نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۷- شماره‌ی۱/تابستان ۱۳۹۷

ارتقای کد محاسباتی FNETF با هدف مدل سازی جریان آب ورودی به داخل فضاهای زیرزمینی با استفاده از تئوری محیط پیوسته تصادفی

مرتضی جوادی اصطهباناتی*[1]؛ شهربانو صیادی[2]
۱- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۳/۲۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۴/۱۸
شناسه دیجیتال (DOI):10.22044/tuse.2018.4468.1270

واژگان کلیدی
رفتار هیدرولیکی
محیط پیوسته تصادفی
جریان آب ورودی
فضای زیرزمینی
عدم قطعیت جریان
کد محاسباتی *FNETF*

چکیده

در این مقاله، مدل سازی جریان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی (تونل) با استفاده از روش محیط پیوسته تصادفی مطالعه شده است. بدین منظور، کد محاسباتی دو بعدی *FNETF* بر اساس روش محیط پیوسته تصادفی و با هدف مدل سازی جریان آب ورودی به داخل حفریات زیرزمینی ارتقا و سپس صحت سنجی شد. سپس، تاثیر ویژگی های هیدرولیکی محیط درونگیر تونل بر روی دبی جریان آب ورودی بررسی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد، خروجی کد محاسباتی *FNETF* برای توده سنگ دارای انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی نزدیک به صفر (محیط ایده آل) هم از نظر توزیع هد فشاری اطراف تونل و هم از نظر مقدار دبی جریان آب ورودی با نتایج دو روش تحلیلی و مدل سازی عددی با استفاده از محیط پیوسته معادل دارای انطباق بسیار خوبی بوده بگونه ای که حداکثر خطای نسبی بین مقادیر دبی جریان آب ورودی کمتر از ٪۰/۸۵ است. همچنین، با افزایش انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی، همچنین، با افزایش انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی، مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه دبی جریان آب ووردی به تونل کاهش می یابد.

۱- مقدمه

جریان آب زیرزمینی و ورود آب به داخل فضای زیرزمینی، در بیشتر موارد بعنوان یک چالش بسیار مهم در صنعت تونلسازی تلقی شده و مشکلات متعددی را ایجاد می‌کند. با توجه به اثرات مختلف آب بر فضاهای زیرزمینی، لازم است در مراحل مختلف طراحی و اجرایی، محل و مقدار تقریبی جریان آب ورودی تا حد امکان و با استفاده از ابزار و مدل مناسب پیش بینی شود.

روش های تجربی-توصیفی مورد استفاده برای مسئله جریان آب ورودی به داخل حفریات زیرزمینی عمدتا به مدل های مفهومی و مشاهدات میدانی *(Sharifzadeh, et al., 2012)* و *(Cesano, et al., 2000)* و یا تخمینی از دبی جریان آب ورودی به فضای زیرزمینی *(Zarei et al., 2013)* و *(Tammetta, 2013)* محدود می شوند. در سال های اخیر، برای رفع نواقص روش های تجربی-توصیفی، بطور گسترده‌ای از مدل سازی جریان با استفاده از حل معادلات حاکم استفاده شده است. روش های مبتنی بر مدل سازی جریان سیال در محیط سنگی اطراف حفریات زیرزمینی را می توان به دو روش اصلی پیوسته و ناپیوسته تقسیم بندی کرد. تفاوت اصلی بین دو روش پیوسته و ناپیوسته در نحوه اعمال تاثیر شکستگی ها در رفتار هیدرولیکی توده سنگ است. در روش های ناپیوسته، نقش ناپیوستگی ها بطور مستقیم در مدل سازی اعمال می شود. ساخت مدل مناسب برای رفتار هیدرولیکی با استفاده از روش ناپیوسته نیازمند اطلاعات بسیار زیادی در

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه‌ی سوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱؛
شماره‌ی تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۵۵۰۹؛ رایانامه: mortezjavadi@gmail.com

رابطه به رفتار هندسی و رفتار هیدرولیکی شکستگی ها خواهد بود (*Javadi & Sharifzadeh, 2014*) و (*Javadi, et al., 2016a*) که معمولاً این داده های مورد نیاز در بسیاری از پروژه ها در دسترس نخواهد بود. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های عددی مبتنی بر محیط پیوسته معادل برای اهداف مهندسی و بر اساس داده های کمتری قابل بکارگیری خواهد بود.

در روش های پیوسته، معادله حاکم بر جریان (معادله دارسی و یا معادله لاپلاس) به دو روش تحلیلی و عددی حل می شوند. روش های حل تحلیلی معادلات جریان برای محاسبه و پیش بینی جریان آب ورودی به داخل تونل از سابقه طولانی برخوردار بوده و معادلات تحلیلی متعددی توسط محققین مختلف برای محاسبه جریان آب ورودی به تونل ارائه شده است (*Goodman, et al., 1965*)، (*El Tani, 2003*)، (*Park, et al., 2008*) و (*Huangfu, et al., 2010*). معادلات تحلیلی، عموماً برای تونل های با سطح مقطع دایره‌ای در زیر سطح آب زیرزمینی و محیط همگن همسانگرد ارائه شده اند که از این معادلات تنها می توان برای تحلیل پارامتریک (که معمولاً در مراحل اولیه طراحی و یا امکان سنجی مورد استفاده قرار می گیرند) و یا اعتبارسنجی روش‌های دیگر بکار گرفت(*El Tani, 2003*). برای رفع بعضی از محدودیت های روش های تحلیلی، محققین مختلف بطور گسترده از روش های عددی استفاده کرده اند (*Tal & Dagan, 1983*)، (*Anagnostou, 1995*) و (*Molinero, et al., 2002*). البته، در عمده مطالعات فوق (عددی و تحلیلی) پارامترهای هیدرولیکی محیط درونگیر فضای زیرزمینی بصورت قطعی لحاظ شده اند. با این وجود، در همه ساختارهای زمین شناسی و سازندهای طبیعی (حتی محیط های همگن)، ویژگی های هیدروژئولوژیکی (نظیر نفوذپذیری و تخلخل) بصورت غیر یکنواخت و وابسته به مکان (با تغییرات فضایی) ظاهر شده (*Dagan, 1997*) و پیش بینی رفتار و فرآیندهای فیزیکی مرتبط با جریان سیال با استفاده از روش های قطعی امکان پذیر نیست (*Neuman, 1997*) و (*Javadi & Sayadi, 2018*). در این حالت، ناهمگنی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی محیط (بطور مثال هدایت هیدرولیکی) را می توان با استفاده از انحراف استاندارد و توزیع فراوانی بیان نموده (*Freeze, 1997*)، که روش پیوسته تصادفی (*Stochastic Continuum*) به عنوان بهترین گزینه برای این هدف خواهد بود (*Neuman, 1987*). با این وجود، روش پیوسته تصادفی برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی در اطراف تونل ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از روش محیط پیوسته تصادفی برای مدل سازی جریان آب ورودی به حفریات زیرزمینی، نیازمند بکارگیری کدهای محاسباتی است که علاوه بر قابلیت تولید و پردازش محیط تصادفی و تحلیل مسائل جریان سیال، دارای توانایی مدل سازی بصورت سیستماتیک و برای آرایش های متعدد از تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی را داشته باشد. در حال حاضر دسترسی به چنین کد محاسباتی وجود نداشته که در نتیجه، این مقاله بر روی توسعه یک کد محاسباتی با توانایی بکارگیری تئوری محیط پیوسته تصادفی برای مدل سازی جریان آب ورودی به داخل فضاهای زیرزمینی متمرکز شده است.

در این مقاله، مدل سازی جریان پایدار (*Steady State*) آب ورودی به داخل فضاهای زیرزمینی با استفاده از روش پیوسته تصادفی بررسی شده است. بدین منظور، بعد از بیان کلیات روش پیوسته تصادفی، مبانی و الگوریتم کد محاسباتی توسعه داده شده برای مدل سازی جریان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی توضیح داده شده است. سپس، با توجه به نوپا بودن این کد محاسباتی، صحت سنجی محاسبات هیدرولیکی در این کد محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، با استفاده از این کد محاسباتی، دبی جریان آب ورودی به داخل تونل و بصورت مطالعه پارامتریک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مبانی روش پیوسته تصادفی

مدل سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مفهوم تئوری محیط تصادفی یکی از مهم ترین موضوعات تحقیقاتی در دو دهه اخیر بوده است. در تئوری محیط تصادفی به این موضوع پرداخته می شود که تغییرات پارامترهای هیدروژئولوژیکی تحت تاثیر عدم قطعیت بوده و این پارامترها عمدتاً بصورت تصادفی در محیط توزیع می شوند (*Dagan, 1997*). بصورت عملی، مهم ترین مزیت روش های تصادفی، قابلیت این روش‌ها در کمی سازی عدم قطعیت مسائل زیرسطحی بوده و این روش ها، قابلیتی را ایجاد می کنند که بتوان ریسک های

ناشی از ناهمگنی محیط و همچنین فقدان داده ها را در مسائل طراحی اعمال نمود (*Renard, 2007*).

روش محیط پیوسته تصادفی، بصورت ترکیب مدل سازی عددی رفتار هیدرولیکی توده سنگ (با در نظر گرفتن رفتار پیوسته) و مفهوم هیدروژئولوژی تصادفی (*Stochastic Hydrogeology*) است. این روش، یک چارچوب کلی برای تخمین محدوده قابل انتظار مولفه های هیدرولیکی مرتبط با جریان و برآورد عدم قطعیت آن ارائه می کند (بطور مثال: محدوده قابل انتظار، میانگین و عدم قطعیت دبی جریان آب ورودی به فضای زیرزمینی).

