



## Uncertainty analysis of numerical simulation of groundwater inflow into Safarood Kerman water transfer tunnel

Ahmad Jafarzadeh<sup>1, 2</sup> | Amir Saberinasr<sup>3</sup> | Arash Hashemnejad<sup>4</sup> |  
Masoud Morsali<sup>5</sup>

1. Corresponding Author, Department of Water Resources, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: [a.jafarzadeh@birjand.ac.ir](mailto:a.jafarzadeh@birjand.ac.ir)
2. Saffron Research Institute, Torbat Heydarieh University, Torbat Heydarieh, Iran. E-mail: [a.jafarzadeh@birjand.ac.ir](mailto:a.jafarzadeh@birjand.ac.ir)
3. Department of Geology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [amirsaberinasr@yahoo.com](mailto:amirsaberinasr@yahoo.com)
4. Geology Engineering, Sahel Omid Iranian Consulting Engineers Company, Tehran, Iran. E-mail: [hashemnejad.arash@gmail.com](mailto:hashemnejad.arash@gmail.com)
5. Department of Geology, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: [massoud.morsali@yahoo.com](mailto:massoud.morsali@yahoo.com)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: 15 February 2022

Received in revised form:

15 March 2022

Accepted: 17 April 2022

Published online:

25 December 2022

#### Keywords:

Alteration,

Fractured-Rock Aquifer,

Hydrothermal Conditions,

Local Radial Point Interpolation

Function,

Mesh less.

### ABSTRACT

Groundwater inflow is one of the most important problems in Constructing a conveyance tunnel. Increasing pressure on the tunnel wall and reducing its stability, the related issues of drainage and pumping, destructive impacts on the mechanical and geological condition of the tunnel surrounding environment, loss of life, increased costs, and advance delays are among the most important challenges that can be existed during excavation. Therefore, it is crucial to evaluate the amount of water inflow and predict the required measures previously. Conventional techniques for estimating the water inflow are analytical-experimental techniques whose efficiency in complex heterogeneous and anisotropic aquifers is always tainted. Accordingly, this study intends to investigate the effectiveness of the Meshfree (Mfree) numerical method for simulating the groundwater level in the environment surrounding the Safarood water transfer tunnel in Kerman. Also, considering the uncertainty analysis, uncertainty of parameters (hydraulic conductivity), input data, and structure of numerical modeling were addressed using Differential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) algorithm. Hence, an open-source framework based on a Mfree numerical method and DREAM algorithm was proposed for the simulation-optimization process of groundwater level prediction in the environment surrounding the tunnel, and finally, the water inflow discharge was estimated. The results of uncertainty analysis indicated that hydraulic conductivity parameters may be ranged between 0.0002 to 0.2 m/day in different homogeneous zones. Also, the study of thin sections samples collected from field observation shows that hydrothermal conditions have influenced directly the alteration of rocks and minerals in some zones and likely it is the main factor in increasing permeability in these areas. The results showed that the recorded input data has a four percent underestimation. The uncertainty of the parameters involved with the structure of numerical modeling also proved that to obtain an adequate accuracy, the size of the local domain must be about 0.85, and the support domain should be considered at least three nodes to estimate the weight function. The simulation results of groundwater level fluctuations using the derived true values of parameters showed that there is a good accuracy between the observed and simulated values (the RMSE index was estimated to be about 2.531 meters). In addition, the assessment of numerical simulation of groundwater inflow into tunnel indicated that inflow rate in the north and south parts is respectively 72.43 and 09.45 l/s.

**Cite this article:** Jafarzadeh, A., Saberinasr, A., Hashemnejad, A., & Morsali, M. (2022). Uncertainty analysis of numerical simulation of groundwater inflow into Safarood Kerman water transfer tunnel. *Journal of Water and Irrigation Management*, 12 (4), 675-694. DOI: <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.339210.969>





## تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی عددی هجوم آب به تونل انتقال آب صفارود کرمان

احمد جعفرزاده<sup>۱\*</sup> | امیر صابری نصر<sup>۳</sup> | آرشی هاشم‌نژاد<sup>۴</sup> | مسعود مرسلی<sup>۵</sup>

۱. نویسنده مسئول، منابع آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: [a.jafarzadeh@birjand.ac.ir](mailto:a.jafarzadeh@birjand.ac.ir)

۲. پژوهشکده زعفران، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران. رایانامه: [a.jafarzadeh@birjand.ac.ir](mailto:a.jafarzadeh@birjand.ac.ir)

۳. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [amirsaberinasr@yahoo.com](mailto:amirsaberinasr@yahoo.com)

۴. زمین‌شناسی مهندسی، شرکت ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران. رایانامه: [hashemnejad.arash@gmail.com](mailto:hashemnejad.arash@gmail.com)

۵. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: [massoud.morsali@yahoo.com](mailto:massoud.morsali@yahoo.com)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۱/۰۴

یکی از مهم‌ترین مشکلات در پروسه حفاری تونل، هجوم آب به درون تونل است. از این رو، تخمین میزان هجوم آب و پیش‌بینی اقدامات موردنیاز قبل از شروع حفاری بسیار اهمیت دارد. این پژوهش در نظر دارد تا یک مدل بر پایه روش عددی بدون شبکه و الگوریتم DiffeRential Evolution (DREAM) را جهت انجام دادن فرایند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی هجوم آب به درون تونل ارائه دهد. در طرح پیشنهادی، ارتفاع سطح آب زیرزمینی در محیط پیرامون تونل انتقال آب صفارود کرمان شبیه‌سازی شد و تحلیل عدم قطعیت پارامترها (هدایت هیدرولیکی)، داده‌های ورودی (بارش و دبی منابع برداشت) و مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان داد که هدایت هیدرولیکی در نواحی مختلف بین  $0/0002$  تا  $0/2$  متر بر روز متغیر است. همچنین، بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه اثبات کرد که شرایط هیدروترومال موجب افزایش نفوذپذیری شده است. علاوه بر این، مشخص شد که داده‌های ورودی با چهار درصد کم تخمینی ثبت شده‌اند. بررسی عدم قطعیت مؤلفه‌های دخیل در مدل‌سازی عددی نیز نشان داد که برای حصول یک دقت مناسب، اندازه دامنه محلی و دامنه حمایتی باید به ترتیب  $0/85$  و سه برابر فاصله میان‌گرهی باشند. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب زیرزمینی با استفاده از خروجی فرایند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی نشان داد که بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دقت مناسبی وجود دارد و از این منظر شاخص RMSE حدود  $2/5731$  متر برآورد شد. علاوه بر این، مقایسه شبیه‌سازی هجوم آب نشان داد که دبی هجوم آب به درون تونل در قسمت‌های شمالی و جنوبی به ترتیب معادل  $72/43$  و  $45/09$  لیتر بر ثانیه است.

### کلیدواژه‌ها:

آبخوان سنگی درز و شکاف‌دار،

بدون شبکه،

تابع محلی درون‌یاب نقطه‌ای شعاعی،

دگرسانی،

شرایط هیدروترومال.

**استناد:** جعفرزاده، ا.، صابری نصر، ا.، هاشم‌نژاد، آ. و مرسلی، م (۱۴۰۱). تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی عددی هجوم آب به تونل انتقال آب صفارود کرمان.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۲ (۴)، ۶۷۵-۶۹۴. DOI: <http://doi.org/10.22059/jwim.2022.339210.969>



## ۱. مقدمه

هجوم و پیش‌روی آب به طرف تونل می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی برنامه‌ریزی زمانی پیشرفت پروژه را مختل کند (Coli *et al.*, 2008) و سبب بروز تلفات جانی و همچنین افزایش هزینه‌ها شود (Golian *et al.*, 2018). ریزش قسمت پیشانی تونل‌ها در اثر هجوم شدید آب در پروژه‌های حمل و نقل شهری و خطوط راه‌آهن (Tseng *et al.*, 2001)، تخریب دیواره تونل در اثر هجوم آب به تونل حفاری خطوط قطار شهری (Song *et al.*, 2006)، کاهش پایداری دیواره تونل در اثر فشار فوقانی جریان آب زیرزمینی (Gong *et al.*, 2013) از جمله برخی از اثرات هجوم آب به تونل است. بنابراین، تخمین هجوم آب به‌عنوان یکی از حساس‌ترین ملاحظات طراحی باید در مطالعات اولیه زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بررسی شود.

ارزیابی مطالعات انجام‌شده در زمینه تخمین جریان ورودی به تونل نشان می‌دهد که به‌طور کلی روش‌های تخمین جریان ورودی به درون تونل به روش‌های تحلیلی-تجربی (Analytical-Empirical) و عددی (Numerical) تقسیم می‌شوند. عموماً پژوهش‌گران روش‌های تحلیلی-تجربی را در محیط‌های همگن و همسان‌گرد جهت حل معادله حاکم بر جریان ورودی به درون تونل استفاده می‌کنند (Maréchal *et al.*, 2014; Scheidler *et al.*, 2019). این روش‌ها ساده و سریع بوده (Zhou *et al.*, 2021; Golian *et al.*, 2021) و پیشینه تاریخی آن‌ها به دهه ۱۹۶۰ میلادی برمی‌گردد، زمانی که نخستین بار Goodman *et al.* (1965) یک رابطه تحلیلی برای یک مخزن نامتناهی (دریاچه یا رودخانه) بالای تونل ارائه کرد. در طول زمان مطالعات زیادی جهت ارزیابی کارایی (Bouvard and Pinto, 1969; Rat, 1973) و اصلاحات روی این رابطه انجام شد (Heuer, 1995; Lei, 1999; El Tani, 1999; Lombardi, 2002; Ribacchi *et al.*, 2002). در نهایت در پژوهش El Tani (2003) رابطه‌ای بیان شد که مقبولیت قابل‌توجهی بین پژوهش‌گران به‌دست آورد. از آن زمان نیز تلاش‌های بسیار زیادی در خصوص معرفی روش‌های تحلیلی جدید انجام شده است (Kolymbas and Wagner, 2007; Park *et al.*, 2008; Huangfu *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012) که تاکنون نیز ادامه داشته است (Farhadian *et al.*, 2016; Hassani *et al.*, 2018; Farhadian and Nikvar, 2019; Ghorbani *et al.*, 2021). با وجود کاربرد گسترده روش‌های تحلیلی-تجربی در زمینه تخمین هجوم آب به درون تونل، اما کاربرد این روش‌ها در مطالعات میدانی با برخی چالش‌های جدی مواجه است. نخست این‌که بیش‌تر این روش‌ها با فرض محیط همگن و همسان‌گرد ارائه شده است و شرایط واقعی مدل‌سازی در بیش‌تر مواقع با ناهمگنی و ناهمسان‌گردی پارامترها همراه است (Ghorbani *et al.*, 2021). علاوه بر این، بیش‌تر روش‌های تحلیلی-تجربی به‌طور مشخص فقط به دو مؤلفه نفوذپذیری و ارتفاع سطح آب وابسته هستند و مؤلفه‌های تأثیرگذار نظیر جهت جریان آب زیرزمینی، تخلخل، شرایط مرزی و مقادیر اولیه در نظر گرفته نمی‌شوند (Katibeh and Aalianvari, 2009).

