

ارزیابی عملکرد روش بدون شبکه در شبیه‌سازی عددی هجوم آب به درون تونل

احمد جعفرزاده^{۱*}، امیر صابری نصر^۲، آرش هاشم نژاد^۳

دکتری تخصصی مهندسی آب، دانشگاه بیرجند^{۲،۳}، شرکت مشاور ساحل امید ایرانیان

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰)

چکیده

این پژوهش در نظر دارد تا یک مدل بر پایه روش عددی بدون شبکه و الگوریتم DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) را جهت انجام دادن فرآیند شبیه‌سازی-بهینه‌سازی هجوم آب به درون تونل ارائه دهد. همچنین، هدف دیگر این پژوهش مقایسه عملکرد روش‌های تحلیلی-تجربی و عددی جهت تخمین آب ورودی به تونل انتقال آب صفارود کرمان است. در این پژوهش، جهت تخمین هدایت هیدرولیکی یک چارچوب شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به صورت توأمان پیاده‌سازی شد. در ساختار پیشنهادی ارتفاع سطح آب زیرزمینی بوسیله مدل عددی و مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی توسط الگوریتم تحلیل عدم قطعیت DREAM تعیین شد. پس از مشخص شدن مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی، مدل سازی ارتفاع سطح آب زیرزمینی و دبی هجوم آب ابتدا برای حالت ماندگار و سپس برای حالت غیرماندگار اجرا شد و مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار شاخص RMSE برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده ارتفاع سطح آب در حالت ماندگار و غیرماندگار به ترتیب ۲/۵۷۳ و ۳/۴۸۱ است. یافته‌های این پژوهش اثبات کرد که شرایط هیدروترمال به طور خاص مقادیر هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری را تحت تأثیر خود قرار داده است. مقدار شاخص ارزیابی NSE برای تونل شمالی و جنوبی به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۸۷ تعیین گردید. در نهایت نیز مشخص شد که مقادیر تخمین روش‌های تحلیلی-تجربی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده و خروجی روش عددی بسیار کمتر است.

کلیدواژه‌ها: آبخوان سنگی درز و شکاف‌دار، روش عددی بدون شبکه، دگرسانی، شرایط هیدروترمال، عدم قطعیت

تحلیلی-تجربی انجام شده است. با این وجود عموماً این روش‌ها دارای فرضیات ساده‌کننده‌ای هستند که کارایی آن‌ها را برای کاربرد در محیط‌های واقعی دچار مشکل می‌کند. روش‌های عددی با فراهم کردن بستری برای مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های تحلیلی-تجربی بدست آوردند. کمی کردن مؤلفه‌های مختلف و تأثیر گذار در فرآیند هجوم آب، باعث شده است تا خروجی این روش‌ها به واقعیت نزدیک‌تر بوده و در عمل کارایی بیشتر در مسائل واقعی داشته باشد

از طرفی دیگر، با پیشرفت گسترده مدل‌سازی ریاضی، کاربرد روش‌های عددی در شبیه‌سازی هجوم آب نیز مورد توجه 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

۱. مقدمه

هجوم و پیش‌روی آب به طرف تونل می‌تواند به طور قابل توجهی برنامه‌ریزی زمانی پیشرفت پروژه را مختل کند [۱-۳]. و سبب بروز تلفات جانی و همچنین افزایش هزینه‌ها شود [۴]. ریزش قسمت پیشانی تونل‌ها در اثر هجوم شدید آب در پروژه‌های حمل و نقل شهری و خطوط راه‌آهن [۵]، تخریب دیواره تونل در اثر هجوم آب به تونل حفاری خطوط قطار شهری [۶]، کاهش پایداری دیواره تونل در اثر فشار فوقانی جریان آب زیرزمینی [۷] 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.

تخمین آب ورودی به تونل می‌تواند بوسیله روش‌های تحلیلی-تجربی و یا روش‌های عددی محاسبه شود. در دهه‌های گذشته تلاش‌های بسیاری زیادی در جهت توسعه روش‌های پیچیده