مدل سازی عددی رفتار هیدرولیکی به مجموعه فرآیند ساخت مدل محاسباتی، تخصیص هدایت هیدرولیکی به المان های مدل و تحلیل عددی جریان سیال اطلاق می شود. این فرآیند برای آرایش های مختلفی از تخصیص هدایت هیدرولیکی (مدل هندسی-هیدرولیکی از دامنه جریان) تکرار شده بگونه ای که مجموعه آماری مناسبی از نتایج خروجی حاصل شود. ورودی های اصلی برای مدل سازی جریان آب ورودی به تونل با استفاده از تئوری محیط پیوسته تصادفی، شامل ویژگی های هیدرولیکی توده سنگ (بصورت پارامتر های آماری) و شرایط آب زیرزمینی (شرایط مرزی) است. مهم ترین خروجی محاسبات نیز توزیع فراوانی دبی جریان آب ورودی به داخل تونل بهمراه میانگین، محتمل ترین محدوده (محدوده قابل انتظار) و میزان انحراف از میانگین (انحراف استاندارد) دبی جریان آب ورودی بعنوان سنجه ای برای بیان عدم قطعیت هستند.

۳- مبانی و الگوریتم کد محاسباتی FNETF

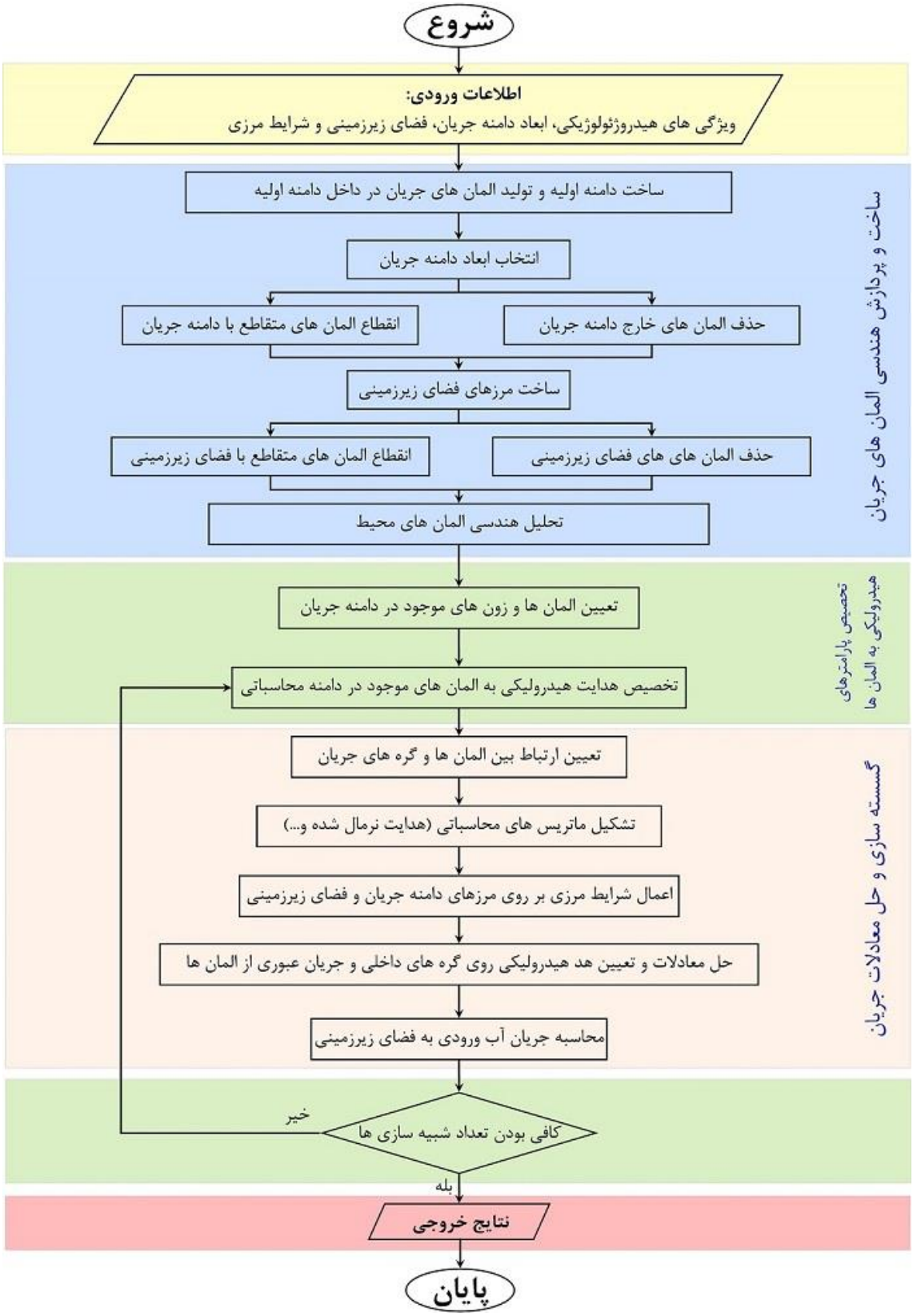
کد محاسباتی *FNETF* در اصل با هدف مدل سازی جریان سیال در محیط ناپیوسته و بر اساس مفهوم شبکه شکستگی مجزا و در محیط برنامه نویسی *MATLAB* توسعه یافته و اعتبار سنجی و صحت سنجی آن برای اهداف مختلفی قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است (*Javadi & Sharifzadeh, 2014*، *Javadi, et al., 2016a*) و (*Javadi, et al., 2016b*). با توجه به قابلیت های کد محاسباتی *FNETF*، برای انجام مطالعه حاضر از این کد محاسباتی استفاده شده و بخش جدیدی برای مدل سازی محیط پیوسته تصادفی و تحلیل جریان سیال در این نوع محیط به این کد محاسباتی اضافه شده است. در اصل، در این مطالعه،کد محاسباتی *FNETF* برای مدل سازی محیط پیوسته تصادفی و تحلیل مسائل جریان سیال ارتقا داده شده است. در نسخه ارتقا یافته‌ی این کد محاسباتی، برای مدل سازی محیط پیوسته تصادفی و تحلیل جریان سیال، فرآیند مدل سازی مسائل جریان سیال در سه مرحله مختلف زیر انجام می‌شود:

۱- ساخت مدل هندسی دامنه جریان (مرزهای داخلی، خارجی و المان بندی)
۲- تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی به المان های دامنه محاسباتی با استفاده از تئوری محیط پیوسته تصادفی
۳- گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان در شبکه و حل عددی معادلات و محاسبات جریان پایدار

فلوچارت کلی فرآیند فوق در **شکل ۱** نشان داده شده است. در ادامه، مراحل مختلف مدل سازی جریان با استفاده از این کد محاسباتی بطور خلاصه تشریح شده است.

۳-۱- ساخت مدل هندسی دامنه جریان

اولین مرحله از فرآیند مدل سازی جریان و محاسبه جریان آب ورودی به داخل حفریات زیرزمینی، ساخت یک مدل هندسی از دامنه جریان است. این مدل هندسی شامل، مرزهای خارجی دامنه جریان، مرزهای داخلی (فضای زیرزمینی) و المان بندی دامنه جریان است. بدین منظور، ابتدا با استفاده از ابعاد دامنه جریان، مرزهای خارجی دامنه ساخته می شود. مرز افقی بالایی، در حدفاصل محدوده اشباع و غیر اشباع (سطح آب زیرزمینی) قرار می گیرد. مرزهای جانبی (قائم) و مرز پایینی دامنه جریان نیز در فاصله ای دور از فضای زیرزمینی و بگونه ای در نظر گرفته می شوندکه فرض معمول مربوط به شرایط مرزی هیدرولیکی مورد استفاده برای مدل سازی جریان (تغییرات ناچیز هد هیدرولیکی) برقرار باشد.


شروع
اطلاعات ورودی:
ویژگی های هیدروژئولوژیکی، ابعاد دامنه جریان، فضای زیرزمینی و شرایط مرزی
ساخت و پردازش هندسی المان های جریان
ساخت دامنه اولیه و تولید المان های جریان در داخل دامنه اولیه
انتخاب ابعاد دامنه جریان
حذف المان های خارج دامنه جریان
انقطاع المان های متقاطع با دامنه جریان
ساخت مرزهای فضای زیرزمینی
حذف المان های های فضای زیرزمینی
انقطاع المان های متقاطع با فضای زیرزمینی
تحلیل هندسی المان های محیط
تخصیص پارامترهای هیدرولیکی به المان ها
تعیین المان ها و زون های موجود در دامنه جریان
تخصیص هدایت هیدرولیکی به المان های موجود در دامنه محاسباتی
گسسته سازی و حل معادلات جریان
تعیین ارتباط بین المان ها و گره های جریان
تشکیل ماتریس های محاسباتی (هدایت نرمال شده و...)
اعمال شرایط مرزی بر روی مرزهای دامنه جریان و فضای زیرزمینی
حل معادلات و تعیین هد هیدرولیکی روی گره های داخلی و جریان عبوری از المان ها
محاسبه جریان آب ورودی به فضای زیرزمینی
کافی بودن تعداد شبیه سازی ها
خیر
بله
نتایج خروجی
پایان

شکل ۱- فلوچارت کلی ساخت مدل هندسی و تحلیل جریان در نسخه ارتقا یافته‌ی کد محاسباتی FNETF

بعد از ساخت مرزهای خارجی دامنه جریان، محدوده داخلی دامنه به المان های کوچک (چهاروجهی یا مربع شکل) تقسیم بندی می شود. در این حالت، دامنه جریان به نواحی کوچکتری تقسیم بندی (**شکل ۲-الف**) شده که به هر یک از این المان ها می توان خواص هیدروژئولوژیکی مختلفی را تخصیص داد.