از طرفی دیگر، با پیشرفت گسترده مدل‌سازی ریاضی، کاربرد روش‌های عددی در شبیه‌سازی هجوم آب نیز موردتوجه پژوهش‌گران زیادی قرار گرفت. در این روش‌ها با استفاده از تکنیک‌های ریاضی یک راه‌حل تقریبی برای متغیر مورد نظر ارائه می‌شود. بنابراین در مقایسه با روش‌های تحلیلی-تجربی نیاز به دانش و تخصص بالاتری دارند و چنانچه درک خوبی از شرایط مرزی منطقه و داده‌های ورودی وجود داشته باشد، برای محیط‌های پیوسته و ناپیوسته تخمین خوبی را ارائه می‌کنند. در مدل‌سازی عددی تغییرات مکانی مؤلفه‌ها راحت‌تر در شبیه‌سازی اعمال می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده قابل اعتمادتر است (Golian *et al.*, 2018). بدون شک کاربرد روش‌های عددی در زمینه تخمین جریان ورودی به درون تونل از یک پیشینه تاریخی بسیار گسترده‌ای برخوردار است (Meiri, 1985; Lee & Nam, 2001).

ادامه سعی شده است تا یک تقسیم‌بندی در خصوص شیوه مدل‌سازی عددی هجوم آب به درون تونل انجام گیرد. بررسی مطالعات انجام‌شده حاکی از آن است که بیش‌تر آن‌ها از نرم‌افزارهای آماده بر پایه تفاضل محدود استفاده کردند که مدل (MODular groundwater FLOW (MODFLOW در بین آن‌ها بیش‌ترین استفاده را دارد (Dassargues, 1997; Kim *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009; Chiu and Chia, 2012; Xia *et al.*, 2018; ) (Golian *et al.*, 2018; Gholizadeh., 2020). در کنار مدل عددی MODFLOW، برخی دیگر از پژوهش‌گران از مدل‌های عددی مبتنی بر اجزای محدود نظیر 3-TRANMEF، MIDAS Geotechnical and Tunnel analysis، System (GTS) و Finite Element subsurface FLOW system (FEFLOW) استفاده کردند (Molinero *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2007; Tedesco *et al.*, 2019; Insana *et al.*, 2020). بررسی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که فراوانی کاربرد سایر روش‌های عددی در مدل‌سازی هجوم آب به سمت تونل بسیار کم‌تر از دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود است. این در حالی است که، کاربرد این دو روش در مطالعات میدانی با محدودیت‌هایی همراه است که عملکرد و تخمین نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. چراکه این دو روش عددی نیازمند تعریف یک شبکه نقاط (Mesh, Grid point) منظم روی دامنه مسئله هستند و این موضوع در پروژه‌هایی که دامنه مسئله به صورت نامنظم است، موجب بروز خطای ساختاری در مدل‌سازی می‌شود (Jafarzadeh *et al.*, 2021a). یک راه‌حل جایگزین برای غلبه بر این مشکل استفاده از روش‌هایی است که مبتنی بر شبکه نقاط نبوده و در عمل کارایی و عملکرد آن‌ها مستقل از شبکه نقاط است (Anshuman and Eldho, 2019; Crist, 2019). روش عددی بدون شبکه (Mesh less)، معرفی شده توسط Gingold and Monaghan (1977)، یک جایگزین مناسب برای مدل‌سازی در مطالعات میدانی با هندسه‌های نامنظم است (Jafarzadeh *et al.*, 2021a,b). عملکرد خوب این روش در مقایسه با سایر روش‌های عددی باعث افزایش کاربرد این روش در حوزه مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی شده است (Mohtashami *et al.*, 2017; Thomas *et al.*, 2018; Jafarzadeh *et al.*, 2021a, 2021b; Swetha *et al.*, 2022). با این وجود، ارزیابی کارایی این روش در شبیه‌سازی عددی هجوم آب به تونل زیاد مورد توجه قرار نگرفته و پژوهش‌های بیش‌تری در این زمینه را می‌طلبد.

از طرفی دیگر باید توجه داشت که همواره اعتمادپذیری نتایج متأثر از منابع مختلف عدم قطعیت است (Wu & Zeng, 2013). منابع عدم قطعیت در شبیه‌سازی محیط متخلخل بسیار گسترده بوده و شامل عدم قطعیت داده‌های ورودی، پارامترها، مدل مفهومی و مدل‌سازی ریاضی است (Mustafa *et al.*, 2020). اهمیت این موضوع به حدی است که در حال حاضر شبیه‌سازی‌های عددی آب زیرزمینی بدون توجه به تحلیل منابع عدم قطعیت قابل اعتماد نیست و هدف اکثر پژوهش‌ها در سال‌های اخیر به تحلیل عدم قطعیت و بررسی تأثیر آن در تخمین نهایی معطوف شده است (Yoon *et al.*, 2013; Hamraz *et al.*, 2015; Pham and Tsai, 2016; Rajabi *et al.*, 2018; ) (Hassanzadeh *et al.*, 2019; Pan *et al.*, 2020). بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که با وجود اهمیت بالای تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی آب زیرزمینی، لکن به آن در مدل‌سازی تخمین هجوم آب به درون تونل کم‌تر توجه شده است و لازم است پژوهش‌های بیش‌تری انجام شود.

جمع‌بندی بررسی مطالعات انجام‌شده مشخص کرد که در حال حاضر بیش‌تر مطالعات انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی عددی هجوم آب به تونل با استفاده از روش‌هایی (تفاضل محدود و اجزای محدود) انجام شده است که عملکرد آن‌ها در مطالعات میدانی با هندسه نامنظم همراه با چالش است. به علاوه، اکثر مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های آماده

شبیه‌سازی هجوم آب را انجام دادند در کم‌تر مطالعه‌ای این مقوله با استفاده از مدل‌های عددی متن باز انجام شده است. درحالی‌که ایجاد ارتباط بین مدل‌سازی عددی و فرایندهایی نظیر بهینه‌سازی و تحلیل عدم قطعیت در قالب‌های متن باز بسیار راحت‌تر و کاربردی است. بنابراین، مطالعه پیش‌رو در نظر دارد تا در یک اقدام نسبتاً جدید مدل‌سازی عددی هجوم آب را در قالب یک چارچوب کدنویسی شده بر پایه زبان برنامه‌نویسی MATLAB انجام دهد. هم‌چنین، پژوهش حاضر در نظر دارد تا با ایجاد ارتباط بین مدل‌سازی عددی و الگوریتم تفاضل تکاملی - متروپلیس تطبیقی DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) عدم قطعیت پارامتر (هدایت هیدرولیکی)، داده‌های ورودی (دبی برداشت و ارتفاع سطح آب) و مؤلفه‌های تأثیرگذار در مدل عددی را احصا و اثر آن‌ها را در نتیجه شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دهد. علاوه بر این، مسئله هجوم جریان آب زیرزمینی به درون تونل در آبخوان سنگی درز و شکاف دار و در شرایط هیدروترمال از جمله پیچیدگی‌های منحصر به فرد این پژوهش است که خود نیز یکی دیگر از جنبه‌های تمایز پژوهش حاضر به‌شمار می‌رود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

تونل انتقال آب صفارود یا تونل کرمان در مرکز فلات مرکزی ایران و جنوب شهر کرمان، با امتداد کلی شمالی - جنوبی در حال حفاری است که وظیفه انتقال آب را از سد صفا به شهر کرمان دارد. طول تونل در حدود ۳۸ کیلومتر است که ارتفاع روباره آن حدود حداکثر ۱۰۰۰ متر برآورد می‌شود. دو دستگاه حفاری Tunnel Boring Machine (TBM)، با طول ۱۲۷ متر و ۱۱ متر ارتفاع پیشانی، از دو قسمت شمالی و جنوبی در حال حفاری مسیر تونل هستند. در حال حاضر حدود ۱۳ کیلومتر از قسمت شمالی و حدود پنج کیلومتر از مسیر تونل در قسمت جنوبی حفاری شده است و در برخی مقاطع آن حجم آب زیادی وارد تونل شده است. منطقه مورد مطالعه در مرز حوضه آبریز درجه دو هامون - جازموریان و کویر درانجیر قرار می‌گیرد. بخش شمالی مسیر تونل در محدوده مطالعاتی قریه‌العرب و بخش جنوبی در محدوده مطالعاتی رابر قرار دارد (شکل ۱).