۱ - مواد و روش‌ها

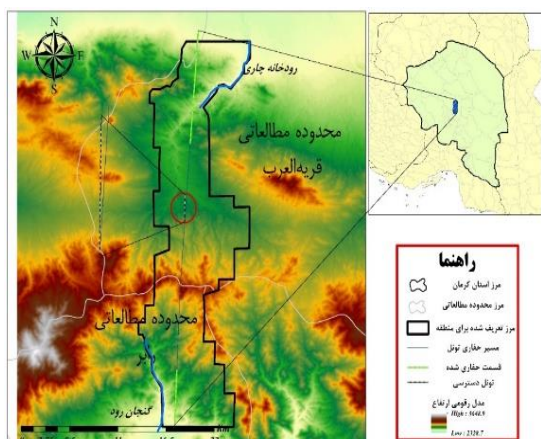
۱-۱ - منطقه مورد مطالعه

تونل انتقال آب صفارود یا تونل کرمان در مرکز فلات مرکزی ایران و جنوب شهر کرمان، با امتداد کلی شمالی-جنوبی، وظیفه انتقال آب از سد صفا را به شهر کرمان دارد. مسیر حفاری تونل حدوداً ۳۸ کیلومتر است که ارتفاع روباره آن حدود ۸۵۰ 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. تا پایان شهریور ۱۳۹۷ حدود ۵۳۰۵ متر از قسمت شمالی و ۱۰۳۱۸ متر از قسمت تونل جنوبی حفاری شده است (شکل ۱) و در برخی مناطق آن به میزان قابل توجهی هجوم آب به درون تونل مشاهده شده است. منطقه مورد مطالعه در حوضه آبریز درجه دو هامون - جازموریان و کویر در انجیر قرار می‌گیرد. بخش شمالی مسیر تونل در محدوده مطالعاتی (حوزه آبریز درجه سه) قریه‌العرب قرار دارد. این محدوده در نوار دهج ساردوئیه و به طور خاص در کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان واقع است. بخش جنوبی تونل در محدوده مطالعاتی (حوزه آبریز درجه سه) رابُر واقع شده است و این بخش عمدتاً تحت تأثیر زون ایران مرکزی و زون ماگمایی ارومیه دختر قرار دارد و این موضوع باعث دگرسانی شدید سنگ‌ها در محیط پیرامون تونل شده است. علاوه بر این، براساس یافته‌های پژوهش‌های انجام شده منشاء آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بیشتر به علت اختلاط زمین گرمایی و شهاب سنگی و همچنین برهم‌کنش متقابل سنگ و آب است [۳۲]. که این خصوصیات از جمله مشخصه‌های منحصر به فرد این منطقه به شمار می‌رود که باعث پیچیده‌تر شدن فرآیند ارتفاع سطح آب زیرزمینی و تخمین میزان هجوم آب خواهد شد. به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی یکی از ابتدایی‌ترین و البته مهم‌ترین اقدامات، تعیین مرز هیدرولوژی منطقه است. در این پژوهش با در نظر گرفتن مرز محدوده‌های مطالعاتی رابُر و قریه‌العرب، موقعیت دو رودخانه مهم گنجان رود و رودخانه چاری، ارتفاعات منطقه و همچنین یافته‌های پژوهش‌های [۳۲-۳۳]. مرز منطقه مورد مطالعه پیرامون مسیر حفاری تونل مطابق با شکل زیر تعیین شد. وسعت این آبخوان ۴۴۴/۱۴ کیلومتر مربع و با توجه به ارتفاعات منطقه از دو قسمت شمالی و جنوبی تشکیل شده است. در شکل (۲) موقعیت مسیر کلی حفاری تونل انتقال، قسمت‌های حفاری شده شمالی و جنوبی به همراه موقعیت تونل دسترسی مشخص شده است.

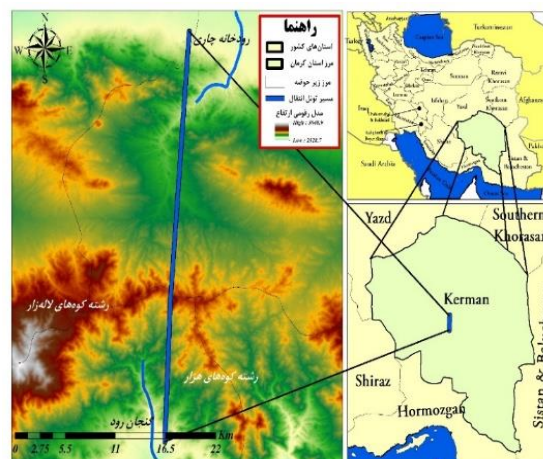
۱-۱- وضعیت زمین‌شناسی

مسیر تونل از نظر زمین‌شناسی در نوار دهج ساردوئیه و به طور 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 [۳۲] آب‌های زیرزمینی منطقه عمدتاً