هر المان چهاروجهی از چهار گره محاسباتی و چهار گوشه تشکیل شده که این گوشه ها و گره ها با المان های مجاور مشترک است. در مرحله بعد، مرزهای فضای زیرزمینی در داخل دامنه جریان ایجاد می شود (**شکل۲-ب**). مقطع فضای زیرزمینی می تواند دارای شکل های متنوع باشد ولی عمدتاً بصورت نعل اسبی یا دایروی است.

بعد از ساخت مرزهای مربوط به فضای زیرزمینی، المان‌هایی که کاملاً در داخل فضای زیرزمینی قرار می گیرند باید از دامنه محاسباتی حذف شوند (**شکل۲-ج**). بعد از حذف این نوع از المان ها، در صورت نیاز، المان بندی دامنه جریان اصلاح می شود (**شکل۲-د**). انجام کلیه مراحل فوق (ساخت و پردازش مدل هندسی) تحت عنوان تنظیم (*Regularization*) مدل هندسی نامیده می شود. مراحل ساخت و پردازش هندسی دامنه جریان در **شکل۲** نشان داده شده است.

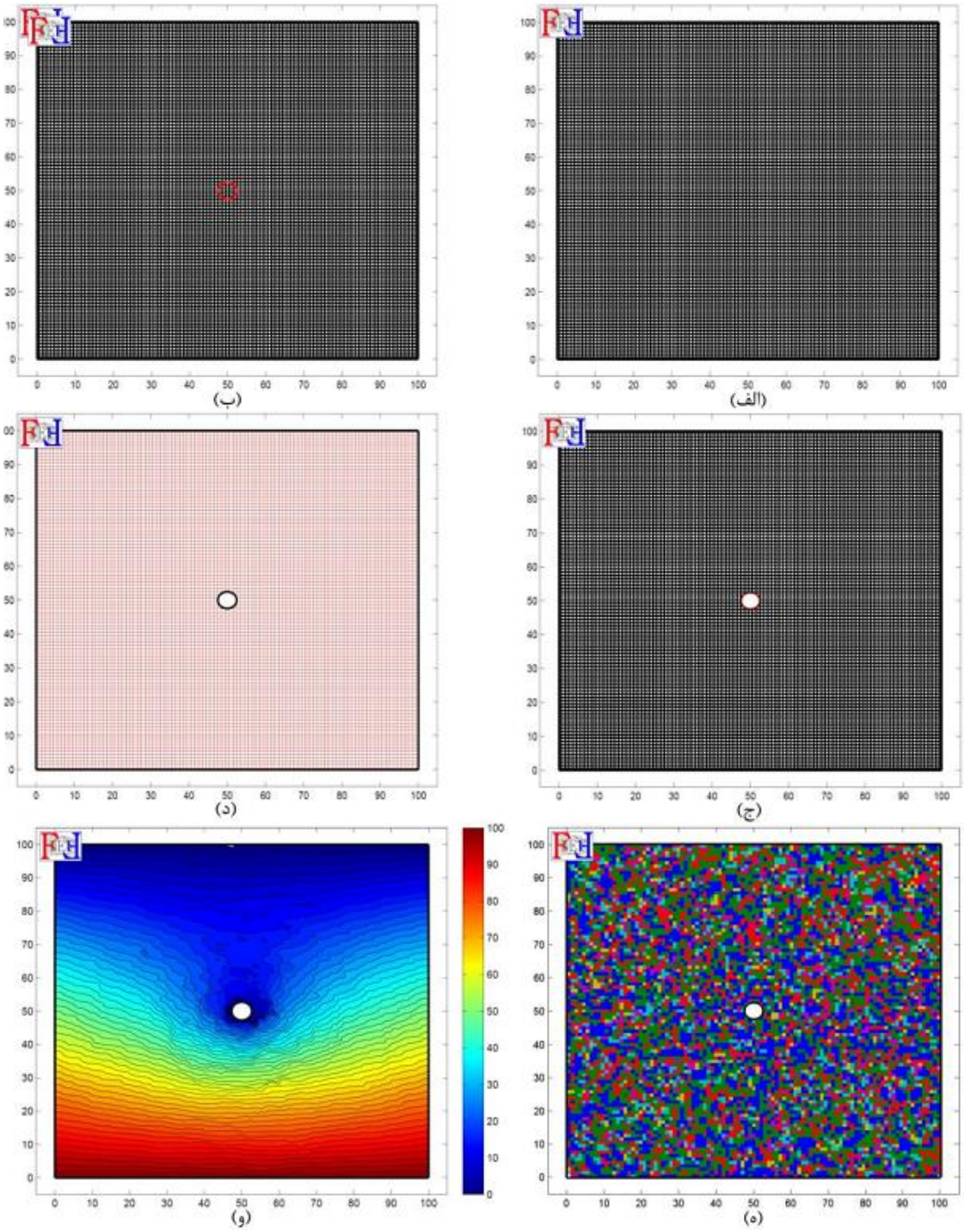
۲-۳- تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی به المان ها

دومین مرحله از مدل سازی جریان سیال در اطراف فضای زیرزمینی، تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی به المان های موجود در دامنه جریان (توده سنگ درونگیر فضای زیرزمینی) است. بطور کلی، در عمده سازندهای زمین شناسی (سازندهای طبیعی) ویژگی ها و خواص هیدروژئولوژیکی محیط مثل نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی بصورت غیر یکنواخت و وابسته به مکان ظاهر می شوند(*Sharifzadeh & Javadi, 2017*).

بهترین روش برای اعمال این ویژگی ذاتی سازندهای زمین شناسی (توده سنگ یا خاک درونگیر تونل) در مدل های عددی، استفاده از مفهوم تئوری محیط تصادفی است. در این تئوری، ویژگی های هیدروژئولوژیکی محیط بطور تصادفی در نظر گرفته می شود. برای رسیدن به این هدف، ابتدا لازم است تابع توزیع پارامترهای هیدروژئولوژیکی موثر در مسئله (بطور مثال تابع توزیع مربوط به هدایت هیدرولیکی توده سنگ) تعیین شود. سپس، از روش مونت کارلو برای تخصیص هدایت هیدرولیکی به هریک از اجزا مدل محاسباتی (المان های سنگی اطراف فضای زیرزمینی) استفاده می شود (*Javadi, et al., 2016a*). مقدار انتخاب شده ویژگی های هیدروژئولوژیکی به هر المان تحت عنوان "مقدار تصادفی هیدروژئولوژیکی" نامیده می‌شود. فرآیند تخصیص ویژگی های هیدروژئولوژیکی برای هر یک از المان های موجود در دامنه جریان تکرار می شود. با اتمام این فرآیند، یک آرایش تصادفی (*Stochastic Realization*) از مدل هیدروژئولوژیکی در اطراف فضای زیرزمینی بدست می آید. نمای کلی از یک آرایش تصادفی از مدل هیدروژئولوژیکی در شکل۲-ه نشان داده شده است.

تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی (مثل هدایت هیدرولیکی) در محیط اطراف فضای زیرزمینی با استفاده از روش مونت کارلو، باعث می شود که نتایج خروجی (بعد از محاسبات عددی) به نحوه تخصیص پارامترها وابسته باشد. در این حالت، نتیجه حاصل از هر "آرایش تصادفی از مدل هیدروژئولوژیکی" با نتایج حاصل از سایر آرایش های از مدل هیدروژئولوژیکی متفاوت خواهد بود. با توجه به این مسئله و برای جلوگیری وابستگی نتایج حاصل از مدل سازی به یک یا چند آرایش خاص از مدل هیدروژئولوژیکی، لازم است مراحل تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی به اجزای مدل محاسباتی و محاسبه جریان آب ورودی برای تعداد زیادی از آرایش‌های مختلف از محیط تصادفی تکرار شود(*Sharifzadeh & Javadi, 2017*) و (*Javadi, et al., 2016a*).

تکرار ساخت آرایش تصادفی از مدل هیدروژئولوژیکی تا زمانی ادامه داده می شود که واریانس نتایج خروجی از یک مقدار حدی (بطور معمول ۵٪) کمتر شود. در حقیقت، چرخه تکراری ساخت آرایش تصادفی از مدل هیدروژئولوژیکی و مدل سازی جریان سیال ورودی آنقدر ادامه پیدا می کند که تغییرات واریانس جریان آب ورودی به داخل فضای زیرزمینی نسبت به تعداد آرایش های مدل هیدروژئولوژیکی به کمتر از ۵٪ برسد.