### ۲.۱.۱. وضعیت زمین‌شناسی

نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی مسیر تونل در شکل (۲) نشان داده شده است. زمین‌شناسی منطقه کرمان از نظر چینه‌شناسی و ساختاری پیچیده است. توده‌های سنگی از نظر سنی احتمالاً به پرکامبرین تا عهد حاضر تعلق دارند. در جنوب باختری کرمان، سنگ‌های ائوسن به‌طور عمده خاستگاه آتشفشانی دارند که نشان‌گر نهشت زیاد مواد آتشفشانی و ستبر شدن سریع لایه‌ها در فاصله زمانی کوتاه است. چهار واحد سنگی غیر رسمی مجموع رسوبی ائوسن زیرین، مجموع آتشفشانی بحر آسمان، مجموع رسوبی ائوسن میانی، مجموع رازک و آذرین هزار معرف سنگ‌های ائوسن جنوب غربی کرمان هستند. مجموعه رازک شامل سنگ‌های آذرین بازی و اسیدی است که در بیش‌تر نقاط کرمان، به سه زیر واحد با سنگ‌شناسی متفاوت تقسیم می‌شود. بخش زیرین آن بیش‌تر سنگ‌های بازی، بخش میانی سنگ‌های اسیدی و بخش بالایی ترکیب بازی دارد، اما در مناطقی مانند انار و شهر بابک بخش میانی اسیدی وجود ندارد. علاوه بر این، دو گونه گرانیتی جبال بارز (JBGr) و کوه پنج (KPGGr) که بخش‌های بزرگی از مسیر تونل را (در نیمه جنوبی مسیر تونل) تشکیل می‌دهند نیز حاصل عملکرد همین فرایندهای آتشفشانی هستند (Hydrogeochemical studies of Safarood Kerman water transfer tunnel, 2018). مسیر تونل از نظر زمین‌شناسی در نوار دهج ساردوئی و به‌طور

خاص در کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان واقع شده که محلول‌های زمین‌گرمایی خاص این مناطق باعث دگرسانی شدید سنگ‌ها در محیط پیرامون تونل شده است (شکل ۳). هم‌چنین، براساس یافته‌های پژوهش *Saberinasr et al.* (2019) آب‌های زیرزمینی منطقه به‌طور عمده حاصل اختلاط آب‌های جوی و زمین‌گرمایی است که این موضوع از جمله ویژگی‌های منحصربه‌فرد این منطقه به‌شمار می‌رود که باعث پیچیده‌تر شدن ارزیابی‌ها و فرایند شبیه‌سازی هجوم آب خواهد شد (Hydrogeological studies of Safarood Kerman water transfer tunnel, 2022).

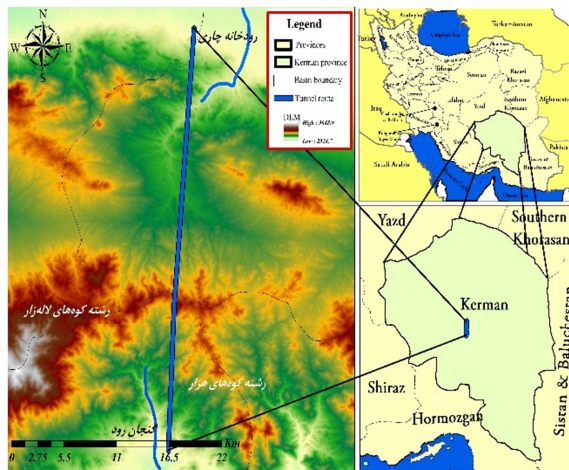


Figure 1. Geographical location of Safarood Kerman water transfer tunnel

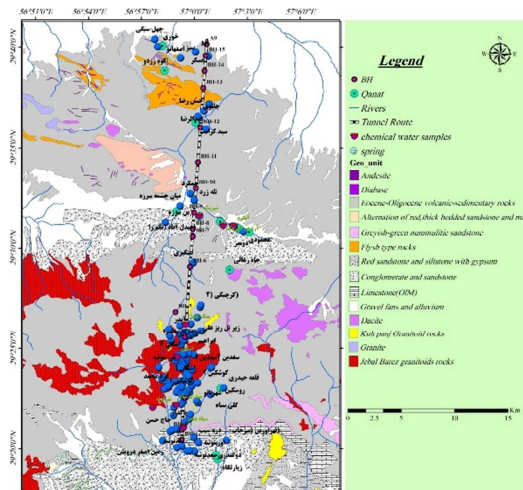


Figure 2. Geology map of tunnel route, boreholes, and water extraction wells

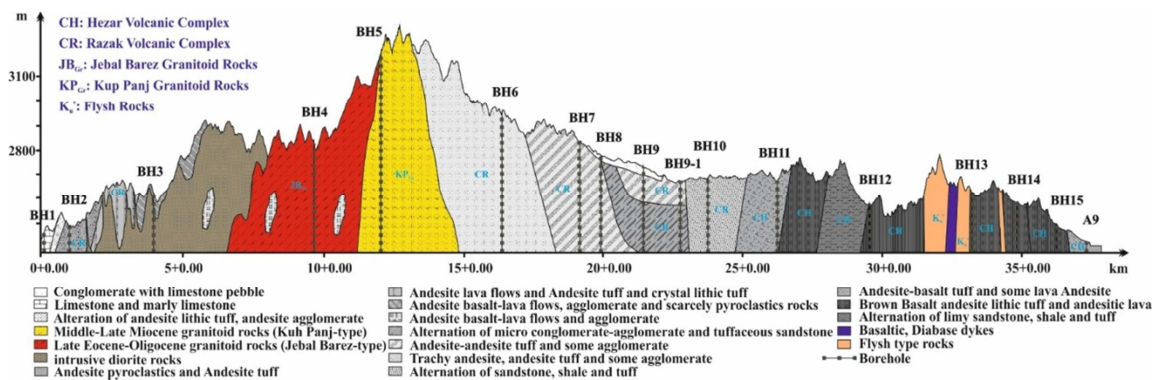


Figure 3. Geological cross-section of the Kerman tunnel route showing the boreholes

## ۲.۲ مدل جریان آب زیرزمینی

### ۲.۲.۱ معادله جریان آب زیرزمینی

معادله جریان ماندگار، در یک فضای دو بعدی و در یک آبخوان همگن، همسان‌گرد و آزاد به‌صورت معادله (۱) ارائه می‌شود (Arnold *et al.*, 1993).

$$K \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + K \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q(i, j) = 0, \quad \left( Q(i, j) = Qd + \sum_{i=1}^n Qc_i \delta(x_0 - x_i, y_0 - y_i) \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن  $K$ : هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)،  $h$ : ارتفاع هیدرولیکی سطح آب زیرزمینی (متر)،  $Q_d$ : دبی گسترده نظیر تبخیر و یا بارندگی (متر بر روز)،  $Q_c$ : دبی متمرکز نظیر چاه برداشت و تزریق (مترمکعب بر روز)،  $x$  و  $y$ : مختصات مکانی در راستای افقی و عمودی (متر)،  $(x_0 - x_i, y_0 - y_i)$ : تابع دیراک و  $x_0$  و  $y_0$  مختصات مبدأ است. شرایط مرزی و شرایط اولیه طبق روابط زیر در نظر گرفته شد:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} n_x + \frac{\partial h}{\partial y} n_y = \frac{q_t}{K} \delta & \text{on } \Gamma = \Gamma t \\ \text{Where, } n = \{n_x, n_y\}, n_x, n_y = 0 \text{ or } 1. \end{cases} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$h(x, y, t) = \bar{h} \quad \text{on } \Gamma = \Gamma u$$

$$h(x, y, 0) = h_0 \quad \text{on } \Omega$$

که در آن  $\Gamma$ : مرز کلی آبخوان،  $\Gamma t$ : شرایط مرزی طبیعی (Neuman)،  $\Gamma u$ : شرایط مرزی اساسی (Dirichlet)،  $\Omega$ : دامنه آبخوان شامل نقاط داخلی و مرزی،  $q_t$ : دبی ورودی/خروجی به آبخوان در مرز  $\Gamma t$  (مترمکعب بر روز)،  $n = \{n_x, n_y\}$ : بردار واحد ورودی/خروجی،  $\delta$ : فاصله گرهی شبکه نقاط،  $i$ : شیب هیدرولیکی،  $\bar{h}$ : ارتفاع ثابت سطح آب زیرزمینی و  $h_0$ : شرایط مرزی اولیه است.

## ۲.۲.۲. مدل مفهومی

در گام نخست لازم است تا مرز آبخوان پیرامون تونل تعریف شده و کلیه اطلاعات به این مقیاس آماده تبدیل شود. جهت تعریف مرز آبخوان منطقه مسیر تونل، موقعیت چشمه و چاه‌های حفر شده، رودخانه‌های موجود و همچنین بررسی مطالعات انجام شده در این منطقه (Gholizadeh et al., 2020; Saberinasr et al., 2019) مورد استفاده قرار گرفت. پس از مشخص شدن مرز منطقه، کلیه داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری شده و سپس در محیط Arc GIS 10.3 به داده‌های نقطه‌ای تبدیل شد. بدین منظور یک شبکه از نقاط متشکل از ۸۶۵ گره با فواصل افقی و عمودی ۵۰۰ متر روی مرز آبخوان پیرامون تونل پیاده‌سازی شد (شکل ۴). پس از ایجاد مدل مفهومی، جهت شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب زیرزمینی از روش عددی بدون شبکه استفاده شد.

## ۳.۲.۲. شبیه‌سازی عددی بدون شبکه

در این روش برای هر کدام از گره‌ها، یک دامنه محلی در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از دامنه حمایتی گره‌های مؤثر پیرامون آن مشخص می‌شود. اندازه اضلاع دامنه محلی و دامنه حمایتی به صورت ضرایبی از فواصل افقی و عمودی گره‌ها خواهد بود. در روش بدون شبکه تابع وزن متفاوت از تابع شکل است و مقدار آن در مرکز دامنه حمایتی یک (بیشترین مقدار) و با افزایش فاصله به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد تا این که برای نقاط بیرون دامنه حمایتی صفر شود. در این پژوهش از تابع وزن اسپلاین مربعی (Quartic spline function) استفاده شد. اولین گام تعیین یک راه‌حل تقریبی است:

$$\hat{h}(x, y) = \sum_{L=1}^n h_L \phi_L(x, y) \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه فوق  $\hat{h}$ : مقدار تخمینی سطح آب زیرزمینی،  $L$ : شمارنده گره‌های موجود در شبکه آبخوان،  $h_L(t)$ : ارتفاع سطح آب زیرزمینی در گره  $L$  و در زمان  $t$  و  $\phi_L(x, y)$ : مقدار تابع شکل روی گره  $L$  است. با جایگذاری معادله (۳) در معادله (۱) و استفاده از فرضیه روش باقیمانده وزنی خواهیم داشت:



$$\int_{\Omega} \left( Kh \left( \frac{\partial^2 \hat{h}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{h}}{\partial y^2} \right) + 2.Q(i, j) \right) W_L . d\Omega = 0 \tag{۴}$$

که در آن  $\Omega$ : دامنه مسئله و  $W_L$ : تابع وزن است. با ضرب  $W_L$  در مؤلفه‌های داخل پرازنر و استفاده از روش انتگرال جزء به جزء مشتق دوم  $\hat{h}$  به مشتق اول تبدیل خواهد شد. با ضرب تابع وزن در همه مؤلفه‌ها و در نظر گرفتن دامنه محلی به جای دامنه اصلی مسئله خواهیم داشت:

$$- \int_{\Omega_q} \left( Kh \left( \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial x} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial y} \right) \right) d\Omega + 2 \int_{\Omega_q} (Q.W_L) d\Omega + \int_{\Gamma_q} Kh \left( \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y \right) W_L d\Gamma = 0 \tag{۵}$$

