



ارائه یک چارچوب مبتنی بر معیار کمی برای انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان در مدل سازی عددی جریان آب ورودی به داخل تونل

مرتضی جوادی اصطهباناتی^{۱*}، مصطفی شریف زاده^۲، کورش شهریار^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن مدرسه معدنی استرالیای غربی، دانشگاه کرتین، استرالیا

^۳ استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالوژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۲۶

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۰-۲۳

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۲۷

کلمات کلیدی:

تونل و فضاهای زیرزمینی

جریان آب زیرزمینی

آب ورودی به تونل

ابعاد مدل عددی

دقت مدل سازی عددی

خلاصه: انتخاب ابعاد مناسب برای مدل سازی جریان آب ورودی به داخل تونل با استفاده از روش های عددی، یکی از مباحث چالشی در حوزه مهندسی سازه های زیرزمینی است. هدف از این مقاله، ارائه یک چارچوب مبتنی بر معیار کمی جهت انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان برای مدل سازی عددی جریان (آرام، پایا و خطی) آب ورودی به داخل تونل واقع در آبخوان با گسترش عرضی نامتناهی است. بدین منظور، ابتدا یک فاکتور بی بعد تحت عنوان "نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی به داخل تونل (NRIV)" تعریف شده و سپس بر اساس یک مقدار حدی تحت عنوان "سطح پذیرش تغییرات (ALV)"، ابعاد مناسب برای دامنه جریان (SDS) تعیین شده است. این چارچوب پیشنهادی بر روی نتایج حاصل از مدل سازی عددی جریان آب ورودی به داخل تونل برای دامنه وسیعی از پارامترهای هندسی تونل و ابعاد مختلف دامنه جریان پیاده سازی شده و در نهایت کارایی این چارچوب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل های انجام شده نشان داد که با افزایش عمق و ابعاد فضای زیرزمینی، ابعاد مناسب برای مدل سازی جریان بصورت غیرخطی افزایش می یابد. همچنین، با کاهش ALV از ۰/۰۰۰۵ به ۰/۰۰۰۱، ابعاد دامنه جریان مورد نیاز برای مدل سازی بطور متوسط ۱/۸ برابر شده و بطور همزمان خطای نسبی نتایج مدل سازی تنها در حدود ۰/۴٪ کاهش می یابد. افزایش ابعاد دامنه جریان، باعث افزایش شدید زمان مدل سازی و کاهش ناچیز خطای مدل سازی شده که در نتیجه، برای کاربردهای عملی، سطح قابل قبول ALV معادل ۰/۰۰۰۵ پیشنهاد می شود.

۱- مقدمه

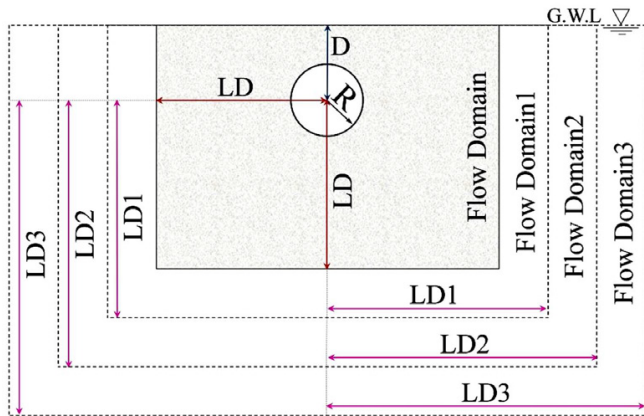
بویژه برآورد جریان آب ورودی، از دیرباز مورد توجه محققین مختلف بوده است. بدین منظور، روش ها و ابزارهای مطالعاتی مختلفی شامل روش های تجربی-توصیفی [۳-۱]، مدل سازی فیزیکی [۵ و ۴]، روش های تحلیلی [۹-۶] و مدل سازی عددی [۱۹-۱۰] برای بررسی پدیده های هیدرولیکی در اطراف فضاهای زیرزمینی بکار گرفته شده است. با توجه به افزایش روزافزون توان محاسبات کامپیوتری و توسعه سخت افزارها و نرم افزارهای کامپیوتری، امروزه روش های عددی بطور گسترده ای برای مطالعه و بررسی پدیده های هیدرولیکی در اطراف فضاهای زیرزمینی مورد استفاده قرار می گیرد. این گسترش روزافزون باعث شده، طیف وسیعی از پارامترها و عوامل موثر بر جریان

رفتار هیدرولیکی توده سنگ و جریان سیال در آن یکی از مهم ترین و چالش برانگیزترین فرآیندهای فیزیکی در مباحث علوم زمین بوه و در بسیاری از کاربردهای مهندسی مرتبط با فعالیت های عمرانی، معدنی و زیست محیطی دارای نقش بسیار کلیدی است. از میان کاربردهای فوق، جریان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی یکی از چالش برانگیزترین مباحث مرتبط بوده و برآورد آن نیازمند مدل سازی مناسب و سازگار با واقعیت است.

بررسی پدیده های هیدرولیکی در اطراف فضاهای زیرزمینی و

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mortezjavadi@gmail.com





شکل ۱. دامنه جریان مورد استفاده برای مدل‌سازی جریان آب ورودی به تونل و نحوه افزایش مقیاس دامنه جریان.

Fig. 1. The flow domain and its increment for modeling the groundwater inflow into tunnel.

پیشنهادی برای تعیین ابعاد مناسب دامنه جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- چارچوب انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان

بمنظور بررسی تاثیر ابعاد دامنه جریان بر نتایج مدل‌سازی جریان آب ورودی به تونل، ابتدا یک دامنه جریان کلی در اطراف تونل در نظر گرفته شده و ابعاد (مقیاس) این دامنه جریان بتدریج افزایش داده شده است. نمای شماتیک از دامنه جریان و نحوه افزایش ابعاد دامنه برای بررسی تاثیر مقیاس در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱، مدل‌سازی تاثیر مقیاس بر جریان آب ورودی برای تونل دایره‌ای با شعاع R که در عمق D از سطح زمین (فاصله مرکز تونل از سطح زمین) واقع شده، انجام شده است. در هر مقیاس مورد بررسی، گسترش عمقی و عرضی دامنه جریان (LD) با هم برابر در نظر گرفته شده است. افزایش ابعاد دامنه جریان، فقط شامل گسترش عرضی و عمقی (LD) بوده و در مراحل مختلف، عمق تونل از سطح زمین ثابت نگه داشته شده است. کل دامنه جریان بصورت اشباع از آب بوده و سطح ایستابی دقیقاً بر روی مرز بالای دامنه قرار دارد.