شکل ۲- مراحل مدل سازی جریان: الف) ساخت مرزهای خارجی و المان بندی، ب) ساخت مرزهای فضای زیرزمینی، ج) حذف المان های داخل فضای زیرزمینی، د) پردازش و اصلاح المان ها، ه) تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی، و) حل معادلات جریان

۳-۳- گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان و حل عددی معادلات

یک دامنه محاسباتی از یک مدل المان بندی شده در **شکل ۳** نشان داده شده است. المان های این دامنه محاسباتی با مرزهای مشخص از سایر المان ها تفکیک شده و به هریک از این المان ها یک مقدار از هدایت هیدرولیکی تخصیص داده شده است. در مرکز هر المان نیز یک گره محاسباتی در نظر گرفته شده که مقدار هد هیدرولیکی در این گره بعنوان اصلی ترین مجهول مسئله تعریف می شود. دبی جریان عبوری از نقطه (۱) و (۲) در راستای محور x را می توان با استفاده از رابطه دارسی بصورت زیر بیان کرد (*Gustafson, et al., 1991*):

$$Q = K_{m,n}\frac{H_{m,n} - H_e}{\Delta x}\Delta y = K_{m+1,n}\frac{H_e - H_{m+1,n}}{\Delta x}\Delta y \quad (۱)$$

که در رابطه فوق، Q دبی جریان حجمی عبوری از واحد سطح (بعد سوم یا عمود بر صفحه معادل واحد)، K هدایت هیدرولیکی (بر حسب متر بر ثانیه) و H هد هیدرولیکی در نقاط است. لازم به ذکر است، معادله فوق بر اساس هد هیدرولیکی نقطه (e) در حد فاصله دو نقطه (۱) و (۲) نوشته شده است. بر همین اساس، معادله جریان حول هر نقطه (گره) دیگر نیز بدست می آید. با نوشتن کلیه معادلات جریان حول نقطه (۱) و ترکیب آن با رابطه بقای جرم (معادل با بقای حجم برای سیال تراکم ناپذیر)، رابطه زیر به دست می آید (*Gustafson, et al., 1991*):

$$K_{m-1,n}\frac{H_{m-1,n} - H_{m,n}}{\Delta x}\Delta y + K_{m+1,n}\frac{H_{m+1,n} - H_{m,n}}{\Delta x}\Delta y + K_{m,n-1}\frac{H_{m,n-1} - H_{m,n}}{\Delta y}\Delta x + K_{m,n+1}\frac{H_{m,n+1} - H_{m,n}}{\Delta y}\Delta x = 0 \quad (۲)$$

برای اینکه بتوان معادله فوق را بصورت کاربردی در محاسبات عددی وارد کرد، لازم است ترم های مربوط به ابعاد المان ها از معادلات حذف شود. بدین منظور، ترم هدایت هیدرولیکی به ضریب هدایت تبدیل شده که در این حالت، فرم اصلاح شده معادله (۲) بصورت زیر خواهد بود:

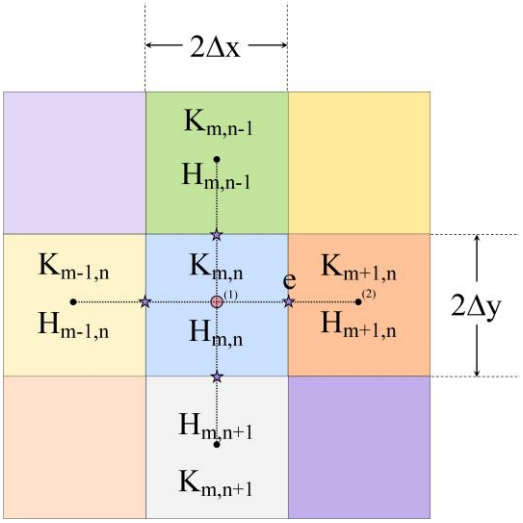
$$K\!\!\!\!\not\,_{m-1,n}H_{m-1,n} + K\!\!\!\!\not\,_{m+1,n}H_{m+1,n} + K\!\!\!\!\not\,_{m,n-1}H_{m,n-1} + K\!\!\!\!\not\,_{m,n+1}H_{m,n+1} = H_{m,n}(K\!\!\!\!\not\,_{m-1,n} + K\!\!\!\!\not\,_{m+1,n} + K\!\!\!\!\not\,_{m,n-1} + K\!\!\!\!\not\,_{m,n+1}) \quad (۳)$$

که در رابطه فوق، $K\!\!\!\!\not\,$ فرم تبدیل یافته هدایت هیدرولیکی است که تحت عنوان "ضریب هدایت" (*Conductance Ratio*) نامیده می شود. لازم به ذکر است، در حالتی که ابعاد طولی و عرضی المان ها با هم برابر باشد ($\Delta x = \Delta y$)، ضریب هدایت المان معادل با هدایت هیدرولیکی خواهد بود. رابطه فوق را می توان برای تمامی گره های موجود در دامنه جریان بکار گرفت. با در نوشتن رابطه فوق برای هر یک از گره های موجود در دامنه جریان، یک مجموعه از روابط مستقل از هم بدست می آید. این معادلات حاصله را می توان با اعمال هد معلوم بر روی گره های مرزی حل کرد. بدین منظور، معادلات حاصله بر اساس نوع گره ها جداسازی و تفکیک می شوند. در این حالت، فرم ماتریسی معادله جریان در شبکه بصورت زیر بدست می آید (*Javadi, et al., 2016b*):

$$[D^{pf}]\{H^p\} + [D^{ff}]\{H^f\} = 0 \quad (۴)$$

در این رابطه، بالانویس های p و f بترتیب نشان دهنده گره های مرزی (با هد معلوم) و گره های داخلی (با هد مجهول) است. بردار H^p بیان کننده هد هیدرولکی (معلوم) روی گره های مرزی و H^f بردار هد هیدرولیکی روی گره های داخلی (مجهول) است.

ماتریس غیر متقارن D^{pf} بیانگر هدایت نرمال شده المان های موجود بین گره های مرزی و گره های داخلی متصل به آنها است. ماتریس D^{pf} دارای n سطر (تعداد گره های داخلی) و m ستون (تعداد گره های مرزی) است. درایه‌های این ماتریس (سطر jام و ستون iام) $d_{i,j}$ معادل با مقدار بی بعد شده ضریب هدایت المان با مرکزیت گره jام نسبت به حاصل جمع ضریب هدایت همه المان های مجاور (محاطی) به گره j است. در صورتی که بین گره داخلی jام با گره مرزی iام المانی وجود نداشته باشد، مقدار $d_{i,j}$ برابر با صفر خواهد بود. ماتریس غیر متقارن D^{ff} نیز بیانگر هدایت نرمال شده المان های موجود بین گره های داخلی است. D^{ff} یک ماتریس مربعی $n \times n$ بوده که درایه های قطر اصلی آن برابر با (۱-) است. درایه های غیرقطری این ماتریس، بیان کننده هدایت نرمال شده بین گره های داخلی است. در صورتی که گره داخلی o با گره داخلی q ارتباط مستقیم نداشته باشد (المان واسط بین این گره ها وجود داشته باشد)، مقدار $d_{q,o}$ برابر با صفر خواهد بود.



شکل ۳- دامنه محاسباتی از یک مدل المان بندی شده

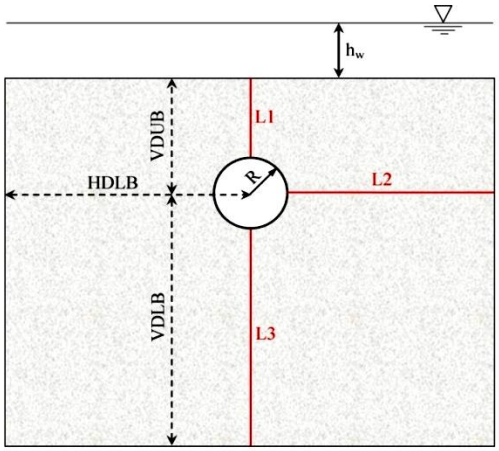
تنها ترم مجهول در معادله (۴)، مقادیر هد کلی در گره‌های داخلی یا بردار H_f است. برای محاسبه این بردار، ابتدا باید بردار معلوم H^p برای گره های خارجی و بر اساس شرایط مرزی اعمالی به مسئله تعیین شود. بعد از تعیین بردار H^p، معادله (۲) با استفاده از روش محاسبات ماتریسی حل می شود. در کد محاسباتی *FNETF*، برای حل معادله (۲) از روش حذفی گاوسی (*Gaussian Elimination*) استفاده شده و هد هیدرولیکی بر روی تمامی گره های داخلی مشخص می شود. با استفاده از مقادیر هد هیدرولیکی گره ها، دبی جریان عبوری از هر المان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود.

۴- صحت سنجی کد محاسباتی

با توجه به نوپا بودن کد محاسباتی *FNETF*، لازم است فرآیند مدل سازی در این کد محاسباتی مورد صحت سنجی قرار گیرد. منظور از صحت سنجی، بررسی صحت محاسبات انجام شده در مراحل مختلف مدل سازی است. برای صحت سنجی کد محاسباتی *FNETF*، از نتایج مدل سازی رفتار هیدرولیکی در اطراف تونل دایره ای و جریان آب ورودی به تونل استفاده شده است. بدین منظور، نتایج مربوط به توزیع هد هیدرولیکی در اطراف تونل دایره ای شکل و همچنین مقدار جریان آب ورودی به داخل تونل با استفاده روابط تحلیلی موجود محاسبه شده و نتایج آن با مقادیر حاصل از مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار *Phase2* و مدل سازی عددی با استفاده از کد محاسباتی *FNETF* مقایسه شده است. در حقیقت، بمنظور صحت سنجی کد محاسباتی *FNETF* از نتایج دو راه حل مختلف (تحلیلی و حل عددی با استفاده از یک نرم افزار تجاری) استفاده شده است. برای رسیدن به این هدف، یک سری فرضیات اولیه و شرایط هیدرولیکی برای مسئله مورد بررسی در نظر گرفته شده که این موارد، در ادامه توضیح داده شده اند.