که در آن  $\Omega_q$ : دامنه محلی پیرامون هر کدام از گره‌های آبخوان و  $\Gamma_q$ : معرف مرز دامنه محلی است که از سه قسمت مرز داخلی، مرز طبیعی و مرز اساسی ( $\Gamma_q = \Gamma_i \cup \Gamma_t \cup \Gamma_u$ ) تشکیل شده است (شکل ۵). از این رو خواهیم داشت:

$$- K \int_{\Omega_q} h \left( \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial x} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial y} \right) d\Omega + 2 \int_{\Omega_q} (Q.W_L) d\Omega + K \int_{\Gamma_{qt}} (qt) W_L d\Gamma + K \int_{\Gamma_{qu}} h \left( \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y \right) W_L = 0 \tag{۶}$$

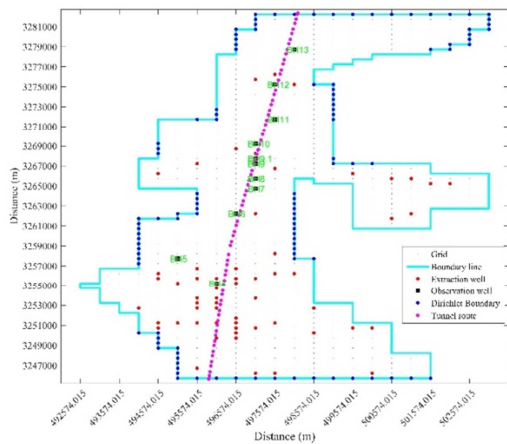


Figure 4. Representation of conceptual model, boundary conditions, extraction wells, boreholes, and tunnel route

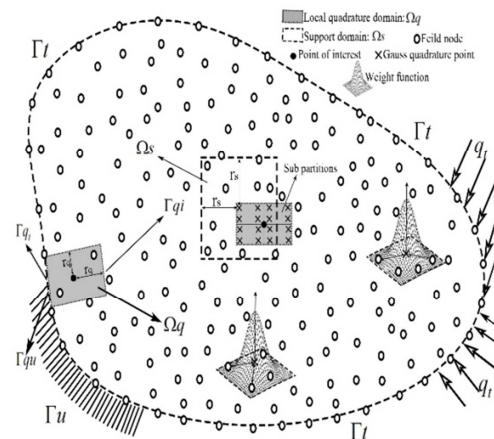


Figure 5. Illustration of nodes, local and support domains, weight function, boundaries, and subdomains

در ادامه محاسبات، نیاز به تعریف تابع شکل است. در این مطالعه از تابع شکل درون یاب نقطه‌ای شعاعی استفاده شد:

$$\Phi_L(x, y) = \{R(x, y) P(x, y)\} G^{-1}, \text{ where } G = \begin{bmatrix} R_0 & P_m \\ P_m^T & 0 \end{bmatrix} \tag{۷}$$

که در آن  $R$  و  $P$  به ترتیب توابع شعاعی و چندجمله‌ای درون تابع شکل هستند. هم‌چنین  $R_0$ : مقدار تابع شعاعی برای کلیه نقاط درون دامنه حمایتی و  $P_m$ : تابع چند جمله‌ای است. توابع شعاعی دارای انواع مختلفی است که در این مطالعه از توابع نمایی یا گوسی استفاده شد. هم‌چنین تعداد چندجمله‌ای‌ها برابر سه در نظر گرفته شد. رابطه (۸) محاسبات توابع نمایی و تابع چندجمله‌ای را نشان می‌دهد.



$$R_X(r_{X'}) = \exp[-\alpha_c \left(\frac{r_{X'}}{dc}\right)^2], r_{X'} = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$P_3^T = [P_3(X_1) \ P_3(X_2) \ \dots \ P_3(X_n)], P_3(X) = \{1 \ x \ y\}$$

که در آن  $r_{X'}$ : فاصله،  $\alpha_c$ : پارامتر ثابت تابع شعاعی و  $dc$ : همان فاصله میان گره‌ای در شبکه نقاط است. رابطه (۹) شکل نهایی معادلات انتگرالی روش بدون شبکه را نشان می‌دهد:

$$K \left( \int_{\Omega_q} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial y} \right) d\Omega - \int_{\Gamma_{qu}} \left( \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y \right) W_L d\Gamma_{qu} \right) \{h_L^2\} = \int_{\Omega_q} (Q \cdot W_L) d\Omega + \int_{\Gamma_{qt}} (qt) W_L d\Gamma_{qt} \quad \text{رابطه ۹}$$

به منظور افزایش دقت در انتگرال‌های عددی فوق، دامنه محلی به چندین بخش کوچک تقسیم می‌شود و داخل هر بخش تعداد مشخصی نقاط گوس تعریف می‌شود (شکل ۵) و شکل ماتریسی معادله نهایی روش بدون شبکه مشابه رابطه (۱۰) به دست خواهد آمد.

$$[G] \cdot \{h^2\} = \{B\} + \{F\} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

### ۳.۲. تحلیل عدم قطعیت

در مطالعه پیش‌رو جهت تعیین مقدار درست پارامترهای تأثیرگذار نظیر هدایت هیدرولیکی از الگوریتم DREAM استفاده شد. هم‌چنین، جهت بررسی دقت داده‌های ورودی (ارتفاع سطح آب روی گمانه‌ها و هم‌چنین دبی منابع برداشت) و در نظر گرفتن اثر دامنه محلی و حمایتی و تنظیم کردن پارامتر تابع شکل، عدم قطعیت این اجزاء نیز مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه توضیح روش کار الگوریتم DREAM ارائه شده است.

### ۳.۲.۱. الگوریتم DREAM

این الگوریتم نخستین بار توسط Vrugt *et al.* (2009) معرفی شد. در حال حاضر، یکی از بهترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت که کاربرد گسترده‌ای در علوم مختلف هم دارد الگوریتم DREAM است که مراحل انجام این الگوریتم در شکل (۶) نشان داده شده است. در روش DREAM براساس الگوریتم تفاضل تکاملی و از روی مقادیر فعلی نسل بعدی تولید می‌شود. هر نسل شامل تعداد مشخصی زنجیره می‌شود که هر زنجیره مقدار تقریبی پارامترهای مدنظر را دارد.

$$\bar{v}^i = \bar{\theta}^i + (1+e)\gamma(\delta) \cdot \left( \sum_{j=1}^{\delta} \bar{\theta}^{r_1(j)} - \sum_{n=1}^{\delta} \bar{\theta}^{r_2(n)} \right) + \varepsilon \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن،  $\bar{v}^i$  نسل جدید زنجیره  $i$  ام،  $\bar{\theta}^i$  نسل قبلی زنجیره‌ی  $i$  ام در گام پیش،  $\varepsilon$  یک عدد تصادفی بین صفر و یک از توزیع یکنواخت،  $\delta$  تعداد جفت زنجیر به کار رفته برای تولید سری پیشنهادی،  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  دو سری زنجیر انتخابی (از زنجیره‌های پیشین) که انتخاب آن‌ها تصادفی بوده و  $\gamma$  مقدار جهش است. در الگوریتم DREAM به منظور تولید توزیع پسین برای پارامترهای ورودی، صرفاً نمونه‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که شاخص همگرایی گلמן و رابین (Statistic) برای آن‌ها کوچک‌تر یا مساوی  $1/2$  باشد (Gelman and Rubin, 1992).

### ۴.۲. پیاده‌سازی و توصیف روش اجرا

در مطالعه پیش‌رو به‌منظور تعیین باند عدم‌قطعیت پارامتر هدایت هیدرولیکی، تعداد ۱۸ پهنه همگن متناسب با وضعیت زمین‌شناسی محیط پیرامون تونل در نظر گرفته شد و حدود تغییرات اولیه این پارامتر براساس اندازه‌گیری‌های صحرائی (آزمون لوژان) در مدل اعمال شد. شکل (۷) موقعیت این نواحی همگن را نشان می‌دهد.