برای انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان، ابتدا مدل‌سازی جریان آب ورودی به داخل تونل برای مقیاس‌های مختلف (مقادیر مختلف از LD) انجام می‌شود. سپس، نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی به داخل تونل ($NRIV^2$) با افزایش مقیاس، با استفاده از

آب ورودی و فرآیندهای هیدرولیکی در اطراف فضای زیرزمینی شامل جریان پایا و گذرا [۱۱ و ۱۰]، شکل و ابعاد فضای زیرزمینی [۱۲-۱۴]، ناهمگنی و غیریکنواختی زمین درونگیر [۱۳-۱۵]، اثر ناپیوستگی‌ها [۱۵-۱۷] و فرآیندها خاص [۱۷-۱۹] با استفاده از روش‌های عددی مورد مطالعه قرار گیرد. با وجود کاربرد گسترده روش‌های عددی در حل مسائل مختلف، اعتبار نتایج مدل‌سازی عددی بشدت تحت تاثیر فاکتورهایی نظیر، سطح گسسته‌سازی معادلات، نحوه اعمال شرایط مرزی، صحت پارامترهای ورودی و نحوه مدل‌سازی است [۲۰]. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر نتایج مدل‌سازی عددی مسائل جریان در اطراف فضاهای زیرزمینی، ابعاد دامنه جریان است. در حقیقت، دقت مدل‌های عددی بشدت به ابعاد دامنه جریان وابسته بوده و با افزایش ابعاد مدل، خطای نتایج کاهش می‌یابد [۲۱-۲۳]. با این وجود، در عمده مطالعات پیشین، ابعاد دامنه جریان بطور مناسبی انتخاب نشده (عدم لحاظ نمودن اثر مرزها بر نتایج مدل‌سازی) و طیف وسیعی از ابعاد دامنه جریان (از دامنه‌های بسیار کوچک تا دامنه‌های بزرگ مقیاس) در مطالعات پیشین مورد استفاده قرار گرفته که این موضوع باعث سردرگمی محققین می‌شود. بعبارت دیگر، فقدان یک چارچوب کاربردی برای انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان برای مدل‌سازی عددی مسائل جریان در اطراف فضاهای زیرزمینی بویژه مدل‌سازی جریان آب ورودی کاملاً محسوس بوده که این موضوع، در مقاله پیش رو مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف از این مقاله ارائه یک متدولوژی (چارچوب) مبتنی بر معیار کمی جهت انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان برای مدل‌سازی عددی جریان آب ورودی به داخل تونل واقع در آبخوان با گسترش عرضی نامتناهی^۱ است. بدین منظور، ابتدا یک فاکتور بی بعد تحت عنوان "نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی به داخل تونل" تعریف شده و سپس بر اساس یک مقدار حدی تحت عنوان "سطح پذیرش تغییرات"، ابعاد مناسب برای دامنه جریان تعیین شده است. به‌منظور ارزیابی کارایی چارچوب پیشنهادی برای تعیین ابعاد مناسب دامنه جریان، مدل‌سازی جریان آب ورودی به داخل تونل بطور سیستماتیک برای دامنه وسیعی از پارامترهای هندسی تونل و ابعاد مختلف دامنه جریان انجام شده است. در ادامه، چارچوب پیشنهادی بر روی نتایج مدل‌سازی عددی پیاده‌سازی شده و کارایی چارچوب

رابطه زیر محاسبه شده است:

$$NRIV = \frac{Q'_S}{LD_{i+1} - LD_i} \quad (1)$$

$$Q'_S = \frac{|Q_{i+1}^{LD} - Q_i^{LD}|}{\left(\frac{Q_{i+1}^{LD} + Q_i^{LD}}{2}\right)}$$

که در رابطه فوق، Q_{i+1}^{LD} دبی جریان آب ورودی (بر حسب لیتر بر دقیقه) برای دامنه جریان با مقیاس LD_{i+1} (متر) و Q_i^{LD} دبی جریان آب ورودی (بر حسب لیتر بر دقیقه) برای مقیاس LD_i (متر) است. همچنین، در رابطه فوق، LD_{i+1} بزرگتر از LD_i است. در رابطه فوق، Q'_S بیان کننده نرخ تغییرات دبی جریان آب ورودی نسبت به مقیاس دامنه بوده که بر اساس مقدار متوسط جریان آب ورودی (برای دو مقیاس متوالی) بی بعد شده است. نرخ تغییرات دبی جریان آب ورودی با این هدف بی بعد شده که از تاثیر مستقیم مقدار دبی بر روی نتایج جلوگیری شود. بعبارت دیگر، با بی بعد کردن نرخ تغییرات دبی جریان آب ورودی، تاثیر مقادیر مختلف نفوذپذیری توده سنگ و مشخصات هندسی تونل (شعاع و عمق) بر روی ابعاد مناسب دامنه جریان را می توان تا حد قابل قبولی بطور یکسان اعمال نمود.

مطابق با رابطه ۱، نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی به داخل تونل یا NRIV تابعی از ابعاد دامنه جریان است و هرچه ابعاد دامنه جریان بزرگتر شود، مقدار NRIV کوچکتر می شود. در چنین شرایطی، این سوال اساسی مطرح می شود که افزایش ابعاد دامنه تا چه میزان باید انجام شود و یا چه میزان از NRIV برای بیان مقیاس مناسب دامنه جریان مناسب خواهد بود. برای پاسخ به این سوال، لازم است یک مقدار مجاز برای NRIV در نظر گرفته شود که بر اساس آن بتوان مقیاس مورد نیاز دامنه جریان را تعیین نمود. در حقیقت، برای انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان، لازم است یک سطح قابل قبول از نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی و یا NRIV تعریف شود. این سطح قابل قبول از نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان تحت عنوان ALV^1 نامگذاری شده و بعنوان یک معیار برای انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان بکار گرفته می شود. در حقیقت، ALV یک مقدار حدی از NRIV بوده که

بر اساس میزان دقت مورد نیاز و سایر محدودیت های مهندسی (محدودیت هایی مثل توان سخت افزاری مدل سازی و زمان مورد نیاز برای حل مسائل) تعیین می شود. در این مطالعه دو سطح دقت مدل سازی شامل دقت مورد نیاز برای مقاصد تحقیقاتی و سطح دقت معمول (برای مقاصد مهندسی) در نظر گرفته شده است. برای این دو سطح دقت مدل سازی، مقادیر ALV بترتیب برابر با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ پیشنهاد شده که این مقادیر بر اساس آنالیزهای انجام شده در مراحل اولیه تحقیق و تجارب پیشین تعیین شده است. بعبارت دیگر، در این مطالعه، برای انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان برای مقاصد تحقیقاتی و مهندسی، مقدار مناسب ALV بترتیب برابر با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ پیشنهاد شده است.

برای انتخاب مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS^2)، ابتدا لازم است این مفهوم تعریف شود. در این مطالعه، SDS به عنوان مقیاس یا ابعادی از دامنه جریان تعریف می شود که مدل سازی جریان با استفاده از این مقیاس، منجر به نتایج عددی قابل قبول (با سطح دقت مد نظر) شود. بعبارت دیگر، ابعاد دامنه جریان باید بگونه ای انتخاب شود که دقت مورد انتظار از مدل عددی را تامین نماید که این مقیاس همان SDS خواهد بود. در این مطالعه، برای انتخاب SDS از مقادیر $NRIV$ و ALV استفاده شده است. برای تعیین SDS ، ابعاد دامنه جریان بتدریج افزایش داده شده و برای هر از ابعاد دامنه جریان، مدل سازی جریان انجام شده و سپس مقدار $NRIV$ با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می شود. در صورتی که $NRIV$ محاسبه شده بیشتر از مقدار مجاز (ALV) باشد، مجددا ابعاد دامنه جریان افزایش داده می شود. افزایش ابعاد دامنه جریان تا زمانی ادامه داده می شود که مقدار $NRIV$ به مقدار مجاز (ALV) برسد. در این حالت، مقیاس منتخب دامنه جریان یا SDS بصورت ابعادی از دامنه جریان تعریف می شود که در آن مقیاس، مقدار $NRIV$ محاسبه شده با رابطه ۱ به حد مجاز ALV مد نظر (معادل با مقدار ۰/۰۰۰۱ برای مدل های با مقاصد تحقیقاتی و مقدار ۰/۰۰۰۵ برای مقاصد طراحی و معمول) برسد. لازم به ذکر است، مقدار عددی سطح قابل قبول از نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی (ALV)، بطور مستقیم بر مقیاس منتخب دامنه جریان تاثیر گذار است. در نتیجه، انتخاب مقدار ALV و متعاقباً SDS ، بر اساس میزان دقت مورد نیاز در مدل سازی جریان تعیین می شود.