۴-۱- تعریف مسئله و دامنه جریان

مسئله مورد بررسی، شامل مدل سازی جریان آب ورودی و همچنین توزیع هد هیدرولیکی در اطراف یک تونل دایره ای شکل برای جریان پایدار است. تونل مورد بررسی در عمق ۵۰ متری از سطح زمین واقع شده و محاسبات برای تونل با شعاع های مختلف شامل ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ متر انجام شده است. برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی در اطراف تونل با استفاده از نرم افزار *Phase2* و کد محاسباتی *FNETF*، از یک دامنه جریان با عرض ۴۰۰ متر و ارتفاع ۵۰۰ متر استفاده شده تا از تاثیر مرزها جلوگیری شود (*Javadi, 2016*). نمای کلی از دامنه جریان مورد استفاده در **شکل ۴** نشان داده شده است. دامنه جریان بصورت اشباع از آب بوده که سطح ایستابی دقیقاً بر روی مرز بالایی دامنه قرار دارد (*hw=0*). بر روی مرزهای خارجی دامنه جریان، شرط مرزی از نوع هد هیدرولیکی ثابت (مجموع هد فشاری و هد ارتفاع) و بر روی مرزهای تونل شرط مرزی جریان آزاد (هد فشاری صفر) اعمال شده است.



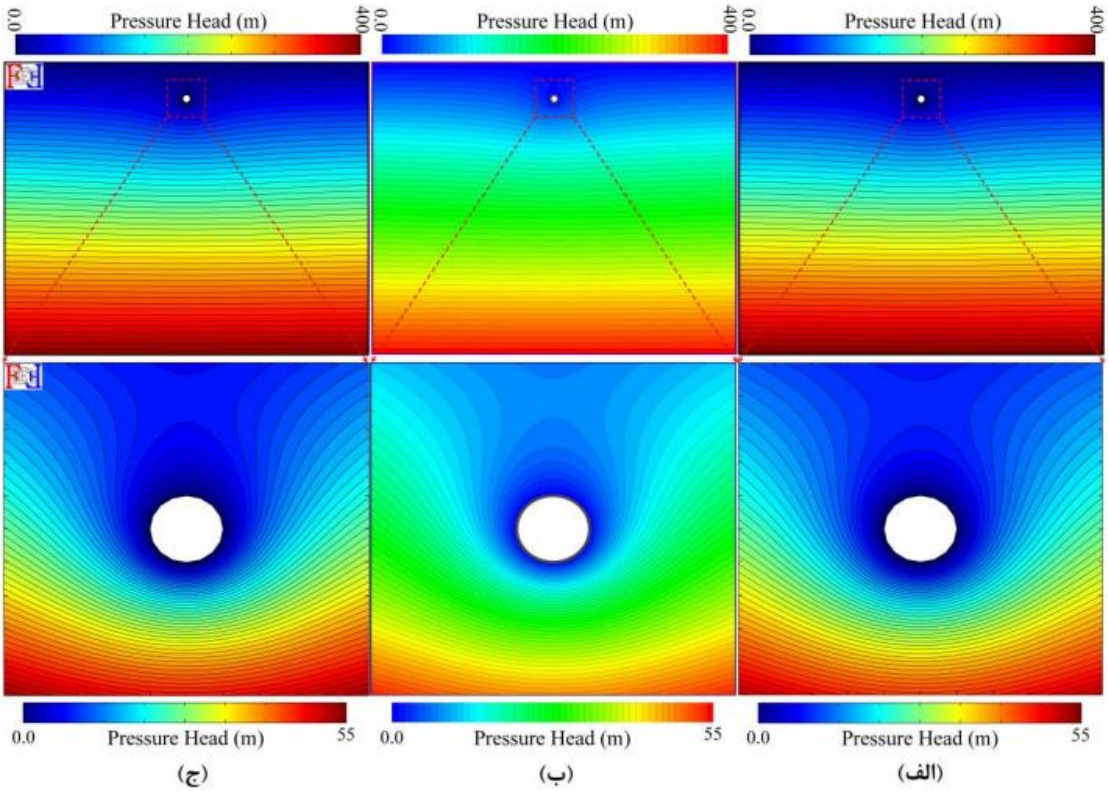
شکل ۴- دامنه مورد استفاده برای مدل سازی عددی جریان آب زیرزمینی در اطراف تونل

توده سنگ درونگیر تونل بصورت همگن و ایزوتروپ با مولفه های اصلی تانسور هدایت هیدرولیکی معادل 1×10^{-6} m/s در نظر گرفته شده است. بدین منظور، مقدار انحراف استاندارد یک مقدار بسیار کوچک (نزدیک به صفر) در نظر گرفته شده است. بمنظور مقایسه نتایج حاصل از کد محاسباتی *FNETF*، از روابط تحلیلی نیز استفاده شده است. بدین منظور، رابطه تحلیلی ارائه شده توسط هوانگفو و همکاران (*Huangfu, et al., 2010*)، برای بررسی صحت توزیع هد هیدرولیکی و هد فشاری در اطراف تونل و رابطه ارائه شده توسط التانی (*El Tani, 2003*)، برای صحت سنجی دبی جریان آب ورودی بکار گرفته شده است.

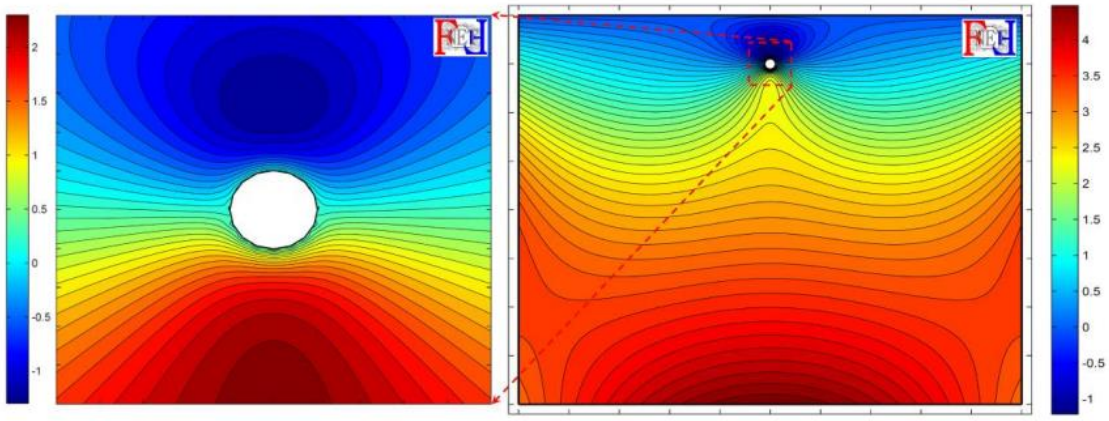
۲-۴- مقایسه نتایج

برای ارزیابی و صحت سنجی کد محاسباتی *FNETF*، در مرحله اول، نتایج مربوط به توزیع هد فشاری آب در اطراف تونل مورد مقایسه قرار گرفته اند. بدین منظور، توزیع مولفه هد فشاری آب در اطراف تونل حاصل از سه روش مورد بررسی (کد محاسباتی *FNETF*، نرم افزار *Phase2* و حل تحلیلی) برای تونل با شعاع ۳ متر و بصورت کانتورهای هم تراز ترسیم و نتایج آن برای کل دامنه و محدوده با طول و عرض ۵ برابر قطر تونل در **شکل ۵** نشان داده شده است.

نتایج **شکل ۵** نشان می دهد، از نظر روند تغییرات هد فشاری آب در اطراف تونل، ارتباط بسیار خوبی بین نتایج حاصل از سه روش مورد بررسی وجود داشته و کانتورهای هم تراز مربوط به فشار آب در اطراف تونل، برای سه روش مورد بررسی بسیار شبیه هستند. برای بررسی بهتر نتایج، توزیع اختلاف بین مقادیر هد فشاری پیش بینی شده با کد محاسباتی *FNETF* و حل تحلیلی در اطراف تونل با شعاع ۵ متر، بصورت کنتوری نیز محاسبه و نتایج آن برای کل دامنه و محدوده با طول و عرض ۵ برابر قطر تونل در **شکل ۶** نشان داده شده است.



