جبهه‌ی تونل به میزان 74% کاهش می‌یابد. همچنین دبی حجمی در مقطع رویت به مقدار پایدار خود میل کرده است.

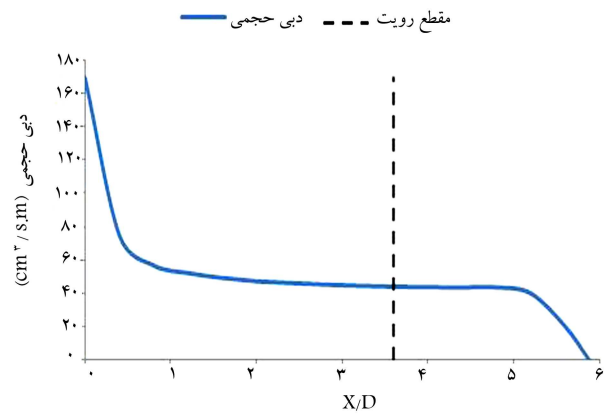
ویژگی‌های مصالح در این پژوهش برگرفته از پژوهش شین و همکاران،^[۱] است.

زهکش چتری به منظور یک مدل اولیه‌ی منطقی برای این سیستم زهکشی در نظر گرفته شده است. مدل پایه، ۶ عدد لوله‌ی زهکش، به طول 4 m ، فاصله‌ی 4 m و زاویه‌ی 45° دارد. در شکل ۶، مدل پایه‌ی مذکور برای سیستم زهکش چتری نشان داده شده است.

یکی از مسائل بسیار مهم در مطالعات عددی ژئوتکنیکی، در نظر گرفتن یک ابعاد صحیح برای مدل در نرم‌افزار است. اگر ابعاد مدل مذکور کوچک باشد، باعث ایجاد خطا در مدل‌سازی می‌شود و در صورتی که بزرگ باشد، از لحاظ زمان تحلیل و حجم اطلاعات خروجی مقرون به صرفه نیست. با توجه به مراحل سعی و خطای انجام‌شده بر روی ابعاد مدل براساس پژوهش‌های انجام‌شده در گذشته و انجام تحلیل همگرایی بر روی خروجی‌های موردنیاز از نرم‌افزار، مدلی به ابعاد نشان داده‌شده در



شکل ۱۱. شرایط مرزی در مدل سازی.



شکل ۱۰. دبی حجمی در پشت جبهه‌ی تونل.

جدول ۱. مشخصات مصالح در مدل سازی.

$E = 1000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.25$	
$\gamma_{sat} = 23 \text{ KN/m}^3$, $\gamma_d = 20 \text{ KN/m}^3$	ground
$k = 10^{-7} \text{ m/s}$	
$E = 25 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$	
$\gamma_{sat} = 25.91 \text{ KN/m}^3$, $\gamma_d = 25 \text{ KN/m}^3$	lining
$k = 5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$	

در جدول ۱، مشخصات مصالح برای مدل رفتاری کشسان متخلخل اشباع به منظور مدل سازی در نرم افزار ارائه شده است.

سرافیم و پیرا،^[۲۲] رابطه‌ی ۱ را برای مدول دگرشکلی سنگ بر حسب طبقه بندی ژئومکانیکی توده‌ی سنگ ارائه کرده‌اند:

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{4}} \quad (1)$$

که در آن، E_m مدول دگرشکلی بر حسب GPa است. حال با توجه به مدول یانگ در نظر گرفته شده برای زمین نتیجه می شود که شاخص طبقه بندی RMR زمین معادل ۱۰ است، که بیانگر سنگ بسیار سست در این طبقه بندی است. لذا به پوشش دائمی در تونل نیاز است.

گام بعدی در مدل سازی عددی در نرم افزار، انتخاب روش تحلیل برای حل مدل است. روش تحلیلی در نظر گرفته شده نیز مطابق پژوهش شین و همکاران،^[۲] تحلیل هم زمان مکانیکی - هیدرولیکی تراوش پایدار است. این روش تحلیلی با در نظر گرفتن اثرات توأم هیدرولیکی و مکانیکی، جامعیت ویژه‌ی دارد. همچنین به منظور اتصال پوشش به زمین، از قید Tie در این پژوهش استفاده شده است. مرحله‌ی بعد در مدل سازی عددی در نرم افزار، اعمال شرایط مرزی است. شرایط مرزی مکانیکی شامل شرط تقارن در سمت چپ مدل به دلیل تقارن مدل در دو نیمه‌ی راست و چپ تونل، شرط گیرداری در کف مدل و شرط غلطکی در جلو، پشت و سمت راست مدل است. همچنین شرایط مرزی هیدرولیکی شامل شرط ضروری همگن فشار آب حفره‌ی صفر در سطح خارجی زهکش‌ها و بالای مدل و شرط طبیعی همگن بسته‌ی جریان برای سایر سطوح مدل است. در شکل ۱۱، شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی در مدل سازی ارائه شده است.

سپس شتاب گرانش به عنوان تنها نیروی خارجی مؤثر در مدل، در مدل سازی اعمال می شود. با انجام این فرایند، بارگذاری در مدل سازی نیز به اتمام می رسد.

گام پایانی در مدل سازی عددی در نرم افزار، شبکه بندی مدل است. المان در نظر گرفته شده برای شبکه بندی، المان مکعبی ۸ گرهه‌ی خطی (استاندارد درجه اول) C3D4P است. شبکه بندی مدل با حدود ۱۰۰ هزار المان برای هر مدل به گونه‌ی انجام شده است، که در نواحی نزدیک به تونل و به خصوص در مقطع رؤیت از المان‌های کوچک تری در مقایسه با نواحی دورتر از تونل استفاده شده است.

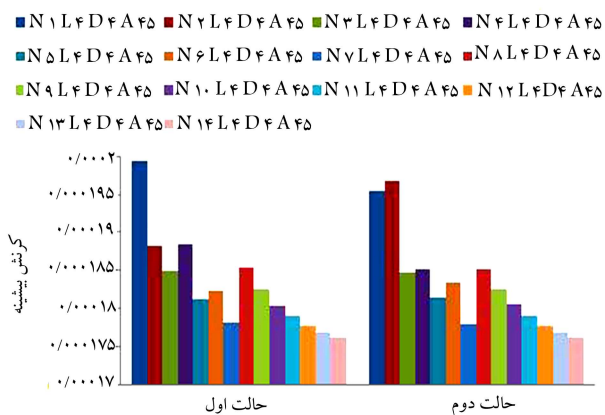
برای بررسی پارامترهای مؤثر در سیستم زهکش چتری بر توزیع فشار آب حفره‌ی اطراف پوشش از ترسیم توزیع این متغیر در محل زهکش‌های مقطع رؤیت استفاده شده است. این تذکر لازم است که مبدأ زاویه‌ی قراردادی برای رسم توزیع فشار آب حفره‌ی در سطح خارجی پوشش در تاج تونل فرض شده است.