۳- مدل سازی عددی جریان آب ورودی به تونل

مدل سازی جریان آب ورودی به داخل تونل با استفاده از کد محاسباتی FNETF انجام شده است. این کد محاسباتی در محیط برنامه نویسی MATLAB توسعه داده شده و عملکرد آن برای اهداف مختلفی همچون ساخت و پردازش شبکه شکستگی مجزا (DFN¹)، مدل سازی جریان در محیط ناپیوسته و DFN، مدل سازی نشت هیدروکربن و ردیابی آلودگی در محیط ناپیوسته، مدل سازی جریان در محیط پیوسته قطعی و مدل سازی جریان در محیط پیوسته تصادفی، پیشتر و بطور گسترده مورد صحت سنجی و اعتبارسنجی قرار گرفته است [۲۴-۲۷]. برای مدل سازی جریان سیال در توده سنگ با استفاده از کد محاسباتی FNETF، ابتدا لازم است یک مدل هندسی از دامنه جریان شامل مرزهای خارجی دامنه ساخته شود. پس از ساخت دامنه جریان، اجزای داخلی دامنه شامل شکستگی ها و یا ماتریکس در داخل دامنه تولید شده و ویژگی های هیدرولیکی (از قبیل نفوذپذیری یا دهانه هیدرولیکی) به اجزای توده سنگ تخصیص داده می شود. در ادامه، مرزهای داخلی مربوط به فضای زیرزمینی (مثل تونل) در داخل مدل ایجاد شده و اصلاحات مربوطه در مدل اعمال می شود. در مرحله بعد، بسته به نوع تحلیل، شبکه بندی (المان بندی) یا زون بندی محیط انجام می شود. در ادامه، با اعمال شرایط مرزی، معادلات حاکم بر جریان شامل معادله لاپلاس و بقای جرم بر روی شبکه المان ها گسسته سازی و ماتریس های محاسباتی تشکیل می شود. در نهایت، معادلات جریان برای تمامی المان های موجود در دامنه بصورت همزمان و با استفاده از یکی از روش های محاسباتی ماتریسی (در این مطالعه با استفاده از روش حذفی گاوس^۲) حل می شود. برای اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه مدل سازی و حل معادلات جریان به مراجع [۲۴-۲۷] مراجعه شود.

در این مطالعه، از ماژول محیط ناپیوسته ایده آل (دسته درزه های ممتد) کد محاسباتی FNETF استفاده شده است. کل دامنه جریان بصورت اشباع از آب بوده و سطح ایستابی دقیقا بر روی مرز بالایی دامنه قرار دارد. معادله حاکم بر مسئله بصورت معادله لاپلاس در نظر گرفته شده که ترکیب این معادله با معادله بقای جرم و با استفاده از روش عددی حل شده است. در این حالت، نتایج حاصل

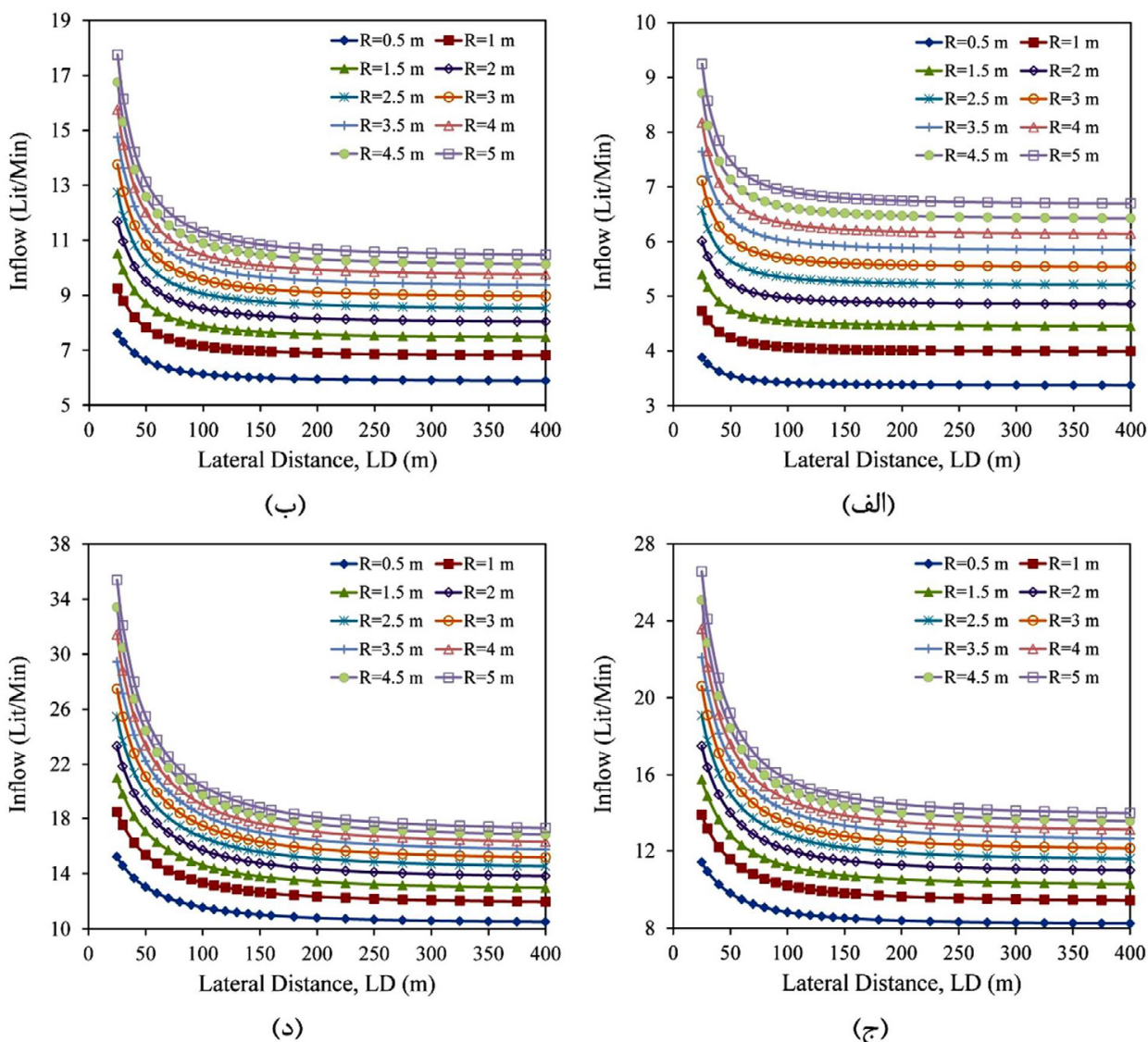
از مدل سازی برای جریان با حالت پایا^۳ و جریان آرام و خطی^۴ معتبر خواهد بود. حل محیط ناپیوسته ایده آل (مورد استفاده در مدل سازی جریان)، دارای دو دسته شکستگی متعامد با طول نامحدود است (شکستگی های ممتد افقی و قائم) است. هر دو دسته شکستگی، شامل شکستگی های کاملا موازی با فاصله داری نیم متر و دهانه هیدرولیکی ۱۰۰ میکرون بوده که در نتیجه، مولفه های اصلی تانسور هدایت هیدرولیکی معادل توده سنگ برابر با $16.6E-7m/s$ خواهد بود.