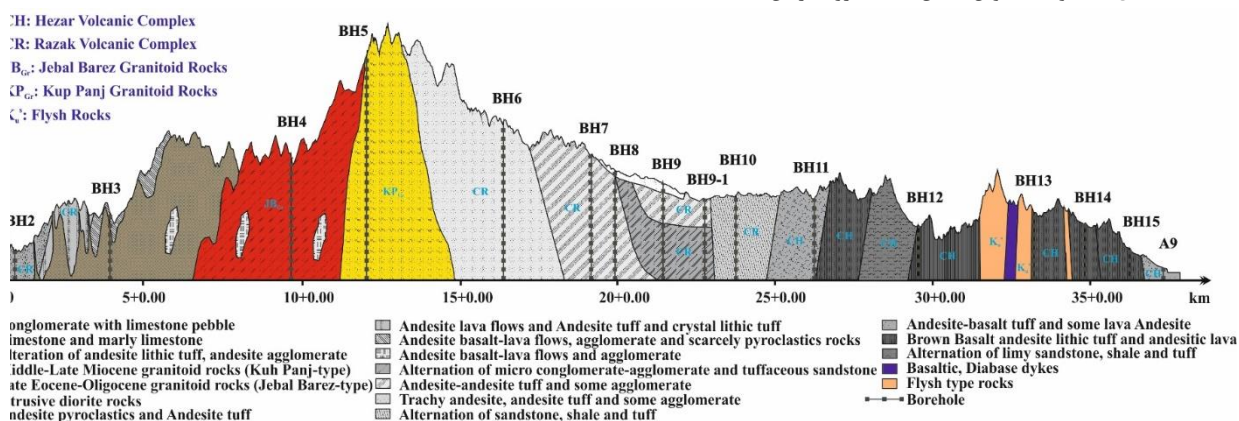
عددی تغییرات مکانی مؤلفه‌ها راحت‌تر در شبیه‌سازی اعمال می‌شود و نتایج بدست آمده قابل اعتمادتر است (Golian et al., 2018). بدون شک کاربرد روش‌های عددی در زمینه تخمین جریان است [۸-۱۲]. با این حال، در ادامه سعی شده است تا یک تقسیم‌بندی در خصوص شیوه مدل‌سازی عددی هجوم آب به درون تونل انجام گیرد. بررسی مطالعات انجام شده 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 [۱۸-۱۳]. در کنار مدل عددی MODFLOW، برخی دیگر از پژوهشگران از مدل‌های عددی مبتنی بر اجزای محدود نظیر MIDAS، TRANMEF-3، Geotechnical and Tunnel analysis System (GTS) و Finite Element subsurface FLOW system (FEFLOW) استفاده کردند [۱۹-۲۲]. 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 مسأله هستند و این موضوع در پروژه‌هایی که دامنه مسأله به صورت نامنظم است، موجب بروز خطای ساختاری در مدل‌سازی می‌شود [۲۳]. 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 [۲۴-۲۵]. روش عددی بدون شبکه (Mesh less)، معرفی شده توسط Gingold and Monaghan، جایگزین مناسب برای مدل‌سازی در مطالعات میدانی با هندسه‌های نامنظم است [۲۶-۲۸]. عملکرد خوب این روش در مقایسه با سایر روش‌های عددی باعث افزایش کاربرد این روش در حوزه مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی شده است [۲۹-۳۱]. 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. در کنار این، باید توجه به این موضوع داشت که مقایسه عملکرد و دقت روش‌های عددی و تحلیل-تجربی تخمین دبی هجوم آب به درون تونل به‌خوبی می‌تواند نقاط ضعف و قوت روش‌های تخمین دبی هجوم آب را مشخص کند و راهنمایی برای پژوهش‌ها و مطالعات آینده در جهت انتخاب روش مناسب تخمین دبی هجوم آب باشد. لکن، بررسی پژوهش‌های انجام شده در این حوزه نشان می‌دهد که کمتر پژوهشی در داخل و خارج کشور به این موضوع پرداخته است و این موضوع یکی از مهم‌ترین خلأهای پژوهشی موجود در حوزه مدل‌سازی دبی هجوم آب به تونل‌های زیرزمینی است.



شکل (۲): موقعیت آبخوان، مسیر حفاری تونل محدوده‌های مطالعاتی



شکل (۱): موقعیت تونل انتقال آب صفارود کرمان



شکل (۳): مقطع عرضی زمین‌شناسی مسیر تونل

دیراک و x_0 و y_0 مختصات مبدأ است. شرایط مرزی و شرایط اولیه طبق روابط زیر در نظر گرفته شد:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} n_x + \frac{\partial h}{\partial y} n_y = \frac{q_t}{K} \delta & \text{on } \Gamma = \Gamma_t \\ \text{Where, } n_x, n_y = 0 \text{ or } 1. \end{cases} \quad (2)$$

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

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

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

۱-۲- مدل جریان آب زیرزمینی

۱-۱-۱- معادله جریان آب زیرزمینی

معادله جریان ماندگار، در یک فضای دو بعدی و در یک آبخوان همگن، همسان‌گرد و آزاد به صورت معادله (۱) ارائه می‌شود

$$K \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + K \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q(i, j) = 0, \quad (1)$$

$$\left(Q(i, j) = Qd + \sum_{i=1}^n Qc_i \delta(x_0 - x_i, y_0 - y_i) \right)$$

که در آن K : هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، h : ارتفاع هیدرولیکی سطح آب زیرزمینی (متر)، Qd : دبی گسترده نظیر تبخیر و یا بارندگی (متر بر روز)، Qc : دبی متمرکز نظیر چاه برداشت و تزریق (متر مکعب بر روز)، x و y : مختصات مکانی در راستای افقی و عمودی (متر)، $\delta(x_0 - x_i, y_0 - y_i)$ تابع