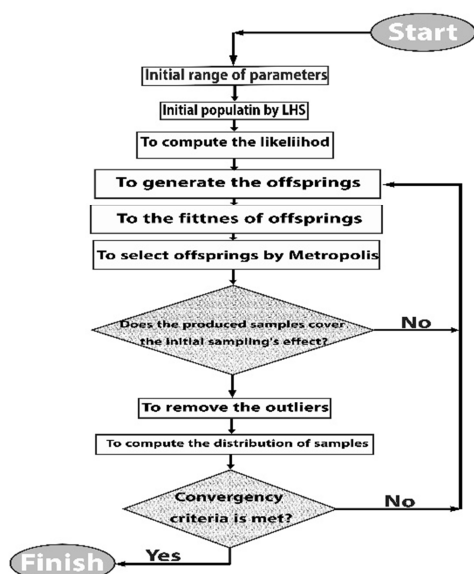


Figure 6. Flow work of DREAM algorithm

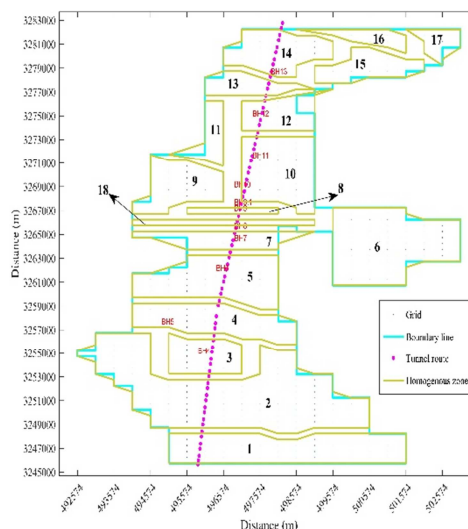


Figure 7. Definition of homogenous zones for hydraulic conductivity estimation

هم‌چنین، به‌منظور بررسی صحت داده‌های اندازه‌گیری‌شده در خصوص ارتفاع سطح آب در گمانه‌ها و دبی منابع برداشت، یک ضریب اصلاحی ( $\lambda_c$ ) در نظر گرفته شد. این روش یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت داده‌های ورودی است که در پژوهش‌های بسیار زیادی نظیر *Mustafa et al.* (2020) و *Vrugt et al.* (2005) به‌کار گرفته شده است. دامنه تغییرات این پارامتر براساس مطالعات انجام‌شده عموماً بین ۲۰- درصد تا ۲۰+ درصد در نظر گرفته می‌شود (*Han et al., 2020; Marshall et al., 2021*). علاوه بر این، به جهت کمی کردن عدم‌قطعیت ناشی از روش عددی، اندازه دامنه محلی ( $\alpha_q$ )، دامنه حمایتی ( $\alpha_s$ ) و پارامتر ثابت تابع شکل شعاعی ( $\alpha_c$ ) در پارامترهای الگوریتم DREAM تعریف شد. دامنه تغییرات این دو پارامتر براساس یافته‌های *Liu and Gu* (2005) در نظر گرفته شده است. در نهایت دسته پارامترهای موردبررسی به‌صورت  $\theta = \{K_i, \lambda_c, \alpha_q, \alpha_s, \alpha_c, i = 1, 2, \dots, 18\}$  تعریف شد و دامنه پیشین آن‌ها مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شد. تعداد اجراهای الگوریتم DREAM پنج هزار بار، تعداد زنجیره‌های اولیه چهار و هم‌چنین شاخص RMSE به‌عنوان تابع درست‌نمایی هر کدام از زنجیره‌ها در نظر گرفته شد. روند اجرای این مدل شبیه‌سازی-بهبوده‌سازی بدین گونه است که الگوریتم DREAM به‌ازای هر کدام از زنجیره‌ها لازم است تا یک مرتبه مدل شبیه‌ساز عددی بدون شبکه را اجرا کند و سپس با مقایسه سطح آب اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده میزان درست‌نمایی هر زنجیره مشخص شود. از آنجاکه مدل‌سازی در این پژوهش در حالت ماندگار انجام شده است، مقایسه سطح آب زیرزمینی برای روز ۲۵ فروردین‌ماه ۱۳۹۶ انجام شد و ارتفاع سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده با مقدار اندازه‌گیری‌شده در این روز انجام شده است.

Table 1. Prior ranges of used parameters in DREAM algorithm

Conductivity parameters for homogenous zones					
Parameter	Unit	Range	Parameter	Unit	Range
K1	m/d	0.0035-0.0043	K10	m/d	0.0058-0.0071
K2	m/d	0.0058-0.0071	K11	m/d	0.0054-0.0067
K3	m/d	0.0194-0.2160	K12	m/d	0.0047-0.0057
K4	m/d	0.0023-0.0029	K13	m/d	0.0047-0.0057
K5	m/d	0.0156-0.1728	K14	m/d	0.0039-0.0048
K6	m/d	0.1555-0.1901	K15	m/d	0.0039-0.0048
K7	m/d	0.0062-0.0076	K16	m/d	0.0039-0.0048
K8	m/d	0.0002-0.0003	K17	m/d	0.0039-0.0048
K9	m/d	0.0272-0.3024	K18	m/d	0.0066-0.0081
Input parameters for rainfall and abstraction rate					
Parameter	Unit	Range			
$\lambda_c$	%	-15% - +15%			
Structure parameters of numerical modeling					
Parameter	Unit	Range	Parameter	Unit	Range
$\alpha_c$	-	0 - 1	$\alpha_s$	-	1.5 - 3.5
$\alpha_q$	-	0.5- 2.5			

## ۵.۲. شبیه‌سازی هجوم آب

بعد از مشخص شدن مقادیر بهینه دسته پارامترهای تأثیرگذار، ارتفاع سطح آب در آبخوان فرض شده پیرامون تونل انتقال آب شبیه‌سازی شده و میزان هجوم آب زیرزمینی به سمت تونل متناسب با ارتفاع سطح آب و قابلیت انتقال آب محیط پیرامون آن محاسبه شد. به‌طور کلی تمام روش‌های تخمین دبی هجوم آب زیرزمینی ریشه در قانون دارسی و قانون بقای جرم دارد. از منظر قانون دارسی دبی هجوم آب براساس نفوذپذیری و شیب هیدرولیکی بیان می‌شود. همچنین، قانون بقای جرم دبی ورودی به تونل را معادل تغذیه و آب کاسته‌شده از مخزن بالاسر تونل بیان می‌کند. در هیدرولیک چاه، جریان آب ورودی به چاه براساس حل ریاضی معادله دارسی قابل محاسبه است. چنانچه محور چاه از حالت عمودی به افقی تبدیل شود، این معادله با در نظر گرفتن بعضی فرضیات می‌تواند برای دبی ورودی به تونل نیز مورداستفاده قرار گیرد. چنانچه یک تونل با طول  $L$  در یک آبخوان نفوذپذیر حفر شده باشد (شکل ۷)، متناسب با بعضی فرضیات از حل ریاضی معادله دارسی می‌توان برای تخمین دبی هجوم آب در تونل استفاده کرد (Katibeh and Aalianvari, 2012):

$$Q_{in} = \frac{2\pi T(h_m - h_t)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_t}\right)} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که در آن،  $Q_{in}$ : دبی هجوم آب به درون تونل (مترمکعب بر روز)،  $T$ : مقدار قابلیت انتقال پیرامون تونل (مترمربع بر روز)،  $h_m$ : ارتفاع سطح آب زیرزمینی در روی تونل (متر) و  $h_t$ : ارتفاع دیواره فوقانی تونل (متر). همچنین،  $r_t$  و  $r_m$  به ترتیب فاصله سطح آب زیرزمینی تا مرکز تونل (متر) و شعاع درونی تونل (متر) است. در وهله اول باید توجه داشت که همانند چاه، مخروط افت به صورت شعاعی و پیرامون محور تونل خواهد بود. همچنین به‌جای این که شیب هیدرولیکی به صورت افقی در نظر گرفته شود، به صورت عمودی و در بالاسر تونل در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، قابلیت انتقال عمودی در نظر گرفته شود، قابلیت انتقال به صورت افقی و در راستای طول تونل فرض می‌شود (جهت کسب اطلاعات بیشتر به Katibeh and Aalianvari (2012) مراجعه شود). در مطالعات مدل‌سازی عددی هجوم آب، عموماً تونل انتقال آب به‌عنوان یک زهکش خطی داخل محیط آبخوان فرض می‌شود (Zhang *et al.*, 2007; Shoemaker *et al.*, 2008).

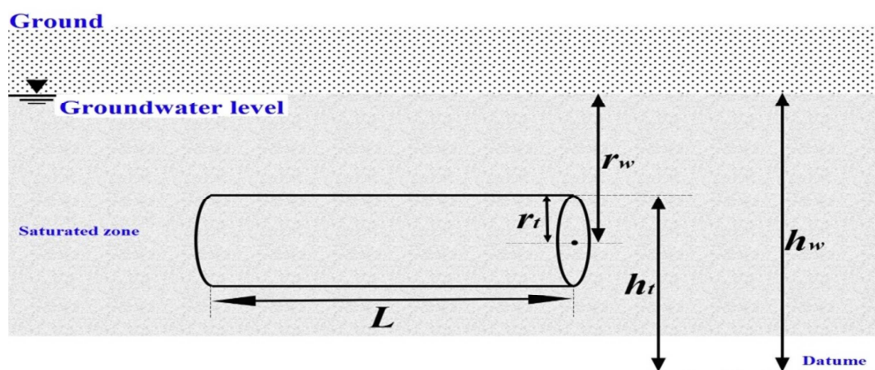


Figure 8. Definition of tunnel excavated in a permeable aquifer

باتوجه به اطلاعات حفاری ثبت‌شده، مقدار شعاع تونل معادل سه متر و ارتفاع تونل در شروع حفاری برای قسمت‌های شمال و جنوبی به ترتیب ۲۳۸۳/۸۳ و ۲۳۶۹/۹۶ متر است که متناسب با پیشرفت حفاری یک شیب ۱۶+ درصد در قسمت جنوبی و یک شیب ۲۳- درصد در جهت شمالی وجود دارد. لازم به ذکر است که کلیه مراحل محاسباتی این پژوهش در محیط برنامه‌نویسی MATLAB 2016a انجام شد. همچنین، عملکرد مدل عددی روش بدون شبکه قبلاً در مطالعات Jafarzadeh *et al.* (2021a) و Jafarzadeh *et al.* (2021b) مورد بررسی قرار گرفته است و صحت کارکرد آن مورد تأیید قرار گرفته است.

### ۳. نتایج و بحث

پس از پایان الگوریتم DREAM، بررسی شاخص گلن و رابین پارامترهای مدنظر نشان داد که از بین ۵۰۰۰ بار اجرای الگوریتم، این شاخص برای تمام پارامترها بعد از ۷۶۰ تکرار به اعداد کم‌تر از ۱/۲ همگرا شده است و این بدان معنی است که تخمین‌های ارائه‌شده درخصوص پارامترها از منظر روند الگوریتم منطقی می‌باشد. شکل (۹) وضعیت همگرایی شاخص گلن و رابین را برای بعضی از پارامترها نشان می‌دهد (به دلیل تعداد زیاد پارامترهای هدایت هیدرولیکی و روند مشابه آن‌ها، بقیه پارامترها نمایش داده نشده است). پس از اجرای برنامه و بررسی مقدار تابع درست‌نمایی در زنجیره‌ها و نمونه‌های تولیدشده مشخص شد که مقدار تابع هدف RMSE در بهترین دسته پارامترهای تخمین‌زده‌شده معادل ۲/۵۷۳۸ متر برآورد شد. جدول (۲) مقادیر تخمین‌زده‌شده پارامترها را نشان می‌دهد.