برای انجام محاسبات عددی، لازم است شرایط مرزی متناسب با مسئله در محاسبات اعمال شود. بمنظور اعمال شرط مرزی، ابتدا هد کلی^۵ سیال (H) بصورت مجموع هد فشاری^۶ (h) و هد ارتفاعی^۷ (Z) تعریف شده و از هد ناشی از سرعت جریان بدلیل کوچک بودن مقادیر سرعت صرف نظر شده است ($H = h + Z$). لازم به ذکر است، در هر نقطه از دامنه جریان (و البته روی مرزها)، هد فشاری بصورت ارتفاع ستون قائم سیال (معادل با هد ناشی از فشار حفراهی سیال) و هد ارتفاعی بصورت ارتفاع قائم از یک سطح مبنا تعریف می شود که مقادیر Z در بالا و پایین سطح مبنا به ترتیب به صورت مثبت و منفی لحاظ می شود (در این مطالعه سطح مبنا در کف مدل در نظر گرفته شده است). مرزهای جریان از نظر شرایط مرزی به دو دسته مرزهای داخلی (مرزهای مربوط به فضای زیرزمینی) و مرزهای خارجی (مرزهای محدود کننده دامنه جریان) دسته بندی شده اند. بر روی مرزهای داخلی، شرط مرزی از نوع جریان آزاد اعمال می شود که بدین منظور، هد فشاری برابر با صفر در نظر گرفته شده و مقدار هد کلی فقط شامل ترم هد ارتفاعی یا Z خواهد بود. بر روی مرزهای خارجی دامنه جریان، شرط مرزی از نوع هد هیدرولیکی ثابت (مجموع هد فشاری و هد ارتفاعی) اعمال شده است.

به منظور بررسی تاثیر ابعاد دامنه جریان، مدل سازی جریان آب ورودی به داخل تونل برای ۲۸ مقدار مختلف LD از ۲۵ متر تا ۴۰۰ متر انجام شده است. تاثیر مقیاس دامنه جریان بر نتایج مدل سازی جریان آب ورودی برای ۴ عمق (D) مختلف شامل ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متر و برای ۱۰ مقدار مختلف شعاع تونل (R) از ۰/۵ متر تا ۵

3 Steady State
4 Linear Laminar
5 Total Head
6 Pressure Head
7 Elevation Head

1 Discrete Fracture Network
2 Gaussian Elimination



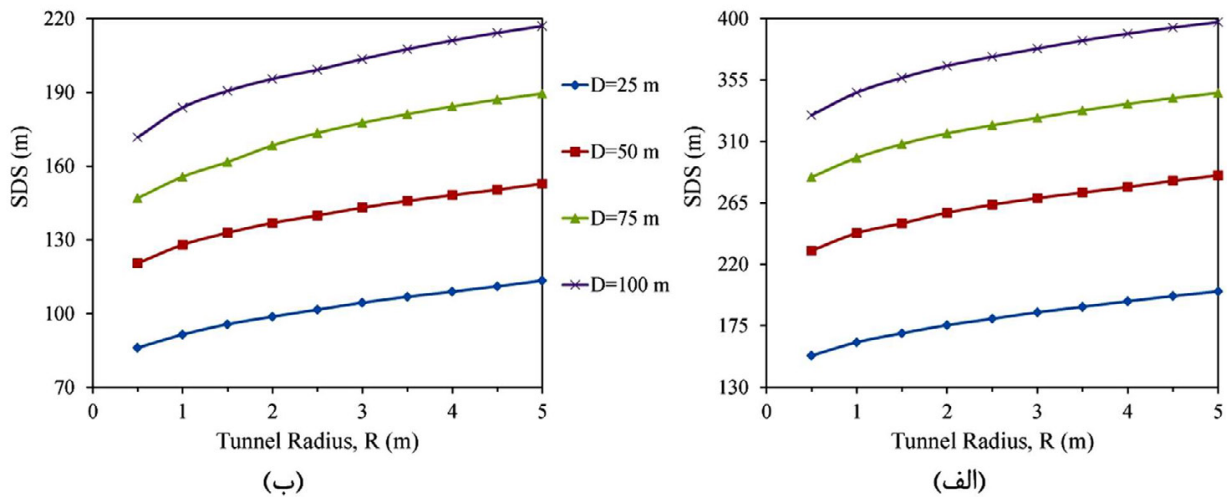
شکل ۲. تاثیر مقیاس دامنه جریان بر جریان آب ورودی به تونل برای عمق‌های مختلف: الف) ۲۵ متر، ب) ۵۰ متر، ج) ۷۵ متر و د) ۱۰۰ متر.
 Fig. 2. Domain size effect on groundwater inflow into tunnel for different depth of: a) 25 m, b) 50 m, c) 75 m, and d) 100 m.

که در شکل ۲ نشان داده شده، با افزایش مقیاس دامنه جریان، دبی جریان آب ورودی به داخل تونل بصورت غیرخطی کاهش یافته و نهایتاً به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود. نرخ کاهش دبی جریان آب ورودی به داخل تونل (شیب تغییرات نمودار)، برای دامنه‌های جریان کوچک مقیاس بسیار بیشتر از دامنه‌های جریان بزرگ مقیاس است. بعبارت دیگر، با افزایش مقیاس دامنه جریان، از شدت کاهش دبی جریان آب ورودی به داخل تونل (نرخ تغییرات دبی جریان) کاسته شده و در نهایت به مقدار صفر میل می‌کند (مشابه رفتار توابع نمایی منفی). مقایسه نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد، با افزایش شعاع تونل، حساسیت دبی جریان آب ورودی به تغییرات مقیاس دامنه بیشتر

متر (با بازه اختلاف ۰/۵ متر) مورد بررسی قرار گرفته است. نهایتاً، در این فرآیند، تعداد ۱۱۲۰ مدل‌سازی جریان آب ورودی به داخل تونل (۴ عمق مختلف ۲۸× مقیاس مختلف ۱۰× شعاع مختلف) انجام شده است.

۴- نتایج و بحث

تاثیر مقیاس دامنه جریان بر مقدار دبی جریان آب ورودی به داخل تونل با شعاع‌های مختلف و به تفکیک عمق قرارگیری تونل در شکل ۲ نشان داده شده است. دبی جریان آب ورودی در این شکل بر حسب لیتر بر دقیقه و برای واحد طول تونل ارائه شده است. همان‌گونه