۳. اثر پارامترهای مؤثر در سیستم زهکش چتری

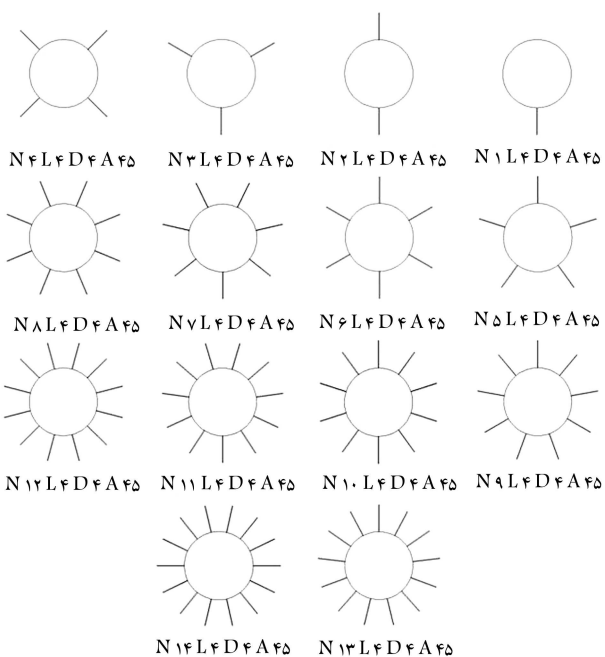
در این بخش به ترتیب به بررسی ۴ پارامتر مؤثر گفته شده (تعداد، زاویه، طول، و فاصله) در لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری، در ۴ زیربخش جداگانه پرداخته شده است. در ادامه‌ی این پژوهش سعی شده است با ساخت حدود ۶۰ مدل عددی به ارائه‌ی یک آرایش بهینه برای سیستم زهکش چتری در یک تونل پوشش دار پرداخته شود. از این تعداد مدل، ۲۸ مدل مربوط به بررسی تعداد ۱ تا ۱۴ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل برای هر دو حالت از آرایش تعدادی لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری است. ۵ مدل مربوط به بررسی زوایای ۵، ۲۵، ۴۵، و ۷۰ و ۹۰ درجه برای لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل است. ۷ مدل مربوط به بررسی طول‌های ۱ m تا ۷ m برای لوله‌های زهکش است. ۸ مدل مربوط به بررسی فاصله‌های ۱ m تا ۸ m برای لوله‌های زهکش است، و بقیه مربوط به تحلیل حساسیت به منظور دست‌یابی به یک آرایش بهینه برای لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری است.

۱.۳. تعداد لوله‌های زهکش

از آنجا که در این زیربخش از بین ۴ پارامتر مؤثر در لوله‌های زهکش، فقط به بررسی اثر تعداد لوله‌های زهکش پرداخته شده است، لذا نیاز به در نظر گرفتن ۳ مقدار ثابت، برای ۳ پارامتر مؤثر دیگر در لوله‌های زهکش است. این ۳ مقدار ثابت همان گونه که در قبل بیان شده است، از مدل پایه گرفته شده است. یعنی طول، فاصله، و زاویه‌ی لوله‌های زهکش به ترتیب ۴ m، ۴ m و ۴۵° در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثر تعداد لوله‌های زهکش در کرنش بیشینه‌ی پوشش، تعداد ۱ تا ۱۴ عدد لوله‌ی



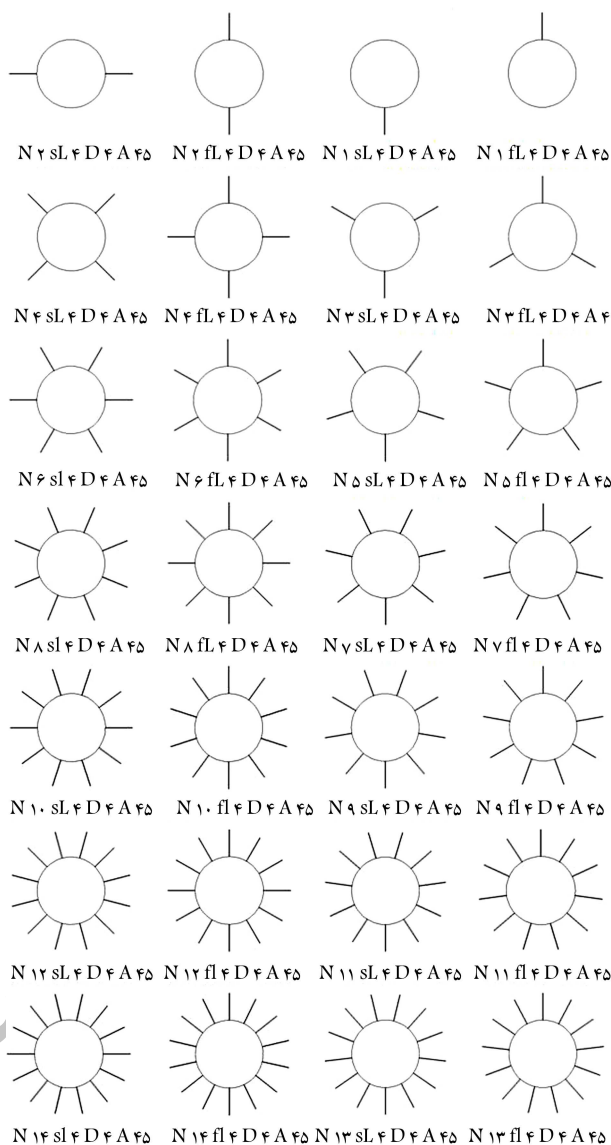
شکل ۱۳. تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در دو حالت در کرنش بیشینه.



شکل ۱۴. آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در حالت بهینه به همراه نام‌گذاری.

از کف تونل است. که این امر به صورت مشهود برای تعداد لوله‌های زهکش ۱، ۲، ۳، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱ عدد در مقطع دایروی تونل مشاهده می‌شود. این امر تأییدکننده‌ی ضرورت کاربرد همان سیستم زهکشی معکوس در تونل‌های تحت تراوش است.