$$\begin{aligned}
 & - \int_{\Omega_q} (Kh(\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial x} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial y})) d\Omega + \\
 & 2 \int_{\Omega_q} (Q \cdot W_L) d\Omega + \\
 & + \int_{\Gamma_q} Kh(\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y) W_L d\Gamma = 0
 \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن Ω_q : دامنه محلی پیرامون هر کدام از گره‌های آبخوان و Γ_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:

$$\begin{aligned}
 & -K \int_{\Omega_q} h(\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial x} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial y}) d\Omega + \\
 & + 2 \int_{\Omega_q} (Q \cdot W_L) d\Omega + K \int_{\Gamma_{qt}} (qt) W_L d\Gamma + \\
 & + K \int_{\Gamma_{qu}} h(\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y) W_L = 0
 \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned}
 \Phi_L(x, y) &= \{R(x, y) P(x, y)\} G^{-1}, \\
 \text{where } G &= \begin{bmatrix} R_0 & P_m \\ P_m^T & 0 \end{bmatrix},
 \end{aligned} \quad (7)$$

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 چند جمله‌ای‌ها برابر سه در نظر گرفته شد. رابطه (۸) محاسبات توابع نمایی و تابع چند جمله‌ای را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}
 R_x(r, r') &= \exp[-\alpha_c (\frac{r-r'}{dc})^2], r, r' = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \\
 P_3^T &= [P_3(X_1) \ P_3(X_2) \ \dots \ P_3(X_n)], P_3(X) = \{1 \ x \ y\}
 \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن r, r' : فاصله، α_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:

$$\begin{aligned}
 & K \left(\int_{\Omega_q} (\frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot \frac{\partial W_L}{\partial y}) d\Omega - \int_{\Gamma_{qu}} (\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y) W_L d\Gamma_{qu} \right) \{h_i^2\} = \\
 & \int_{\Omega_q} (Q \cdot W_L) d\Omega + \int_{\Gamma_{qt}} (qt) W_L d\Gamma_{qt}
 \end{aligned} \quad (9)$$

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) بدست خواهد آمد.

$$[G] \cdot \{h^2\} = \{B\} + \{F\} \quad (10)$$

۱-۲-۱- 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 [۱۷ و ۳۲] 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.

۱-۲-۲- شبیه‌سازی عددی بدون شبکه

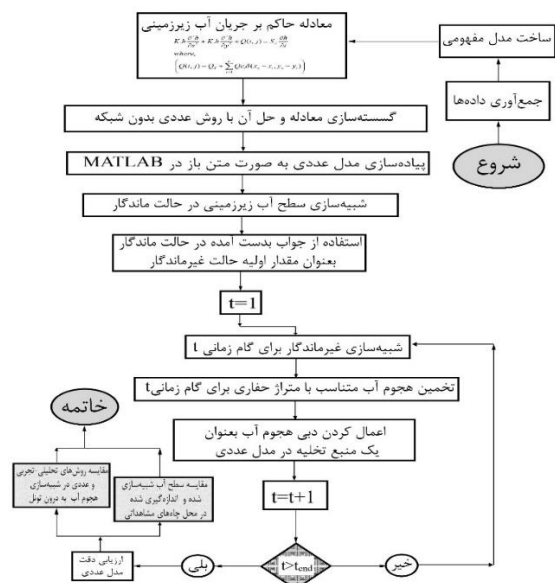
در این روش برای هر کدام از گره‌ها، یک دامنه محلی در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از دامنه حمایتی گره‌های مؤثر پیرامون آن مشخص می‌شود. اندازه اضلاع دامنه محلی و دامنه حمایتی به صورت ضرایبی از فواصل افقی و عمودی گره‌ها خواهد بود. در روش بدون شبکه تابع وزن متفاوت از تابع شکل است و مقدار آن در مرکز دامنه حمایتی یک (بیشترین مقدار) و با افزایش فاصله به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد تا اینکه 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:

$$\hat{h}(x, y) = \sum_{L=1}^n h_L \phi_L(x, y) \quad (3)$$

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:

$$\int_{\Omega} \left(Kh \left(\frac{\partial^2 \hat{h}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{h}}{\partial y^2} \right) + 2 \cdot Q(i, j) \right) W_L \cdot d\Omega = 0 \quad (4)$$

که در آن Ω : دامنه مسأله و W_L : تابع وزن است. با ضرب W_L در مؤلفه‌های داخل پرانتز 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 به‌جای دامنه اصلی مسأله خواهیم داشت:



شکل (۴): نمایش گام‌های عملیاتی استفاده شده در تحقیق پیش‌رو

۱-۳- پیاده‌سازی و توصیف روش اجرا

به‌منظور درک بهتر خوانندگان بهتر و ارائه یک تصویر کلی از پژوهش حاضر، در این قسمت توضیحاتی در خصوص روش کلی بکار گرفته شده ارائه شده است. در ابتدا و بعنوان اولین گام لازم است تا مجموعه‌ای از داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز فرآیند مدل‌سازی گردآوری گردد؛ فلذا در گام نخست، یک بانک اطلاعاتی شامل بر مرز حوضه آبریز و آبخوان منطقه پیرامون تونل انتقال، چاه‌های مشاهداتی، نقشه رقومی ارتفاع، مسیر و دبی رودخانه‌ها و آبراهه‌های موجود در منطقه، موقعیت و مقدار منابع برداشت آب (چاه، چشمه و قنات)، هدایت هیدرولیکی (براساس آزمون لوزان)، نقشه زمین‌شناسی، اطلاعات دراز مدت مؤلفه‌های اقلیمی (بارش، دما و تبخیر)، مسیر حفاری تونل، دبی هجوم آب به درون تونل و داده‌های سری زمانی ارتفاع سطح آب در چاه‌های مشاهداتی (Bore Hole- BH) ایجاد شد. سپس کلیه اطلاعات گردآوری شده جهت ساخت مدل مفهومی آبخوان پیرامون مسیر تونل، وارد مدل مفهومی شد. اولین مرحله در ساخت مدل مفهومی تشکیل مرز مسئله و تعیین شرایط مرزی حاکم بر آن است. پس از ایجاد مرز مسئله، کلیه اطلاعات در قالب داده‌های نقطه‌ای (Gridded data) روی یک مش (Mesh) شبکه‌بندی شد. در گام بعدی، با استفاده از روش عددی Mfree، معادله‌ی حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی نوسانات سطح آب در آبخوان پیرامون تونل مورد گسسته‌سازی قرار گرفت. از آنجا که مهم‌ترین پیامد شرایط هیدروترمال روی مقادیر هدایت هیدرولیکی خواهد بود، به‌منظور کمی کردن اثرات هیدروترمال روی هدایت هیدرولیکی، لازم است تا مقدار تغییر یافته این مؤلفه در یک فرآیند بهینه‌سازی مورد واسنجی قرار گیرد. در این قسمت از پژوهش متناسب با شرایط زمین‌شناسی آبخوان مورد نظر، تعداد ۱۸ منطقه همگن در نظر گرفته شد و با استفاده از الگوریتم تحلیل عدم قطعیت DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) مقدار بهینه هدایت هیدرولیکی برای این مناطق تخمین زده شد. ترکیب مدل بهینه‌سازی DREAM با مدل شبیه‌سازی Mfree منجر به تولید یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی شد که در آن الگوریتم بهینه‌سازی وظیفه یافتن مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی را دارد و مدل عددی شبیه‌ساز جریان آب زیرزمینی وظیفه مدل‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی را داشت. همچنین، مدل‌سازی تغذیه ناشی از بارش نیز در مدل عددی شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی قرار داده شد. در نهایت و پس از واسنجی مؤلفه‌های تأثیر گذار در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان پیرامون تونل انتقال آب در حالت غیر ماندگار مدل‌سازی شد تا عملکرد مدل ارائه شده در این حالت نیز مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۴) نمایشی از طرح کلی این پژوهش را نشان می‌دهد.

۱-۴- شبیه‌سازی هجوم آب به درون تونل

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. عموماً تمام روش‌های تخمین دبی هجوم آب زیرزمینی ریشه در قانون داری و قانون بقای جرم دارد. از منظر قانون داری دبی هجوم آب براساس نفوذپذیری و شیب هیدرولیکی بیان می‌شود. همچنین، قانون بقای جرم دبی ورودی به تونل را معادل تغذیه و آب کاسته شده از مخزن بالاسر تونل بیان می‌کند. در هیدرولیک چاه، جریان آب ورودی به چاه براساس حل ریاضی معادله داری 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 مورد استفاده قرار گیرد. چنانچه یک تونل با طول L در یک آبخوان نفوذپذیر حفر شده باشد (شکل ۵)، متناسب با بعضی فرضیات از حل ریاضی معادله داری می‌توان برای تخمین دبی هجوم آب در تونل استفاده کرد [۳۵]:

$$Q_{in} = \frac{2\pi T(h_m - h_t)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_t}\right)} \quad (12)$$

که در آن Q_{in} : دبی هجوم آب به درون تونل (متر مکعب 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 وهله‌ی اول باید توجه داشت که همانند چاه، مخروط افت به صورت

۲/۵۷۳۸ متر برآورد گردید. جدول (۱) مقادیر تخمین زده شده پارامترها را نشان می‌دهد.