شکل ۵- توزیع هد فشاری آب در کل دامنه و محدوده زوم شده با طول و عرض ۵ برابر قطر تونل با شعاع ۵ متر و روش های مختلف حل معادلات: الف) حل تحلیلی، ب) نرم افزار Phase2 و ج) کد محاسباتی FNETF



شکل ۶- توزیع اختلاف بین مقادیر هد فشاری پیش بینی شده با کد محاسباتی FNETF و حل تحلیلی در کل دامنه و محدوده زوم شده با طول و عرض ۵ برابر قطر تونل با شعاع ۵ متر

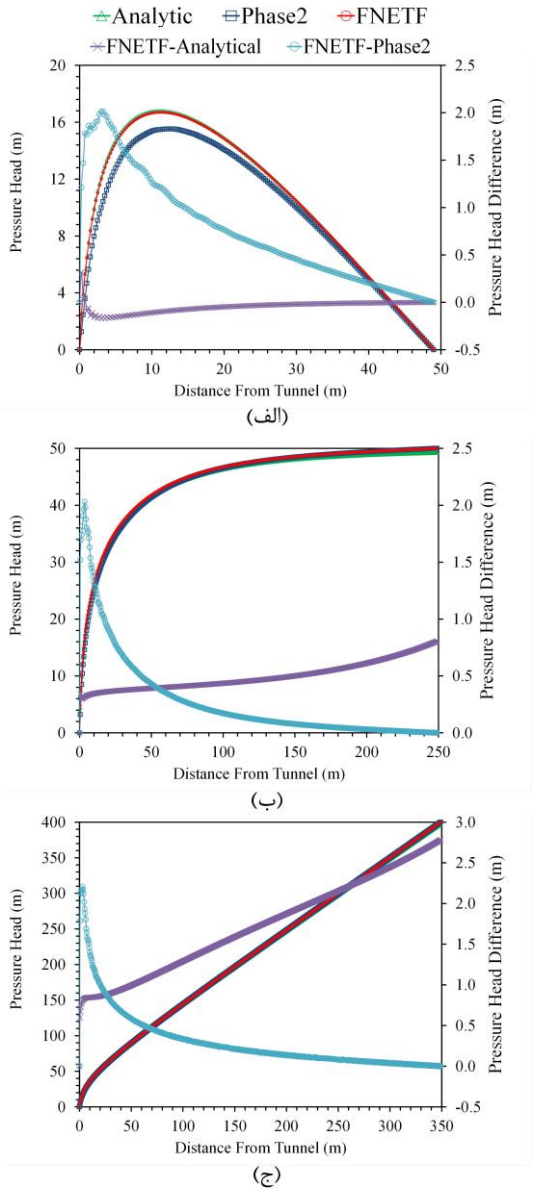
مطابق با **شکل ۶**، بیشترین اختلاف بین نتایج در پایین ترین نقطه دامنه جریان و در وسط دامنه (دقیقاً زیر تونل) حادث شده و با افزایش فاصله از محور تونل از شدت اختلاف بین نتایج کاسته می شود. همچنین، برای ناحیه بالای تونل، کمترین اختلاف بین نتایج این دو روش حادث می شود. لازم به ذکر است، اختلاف بین مقادیر هد فشاری پیش بینی شده با کد محاسباتی *FNETF* و حل تحلیلی در محدوده نزدیک به تونل (محدوده زوم شده) بسیار ناچیز و کاملا در محدوده مجاز است.

مقادیر هد فشاری آب در طول سه خط شاخص *L1*، *L2* و *L3* (مطابق با **شکل ۴**) برای هر سه روش کد محاسباتی *FNETF*، نرم افزار *Phase2* و حل تحلیلی محاسبه شده و در **شکل ۷** نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر نتایج، اختلاف بین مقادیر هد فشاری پیش بینی شده با کد محاسباتی *FNETF* و دو روش دیگر در طول خطوط شاخص *L1*، *L2* و *L3* نیز محاسبه و بهمراه سایر نتایج در **شکل ۷** نشان داده شده است.

مقایسه نتایج **شکل ۷** نشان می دهد مقادیر هد فشاری محاسبه شده با استفاده هر سه روش مورد بررسی، هم از نظر مقداری و هم از نظر روند تغییرات فضایی انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. با این وجود، مقادیر هد فشاری محاسبه شده با سه روش مورد بررسی، از نظر مقداری دارای اختلاف اندکی نیز هستند. بخش عمده ای از اختلاف بین نتایج حاصل از کد محاسباتی *FNETF* و حل تحلیلی در طول خطوط شاخص *L2* و *L3*، بدلیل تاثیر شرایط مرزی بر حل عددی معادلات جریان ایجاد شده است.

معادلات تحلیلی جریان در اطراف تونل بر اساس فرض برقراری شرایط مرزی هد ثابت در موقعیت بینهایت بدست می آیند (فرض گسترش عرضی نامحدود برای دامنه جریان). ولی در حل عددی معادلات جریان، استفاده از این فرض (دامنه جریان نامحدود) بصورت عملی غیرقابل استفاده بوده و از فرض محدود بودن دامنه جریان و شرط مرزی هد ثابت استفاده می شود که در نتیجه، با افزایش ابعاد دامنه جریان انطباق بین فرضیات مورد استفاده در دو روش تحلیلی و عددی افزایش می یابد. همچنین، با توجه به یکسان بودن شرایط مرزی در روش های عددی، مقادیر اختلاف بین هد فشاری در نزدیکی مرزها کمترین مقدار خود را خواهد داشـــت.

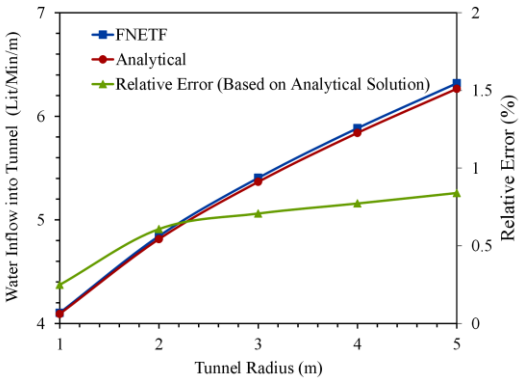
به منظور صحت سنجی کد محاسباتی *FNETF*، نتایج مربوط به مقادیر دبی جریان آب ورودی به داخل تونل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، مقادیر به دست آمده جریان آب ورودی به داخل تونل با کد محاسباتی *FNETF*، با مقادیر حاصل از روش تحلیلی التانی مقایسه شده‌اند. نتایج مربوط به دبی جریان آب ورودی به تونل برای شعاع های مختلف تونل با استفاده از کد محاسباتی *FNETF* و حل تحلیلی به همراه خطای نسبی بین نتایج حاصل از این دو روش (بر مبنای حل تحلیلی) در **شکل ۸** نشان داده شده است.



شکل ۷- مقادیر هد فشاری حاصل از سه روش کد محاسباتی FNETF، نرم افزار Phase2 و حل تحلیلی (محور چپ) و اختلاف بین مقادیر هد فشاری حاصل از کد محاسباتی FNETF با دو روش دیگر (محور راست) بر روی خطوط شاخص: الف) L1، ب) L2، ج) L3

مقایسه **شکل ۸** حاکی از انطباق بسیار خوب بین مقادیر دبی جریان آب ورودی به تونل مربوط به کد محاسباتی *FNETF* و حل تحلیلی (هم از نظر مقدار و هم از نظر روند تغییرات) بوده به گونه ای که حداکثر خطای نسبی بین مقادیر دبی جریان آب ورودی کمتر از ٪۰٫۸۵ است. همچنین، با کاهش شعاع تونل، از شدت خطای نسبی بین مقادیر دبی جریان آب ورودی به تونل کاسته شده بگونه ای که مقدار خطای نسبی از ٪۰٫۸۵ برای تونل با شعاع ۵ متر تا حدود ٪۰٫۲۵ برای تونل با شعاع ۱ متر کاهش می یابد.

مقایسه نتایج مربوط به توزیع هد هیدرولیکی در اطراف تونل و همچنین دبی جریان آب ورودی، بیان کننده صحت محاسبات و اعتبار مناسب نتایج مدل سازی جریان آب زیرزمینی در اطراف تونل با استفاده از کد محاسباتی *FNETF* بوده و بنابراین می توان از این کد محاسباتی در مراحل دیگر و برای مسائل دیگر (به شرط صحت داده های ورودی و شرایط مرزی) نیز استفاده نمود.

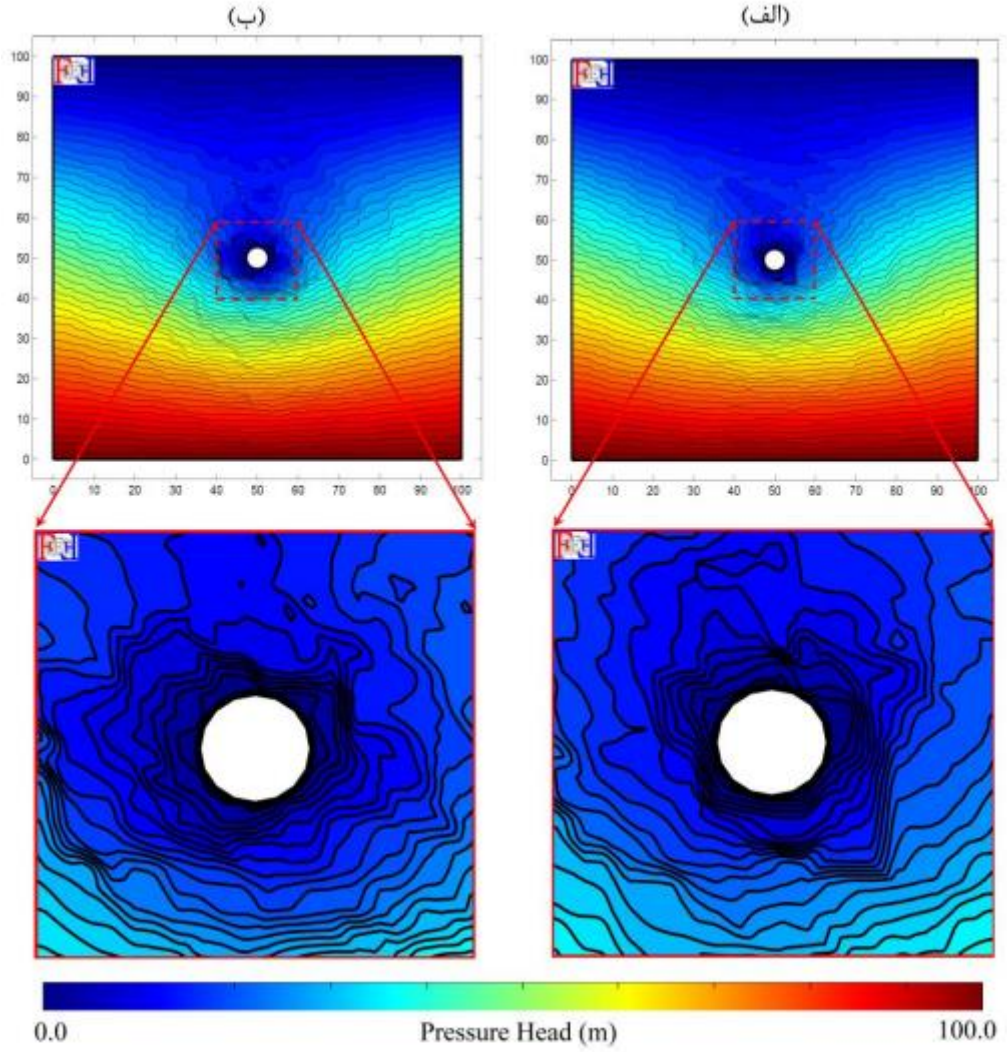


شکل ۸- مقادیر دبی جریان آب ورودی حاصل از کد محاسباتی FNETF و حل تحلیلی بهمراه خطای نسبی بین نتایج