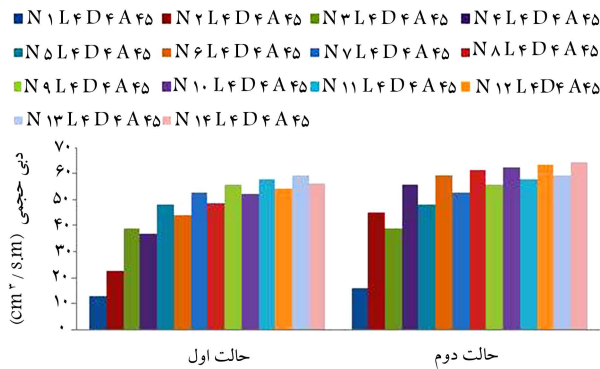
در شکل ۱۵، مقدار کرنش بیشینه‌ی پوشش، در حالت بهینه‌ی آرایش تعدادی لوله‌های زهکش برای کلیه‌ی حالات و حالات فرد نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور نتیجه می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، کرنش بیشینه‌ی پوشش به طور معمول کاهش می‌یابد. البته این کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش، تا تعداد ۵ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل مشهود است. کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش از تعداد ۱ به ۵ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل به میزان ۷۳٪ است. این تذکر لازم است که عدد صفر برای تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، بیان‌گر کرنش بیشینه‌ی پوشش بدون در نظر گرفتن سیستم زهکشی است. همچنین با در نظر گرفتن حالات فرد برای تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل می‌توان از بیشتر نوسانات موجود در نمودار کرنش



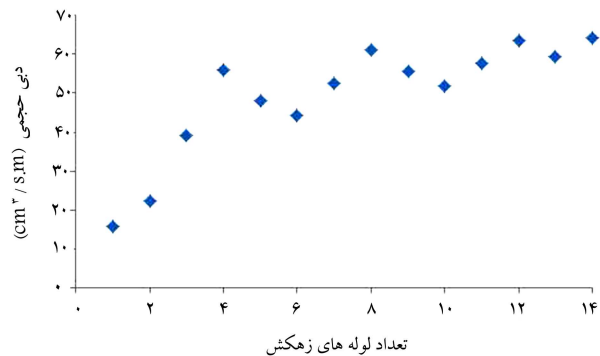
شکل ۱۲. آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در دو حالت به همراه نام‌گذاری.

زهکش در مقطع دایروی تونل در نظر گرفته شده است. از آنجا که آرایش لوله‌های زهکش در این سیستم زهکشی، در دو نیمه‌ی راست و چپ تونل نسبت به یکدیگر متقارن است، لذا برای هر آرایش تعدادی از این لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، دو حالت را می‌توان در نظر گرفت. در شکل ۱۲، این دو حالت از هر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش، به همراه نام‌گذاری آن‌ها نشان داده شده است. این تذکر لازم است که در این نام‌گذاری، حرف f بیان‌گر حالت اول و حرف s بیان‌گر حالت دوم است.

در شکل ۱۳، مقدار کرنش بیشینه‌ی پوشش، در هر دو حالت از این آرایش تعدادی لوله‌های زهکش نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می‌شود که از بین دو حالت اول و دوم از هر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش، فقط یک حالت وجود دارد که به صورت بهینه، کرنش بیشینه‌ی کمتری را در پوشش ایجاد می‌کند. در شکل ۱۴، این حالت بهینه از هر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش، به همراه نام‌گذاری آن‌ها نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می‌شود که وجه مشترک معمول حالت بهینه‌ی آرایش تعدادی لوله‌های زهکش، ضرورت زهکشی



شکل ۱۷. تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در دو حالت در دبی حجمی.

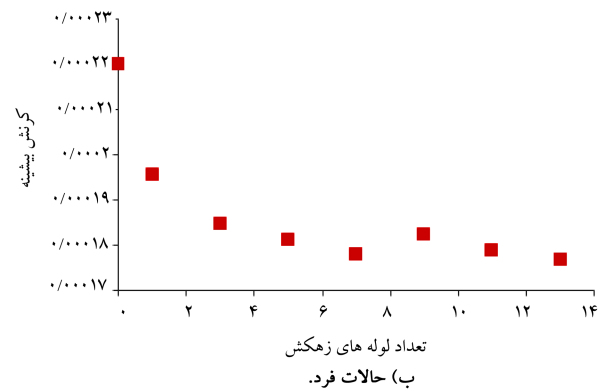
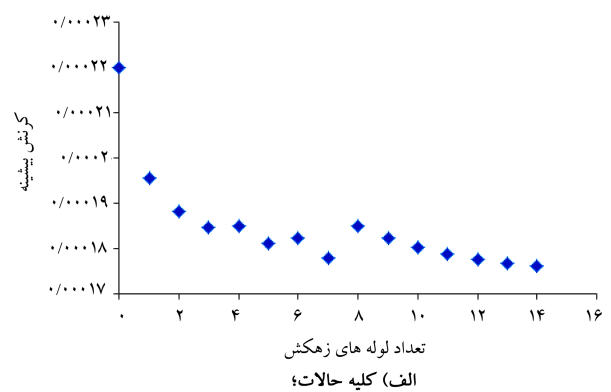


شکل ۱۸. تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در حالت بهینه بر دبی حجمی.

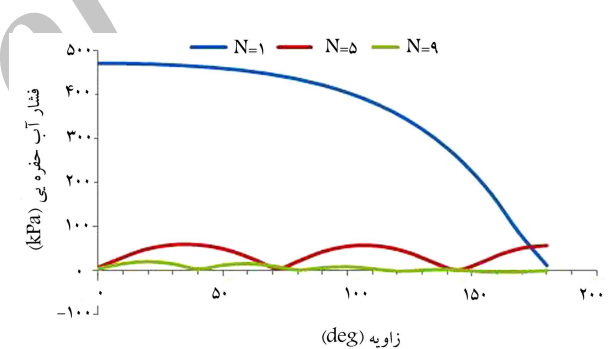
مطابق شکل ۱۷ نتیجه می‌شود که از بین دو حالت از هر آرایش، تعدادی لوله‌های زهکش فقط یک حالت وجود دارد که به صورت بهینه، دبی بیشتری را زهکشی می‌کند. البته این تذکر لازم است که این حالت بهینه، الزاماً همان حالت بهینه‌ی آرایش تعدادی لوله‌های زهکش به منظور ایجاد کرنش بیشینه کمتر در پوشش نیست. مثلاً مدل N2L4D4A45 حالت اول، از جمله حالات بهینه‌ی آرایش تعدادی لوله‌های زهکش به منظور کاهش کرنش بیشینه در پوشش است. ولی مدل ذکر شده، از جمله حالات بهینه‌ی آرایش تعدادی لوله‌های زهکش به منظور افزایش دبی حجمی زهکشی شده نیست. از آنجا که رویکرد اصلی در این پژوهش، بررسی اثر عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش بر مبنای کرنش بیشینه‌ی پوشش است، لذا از بررسی حالات بهینه‌ی آرایش تعدادی لوله‌های زهکش به منظور افزایش دبی حجمی زهکشی شده اجتناب شده است.

در شکل ۱۸، مقدار دبی حجمی در حالت بهینه‌ی آرایش تعدادی لوله‌های زهکش نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، دبی حجمی به طور معمول افزایش می‌یابد؛ که علت این امر را می‌توان ناشی از افزایش سطح مقطع جریان در اثر افزایش تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل دانست. این افزایش دبی حجمی در اثر افزایش تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل با نوساناتی در بعضی نقاط متوالی روبرو است، که باز با در نظر گرفتن تعداد فرد برای لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، می‌توان بدون این نوسانات از بیشینه‌ی ظرفیت لوله‌های زهکش برای زهکشی استفاده کرد.