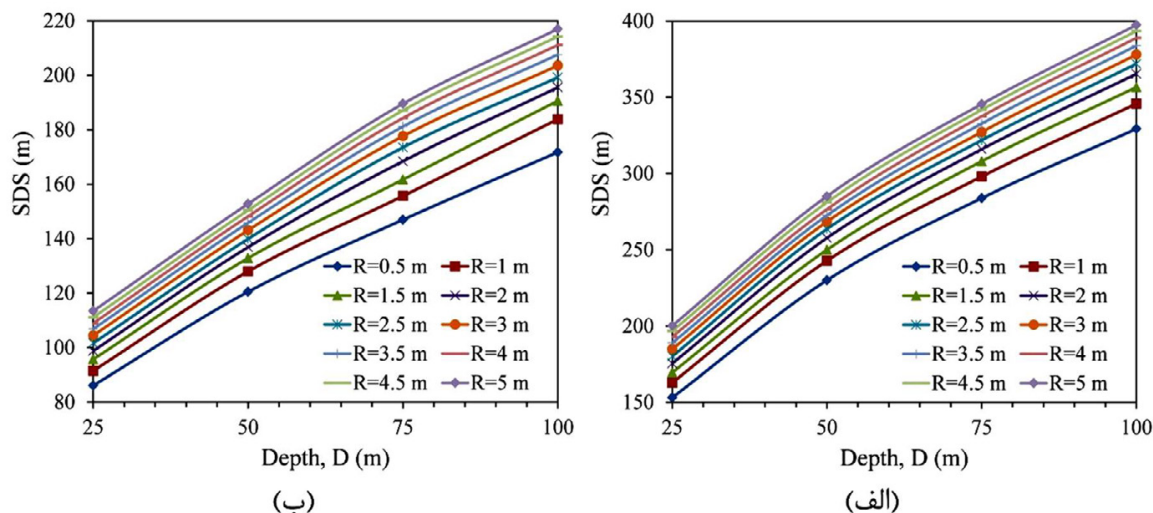
شکل ۳. تاثیر شعاع تونل بر مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS) برای مقادیر مختلف سطح قابل قبول ALV: الف) ۰/۰۰۰۱ و ب) ۰/۰۰۰۵.
 Fig. 3. Tunnel radius effect on SDS for Different ALVs: a) 0.0001, and b) 0.0005.

شدت کاهش می‌یابد. بطور مثال، با افزایش سطح قابل قبول ALV از ۰/۰۰۰۱ به ۰/۰۰۰۵، مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS) برای تونل با شعاع ۲/۵ متر و عمق ۵۰ متری بترتیب از حدود ۲۶۳/۶ متر به مقدار حدودی ۱۳۹/۹ متر کاهش می‌یابد. در این حالت، نسبت بین مقیاس‌های منتخب دامنه جریان برای مقادیر مختلف ALV برابر با ۱/۸۸ خواهد بود. به عبارت دیگر، مقیاس مورد نیاز دامنه جریان برای رسیدن به سطح قابل قبول ALV معادل ۰/۰۰۰۱ در حدود ۱/۸۸ برابر مقیاس مورد نیاز برای سطح قابل قبول ALV معادل ۰/۰۰۰۵ خواهد بود. برای کل شعاع‌ها و عمق‌های قرارگیری تونل، نسبت بین مقیاس‌های منتخب برای دو مقدار ALV معادل با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ از بازه ۱/۷۶ تا ۱/۹۱ تغییر می‌کند. کمترین مقدار مربوط به این نسبت برابر با ۱/۷۶ بوده که برای تونل با شعاع ۵ متر و عمق ۲۵ متر حادث می‌شود. همچنین، بیشترین مقدار مربوط به نسبت بین مقیاس‌های منتخب (۱/۹۱) برای تونل با شعاع ۰/۵ متر و عمق ۱۰۰ متر حادث شده است.

مقایسه نمودارهای شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش عمق تونل، مقیاس منتخب دامنه جریان نیز افزایش می‌یابد. برای بررسی بهتر این موضوع، تغییرات مقیاس منتخب دامنه جریان بر اساس عمق تونل و برای دو سطح قابل قبول ALV معادل با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۴، با افزایش عمق تونل، مقیاس منتخب دامنه جریان بصورت غیرخطی افزایش می‌یابد.

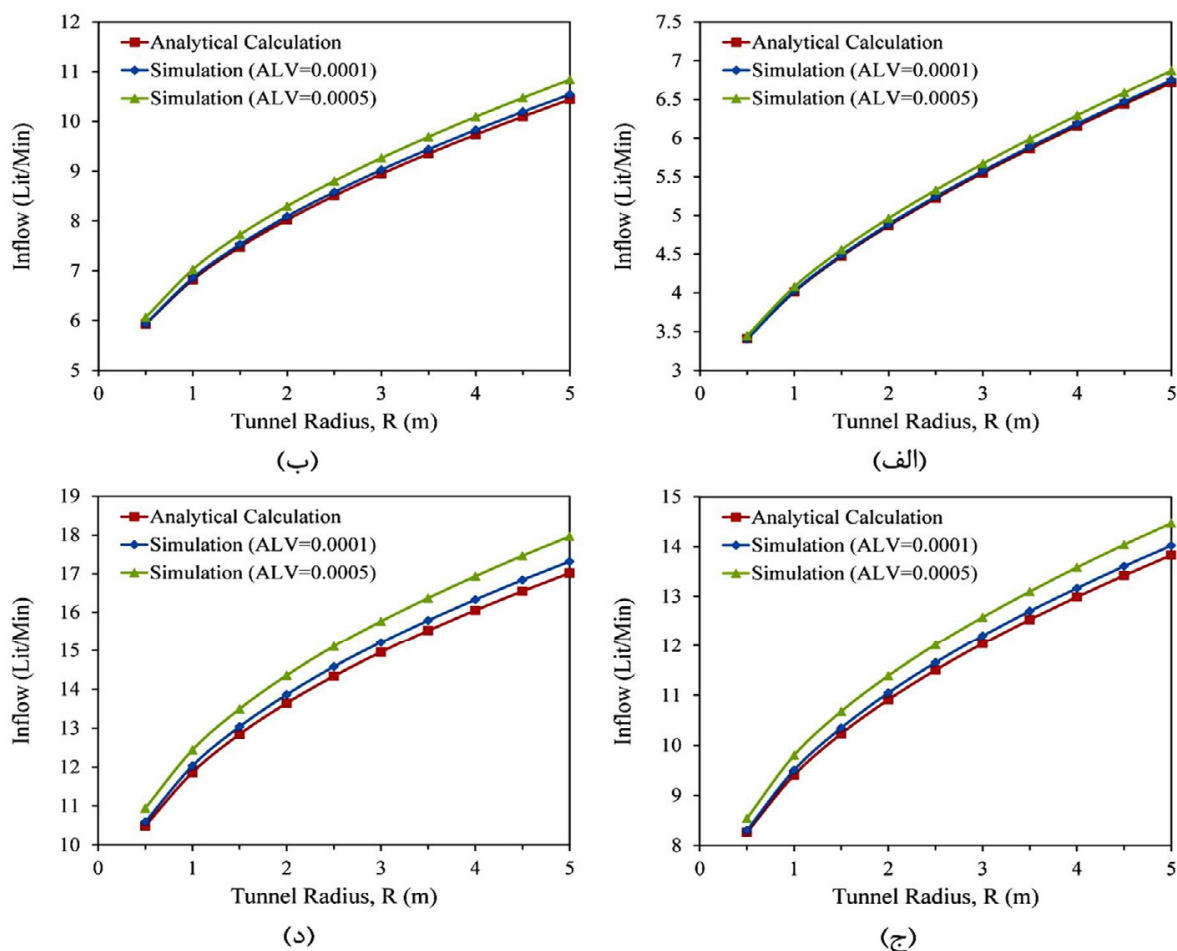
می‌شود. این مسئله باعث می‌شود که با افزایش شعاع تونل، رفتار حادی نرخ کاهش دبی جریان آب ورودی به داخل تونل، در مقیاس‌های بزرگتری از دامنه جریان حادث شود. همچنین، با افزایش عمق، میزان حساسیت دبی جریان آب ورودی به تغییرات مقیاس دامنه بیشتر می‌شود. در نتیجه، رفتار حادی نرخ کاهش دبی جریان آب ورودی به داخل تونل، با افزایش عمق در مقیاس‌های بزرگتری پدیدار خواهد شد. با توجه به این موارد، می‌توان انتظار داشت که با افزایش عمق و شعاع تونل، مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS) افزایش یابد.