۵- تحلیل پارامتریک

در این مطالعه، بمنظور بررسی تاثیر عدم قطعیت و تغییرات خواص هیدرولیکی توده سنگ بر دبی جریان آب ورودی به داخل تونل، از مطالعه پارامتریک استفاده شده است. مطالعه پارامتریک بر روی تاثیر تغییرات انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی توده سنگ انجام شده است. مسئله مورد بررسی، شامل مدل سازی جریان آب ورودی به داخل تونل دایره ای شکل برای جریان پایا و برای مقادیر مختلف انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی است. ابعاد و تنظیمات هندسه دامنه جریان مشابه با بخش قبل (**شکل ۴**) در نظر گرفته شده است.

شبیه سازی جریان آب ورودی، برای تونل با شعاع ۲٫۵متر و عمق قرارگیری ۵۰ متر انجام شده است. شبیه سازی جریان برای سه مقدار مختلف از انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی شامل *1E-8*، *1E-6* و *1E-4* متر بر ثانیه انجام شده که در همه این موارد، مقدار میانگین هدایت هیدرولیکی *1E-6* متر بر ثانیه ثابت در نظر است. لازم به ذکر است، برای تخصیص هدایت هیدرولیکی به المان های مدل محاسباتی از تابع توزیع لوگ نرمال استفاده شده است. برای هر یک از مقادیر انحراف استاندارد فوق، تعداد ۵۰۰ آرایش مختلف از تخصیص هدایت هیدرولیکی به المان های دامنه جریان در نظر گرفته شده است. تخصیص هدایت هیدرولیکی به المان های دامنه جریان (زمین درونگیر تونل) با استفاده از روش مونت کارلو انجام شده و سپس، معادلات جریان بر روی المان ها گسسته سازی و نهایتا بصورت عددی حل شده اند. در این حالت، نتیجه حاصل از هر "آرایش تصادفی از مدل هیدروژئولوژیکی" با نتایج حاصل از سایر آرایش های از مدل هیدروژئولوژیکی متفاوت خواهد بود. این موضوع (به طور نمونه) برای دو آرایش مختلف از تخصیص هدایت هیدرولیکی به المان های دامنه جریان در **شکل ۹** نشان داده شده است.



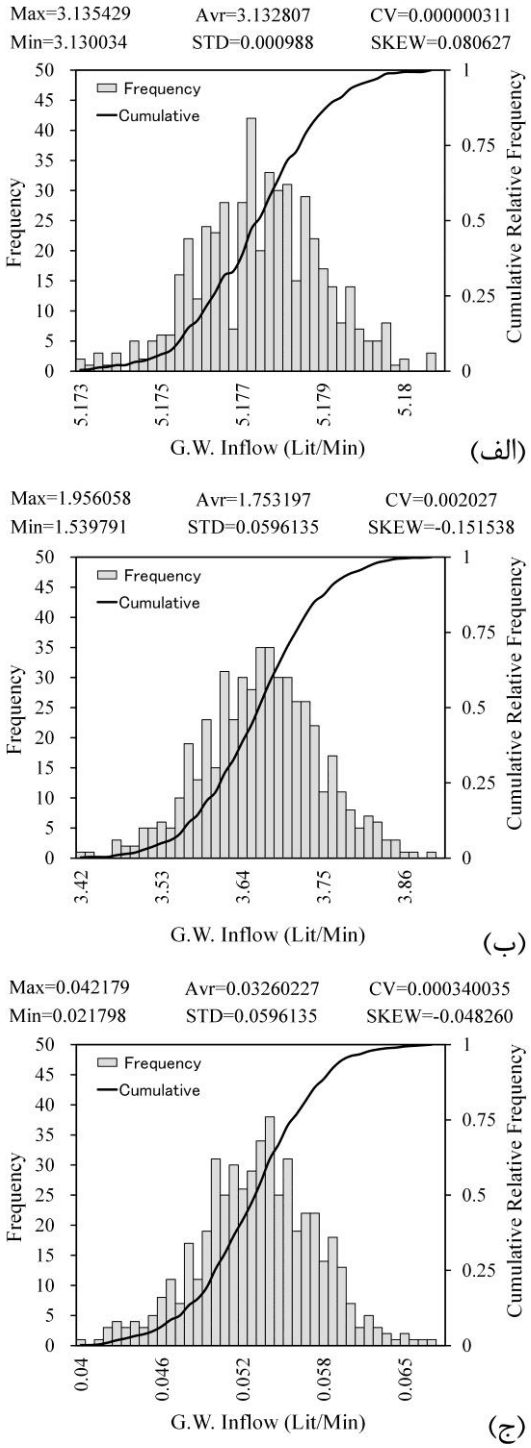
شکل ۹- توزیع هد فشاری آب در کل دامنه و محدوده زوم شده با طول و عرض ۵ برابر قطر تونل برای دو آرایش مختلف از تخصیص به المان های دامنه جریان

شکل ۹ نشان می دهد که توزیع هد فشاری و خطوط پتانسیل هد در اطراف تونل برای هر آرایش تصادفی از مدل هیدروژئولوژیکی متفاوت از سایر آرایش ها خواهد بود و بالتبع، نتیجه محاسبات بصورت مقدار دبی جریان آب ورودی به داخل تونل نیز برای هر آرایش روژئولوژیکی متفاوت خواهد بود. بمنظور بررسی تاثیر محیط تصادفی بر نتایج حاصل از این شبیه سازی ها، نمودار فراوانی (هیستوگرام) دبی جریان آب ورودی به داخل تونل برای مقادیر مختلف انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی ترسیم و در **شکل ۱۰** نشان داده شده است. برای درک بهتر نتایج، علاوه بر هیستوگرام دبی جریان آب ورودی، نمودار تجمعی فراوانی نسبی نیز ترسیم شده است.

در همه هیستوگرام های نشان داده شده در **شکل ۱۰**، فراونی دبی جریان آب ورودی مدل سازی شده شامل یک مقدار اوج بوده و مقادیر دبی جریان آب ورودی تقریباً بطور متقارن نسبت به این مقدار اوج توزیع یافته اند. همچنین، این هیستوگرام ها تقریباً دارای شکل مشابه با توزیع نرمال هستند. با افزایش انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی، مقادیر کمینه و بیشینه دبی جریان آب ووردی به تونل در هیستوگرام ها (مقادیر حدی دبی در هیستوگرام ها) کاهش می یابد.

برای بررسی دقیق تر تاثیر انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی بر نتایج شبیه سازی، لازم است ویژگی های آماری نتایج حاصل از مدل سازی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، مقادیر بیشینه (*MAX*)، کمینه (*MIN*)، متوسط (*Avr*)، انحراف استاندارد (*STD*)، ضریب تغییرات (*CV*) و چولگی (*SKEW*) نتایج حاصل از شبیه سازی در بالای هر یک از هیستوگرام های **شکل ۱۰**، (برای مقادیر مختلف انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی) نشان داده شده است.

این نتایج نشان می‌دهد، با افزایش انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی، مقدار میانگین دبی جریان آب ورودی به داخل تونل کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی، هر دو مقدار کمینه و بیشینه دبی جریان آب ووردی به تونل کاهش می یابد که کاهش هر دو مقدار کمینه و بیشینه جریان منتج به کاهش میانگین دبی جریان آب ورودی می شود.