در شکل ۱۹، مقدار دبی حجمی در حالت فرد آرایش تعدادی لوله‌های زهکش نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می‌شود که این افزایش دبی حجمی تا تعداد ۷ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل قابل ملاحظه است. در ضمن



شکل ۱۵. تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در حالت بهینه در کرنش بیشینه.

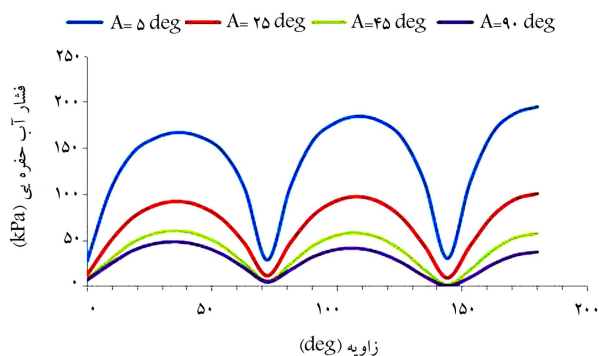


شکل ۱۶. تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در توزیع فشار آب حفره‌ی.

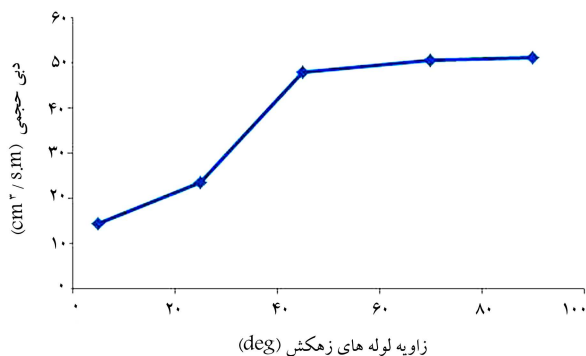
بیشینه‌ی پوشش جلوگیری کرد. لذا می‌توان بهترین تعداد برای لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل را ۵ عدد برای آرایش مذکور دانست.

برای بررسی اثر تعداد لوله‌های زهکش در فشار آب حفره‌ی پوشش، فقط تعداد ۱، ۵ و ۹ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۶، توزیع فشار آب حفره‌ی پوشش در این حالت از آرایش تعدادی لوله‌های زهکش نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۶، این نتیجه به دست آمده است که با افزایش تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، فشار آب حفره‌ی پوشش کاهش می‌یابد. البته همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در صورتی که تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل ۹ عدد باشد، فشار آب حفره‌ی اندکی در کف پوشش منفی می‌شود، که این امر دلالت بر غیرتوجه‌پذیر بودن کاربرد تعداد ۹ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل را دارد. در شکل ۱۷، مقدار دبی حجمی زهکشی شده در هر دو حالت از آرایش تعدادی لوله‌های زهکش نشان داده شده است.



شکل ۲۱. تأثیر زاویه لوله‌های زهکش در توزیع فشار آب حفره‌یی.



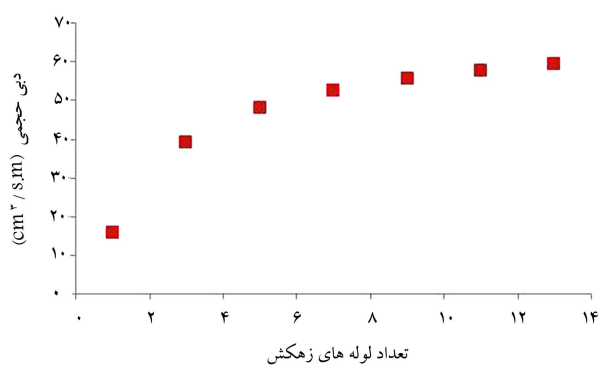
شکل ۲۲. تأثیر زاویه‌ی لوله‌های زهکش در دبی حجمی.

زوایای لوله‌های زهکش نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه‌ی لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل، فشار آب حفره‌یی پوشش کاهش می‌یابد. در شکل ۲۲، مقدار دبی حجمی به ازاء زوایای لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می‌شود که با افزایش زاویه‌ی لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل دبی حجمی افزایش می‌یابد، که علت این امر را می‌توان ناشی از افزایش هد کل جریان در اثر افزایش زاویه‌ی لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل دانست. همچنین این افزایش دبی حجمی تا زاویه‌ی 45° درجه برای لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل مشهود است. افزایش دبی حجمی از زاویه‌ی 5° به 90° برای لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل به میزان 257% است.

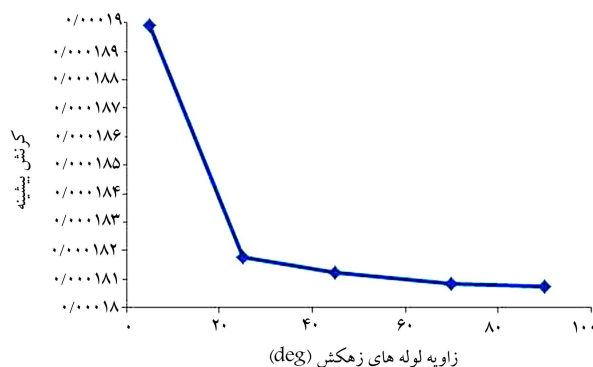
۳.۳. طول لوله‌های زهکش

در زیربخش قبل این نتیجه به دست آمده است که زاویه‌ی بهینه برای لوله‌های زهکش در آرایش مذکور، زاویه‌ی 90° نسبت به محور طولی تونل است. لذا در این زیربخش ۳ مقدار ثابت ۵، ۴ m و 90° ، به ترتیب برای ۳ پارامتر تعداد، فاصله، و زاویه‌ی لوله‌های زهکش در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی اثر طول لوله‌های زهکش در کرنش بیشینه‌ی پوشش، طول‌های ۱ m تا ۷ m برای لوله‌های زهکش در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۳، مقدار کرنش بیشینه‌ی پوشش، به ازای این طول‌های لوله‌های زهکش نشان داده شده است.

مطابق شکل مذکور نتیجه می‌شود که با افزایش طول لوله‌های زهکش، کرنش بیشینه‌ی پوشش ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. همچنین این کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش تا طول ۳m، برای لوله‌های زهکش مشهود است. علت افزایش



شکل ۱۹. تأثیر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در حالت فرد در دبی حجمی.



شکل ۲۰. تأثیر زاویه‌ی لوله‌های زهکش در کرنش بیشینه.

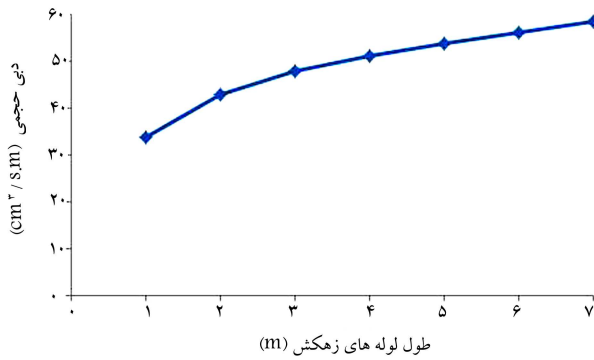
افزایش دبی حجمی از تعداد ۱ به ۵ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل به میزان 204% است.