برای شعاع‌ها و عمق‌های مختلف تونل، مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS) با استفاده از رابطه ۱ و برای دو سطح قابل قبول ALV معادل با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ محاسبه شده است. در شکل ۳، تغییرات مقیاس منتخب دامنه جریان، بر اساس شعاع تونل نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳، با افزایش شعاع تونل، مقیاس منتخب دامنه جریان بصورت غیرخطی افزایش می‌یابد. نمودارهای مربوط به تغییرات مقیاس منتخب دامنه جریان بر اساس شعاع تونل دارای تقعر رو به پایین هستند. در نتیجه، با افزایش شعاع تونل، از شدت تغییرات SDS کاسته می‌شود. همچنین، نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که نرخ تغییرات مقیاس منتخب دامنه جریان با شعاع، برای سطح قابل قبول ALV معادل با ۰/۰۰۰۱ بیشتر از سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۵ است. مطابق با شکل ۳، با افزایش سطح قابل قبول ALV (که به معنای کاهش دقت مورد نیاز است)، مقیاس منتخب دامنه جریان به



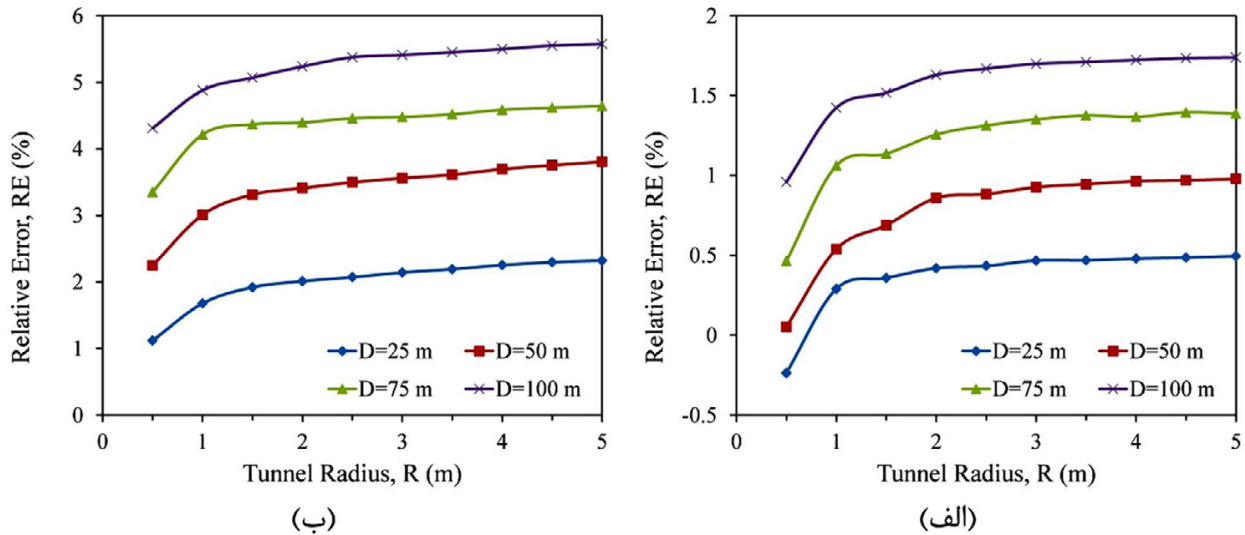
شکل ۴. تاثیر عمق تونل بر مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS) برای مقادیر مختلف سطح قابل قبول ALV: الف) ۰/۰۰۰۱ و ب) ۰/۰۰۰۵.

Fig. 4. Tunnel depth effect on SDS for Different ALVs: a) 0.0001, and b) 0.0005.



شکل ۵. مقایسه دبی جریان آب ورودی به تونل برای حل تحلیلی و مدل سازی عددی با مقیاس های منتخب متناظر با سطوح ALV معادل با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵. برای اعماق مختلف تونل: الف) عمق ۲۵ متر، ب) عمق ۵۰ متر، ج) عمق ۷۵ متر و د) عمق ۱۰۰ متر.

Fig. 5. Comparison of predicted groundwater inflow with analytical solution and numerical simulation for different depth of: a) 25 m, b) 50 m, c) 75 m, and d) 100 m.



شکل ۶. تاثیر شعاع و عمق تونل بر خطای نسبی بین دبی جریان آب ورودی حاصل از حل تحلیلی و مدل سازی با استفاده از مقیاس منتخب دامنه جریان برای مقادیر مختلف سطح قابل قبول ALV (الف: ۰/۰۰۰۱ و ب) ۰/۰۰۰۵.

Fig. 6. The effect of tunnel radius and depth on the relative error of groundwater inflow into tunnel for Different ALVs: a) 0.0001, and b) 0.0005.

$$A = D \left(\frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2} \right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{r} \left(D - \sqrt{D^2 - r^2} \right)$$

در روابط فوق، Q دبی جریان آب ورودی برای یک متر تونل، K هدایت هیدرولیکی معادل توده سنگ، h_w ارتفاع آب در بالای سطح زمین (از سطح زمین تا سطح ایستابی)، D روباره تونل (فاصله قائم بین مرکز تونل تا سطح زمین) و r شعاع تونل است. بمنظور مقایسه نتایج و ارزیابی تاثیر سطح قابل قبول ALV بر دقت نتایج مدل سازی، مقادیر دبی جریان آب ورودی برای هر یک از شعاعها و عمقهای قرار گیری تونل با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شده و مقادیر آن در مقایسه با مقادیر حاصل از مدل سازی عددی (با دامنه جریان با مقیاس منتخب) در شکل ۵ ارائه شده است.

بررسی شکل ۵ نشان می دهد، نتایج مربوط به دبی جریان آب ورودی به تونل با استفاده از کد محاسباتی FNETF و دامنه جریان با مقیاس منتخب و حل تحلیلی هم از نظر مقدار و هم از نظر روند تغییرات انطباق بسیار خوبی دارند. در عمده موارد، دبی جریان آب ورودی حاصل از تحلیل عددی، بیشتر از مقدار مربوط به حل تحلیلی

همچنین، نمودارهای مربوط به تغییرات مقیاس منتخب دامنه جریان بر اساس عمق قرارگیری تونل بصورت صعودی و دارای تقعر رو به پایین هستند. این موضوع نشان می دهد که با افزایش عمق قرارگیری تونل، از شدت تغییرات SDS کاسته می شود. بعبارت دیگر، نرخ تغییرات مقیاس منتخب دامنه جریان (شیب منحنی)، با افزایش عمق قرارگیری تونل کاهش می یابد. همچنین، مقایسه شکل ۴ نشان می دهد که نرخ تغییرات مقیاس منتخب دامنه جریان با عمق، برای سطح قابل قبول ALV معادل با ۰/۰۰۰۱ بیشتر از سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۵ است.