شکل ۱۰- هیستوگرام دبی جریان آب ورودی به تونل با شعاع ۲/۵ متر و عمق ۵۰ متر برای مقادیر مختلف انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی: الف) 1E-8، ب) 1E-6، ج) 1E-4

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله بر روی مدل سازی جریان آب ورودی به داخل فضاهای زیرزمینی با استفاده از روش پیوسته تصادفی متمرکز شده است. بدین منظور، ابتدا کد محاسباتی *FNETF* برای مدل سازی جریان آب ورودی به فضاهای زیرزمینی و بر اساس تئوری محیط پیوسته تصادفی توسعه داده شده که دارای قابلیت تولید و پردازش محیط تصادفی و تحلیل مسائل جریان سیال و مدل سازی بصورت سیستماتیک و برای آرایش های متعدد از تخصیص پارامترهای هیدروژئولوژیکی است. در ادامه، با توجه به نوپا بودن این کد محاسباتی، صحت سنجی محاسبات هیدرولیکی در این کد محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، با استفاده از این کد محاسباتی، دبی جریان آب ورودی به داخل تونل و بصورت مطالعه پارامتریک مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس ارزیابی های انجام شده در مراحل مختلف این مقاله، نتایج زیر بدست آمده است:

برای صحت سنجی کد محاسباتی *FNETF*، از نتایج مدل سازی رفتار هیدرولیکی در اطراف تونل دایره ای در پیوسته محیط ایده آل استفاده شده است. بدین منظور، یک مقدار بسیار کوچک (نزدیک به صفر) برای انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی محیط درونگیر تونل در نظر گرفته شده بگونه ای که محیط اطراف تونل دارای بیشترین تطابق با فرضیات مدل‌های تحلیلی باشد. در این حالت، نتایج حاصل از کد محاسباتی *FNETF*، هم از نظر توزیع هد فشاری در اطراف فضای زیرزمینی و هم از نظر مقدار دبی جریان آب ورودی با نتایج دو روش تحلیلی و مدل سازی عددی با استفاده از محیط پیوسته معادل دارای انطباق بسیار خوبی است. خطای نسبی بین مقادیر دبی جریان آب ورودی به تونل مربوط به کد محاسباتی *FNETF* و حل تحلیلی بسیار اندک بوده، بگونه ای که حداکثر خطای نسبی بین مقادیر دبی جریان آب ورودی کمتر از ۰٫۸۵٪ است. البته با کاهش شعاع تونل، مقدار این خطای نسبی نیز کاهش می یابد.

نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک نشان می دهد، با افزایش انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی، مقدار میانگین دبی جریان آب ورودی به داخل تونل کاهش می یابد. همچنین، با افزایش انحراف استاندارد هدایت هیدرولیکی، هر دو مقدار کمینه و بیشینه دبی جریان آب ووردی به تونل کاهش می یابد که کاهش هر دو مقدار کمینه و بیشینه جریان منتج به کاهش میانگین دبی جریان آب ورودی می شود.

مقاله حاضر بعنوان اولین قدم در راستای بکارگیری مفهوم هیدروژئولوژی تصادفی در مسئله جریان آب ورودی به داخل فضاهای زیرزمینی نگاشته شده است. با توجه به سطح دانش فعلی در این زمینه، پیشنهاد می شود در مطالعات بعدی بخشی از جنبه های این مسئله که در مقاله حاضر در نظر گرفته نشده (بطور نمونه، جریان وابسته به زمان، مطالعه پارامتریک سیستماتیک، تاثیر پارامترهای هندسی تونل و...) در آینده بعنوان زمینه تحقیقاتی و کاربردی مورد مطالعه قرار گیرد.

۷- مراجع

Anagnostou, G., 1995. The Influence of Tunnel Excavation on Hydraulic Head. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 19*, 725-746.

Cesano, D., Olofsson, B., Bagtzoglou, A. C. (2000). Parameters Regulating Groundwater Inflows into Hard Rock Tunnels-a Statistical Study of the Bolmen Tunnel in Southern Sweden. *Tunn. Undergr. Space Technol., 15(2)*, 153-165.

Dagan, G. (1997). Stochastic modeling of flow and transport: the broad perspective. *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*. Cambridge University Press.

El Tani, M., 2003. Circular Tunnel in a Semi-Infinite Aquifer. *Tunn. Undergr. Space Technol., 18(1)*, 49–55.

Freeze, R. A., 1975. A Stochastic-Conceptual Analysis of One-Dimensional Groundwater Flow in Nonuniform Homogeneous Media. *Water Resour. Res., 11(5)*, 725-741.

Gustafson, G., Lindblom, U. and Söder, C.O. (1991) Hydrogeological and hydromechanical aspects of gas storage. Paper presented in *7th Congress of International Society of Rock Mechanics*, 16-20 September, Aachen, Germany.

Goodman, R., Moye, D., Schalkwyk, A., Javendel, I., 1965. Groundwater Inflow During Tunnel Driving. *Eng. Geol., 1*, 150–162.

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.

Javadi M, (2016). *Two-Dimensional Modeling of Rock Mass Hydraulic Behavior Using Distinct Fracture Network with an Emphasis on the Fluid Inflow to Underground Excavations*. Ph.D Thesis, Amirkabir University of Technology.

Javadi, M., Sayadi, S., 2018. Stochastic discontinuum analysis of hydrocarbon migration probability around an unlined rock cavern based on the discrete fracture networks. *Tunnel. Underg. Space Technol., 81*, 41–54. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.030

Javadi M, Sharifzadeh M. (2014). Fluid Flow Modeling in Discontinuous Rock Media Using a Distinct Fracture Network. *Sharif Journal of Science and Technology, Civil Engineering, 2-30 (3)*, 107-116.

Javadi M, Sharifzadeh M, Shahriar K. (2016a). Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh pumped storage project, Iran. *Tunnel. Underg. Space Technol., 51*, 424–438. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.09.003

Javadi M, Sharifzadeh M, Shahriar K, Sayadi S. (2016b). Migration tracing and kinematic state concept embedded in discrete fracture network for modeling hydrocarbon migration around unlined rock caverns. *Computers & Geosciences 91*, 105–118. http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.02.012

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.

Neuman, S.P. (1987). Stochastic Continuum Representation of Fractured Rock Permeability as an Alternative to the REV and Fracture Network Concepts. In: Farmer, I.W., et al. (Ed.), *Proceedings of the 28th U.S. Symposium*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 533–561.

Neuman, S.P. (1997). Stochastic approach to subsurface flow and transport: a view to the future. *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*. Cambridge University Press.

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.

Renard, P., 2007. Stochastic Hydrogeology: What Professionals Really Need? *Ground Water, 45(4)*, 531–541.

Sharifzadeh, M., Javadi, M., 2017. Groundwater and underground excavations: From theory to practice. In: Rock Mechanics and Engineering Volume 3: Analysis, Modeling & Design, Chapter 10. Ed.: Xia-Ting Feng. CRC Press.

Sharifzadeh, M., Javadi, M., Zarei, H.R. (2012). The Role of Geological Structures to Tunnel Inflow, Modelling Strategies and Predictions. In: Phienwej, N., Boonyatee, T. (Ed.), *Proceedings of the World Tunnel Congress*: 483-484.

Tal, A., Dagan, G., 1983. Flow Toward Storage Tunnels Beneath a Water Table: 1. Two-Dimensional Flow. *Water Resour. Res., 19(1),* 241-249.

Tammetta, P. (2013). Estimation of the Height of Complete Groundwater Drainage Above Mined Longwall Panels. *Groundwater, 51(5),* 723–734.

Zarei, H.R., Uromeihy, A., Sharifzadeh, M. (2013). A New Tunnel Inflow Classification (TIC) System through Sedimentary Rock Masses. *Tunn. Undergr. Space Technol., 34*, 1–12.

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

Volume 7-Issue 1\Summer 2018

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Upgrading the FNETF Computational Code for Modeling Groundwater Inflow into Underground Excavations Using the Stochastic Continuum Theory

M. Javadi[1]; S. Sayadi[2]

1- Assistant Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology

2- PhD Student; Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

Received: 17 Jun 2016; Accepted: 09 Jul 2018

DOI: 10.22044/tuse.2018.4468.1270

Keywords

Hydraulic Behavior
Stochastic Continuum Theory
Groundwater Inflow
Underground Excavations
Flow Uncertainty
FNETF Computational Code

Extended Abstract

Summary

In this study, modeling of groundwater inflow into underground excavations was studied based on the stochastic continuum theory. To reach this goal, the two dimensional FNETF computational code was modified based on the stochastic continuum theory to model groundwater inflow into underground excavations. The accuracy of the computations in this code was evaluated from validation point of view.

Introduction

All geological formations show random variation (or spatial nonuniformity) in the values of hydrogeological parameters leading to a considerable amount of uncertainty in the hydrogeological models. Therefore, it is essential to characterize the uncertainty of groundwater processes that can be achieved through the implementation of stochastic continuum theory. This method can be used to estimate the most likely range of groundwater inflow into underground excavations and assess the uncertainty of estimates.

Methodology and Approaches

In this paper, the FNETF computational code was modified based on the stochastic continuum theory, and then, the accuracy of computations in this code was evaluated from validation point of view. The results of analytical and numerical (by performing phase2 software) solutions for hydraulic head distribution around the circular tunnel, and also, the groundwater inflow rates were used to validate the accuracy of FNETF computational code. Then, the role of hydraulic properties of rock mass was investigated through parameter study.

Results and Conclusions

The results of this study for modification and validation of FNETF computational code show that the outputs of this code for ideal media (having near zero standard deviation of hydraulic conductivity) in terms of both hydraulic head distribution around the tunnel and the groundwater inflow rates are appropriately in good agreement with those obtained from ideal analytical and numerical solutions. Therefore, this computational code can be successfully applied for modeling groundwater inflow into underground excavations by the application of the stochastic continuum theory. The results of parameter study and sensitivity analysis also show that the maximum, minimum, and average values of groundwater inflow into the study tunnel decreases by increasing the standard deviation of the rock mass hydraulic conductivity. For very heterogeneous rock masses, both the analytical solution and deterministic numerical methods overestimate (i.e. with one or more order of magnitudes) the groundwater inflow into the tunnel in comparison with the stochastic continuum method.