۲.۳. زاویه‌ی لوله‌های زهکش

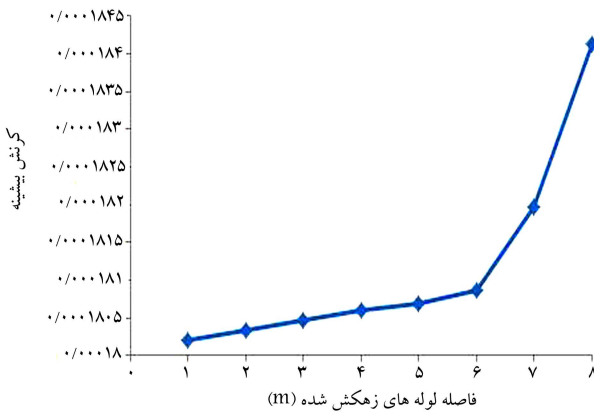
در زیربخش قبل این نتیجه به دست آمده است که بهترین تعداد برای آرایش مذکور، تعداد ۵ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل است. لذا در این زیربخش ۳ مقدار ثابت ۵، ۴ m و 45° به ترتیب برای ۳ پارامتر تعداد، طول، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی اثر زاویه‌ی لوله‌های زهکش بر کرنش بیشینه‌ی پوشش، زوایای ۵، 25° ، 45° و 90° درجه برای لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۰، کرنش بیشینه‌ی پوشش، به ازاء این زوایای لوله‌های زهکش نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می‌شود که با افزایش زاویه‌ی لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل، کرنش بیشینه‌ی پوشش کاهش می‌یابد.

هر چند زاویه‌ی بهینه برای لوله‌های زهکش در آرایش مذکور، زاویه‌ی 90° نسبت به محور طولی تونل است، ولی این کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش تا زاویه‌ی 70° برای لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل مشهود است. لذا به دلیل ملاحظات اجرایی و تجهیزات کارگاهی، می‌توان لوله‌های زهکش را با زاویه‌ی بیشتر از 70° نسبت به محور طولی تونل نصب کرد. کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش از زاویه‌ی 5° به 90° برای لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل به میزان 482% است.

برای بررسی اثر زاویه‌ی لوله‌های زهکش در فشار آب حفره‌یی پوشش، فقط زوایای ۵، 25° ، 45° و 90° درجه برای لوله‌های زهکش، نسبت به محور طولی تونل در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۱، توزیع فشار آب حفره‌یی پوشش، به ازاء این



شکل ۲۵. تأثیر طول لوله های زهکش بر دبی حجمی.



شکل ۲۶. تأثیر فاصله ی لوله های زهکش در گرنش بیشینه.

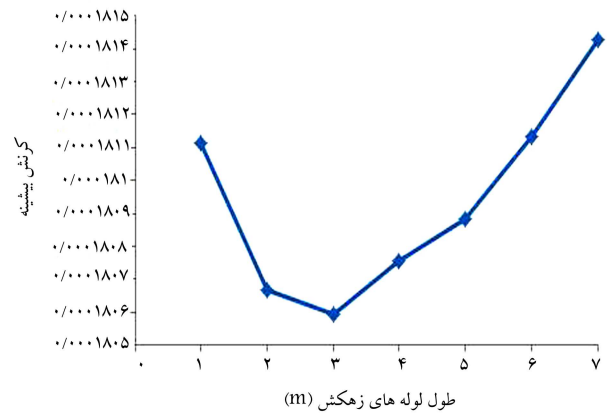
زهکش در آرایش مذکور، طول ۳ m است. لذا در این زیربخش ۳ مقدار ثابت ۵، ۳ m و ۹۰° به ترتیب برای ۳ پارامتر تعداد، طول، و زاویه ی لوله های زهکش در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی اثر فاصله ی لوله های زهکش در گرنش بیشینه ی پوشش، فاصله های ۱ m تا ۸ m برای لوله های زهکش در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۶، مقدار گرنش بیشینه ی پوشش به ازاء فاصله های لوله های زهکش ذکر شده نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می شود که با افزایش فاصله ی لوله های زهکش، گرنش بیشینه ی پوشش می یابد. همچنین این افزایش گرنش بیشینه ی پوشش از فاصله ی ۱ m تا ۶ m برای لوله های زهکش به میزان ۰/۳۶٪ است، که قابل ملاحظه نیست. لذا به دلیل ملاحظات اقتصادی، می توان بهترین فاصله برای لوله های زهکش در آرایش مذکور را فاصله ی ۶ m دانست.

برای بررسی اثر فاصله ی لوله های زهکش در فشار آب حفره ی پوشش، فقط فاصله های ۲، ۴، ۶، ۷ و ۸ متر برای لوله های زهکش در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۷، توزیع فشار آب حفره ی پوشش، به ازاء این فاصله های لوله های زهکش نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می شود با افزایش فاصله ی لوله های زهکش، فشار آب حفره ی پوشش کاهش می یابد. به گونه یی که کاربرد طول ۵ m برای لوله های زهکش، باعث ایجاد اندکی مکش در پوشش در محل زهکش پایینی تونل می شود، که این امر نیز دلالت بر غیرتوجه پذیر بودن کاربرد طول ذکر شده برای لوله های زهکش دارد.

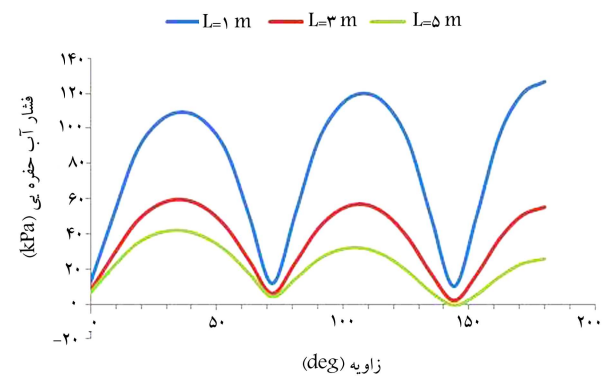
در شکل ۲۵، مقدار دبی حجمی به ازاء طول های لوله های زهکش ذکر شده نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش طول لوله های زهکش، دبی حجمی افزایش می یابد، که علت این امر را می توان ناشی از افزایش قدرت زهکشی در اثر افزایش طول لوله های زهکش دانست. افزایش دبی حجمی از طول ۱ m به ۳ m برای لوله های زهکش به میزان ۰/۴۱٪ است.

۴.۳. فاصله ی لوله های زهکش

در زیربخش قبل، این نتیجه به دست آمده است که طول بهینه برای لوله های



شکل ۲۳. تأثیر طول لوله های زهکش در گرنش بیشینه.



شکل ۲۴. تأثیر طول لوله های زهکش در توزیع فشار آب حفره یی.