Table 2. Optimal values of used parameters in DREAM algorithm

Parameter	Unit	Range	Inferred true values	Parameter	Unit	Range	Inferred true values
K1	m/d	0.0035-0.0043	0.0038	K10	m/d	0.0058-0.0071	0.0071
K2	m/d	0.0058-0.0071	0.0071	K11	m/d	0.0054-0.0067	0.0058
K3	m/d	0.0194-0.2160	0.1988	K12	m/d	0.0047-0.0057	0.0052
K4	m/d	0.0023-0.0029	0.0028	K13	m/d	0.0047-0.0057	0.0052
K5	m/d	0.0156-0.1728	0.0981	K14	m/d	0.0039-0.0048	0.0046
K6	m/d	0.1555-0.1901	0.1660	K15	m/d	0.0039-0.0048	0.0047
K7	m/d	0.0062-0.0076	0.0064	K16	m/d	0.0039-0.0048	0.0044
K8	m/d	0.0002-0.0003	0.0002	K17	m/d	0.0039-0.0048	0.0039
K9	m/d	0.0272-0.3024	0.0287	K18	m/d	0.0066-0.0081	0.0071
$\lambda_c$	%	-15% - +15%	+4.0234	$\alpha_c$	-	0 - 1	0.8516
$\alpha_q$	-	0.5- 2.5	0.84976	$\alpha_s$	-	1.5 - 3.5	2.8531

در ادامه توزیع پسین پارامترها همراه با بهترین تخمین در شکل (۱۰) ارائه شده است. کاملاً مشخص است که توزیع نهایی مقادیر تخمین زده شده اکثر پارامترها به خوبی بیان شده است. تحلیل مقادیر بهینه پارامترهای تخمین شده نشان می‌دهد که مقدار خطای داده‌های ورودی (ارتفاع سطح آب و دبی منابع برداشت) حدود مثبت چهار درصد است و چنین استنباط می‌شود که در ثبت داده‌های ارتفاع سطح آب و دبی منابع برداشت یک کم تخمینی وجود دارد و باید در حدود چهار درصد به مقادیر ثبت شده اضافه شود. دامنه تغییرات پارامترهای مدل‌سازی عددی نیز نشان می‌دهد که برخلاف توجه بسیار کم بیشتر پژوهش‌گران در شناسایی عدم قطعیت ساختاری روش‌های عددی، این بخش از عدم قطعیت می‌تواند تا حد قابل قبولی دقت تخمین نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. مقدار کم اندازه دامنه محلی نشان می‌دهد که برای منطقه مورد مطالعه، دامنه‌های محلی با ابعاد کوچک‌تر می‌تواند منجر به افزایش عملکرد مدل‌سازی عددی شود. همچنین، دامنه حمایتی نزدیک به سه نشان می‌دهد که جهت تقریب تابع وزن برای یک گره، مکان هندسی نقاط پیرامون آن را تا شعاع سه گره در نظر گرفت. همچنین، پارامتر ثابت تابع شکل شعاعی حدود  $0/85$  برآورد شد.

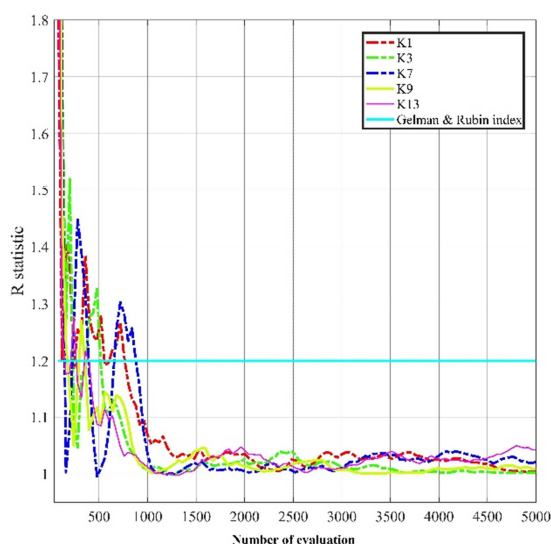


Figure 9. Evolution of the Gelman and Rubin scale-reduction factor for used parameters

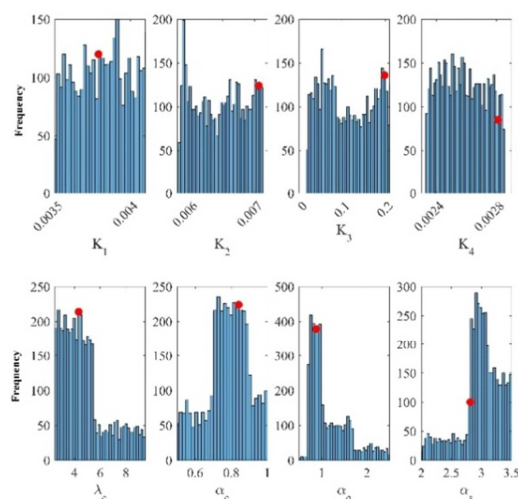


Figure 10. Posterior distribution of DREAM algorithm for used parameters

دامنه کلی تغییرات هدایت هیدرولیکی در نواحی همگن منطقه مورد مطالعه بسیار پایین است و این موضوع به دلیل شرایط آبخوان سنگی درز و شکاف‌دار است. بیش‌ترین هدایت هیدرولیکی به ترتیب در نواحی همگن سه، شش و نه به دست آمده است (شکل ۴). ناحیه همگن شش یک ناحیه آبرفتی است که وجود منابع برداشت زیاد در آن نیز مؤید این مطلب است. علت بالابودن هدایت هیدرولیکی در نواحی سنگی سه و نه، به صورت خاصی ریشه در شرایط هیدروترمال، خردشدگی و مسائل زمین‌شناسی این دو منطقه دارد. بررسی مقاطع نازک برای نمونه‌های اخذ شده در ناحیه نه، در شکل (۱۱) ارائه شده است. سیالات هیدروترمالی با عبور از فضای متخلخل سنگ‌ها موجب دگرسانی کانی‌های موجود در آن‌ها شده و ساختار آن‌ها را با افزودن، حذف و یا آرایش مجدد تغییر می‌دهند. به عبارت دیگر، کانی‌های اولیه سنگ‌های ولکانیکی یا حل شده و یا با کانی‌های ثانویه نظیر کوارتز، رس، کلبریت، زئولیت، سرسیت، اپیدوت، کلسیت و ... جانشین می‌شوند. با توجه به نوع دگرسانی منطقه در مسیر تونل، که از نوع پروپلیتیک دمای پایین (شدت پایین دگرسانی) است، ساختار سنگ متلاشی شده، اما رسی نشده و باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری سنگ شده است. علاوه بر این، به دلیل

وضعیت زمین‌شناسی منطقه (شرایط زمین‌گرایی- آتشفشانی کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر، کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان)، مشاهده سیالات زمین‌گرایی در طول مسیر تونل (چشمه آب گرم شیرینک و گمانه آرتزین BH-9) و آزمایش‌های شیمیایی متعددی که در نمونه‌های آب انجام شده، بروز شرایط هیدروترمال به اثبات رسیده است و موجب افزایش تخلخل و نفوذپذیری و در نتیجه افزایش هدایت هیدرولیکی شده است.

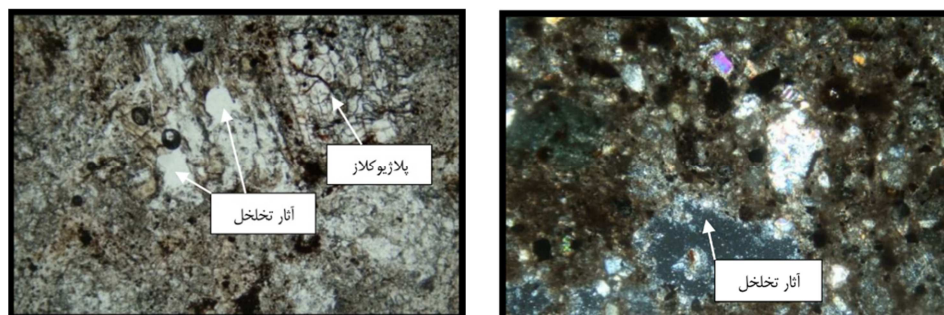


Figure 11. Photomicrographs of thin sections, alteration, and porosity in the homogenous zone of 9

در ادامه و با استفاده از خروجی به‌دست‌آمده از الگوریتم شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، بهترین مقادیر به‌دست‌آمده برای دسته پارامترهای دخیل در فرایند مدل‌سازی اتخاذ شد و شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب برای محیط پیرامون تونل انتقال آب با استفاده از مدل عددی بدون شبکه انجام شد. جدول (۳) مقایسه ارتفاع سطح آب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای گمانه‌های حفار شده در مسیر حفاری تونل را همراه با شاخص RMSE نشان می‌دهد.

Table 3. Error prediction for the Mfree models in the borehole wells

Borehole	Observed head (m)	Estimated head (m)	Error prediction (m)
BH4	2801.200	2801.150	0.05
BH5	2943.030	2938.749	-4.28116
BH6	2941.990	2939.769	-2.22094
BH7	2839.990	2839.841	-0.14890
BH8	2738.730	2736.635	-2.09537
BH9	2721.600	2721.580	-0.012
BH9.1	2680.620	2683.215	2.59548
BH10	2668.110	2671.371	3.26125
BH11	2665.780	2662.980	-2.80014
BH12	2555.980	2559.587	3.60684
BH13	2514.160	2511.526	-2.63355
Total RMSE(m)			2.5731

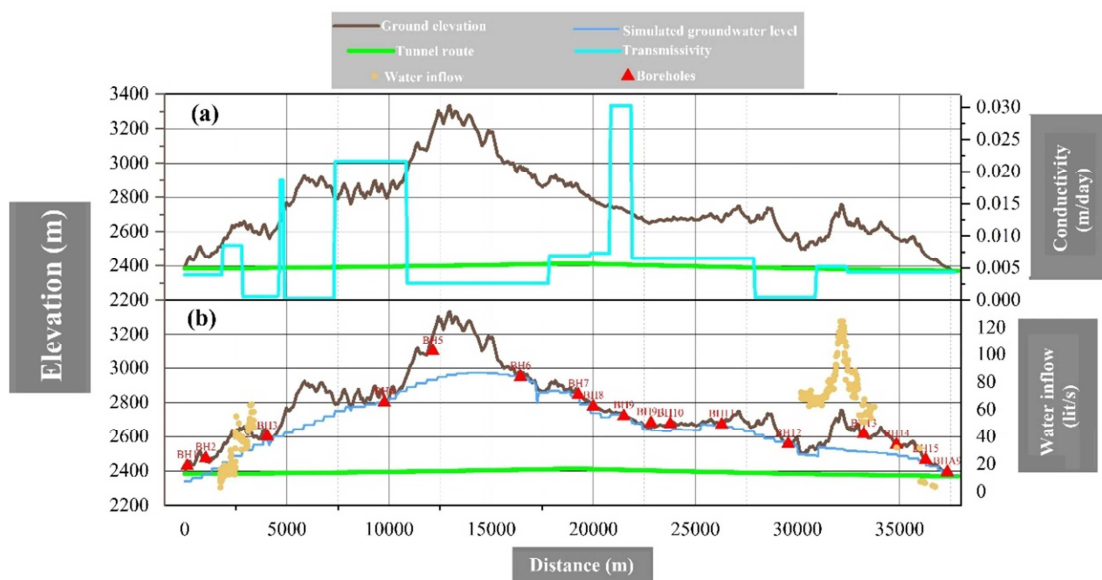
ارزیابی عملکرد مدل عددی و دقت مناسب آن نشان می‌دهد که این روش عددی و کارکرد ساختار پیشنهادی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی قابل توجه بوده و می‌توان از این روش جهت تخمین ارتفاع سطح آب در شرایط واقعی و پیچیده آبخوان سنگی درز و شکافدار استفاده کرد. با توجه به این که فرایند مدل‌سازی آب زیرزمینی در پژوهش حاضر در حالت ماندگار انجام شده است، تخمین دبی هجوم آب فقط برای یک گام زمانی (روز ۲۵ فروردین ماه ۱۳۹۶) انجام شد و مقدار دبی شبیه‌سازی‌شده با مقدار اندازه‌گیری‌شده مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۴). در روز ۲۵ فروردین ماه ۱۳۹۶ در تونل شمالی و جنوبی به ترتیب ۲۰/۸۲ و ۲۵/۶۱ متر حفاری انجام شده است که متناسب با این میزان حفاری دبی‌های ۷۲/۶ و ۴۶/۷ لیتر بر ثانیه بود به ترتیب در تونل‌های شمالی و جنوبی ثبت شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود

که در مترای حفاری صورت گرفته میزان دبی هجوم آب شبیه سازی شده به مقادیر اندازه گیری شده بسیار نزدیک است و این حاکی از دقت و عملکرد مناسب فرایند مدل سازی پیشنهاد شده در این پژوهش دارد. لکن، ارزیابی دقیق تر دبی های تخمین زده شده نشان می دهد که در هر دو قسمت شمالی و جنوبی دبی شبیه سازی شده در مقایسه با دبی اندازه گیری شده با یک کم تخمینی جزئی همراه است.

**Table 4. Simulated and observed groundwater inflows during excavation advance in the north and south parts**

Part	Beginning	End	Excavation length (m)	Water overburden (m)	Estimated inflow rate (l/s)	Observed inflow rate (l/s)
North tunnel	7662.27	7683/09	20.82	172.6	72.43	72.6
South tunnel	3368.61	3394/22	25.61	166.29	45.09	46.7

در ادامه، براساس هدایت هیدرولیکی به دست آمده و همچنین ارتفاع سطح آب شبیه سازی شده، ارتفاع آب بالاسر در طول مسیر کلی تونل به همراه دبی هجوم آب اندازه گیری شده در روزهای قبل از حالت ماندگار در شکل (۱۲) به نمایش گذاشته شده است. شکل (۱۲-ا) هدایت هیدرولیکی محیط پیرامون تونل را در کنار پروفیل مسیر تونل و ارتفاع سطح زمین نمایش می دهد. همچنین، شکل (۱۲-ب) ارتفاع سطح شبیه سازی شده را در طول مسیر تونل به همراه دبی های اندازه گیری شده نشان می دهد. تطابق تغییرات هدایت هیدرولیکی، ارتفاع شبیه سازی شده و دبی هجوم آب وارد شده در طول مسیر تونل حاکی از دقت مناسب هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده و ارتفاع سطح آب شبیه سازی شده دارد. در صورت تکمیل پروژه حفاری در مسیر تونل، پیش بینی می شود که در نواحی پیرامون گمانه های BH3، BH4 و BH9 که هدایت هیدرولیکی بیش تر است، احتمال هجوم بیش تر آب به داخل تونل وجود دارد. چراکه در این مناطق، پدیده های متعددی نظیر شکستگی ها، ساختارهای زمین شناسی و هیدروژئولوژی، وجود جریان های آرتزینی، جریان های عمقی و افزایش نفوذپذیری به دلیل شرایط هیدروترماله هجوم آب به درون تونل را تشدید می کنند.



**Figure 12. Representation of cross-section of the Kerman tunnel route showing (a) tunnel route, ground elevation, and hydraulic conductivity, (b) tunnel route, ground elevation, estimated water overburden, measured inflow rate and borehole wells location**



#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی عملکرد ساختار عملیاتی شبیه‌ساز- بهینه‌ساز بر پایه الگوریتم DREAM و مدل عددی بدون شبکه جهت تخمین ارتفاع سطح آب در محیط پیرامون تونل انتقال آب صفارود کرمان، مورد بررسی قرار گرفت و از آن، جهت تخمین آب ورودی به تونل در مسیر حفاری استفاده شد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که شرایط هیدروترومال و دگرسانی ناشی از آن منجر به تغییر نفوذپذیری مسیر حفاری شده است. به طوری که برخی نواحی مجاور با شرایط هیدروترومال دارای نفوذپذیری بسیار بالاتری نسبت به سایر مناطق هستند. همچنین، بررسی دامنه تغییرات پارامتر اصلاحی داده‌های ورودی نشان می‌دهد که این اطلاعات در حدود چهار درصد با کم تخمینی ثبت شده‌اند. علاوه بر این، بررسی پارامترهای مربوط به مدل‌سازی عددی نشان داد که عدم قطعیت ساختاری مدل‌سازی عددی به صورت قابل توجهی می‌تواند تخمین نهایی را تحت تأثیر قرار دهد. چراکه نتایج به دست آمده از توزیع پسین پارامترهای دخیل در مدل‌سازی عددی نشان داده که روش عددی بدون شبکه تمایل دارد تا دامنه محاسبات محلی را کاهش داده و حداقل سه گره پیرامون برای دامنه حمایتی لازم است تا دقت مناسب حاصل شود. علاوه بر این، با استفاده از شبیه‌سازی عددی انجام شده، بیشترین احتمال هجوم آب در نواحی دامنه شمالی و جنوبی کوه عشق و محدوده سرزه خواهد بود. مقایسه دبی هجوم آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در حالت ماندگار نشان می‌دهد که چارچوب مدل‌سازی ارائه شده از دقت و عملکرد مناسبی برخوردار است و می‌توان از آن برای توسعه و کاربردهای بیش‌تر در زمینه مدل‌سازی و تخمین هجوم آب زیرزمینی به درون تونل استفاده کرد. یافته‌های به دست آمده از این پژوهش، مختص اطلاعات و بررسی‌های این پژوهش بوده و مطالعه پیش‌رو در برخی موارد با محدودیت‌های اساسی مواجه بوده است. به عنوان مثال، به دلیل حجم بالای محاسبات مربوط به ساختار الگوریتم پیشنهاد شده زمان اجرای برنامه بسیار سنگین بوده و از این رو مطالعه مذکور فقط به ارائه نتایج در حالت ماندگار اکتفا کرده است. از این رو، توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی پیاده‌سازی چارچوب‌های متن باز مشابه این پژوهش بر اساس زبان‌های برنامه‌نویسی قوی‌تر نظیر فرتن و یا پایتون صورت بگیرد تا بتواند این محدودیت‌ها را پوشش دهد. از آنجاکه محیط آبخوان پیرامون تونل حفاری از نوع سنگی درز و شکافدار است، به عنوان اهداف پژوهشی مطالعات آینده توصیه می‌شود که عملکرد مدل‌سازی عددی ارائه شده در این پژوهش در تقریب معادلات مخصوص محیط‌های سنگی همراه با شکستگی نظیر Boussinesq equation مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی بین نویسندگان وجود ندارد.

#### ۶. منابع

- Anshuman, A., & Eldho, T. I. (2019). Modeling of transport of first-order reaction networks in porous media using meshfree radial point collocation method. *Computational Geosciences*, 23(6), 1369-1385. <https://doi.org/10.1007/s10596-019-09906-8>
- Arnold, J. G., Allen, P. M., & Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of hydrology*, 142(1-4), 47-69.
- Bouvard, M., & Pinto, N. (1969). Aménagement Caprivari-Cahoeira étude en charge. *La Houille Blanche*, (7), 747-760.
- Chiu, Y. C., & Chia, Y. (2012). The impact of groundwater discharge to the Hsueh-Shan tunnel on the water resources in northern Taiwan. *Hydrogeology journal*, 20(8), 1599-1611.

- Coli, N., Pranzini, G., Alfi, A., & Boerio, V. (2008). Evaluation of rock-mass permeability tensor and prediction of tunnel inflows by means of geostructural surveys and finite element seepage analysis. *Engineering Geology*, 101(3-4), 174-184.
- Crist, J. (2019). *Advantages of Mesh Free Methods for Structural and Fluid Analysis* (No. 2019-01-0939). SAE Technical Paper.
- Dassargues A (1997) Groundwater modelling to predict the impact of tunnel on the behavior of water table aquifer in urban condition. In: *Groundwater in the urban environment: processes and management*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 225-230.
- El Tani, M. (1999). Water inflow into tunnels. *Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES*. p. 61-70.
- El Tani, M. (2003). Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(1), 49-55.
- Farhadian, H., & Nikvar-Hassani, A. (2019). Water flow into tunnels in discontinuous rock: a short critical review of the analytical solution of the art. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3833-3849.
- Farhadian, H., Katibeh, H., & Huggenberger, P. (2016). Empirical model for estimating groundwater flow into tunnel in discontinuous rock masses. *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 471.
- Gelman, A., & Rubin, D. B. (1992). Inference from iterative simulation using multiple sequences. *Statistical science*, 7(4), 457-472.
- Gholizadeh, H., Peely, A. B., Karney, B. W., & Malekpour, A. (2020). Assessment of groundwater ingress to a partially pressurized water-conveyance tunnel using a conduit-flow process model: a case study in Iran. *Hydrogeology Journal*, 28(7), 2573-2585.
- Ghorbani, E., Ghadernejad, S., Emami, D., & Nejati, H. (2021). Estimating groundwater inflow into Dorud-Khorramabad railway tunnel using analytical and numerical methods. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 55(1), 33-41. doi: 10.22059/ijmge.2020.306044.594856
- Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181(3), 375-389.
- Golian, M., Teshnizi, E. S., & Nakhaei, M. (2018). Prediction of water inflow to mechanized tunnels during tunnel-boring-machine advance using numerical simulation. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2827-2851.
- Golian, M., Teshnizi, E. S., Parise, M., Terzić, J., Milanović, S., Vakanjac, V. R., ... & Saadat, H. (2021). A new analytical method for determination of discharge duration in tunnels subjected to groundwater inrush. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(4), 3293-3313.
- Gong, Q. M., Yin, L. J., & She, Q. R. (2013). TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: a case study in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(2), 163-172.
- Goodman, R., Moye, D., Schalkwyk, A., & Javendel, I. (1965). Groundwater inflow during tunnel driving. *Engineering Geology*, 1, 150-162
- Hamraz, B., Akbarpour, A., Bilondi, M. P., & Tabas, S. S. (2015). On the assessment of groundwater parameter uncertainty over an arid aquifer. *Arabian journal of Geosciences*, 8(12), 10759-10773.
- Han, Z., Lu, W., & Lin, J. (2020). Uncertainty analysis for precipitation and sea-level rise of a variable-density groundwater simulation model based on surrogate models. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 28077-28090.
- Hassani, A. N., Farhadian, H., & Katibeh, H. (2018). A comparative study on evaluation of steady-state groundwater inflow into a circular shallow tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 15-25.