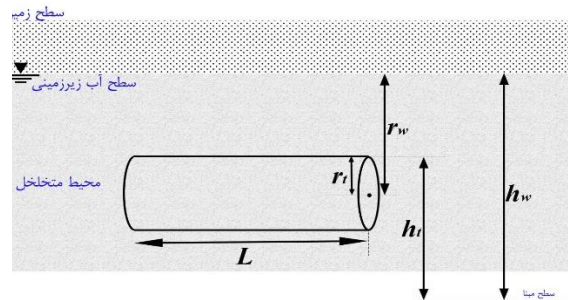
جدول (۱): مقدار دامنه و بهینه‌ی هدایت هیدرولیکی برای نواحی

همگن مختلف			
پارامتر	واحد	دامنه‌ی اولیه	مقدار بهینه
K1	m/d	0.0035-0.043	0.038
K2	m/d	0.0058-0.071	0.071
K3	m/d	0.0194-0.216	0.1988
K4	m/d	0.0023-0.029	0.025
K5	m/d	0.0156-0.173	0.0981
K6	m/d	0.1555-0.190	0.1660
K7	m/d	0.0062-0.076	0.064
K8	m/d	0.0002-0.003	0.002
K9	m/d	0.0272-0.302	0.287
K10	m/d	0.0058-0.071	0.031
K11	m/d	0.0054-0.067	0.058
K12	m/d	0.0047-0.057	0.052
K13	m/d	0.0047-0.057	0.022
K14	m/d	0.0039-0.048	0.046
K15	m/d	0.0039-0.048	0.047
K16	m/d	0.0039-0.048	0.044
K17	m/d	0.0039-0.048	0.019
K18	m/d	0.0066-0.081	0.071

۱-۵-۱- ارزیابی تأثیر شرایط هیدروترمال

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 بدست آمده است. ناحیه همگن شش یک ناحیه آبرفتی است که وجود منابع برداشت زیاد در آن نیز مؤید این مطلب است. علت بالا بودن 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 (۶) 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، کلریت، 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 کمربند ماگمایی ارومیه - دختر، کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان)، مشاهده سیالات زمین‌گرایی در طول مسیر تونل (چشمه آب گرم شیرینک و گمانه آرترین BH-9) و آزمایش‌های شیمیایی متعددی که در نمونه‌های آب انجام شده،

شعاعی و پیرامون محور تونل خواهد بود. همچنین به جای 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 [۳۵]. در مطالعات مدل‌سازی عددی هجوم آب عموماً تونل انتقال آب به عنوان یک زهکش خطی داخل محیط آبخوان فرض می‌شود [۱۹].



شکل (۵): نمایشی از تونل فرضی حفر شده در محیط نفوذپذیر و متخلخل

باتوجه به اطلاعات حفاری ثبت شده، 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 [۲۲] و [۲۶-۲۷] مورد بررسی قرار گرفته است و صحت کارکرد آن مورد تأیید قرار گرفته است.

۲ - نتایج و بحث

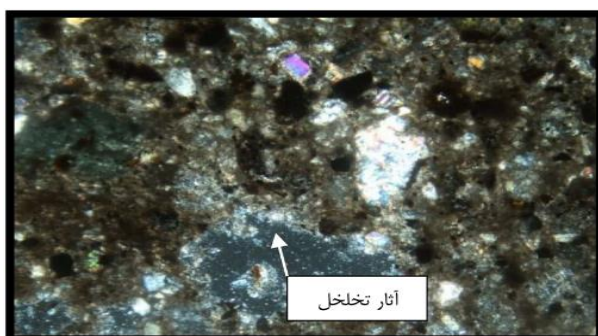
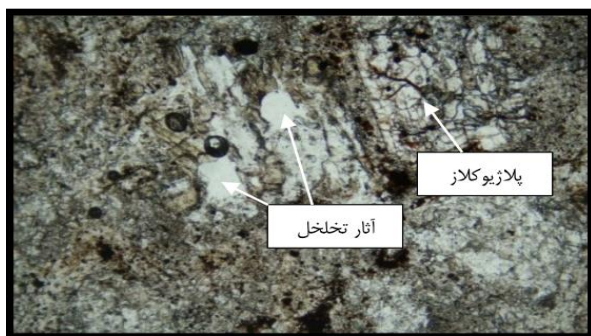
این فصل به ارائه نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر، تحلیل آن‌ها، بررسی صحت نتایج و مقایسه یافته‌های پژوهش با سایر مطالعات مشابه اختصاص دارد.