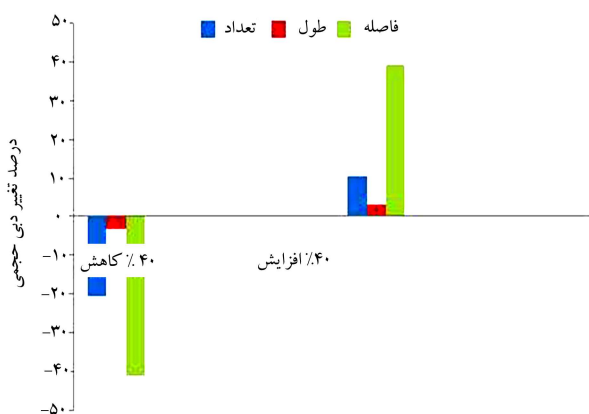
گرنش بیشینه ی پوشش از طول ۳ m بعد را می توان ناشی از منفی شدن فشار آب حفره یی و افزایش تنش مؤثر پوشش استدلال کرد. لذا به دلیل ملاحظات اجرایی و تجهیزات کارگاهی، می توان طول بهینه برای لوله های زهکش را همان طول ۳ m دانست. کاهش گرنش بیشینه ی پوشش از طول ۱ m به ۳ m برای لوله های زهکش به میزان ۰/۲۹٪ است.

برای بررسی اثر طول لوله های زهکش در فشار آب حفره یی پوشش فقط طول های ۱ m، ۳ m و ۵ m برای لوله های زهکش در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۴، توزیع فشار آب حفره یی پوشش، به ازاء طول های لوله های زهکش ذکر شده نشان داده شده است، که مطابق آن نتیجه می شود با افزایش طول لوله های زهکش، فشار آب حفره یی پوشش کاهش می یابد. به گونه یی که کاربرد طول ۵ m برای لوله های زهکش، باعث ایجاد اندکی مکش در پوشش در محل زهکش پایینی تونل می شود، که این امر نیز دلالت بر غیرتوجه پذیر بودن کاربرد طول ذکر شده برای لوله های زهکش دارد.

در شکل ۲۵، مقدار دبی حجمی به ازاء طول های لوله های زهکش ذکر شده نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش طول لوله های زهکش، دبی حجمی افزایش می یابد، که علت این امر را می توان ناشی از افزایش قدرت زهکشی در اثر افزایش طول لوله های زهکش دانست. افزایش دبی حجمی از طول ۱ m به ۳ m برای لوله های زهکش به میزان ۰/۴۱٪ است.



شکل ۲۹. درصد تغییرات کرنش بیشینه در تحلیل حساسیت در مدل سازی.



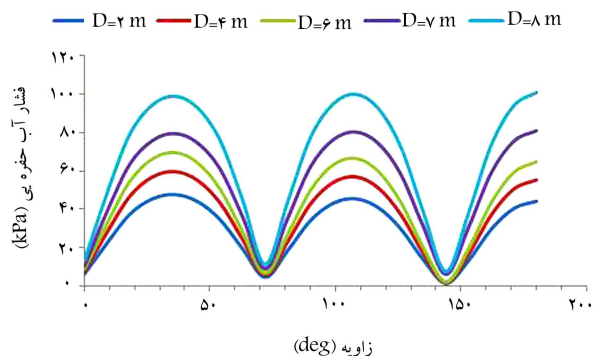
شکل ۳۰. درصد تغییرات دبی حجمی در تحلیل حساسیت در مدل سازی.

از لحاظ اقتصادی هستند، لذا برای دست یابی به مدل مینا برای سیستم زهکش چتری از مقادیر میانه‌ی بهینه‌ی این عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش استفاده شده است. بنابراین مدل مینا برای سیستم زهکش چتری، به صورت $N5L1/5D3A9$ در نظر گرفته شده است. سپس برای تحلیل حساسیت در مدل سازی، اقدام به ۴۰٪ کاهش و افزایش بر روی تک تک عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش شده است.

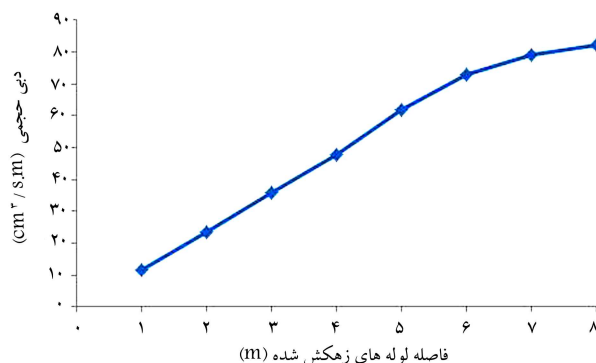
از آنجا که رویکرد اصلی در این پژوهش، ارائه‌ی آرایش بهینه برای لوله‌های زهکش سیستم زهکشی چتری براساس کرنش بیشینه‌ی پوشش است، لذا در شکل ۲۹، درصد تغییرات کرنش بیشینه‌ی پوشش، به ازاء ۴۰٪ کاهش و افزایش در عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش مدل مینا برای سیستم زهکش چتری نشان داده شده است، که مطابق آن تغییرات در تعداد، طول، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش به ترتیب با داشتن میانگین تأثیر ۲۰۷، ۱۹ و ۱۷ درصد بیشترین تأثیر را در کرنش بیشینه‌ی پوشش گذاشته است.

در شکل ۳۰، درصد تغییرات دبی حجمی به ازاء ۴۰٪ کاهش و افزایش در عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش مدل مینا برای سیستم زهکش چتری نشان داده شده است، که مطابق آن تغییرات در فاصله، تعداد، و طول لوله‌های زهکش به ترتیب با داشتن میانگین تأثیر ۴۰ درصد، ۱۵ درصد و ۳ درصد بیشترین تأثیر را در دبی حجمی گذاشته است.

همچنین در شکل ۳۱، توزیع فشار آب حفره‌ی پوشش به ازاء ۴۰٪ کاهش و افزایش در عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش مدل مینا برای سیستم زهکش چتری نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، مطابق تحلیل



شکل ۲۷. تأثیر فاصله‌ی لوله‌های زهکش در توزیع فشار آب حفره‌ی.

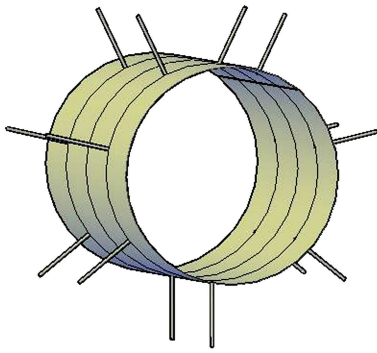


شکل ۲۸. تأثیر فاصله‌ی لوله‌های زهکش در دبی حجمی.