برای ارزیابی تاثیر مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS) بر دقت نتایج مدل سازی جریان آب ورودی به تونل، نتایج حاصل از مدل سازی عددی با مقادیر پیش بینی شده با روش تحلیلی التانی^۱ (۲۰۰۳) با هم مقایسه شده اند. رابطه تحلیلی مورد استفاده برای محاسبه جریان آب ورودی به داخل تونل (با شرط مرزی جریان آزاد یا هد فشاری صفر بر روی مرزهای تونل) بصورت زیر است [۷]:

$$Q = \frac{2\pi K (A + h_w)}{\ln \left(\frac{D}{r} + \sqrt{\frac{D^2}{r^2} - 1} \right)}$$

و خطای نسبی دبی جریان آب ورودی (شکل ۶)، می‌توان سطح قابل قبول ALV را برای انجام مدل‌سازی‌ها انتخاب کرد. افزایش سطح قابل قبول ALV به معنای کاهش دقت مدل‌سازی است. همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شد، با کاهش سطح قابل قبول ALV از ۰/۰۰۰۵ به ۰/۰۰۰۱، مقیاس دامنه جریان مورد نیاز برای مدل‌سازی بطور متوسط ۱/۸ برابر می‌شود. افزایش ابعاد دامنه جریان باعث افزایش شدید زمان محاسبات حل عددی می‌شود. البته، با وجود افزایش شدید زمان محاسبات با افزایش ابعاد دامنه جریان، مقدار خطای مدل‌سازی کاهش شدیدی نمی‌یابد. از طرف دیگر، مقدار خطای ایجاد شده در نتایج مدل‌سازی برای مقیاس منتخب با ALV معادل با ۰/۰۰۰۵ نیز در محدوده قابل پذیرش بوده و حداکثر خطای نسبی کمتر از ۶٪ است. برای کاربردهای عملی، با کاهش دقت مورد نیاز در مدل‌سازی (با کاهش ابعاد دامنه جریان) می‌توان زمان مدل‌سازی جریان را بشدت کاهش داد. بنابراین، برای کاربردهای عملی می‌توان از سطح قابل قبول ALV معادل با ۰/۰۰۰۵ استفاده کرد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تاثیر ابعاد مدل عددی مربوط به دامنه جریان (از دیدگاه اثرگذاری شرایط مرزی اعمالی) بر دقت نتایج مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی در اطراف فضای زیرزمینی و با تمرکز بر جریان آب ورودی، مورد مطالعه قرار گرفت. هدف از این مطالعه، ارائه یک چارچوب و روش کلی برای تعیین ابعاد مناسب دامنه جریان (فاصله مرزهای مدل از فضای زیرزمینی) برای مدل‌سازی جریان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی است. بدین منظور، مفاهیمی همچون نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی (NRIV)، سطح قابل قبول از نرخ تغییرات نرمال شده دبی جریان آب ورودی (ALV) و مقیاس منتخب دامنه جریان (SDS) توسعه داده شد. با بکارگیری این مفاهیم، یک چارچوب کلی از نحوه تعیین مقیاس مناسب دامنه جریان برای مدل‌سازی جریان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی ارائه شد.

در این مطالعه، دو سطح دقت مدل‌سازی شامل دقت مورد نیاز برای مقاصد تحقیقاتی و سطح دقت معمول (برای مقاصد مهندسی) در نظر گرفته شده است. برای این دو سطح دقت مدل‌سازی، مقادیر ALV بترتیب برابر با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ پیشنهاد شده که این

است. همچنین، دبی جریان آب ورودی حاصل از تحلیل عددی با مقیاس دامنه مربوط به سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۱، کمتر از سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۵ است. برای همه تحلیل‌های انجام شده، با افزایش شعاع تونل، اختلاف بین مقادیر دبی جریان افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش عمق قرارگیری تونل، اختلاف بین مقادیر دبی جریان نیز افزایش می‌یابد.

برای مقایسه بهتر بین نتایج مربوط به مدل‌سازی عددی جریان آب ورودی به تونل (برای دامنه با مقیاس منتخب) و حل تحلیلی، خطای نسبی (RE) بین مقادیر دبی جریان آب ورودی به تونل محاسبه و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. خطای نسبی بین حل تحلیلی ($Q_{Analytical}$) و عددی ($Q_{Num.}^{SDS}$) برای مقیاس‌های منتخب متناظر با سطوح قابل قبول ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ بطور جداگانه محاسبه شده است. بدین منظور، ابتدا اختلاف بین مقادیر دبی جریان آب ورودی مربوط به حل تحلیلی و حل عددی محاسبه و این مقدار بر اساس مقدار دبی جریان آب حاصل از حل تحلیلی با استفاده از رابطه زیر بی بعد شده است:

$$RE = \frac{Q_{Analytical} - Q_{Num.}^{SDS}}{Q_{Analytical}} \times 100 \quad (3)$$

مطابق با شکل ۶، نمودارهای مربوط به خطای نسبی دبی جریان یک روند افزایشی را با شعاع تونل نشان می‌دهند. با افزایش شعاع تونل، مقدار خطای نسبی ابتدا به سرعت افزایش یافته و در ادامه از شدت تغییرات آن کاسته می‌شود. برای همه موارد، بیشترین اختلاف نسبی بین مقادیر دبی جریان آب ورودی، در بیشترین شعاع تونل ظاهر می‌شود. همچنین، با افزایش عمق قرارگیری تونل، مقدار خطای نسبی نیز افزایش می‌یابد. در هر حالت از شعاع و عمق قرارگیری تونل، مقدار خطای نسبی مربوط به سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۱ کمتر از سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۵ است. برای سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۱ (شکل ۶-الف)، مقدار خطای نسبی مربوط به بیشترین شعاع (R=5) (m)، برای اعماق ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متر بترتیب برابر با ۰/۴۹٪، ۰/۹۷٪، ۱/۳۸٪ و ۱/۷۴٪ است. همچنین، مقدار خطای نسبی مربوط به بیشترین شعاع برای سطح قابل قبول ۰/۰۰۰۵ برای اعماق ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ متر، بترتیب برابر با ۲/۳۲٪، ۳/۸۰٪، ۴/۶۴٪ و ۵/۵۷٪ است (شکل ۶-ب).

با مقایسه نتایج مربوط به مقیاس منتخب دامنه جریان (شکل ۳)

- Sedimentary Rock Masses. Tunn. Undergr. Space Technol., 34, 1–12.
- [2]. Aalianvari, A., Katibeh, H., Sharifzadeh, M., 2012. Application of Fuzzy Delphi AHP Method for the Estimation and Classification of Ghomrud Tunnel from Groundwater Flow Hazard. Arab. J. Geosci., 5, 275–284.
- [3]. Tammetta, P., 2013. Estimation of the Height of Complete Groundwater Drainage Above Mined Longwall Panels. Groundwater, 51(5) 723–734.
- [4]. Kusaka, T., Sreng, S., Uzuoka, R., Ito, R., Mochizuki, A., 2011. Study on ground upheaval caused by the rise in groundwater level by centrifuge tests and by numerical simulations. Japanese Geotechnical Journal, 6(3), 439–454. <https://doi.org/10.3208/jgs.6.439>
- [5]. Kusaka, T., Sreng, S., Tanaka, H., Sugiyama, H., Ito, T., Kobayashi, K., 2015. Experimental study on influence of ground rebound on tunnels caused by groundwater restoration. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1578-1582. <http://doi.org/10.3208/jgssp.JPN-146>
- [6]. Goodman, R., Moye, D., Schalkwyk, A., Javandel, I., 1965. Groundwater Inflow During Tunnel Driving. Eng. Geol., 1, 150–162.
- [7]. El Tani, M., 2003. Circular Tunnel in a Semi-Infinite Aquifer. Tunn. Undergr. Space Technol., 18(1), 49–55.
- [8]. Park, K.-H., Owatsiriwong, A., Lee, J.-G., 2008. Analytical Solution for Steady-State Groundwater Inflow into a Drained Circular Tunnel in a Semi-Infinite Aquifer: A Revisit. Tunn. Undergr. Space Technol., 23, 206–209.
- [9]. Huangfu, M., Wang, M.-S., Tan, Z.-S., Wang, X.-Y., 2010. Analytical Solutions for Steady Seepage into an Underwater Circular Tunnel. Tunn. Undergr. Space Technol., 25, 391–396.
- [10]. Anagnostou, G., 1995. The Influence of Tunnel Excavation on Hydraulic Head. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 19, 725-746.
- [11]. Molinero, J., Samper, J., Juanes, R., 2002. Numerical Modeling of the Transient Hydrogeological Response Produced by Tunnel Construction in Fractured Bedrocks. Eng. Geol., 64, 369–386.