- Hassani, A. N., Katibeh, H., & Farhadian, H. (2016). Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), 1617-1627.
- Hassanzadeh, Y., Afshar, A.A., Pourreza-Bilondi, M., Memarian, H., & Besalatpour, A.A. (2019). Toward a combined Bayesian frameworks to quantify parameter uncertainty in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Environ Monit Assess*, 191(1), 23.
- Heuer, R. E. (1995, June). Estimating rock tunnel water inflow. In *Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference* (pp. 41-60). SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC.
- Huangfu, M., Wang, M. S., Tan, Z. S., & Wang, X. Y. (2010). Analytical solutions for steady seepage into an underwater circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 391-396.
- Hydrogeochemical studies of Safarood Kerman water transfer tunnel. (2018). Sahel Omid Iranian consulting engineers company. (in Persian).
- Hydrogeological studies of Safarood Kerman water transfer tunnel. (2022). Sahel Omid Iranian consulting engineers company. (in Persian).
- Insana, A., Barla, M., & Sulem, J. (2020). Energy tunnel linings thermo-mechanical performance: comparison between field observations and numerical modelling. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 205, p. 06008). EDP Sciences.
- Jafarzadeh, A., Khashei-Siuki, A., & Pourreza-Bilondi, M. (2021a). Performance assessment of model averaging techniques to reduce structural uncertainty of groundwater modeling. *Water Resources Management*, 1-25.
- Jafarzadeh, A., Pourreza-Bilondi, M., Akbarpour, A., Khashei-Siuki, A., & Samadi, S. (2021b). Application of multi-model ensemble averaging techniques for groundwater simulation: synthetic and real-world case studies. *Journal of Hydroinformatics*, 23(6), 1271-1289.
- Jafarzadeh, A., Khashei, A., & Pourreza-Bilondi, M. (2021). Performance Assessment of Numerical Solutions in Groundwater Simulation (case study: Birjand aquifer). *Hydrogeology*. (in Persian).
- Katibeh, H., & Aalianvari, A. (2012). Common Approximations to the water inflow into Tunnels. *Drainage systems*, 75-88.
- Katibeh, H., & Aalianvari, A. (2009). Development of a New Method for Tunnel Site Rating from. *Journal of Applied Sciences*, 9(8), 1496-1502.
- Kim, S. M., Yang, H. Y., & Yoon, S. G. (2008). Environmental problems of groundwater around the longest expressway tunnel in Korea. In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. (pp. 415-420). CRC Press.
- Kolymbas, D., & Wagner, P. (2007). Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 23-27.
- Lee, I. M., & Nam, S. W. (2001). The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(1), 31-40.
- Lei, S. (1999). An analytical solution for steady flow into a tunnel. *Ground Water*, 37(1), 23.
- Liu, F., Xu, G., Huang, W., & Hu Sh, H. M. (2012). The effect of grouting reinforcement on groundwater seepage in deep tunnels. *Blucher Mech Eng Proc*, 1(1), 4727-4737.
- Liu, G. R. (2009). *Meshfree methods: moving beyond the finite element method*. CRC press.
- Liu, G. R., & Gu, Y. T. (2005). *An introduction to meshfree methods and their programming*. Springer Science & Business Media.
- Lombardi, G. (2002). quoted from: El Tani M (2003) Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18, 49-55.
- Maréchal, J. C., Lanini, S., Aunay, B., & Perrochet, P. (2014). Analytical solution for modeling discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous unconfined aquifer. *Groundwater*, 52(4), 597-605.

- Marshall, A. M., Link, T. E., Flerchinger, G. N., & Lucash, M. S. (2021). Importance of parameter and climate data uncertainty for future changes in boreal hydrology. *Water Resources Research*, 57(8), e2021WR029911.
- Meiri, D. (1985). Unconfined groundwater flow calculation into a tunnel. *Journal of Hydrology*, 82(1-2), 69-75.
- Mohtashami, A., Akbarpour, A., & Mollazadeh, M. (2017). Development of two-dimensional groundwater flow simulation model using meshless method based on MLS approximation function in unconfined aquifer in transient state. *Journal of Hydroinformatics*, 19(5), 640-652.
- Molinero, J., Samper, J., & Juanes, R. (2002). Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks. *Engineering Geology*, 64(4), 369-386.
- Mustafa, S. M. T., Nossent, J., Ghysels, G., & Huysmans, M. (2020). Integrated Bayesian Multi-model approach to quantify input, parameter and conceptual model structure uncertainty in groundwater modeling. *Environmental Modelling & Software*, 126, 104654.
- Mustafa, S. T., Nossent, J., Ghysels, G., & Huysmans, M. (2020). Integrated Bayesian Multi-model approach to quantify input, parameter and conceptual model structure uncertainty in groundwater modeling. *Environmental Modelling and Software*, 126, 104654. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104654>
- Pan, Y., Zeng, X., Xu, H., Sun, Y., Wang, D., & Wu, J. (2020). Assessing human health risk of groundwater DNAPL contamination by quantifying the model structure uncertainty. *J Hydrol*, 584, 124690.
- 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. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 206-209.
- Pham, H. V., & Tsai, F. T. C. (2016). Optimal observation network design for conceptual model discrimination and uncertainty reduction. *Water Resources Research*, 52(2), 1245-1264.
- Rajabi, M. M., Ataie-Ashtiani, B., & Simmons, C. T. (2018). Model-data interaction in groundwater studies: Review of methods, applications and future directions. *Journal of hydrology*, 567, 457-477.
- Rat, M. (1973). Ecoulement et Repartition des Pressions Interstitielles Autour des Tunnels. *Bull Liaison Lab Ponts Chauss*, (68).
- Ribacchi, R., Graziani, A., & Boldini, D. (2002). Previsione degli afflussi d'acqua in galleria ed influenza sull'ambiente. *Le Opere in Sotterraneo e il Rapporto con l'Ambiente*, 143-199.
- Saberinasr, A., Morsali, M., Hashemnejad, A., & Hassanpour, J. (2019). Determining the origin of groundwater elements using hydrochemical data (case study: Kerman water conveyance tunnel). *Environmental Earth Sciences*, 78(6), 1-17.
- Scheidler, S., Huggenberger, P., Butscher, C., & Dresmann, H. (2019). Tools to simulate changes in hydraulic flow systems in complex geologic settings affected by tunnel excavation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 969-980.
- Shoemaker, W. B., Kuniatsky, E. L., Birk, S., Bauer, S., & Swain, E. D. (2008). Documentation of a conduit flow process (CFP) for MODFLOW-2005.
- Song, W. K., Hamm, S. Y., & Cheong, J. Y. (2006). Estimation of groundwater discharged into a tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 3(21), 460.
- Swetha, K., Eldho, T. I., Singh, L. G., & Kumar, A. V. (2022). Groundwater flow simulation in a confined aquifer using Local Radial Point Interpolation Meshless method (LRPIM). *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 134, 637-649.
- Tedesco, G., Bonduà, S., Borgatti, L., Bossi, G., Fabbri, P., Piccinini, L., & Marcato, G. (2019). Slope and Groundwater Monitoring for 3D Numerical Modelling to Ensure the Structural Health of an Alpine Road Tunnel Crossing an Active Rock Slide. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 30(1), 12.

- Thomas, A., Majumdar, P., Eldho, T. I., & Rastogi, A. K. (2018). Simulation optimization model for aquifer parameter estimation using coupled meshfree point collocation method and cat swarm optimization. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 91, 60-72.
- Tseng, D. J., Tsai, B. R., & Chang, L. C. (2001). A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(3), 175-183.
- Vrugt, J. A., Diks, C. G., Gupta, H. V., Bouten, W., & Verstraten, J. M. (2005). Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. *Water resources research*, 41(1).
- Vrugt, J. A., Ter Braak, C. J. F., Diks, C. G. H., Robinson, B. A., Hyman, J. M., & Higdon, D. (2009). Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 10(3), 273-290.
- Wu, J., & Zeng, X. (2013). Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation. *Chin Sci Bull*, 58(25), 3044-3052.
- Xia, Q., Xu, M., Zhang, H., Zhang, Q., & Xiao, X. X. (2018). A dynamic modeling approach to simulate groundwater discharges into a tunnel from typical heterogeneous geological media during continuing excavation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 341-350.
- Xue, L., & Zhang, D. (2014). A multimodel data assimilation framework via the ensemble Kalman filter. *Water Resources Research*, 50(5), 4197-4219.
- Yang, F. R., Lee, C. H., Kung, W. J., & Yeh, H. F. (2009). The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan. *Engineering Geology*, 103(1-2), 39-58.
- Yoon, H., Hart, D. B., & McKenna, S. A. (2013). Parameter estimation and predictive uncertainty in stochastic inverse modeling of groundwater flow: Comparing null-space Monte Carlo and multiple starting point methods. *Water Resources Research*, 49(1), 536-553.
- Zhang, E., Jaramillo, C. A., & Feldsher, T. B. (2007). Transient simulation of groundwater flow for tunnel construction using time-variable boundary condition. In *Fall Meeting Google Scholar, American Geophysical Union, Washington, DC*.
- Zhou, J. Q., Liu, H. B., Li, C., He, X. L., Tang, H., & Zhao, X. J. (2021). A semi-empirical model for water inflow into a tunnel in fractured-rock aquifers considering non-Darcian flow. *Journal of Hydrology*, 597, 126149.