۱-۵-۱- ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز

در تخمین هدایت هیدرولیکی

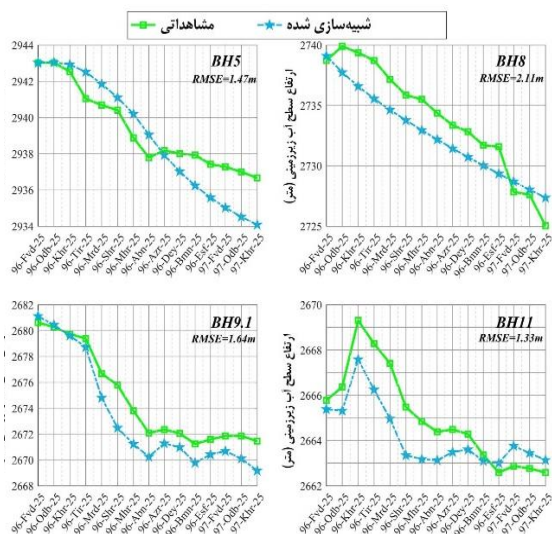
در طی فرآیند شبیه‌ساز - بهینه‌ساز به ازای هر دسته تخمین هدایت هیدرولیکی (هر دسته شامل ۱۸ تخمین برای هدایت هیدرولیکی در ۱۸ ناحیه همگن خواهد بود) که توسط الگوریتم DREAM ارائه شد، یک مرتبه مدل شبیه‌سازی عددی بدون شبکه اجرا شد و سطح آب زیرزمینی برای دامنه آبخوان پیرامون تونل شبیه‌سازی شد. پس از اجرای برنامه و بررسی مقدار تابع درست‌نمایی در نمونه‌های تولید شده مشخص شد که مقدار تابع هدف RMSE در بهترین دسته پارامترهای تخمین زده شده معادل

بروز شرایط هیدروترمال به اثبات رسیده است و موجب افزایش تخلخل و نفوذپذیری و متعاقباً افزایش هدایت هیدرولیکی شده است.



شکل (۶): نمایش میکروسکوپی از آثار دگرسانی و تخلخل در نمونه‌های تهیه شده از ناحیه همگن نه (تهیه شده در آزمایشگاه میکرومورفولوژی)

جهت مقایسه بهتر عملکرد روش بدون شبکه در شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب زیرزمینی، مقایسه نوسانات شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده سطح آب زیرزمینی در محل گمانه‌های BH5, BH8, BH9.1, BH11 در شکل (۷) به نمایش در آمده است.



شکل (۷): نمایش ارتفاع سطح آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در گمانه‌های حفاری همراه با شاخص RMSE

۱-۶-۱- بررسی نتایج مدل‌سازی عددی هجوم

آب

در طی فرآیند مدل‌سازی غیرماندگار برای هر روز متناسب مسافت طی شده در حفاری تونل، نزدیک‌ترین گرهی آبخوان به قسمت حفاری شده مشخص شده و هدایت هیدرولیکی و ارتفاع سطح آب زیرزمینی آن به مسافت حفاری شده در تونل اطلاق شد. در نهایت نیز طبق رابطه‌ی ریاضی (۱۲) میزان هجوم آب به درون تونل برآورد گردید و دبی آن به عنوان یک زهکش خطی در همان

۱-۶-۱- ارزیابی نوسانات ارتفاع سطح آب زیرزمینی

در طی فرآیند مدل‌سازی غیرماندگار، در هر روز ارتفاع سطح آب زیرزمینی به صورت عددی شبیه‌سازی شد و مقدار آن در محل گمانه‌ها جهت مقایسه با مقادیر مشاهداتی ثبت شد. جدول (۲) خطای تخمین و شاخص RMSE را برای هر کدام از گمانه‌های نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مندرج در جدول زیر مشخص است، دقت و عملکرد مدل‌سازی عددی در روش بدون شبکه در تمام پیژومترها قابل قبول بوده است. نکته‌ی دیگری که باید بدان توجه داشت وابستگی مکانی عملکرد مدل‌سازی عددی است. به‌عنوان مثال، خروجی روش بدون شبکه در گمانه‌های BH3 و BH12 کمتر از سایر گمانه‌ها است. همچنین، مقایسه عملکرد روش عددی در این پژوهش با سایر پژوهش‌گران حاکی از آن است که به‌طور کلی، دقت این روش عددی در آبخوان‌های سنگی- درز و شکاف‌دار به مراتب کمتر از دقت این روش در مدل‌سازی آبخوان‌های آبرفتی دارد. به‌عنوان مثال، نتایج پژوهش [۲۲ و ۲۶] که از روش عددی بدون شبکه در مدل‌سازی نوسانات آبخوان دشت بیرجند (مرکز استان خراسان جنوبی) استفاده کرد، نشان داد که عملکرد این روش بسیار مطلوب‌تر از عملکرد بدست آمده در این پژوهش است (شاخص RMSE برای روش بدون شبکه در پژوهش ایشان ۰/۲۶ متر برآورد گردید). همچنین، یافته‌های دیگر پژوهش‌گران که روی مدل‌سازی عددی نوسانات ارتفاع سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش بدون شبکه تمرکز داشته‌اند نیز مؤید این مطلب است [۲۳ و ۲۹].