مقادیر بر اساس دقت و میزان خطای مدل عددی تعیین شده است. عبارت دیگر، در این مطالعه، برای انتخاب ابعاد مناسب دامنه جریان برای مقاصد تحقیقاتی و مهندسی، مقدار مناسب ALV بترتیب برابر با ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵ پیشنهاد شده است.

نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده نشان داد که با افزایش عمق و ابعاد فضای زیرزمینی، مقیاس مناسب برای مدل‌سازی جریان (SDS) بصورت غیرخطی افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج مربوط به مقیاس منتخب دامنه جریان نشان داد که با کاهش سطح قابل قبول ALV از ۰/۰۰۰۵ به ۰/۰۰۰۱، مقیاس دامنه جریان مورد نیاز برای مدل‌سازی بطور متوسط ۱/۸ برابر شده و بطور همزمان خطای نسبی مدل‌سازی در حدود ۴٪ کاهش خواهد یافت. افزایش ابعاد دامنه جریان، باعث افزایش شدید زمان مدل‌سازی جریان در اطراف تونل شده که البته با افزایش شدید زمان محاسبات، مقدار خطای مدل‌سازی کاهش چندانی نمی‌یابد. بنابراین، برای کاربردهای عملی، سطح قابل قبول ALV معادل با ۰/۰۰۰۵ پیشنهاد می‌شود.

فهرست علائم

Q	دبی جریان آب ورودی برای یک متر تونل (m^3/s)
K	هدایت هیدرولیکی معادل توده سنگ (m/s)
h_w	ارتفاع آب در بالای سطح زمین (از سطح زمین تا سطح ایستایی) بر حسب متر
D	روباره یا عمق تونل (فاصله قائم بین مرکز تونل تا سطح زمین) بر حسب متر
r	شعاع تونل
RE	خطای نسبی بین مقادیر دبی جریان آب ورودی به تونل (بدون واحد)
LD	گسترش عمقی و عرضی دامنه جریان (m)
Q'_S	نرخ تغییرات دبی جریان آب ورودی نسبت به مقیاس دامنه
Q_i^{LD}	دبی جریان آب ورودی (بر حسب لیتر بر دقیقه) برای مقیاس LD_i

مراجع

- [1]. Zarei, H.R., Uromeihy, A., Sharifzadeh, M., 2013. A New Tunnel Inflow Classification (TIC) System through

- Technology, 71, 126–137.
- [20]. Bobet, A., 2010. Numerical Methods in Geomechanics. The Arabian Journal for Science and Engineering, 35(1B), 27-48.
- [21]. Indraratna, B., Ranjith, P., 1998. Effects of Boundary Conditions and Boundary Block Sizes on Inflow to an Underground Excavation- Sensivity Analysis. IMWA Symposium, Johannesburg.
- [22]. Butscher, C., 2012. Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology 32, 158–167.
- [23]. Farhadian, H., Katibeh, H., Huggenberger, P., Butscher, C., 2016. Optimum model extent for numerical simulation of tunnel inflow in fractured rock Tunn. Undergr. Space Technol., 60, 21–29.
- [24]. Javadi M, Sharifzadeh M, Shahriar K. 2016. Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh pumped storage project, Iran. Tunnel. Undergr. Space Technol. 51: 424–438. DOI:10.1016/j.tust.2015.09.003
- [25]. Javadi, M., Sayadi, S., 2018. Stochastic discontinuum analysis of hydrocarbon migration probability around an unlined rock cavern based on the discrete fracture networks. Tunn. Undergr. Space Technol., 81, 41-54.
- [26]. Javadi, M., Sayadi, S., 2018. Upgrading the FNETF Computational Code for Modeling of Groundwater Inflow into Underground Excavations by Using the Stochastic Continuum Theory. Tunneling and Underground Space Engineering (TUSE), In press. (In Persian).
- [27]. Javadi, M., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., Sayadi, S. 2016. Migration Tracing and Kinematic State Concept Embedded in Discrete Fracture Network for Modeling Hydrocarbon Migration around Unlined Rock Caverns. Journal of Computers & Geosciences, 91, 105-118. doi:10.1016/j.cageo.2016.02.012
- [12]. Li, D., Li, X., Li, C.C., Gong, F., Huang, B., Gong, F., Zhang, W., 2009. Case Studies of Groundwater Flow into Tunnels and an Innovative Water-Gathering System for Water Drainage. Tunn. Undergr. Space Technol., 24, 260–268.
- [13]. Kurose, H., Ikeya, S., Chang, C.-S., Maejima, T., Shimaya, S., Tanaka, T., Aoki, K., 2014. Construction of Namikata underground LPG storage cavern in Japan. International Journal of the JCRM, 10, 15-24.
- [14]. Jiang, X.-W., Wan, L., Jim Yeh, T.-C., Wang, X.-S., Xu, L., 2010. Steady-state discharge into tunnels in formations with random variability and depth-decaying trend of hydraulic conductivity. Journal of Hydrology, 387, 320–327.
- [15]. Javadi M, Sharifzadeh M, Shahriar K. 2016. Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh pumped storage project, Iran. Tunnel. Undergr. Space Technol. 51: 424–438. DOI:10.1016/j.tust.2015.09.003
- [16]. Fernandez, G., Moon, J., 2010. Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel – Part 2: Verification of proposed method using numerical modeling. Tunn. Undergr. Space Technol., 25, 567–574.
- [17]. Javadi, M., Sayadi, S., 2018. Stochastic discontinuum analysis of hydrocarbon migration probability around an unlined rock cavern based on the discrete fracture networks. Tunn. Undergr. Space Technol., 81, 41-54.
- [18]. Butscher, C., Einstein, H. H., Huggenberger, P., 2011. Effects of tunneling on groundwater flow and swelling of clay-sulfate rocks. Water Resources Research, 47, W11520. doi:10.1029/2011WR011023
- [19]. Qi, T. Y., Lei, B., Wang, R., Li, Y., Li, Z. Y., 2018. Solid-fluid-gas coupling prediction of harmful gas eruption in shield tunneling. Tunnelling and Underground Space

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Javadi, M. Sharifzadeh, K. Shahriar, A Quantitative Criterion-based Methodology for Selecting Appropriate Domain Size for Numerical Modeling of Groundwater Inflow into Tunnel, Amirkabir J. Civil Eng., 52(5) (2020) 1265-1276.

DOI: 10.22060/ceej.2019.15297.5878