۴. آرایش بهینه‌ی سیستم زهکش چتری

از آنجا که هدف اصلی این بخش ارائه‌ی یک آرایش بهینه برای لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری است، لذا لازم است در ابتدا به نوعی تشخیص داده شود که از عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش، کدامیک اولویت بالاتری در طراحی لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری دارد. لذا در این قسمت اقدام به حساسیت‌سنجی در مدل سازی شده است. این تذکر لازم است که مطالب ارائه شده در این قسمت به هیچ عنوان به منزله‌ی یک تحلیل آماری بر مدل سازی برای عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش نیست، بلکه فقط به منزله‌ی روشی برای دست یابی به اولویت‌های طراحی از بین عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش است، که در یافتن ساده‌تر یک آرایش بهینه برای لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری کمک کرده است.

برای تحلیل حساسیت در مدل سازی، در ابتدا نیاز به یک مدل مینا برای سیستم زهکش چتری است. آرایش لوله‌های زهکش در مدل مینا برای سیستم زهکش چتری از تحلیل‌های صورت گرفته در بخش قبل بر روی تک تک عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش گرفته شده است. در بخش‌های قبل براساس کرنش بیشینه‌ی پوشش، این نتایج به دست آمده است که بهترین تعداد برای لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، ۵ عدد است. زاویه‌ی بهینه برای لوله‌های زهکش، زاویه‌ی ۹۰° نسبت به محور طولی تونل است. طول بهینه برای لوله‌های زهکش ۳ m و همچنین بهترین فاصله برای لوله‌های زهکش ۶ m است. البته لازم به ذکر است که این مقادیر بهینه برای عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش، با فرض ۳ مقدار ثابت برای سایر عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش در هر مرحله به دست آمده است. همچنین از آنجا که پارامترهای تعداد، طول، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش از عوامل اصلی توجیه پذیر کردن آرایش بهینه



شکل ۳۳. آرایش بهینه‌ی سیستم زهکش چتری.

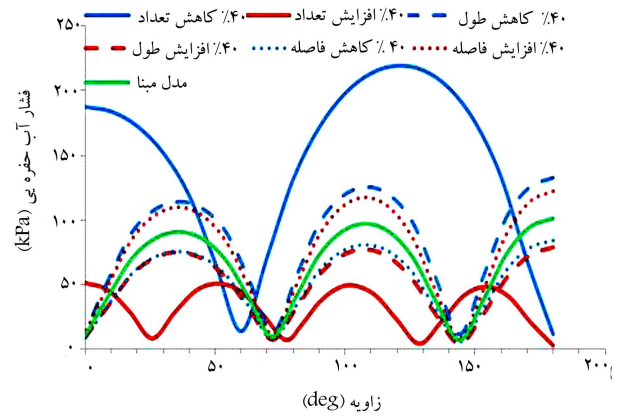
در نظر گرفتن تعداد بیشتر یا کمتر از ۵ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل و با تغییر فاصله بین آن‌ها، منجر به دست‌یابی هیچ مدل بهینه‌تری که از لحاظ اقتصادی هم مقرون به صرفه‌تر باشد، نشده است. در شکل ۳۳، آرایش بهینه‌ی سیستم زهکش چتری نشان داده شده است.

مقدار دبی حجمی زهکشی شده در آرایش بهینه‌ی سیستم زهکش چتری، در مقایسه با مدل N5L3D6A90 بیشتر است؛ که باز دلالت بر انتخاب درست آرایش مذکور به عنوان آرایش بهینه برای لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری دارد. باید توجه داشت که آرایش بهینه‌ی ارائه شده برای سیستم زهکش چتری، منحصر به این تونل با مشخصات هندسی و فیزیکی مصالح گفته شده است. در نتیجه از آرایش بهینه‌ی ذکر شده برای سیستم زهکش چتری، می‌توان برای تونلهایی با مشخصات هندسی و فیزیکی مصالح نسبتاً مشابه استفاده کرد.

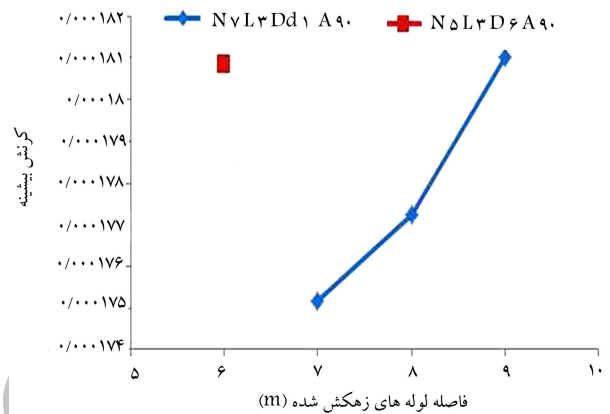
۵. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این پژوهش، این نتایج را می‌توان بیان کرد:

- از هر آرایش تعدادی لوله‌های زهکش، فقط یک حالت وجود دارد که به صورت بهینه، کرنش بیشینه‌ی کمتری را در پوشش ایجاد می‌کند، که حالت مذکور الزاماً همان حالت بهینه به منظور افزایش دبی حجمی زهکشی شده به تونل نیست.
- در آرایش تعدادی لوله‌های زهکش در سیستم زهکش چتری، ضرورت کاربرد سیستم زهکشی معکوس در بیشتر تونل‌های تحت تراوش به اثبات رسیده است.
- در سیستم زهکش چتری با در نظر گرفتن تعداد فرد برای لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل، می‌توان از بیشینه‌ی ظرفیت لوله‌های زهکش برای زهکشی استفاده کرد.
- در سیستم زهکش چتری، افزایش تعداد لوله‌های زهکش در مقطع دایروی تونل باعث کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش، کاهش فشار آب حفره‌ی پوشش و افزایش دبی حجمی زهکشی شده به تونل می‌شود. به گونه‌ی که در یک حالت خاص، افزایش تعداد لوله‌های زهکش از ۱ به ۵ عدد در مقطع دایروی تونل باعث کاهش ۷/۳۱٪ در کرنش بیشینه و افزایش ۲۰۴٪ در دبی حجمی می‌شود.
- در سیستم زهکش چتری، افزایش زاویه‌ی لوله‌های زهکش نسبت به محور طولی تونل باعث کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش، کاهش فشار آب حفره‌ی پوشش، و افزایش دبی حجمی زهکشی شده به تونل می‌شود، به گونه‌ی که در یک حالت خاص، افزایش زاویه‌ی لوله‌های زهکش از ۵° به ۹۰° نسبت به



شکل ۳۱. توزیع فشار آب حفره‌ی در تحلیل حساسیت در مدل‌سازی.



شکل ۳۲. تأثیر فاصله‌ی لوله‌های زهکش بر کرنش بیشینه در آرایش بهینه‌ی سیستم زهکش چتری.

حساسیت در کرنش بیشینه‌ی پوشش، تغییرات در تعداد، طول، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش به ترتیب بیشترین تأثیر را در توزیع فشار آب حفره‌ی پوشش گذاشته‌اند. یادآوری می‌شود که مطالب ارائه شده در این قسمت فقط در بازه‌ی ۴۰٪ عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش مدل مینا برای سیستم زهکش چتری قابل گزارش هستند. این بازه‌ها شامل: تعداد لوله‌های زهکش بین ۳ تا ۷ عدد در مقطع دایروی تونل، طول لوله‌های زهکش بین ۰/۹ m تا ۲/۱ m، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش بین ۱/۸ m تا ۴/۲ m هستند.

در قسمت تحلیل حساسیت در مدل‌سازی، این نتیجه به دست آمد که تغییرات در تعداد، طول، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش به ترتیب بیشترین تأثیر را در کرنش بیشینه‌ی پوشش داشته‌اند. لذا تعداد، طول، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش به ترتیب به عنوان اولویت‌های طراحی عوامل مؤثر در لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری در نظر گرفته شده‌اند. لذا با در نظر گرفتن همان طول ۳ m برای لوله‌های زهکش و تعداد ۷ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل، اقدام به افزایش فاصله بین لوله‌های زهکش بین ۷ الی ۹ متر شده است. در شکل ۳۲، مقدار کرنش بیشینه‌ی پوشش به ازاء فاصله‌های لوله‌های زهکش ذکر شده نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۳۲ مشاهده می‌شود تا فاصله‌ی ۸ m برای لوله‌های زهکش در آرایش مذکور، همچنان کرنش بیشینه‌ی پوشش کمتر از مدل N5L3D6A90 است. لذا می‌توان مدل N7L3D8A90 را به عنوان آرایش بهینه برای لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری دانست. این تذکر لازم است که هرگونه تلاشی با

کرنش بیشینه‌ی پوشش، افزایش فشار آب حفره‌ی پوشش، و افزایش دبی حجمی زهکشی شده به تونل می‌شود، به گونه‌ی که در یک حالت خاص افزایش فاصله‌ی لوله‌های زهکش از ۱ m به ۶ m، باعث افزایش ۳۶٪ در کرنش بیشینه و افزایش ۵۲٪ در دبی حجمی می‌شود.

۸. در طراحی لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری، تعداد، طول، و فاصله‌ی لوله‌های زهکش به ترتیب بیشترین اهمیت را دارند.

۹. آرایش بهینه برای لوله‌های زهکش سیستم زهکش چتری به صورت تعداد ۷ عدد لوله‌ی زهکش در مقطع دایروی تونل، به طول ۳ m، فاصله‌ی ۸ m و زاویه‌ی ۹۰° نسبت به محور طولی تونل است. البته این تذکر لازم است که آرایش بهینه‌ی ذکرشده برای سیستم زهکش چتری، برای تونلهایی با مشخصات هندسی و فیزیکی مصالح نسبتاً مشابه ذکرشده ارائه شده است.

محور طولی تونل، باعث کاهش ۴/۸۲٪ در کرنش بیشینه و افزایش ۲۵۷٪ در دبی حجمی می‌شود. همچنین به دلیل ملاحظات اجرایی و تجهیزات کارگاهی به اثبات رسیده است که می‌توان لوله‌های زهکش را با زاویه‌ی بیشتر از ۷۰° نسبت به محور طولی تونل به صورت چتری نصب کرد.

۶. در سیستم زهکش چتری، افزایش طول لوله‌های زهکش تا ۳ m باعث کاهش کرنش بیشینه‌ی پوشش و افزایش طول لوله‌های زهکش باعث کاهش فشار آب حفره‌ی پوشش و افزایش دبی حجمی زهکشی شده به تونل می‌شود، به گونه‌ی که در یک حالت خاص افزایش طول لوله‌های زهکش از ۱ m به ۳ m، باعث کاهش ۲۹٪ در کرنش بیشینه و افزایش ۴۱٪ در دبی حجمی می‌شود.

۷. در سیستم زهکش چتری، افزایش فاصله‌ی لوله‌های زهکش باعث افزایش

پانویس

1. Muskhelishvili

منابع (References)

- Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling*, Springer (2008).
- Shin, H.-S., Youn, D.-J., Chae, S.-E. and Shin, J.-H. "Effective control of pore water pressures on tunnel linings using pin-hole drain method", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(5), pp. 555-561 (2009).
- Jung, H.-S., Han, Y.-S., Chung, S.-R., Chun, B.-S. and Lee, Y.-J. "Evaluation of advanced drainage treatment for old tunnel drainage system in Korea", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **38**, pp. 476-486 (2013).
- Nam, S.-W. and Bobet, A. "Liner stresses in deep tunnels below the water table", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**(6), pp. 626-635 (2006).
- Fahimifar, A. and Zareifard, M.R. "A theoretical solution for analysis of tunnels below groundwater considering the hydraulic-mechanical coupling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(6), pp. 634-646 (2009).
- Lee, S.-W., Jung, J.-W., Nam, S.-W. and Lee, I.-M. "The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **22**(1), pp. 28-38 (2006).
- Shin, Y.-J., Kim, B.-M., Shin, J.-H. and Lee, I.-M. "The ground reaction curve of underwater tunnels considering seepage forces", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**(4), pp. 315-324 (2010).
- Lee, I.-M. and Nam, S.-W. "Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **19**(3), pp. 273-281 (2004).
- Li, S.-C. and Wang, M.-B. "Elastic analysis of stress-displacement field for a lined circular tunnel at great depth due to ground loads and internal pressure", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**(6), pp. 609-617 (2008).
- Callari, C. "Coupled numerical analysis of strain localization induced by shallow tunnels in saturated soils", *Computers and Geotechnics*, **31**(3), pp. 193-207 (2004).
- Shin, J.-H., Kim, S.-H. and Shin, Y.-S. "Long-term mechanical and hydraulic interaction and leakage evaluation of segmented tunnels", *Soils and Foundations*, **52**(1), pp. 38-48 (2012).
- Arjoui, P., Jeong, J.-H., Kim, C.-Y. and Park, K.-H. "Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(4), pp. 376-389 (2009).
- Xiuying, W., Zhongsheng, T., Mengshu, W., Mi, Z. and Ming, H. "Theoretical and experimental study of external water pressure on tunnel lining in controlled drainage under high water level", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**(5), pp. 552-560 (2008).
- 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).
- Shin, Y.-J., Song, K.-I., Lee, I.-M. and Cho, G.-C. "Interaction between tunnel supports and ground convergence-consideration of seepage forces", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48**(3), pp. 394-405 (2011).

16. Lee, I.-M., Lee, J.-S. and Nam, S.-W. "Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **19**(6), pp. 551-565 (2004).
17. 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).
18. Kolymbas, D. and Wagner, P. "Groundwater ingress to tunnels: The exact analytical solution", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **22**(1), pp. 23-27 (2007).
19. Butscher, C. "Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **32**, pp. 158-167 (2012).
20. Park, K.-H., Owatsiriwong, A. and Lee, J.-G. "Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**(2), pp. 206-209 (2008).
21. Fernandez, G. and Moon, J. "Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel - part 1: Guideline for estimate of ground water inflow rate", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**(5), pp. 560-566 (2010).
22. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements, U.S.Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA) (2009).

Archive of SID