جدول (۲): مقدار شاخص RMSE مدل‌سازی عددی به تفکیک

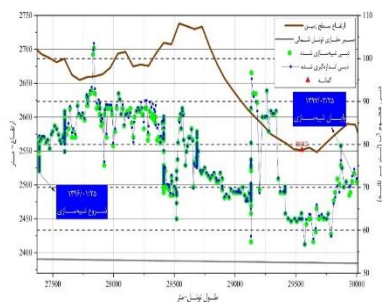
گمانه	پیژومترها	
	گمانه	RMSE
BH2	BH9	0.14
BH3	BH9.1	7.68
BH4	BH10	0.0004
BH5	BH11	1.47
BH6	BH12	1.11
BH7	BH13	3.78
BH8	Total RMSE	2.11
	(m)	

اولین و آخرین روز شبیه‌سازی به ترتیب $۳۳۹۴/۲۲+$ و $۵۳۰۴/۶۱+$ متر بود و مجموع کل مسافت حفاری شده در طی مدت زمان شبیه‌سازی این پژوهش $۱۹۱۹/۳۹$ متر بوده است.

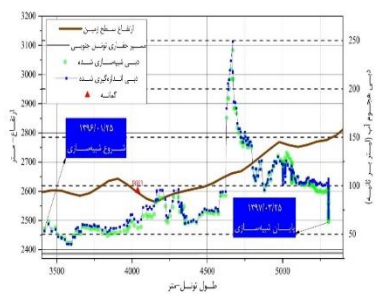
پس از شبیه‌سازی دبی هجوم آب به درون تونل، مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده انجام شد و دقت مدل‌سازی با استفاده از شاخص NSE بیان شد. جدول (۳) نتایج مربوط به مقایسه دبی هجوم آب در تونل شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد. با توجه مقادیر بدست آمده در خصوص شاخص NSE می‌توان اذعان کرد که مدل عددی تا حد بسیار بالایی توانسته است پراکنش و مقدار دبی هجوم آب اندازه‌گیری شده در تونل‌های شمالی و جنوبی را تخمین بزند

جدول (۳): شاخص NSE برای مقایسه دبی هجوم آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تونل شمالی و جنوبی

تونل	متر از حفاری در ابتدای شبیه‌سازی (m)	متر از حفاری در انتهای شبیه‌سازی (m)	طول حفاری در دوره شبیه‌سازی (m)	NSE
شمالی	$۳۰۰۲۳/۱۲+$	$۲۷۳۸۸/۳۸+$	$۲۶۳۴/۷۴$	$۰/۸۳$
جنوبی	$۳۳۹۴/۲۲+$	$۵۳۰۴/۶۱+$	$۱۹۱۹/۳۹$	$۰/۸۷$



شکل (۱۰): مقایسه دبی هجوم آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده روی پروفیل افقی مسیر حفاری تونل شمالی



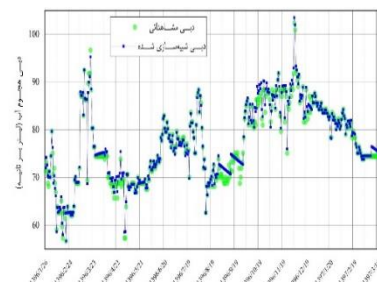
شکل (۱۱): مقایسه دبی هجوم آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده روی پروفیل افقی مسیر حفاری تونل جنوبی

همان‌طور که مشخص است متناسب با وضعیت زمین‌شناسی در این منطقه دبی هجوم آب به تونل شمالی نوسانات بیشتری نسبت به تونل جنوبی دارد. در تونل جنوبی به استثناء نواحی پیرامون گسل F22 که به دلیل شکستگی‌های زیاد ایجاد شده در محیط پیرامون تونل، میزان نفوذپذیری به‌طور فزاینده‌ای افزایش پیدا کرد و موجب افزایش ناگهانی دبی هجوم آب به درون تونل شده است، در مابقی مسیر حفاری تونل متناسب با پیشرفت حفاری در مسیر تعیین شده و افزایش ارتفاع سطح آب زیرزمینی، میزان

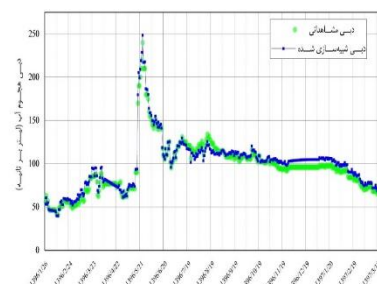
نزدیک‌ترین گره اعمال شد تا اثر دبی تخلیه شده در افت سطح آب زیرزمینی اعمال شود.

در طی بازه شبیه‌سازی (۲۶ فروردین ۱۳۹۶ لغایت ۲۵ خرداد ۱۳۹۷)، پیشرفت حفاری در تونل شمالی به‌گونه‌ای بود که حفاری در اولین روز در متر از $۷۳۸۳/۰۹$ متر $۳۰۰۲۳/۱۲+$ متر از ابتدای مسیر تعیین شده) قرار داشت و در انتهای شبیه‌سازی به متر از $۱۰۳۱۷/۸۳$ متر $۲۷۳۸۸/۳۸+$ متر از ابتدای مسیر تعیین شده) رسید. در واقع در طی ۴۲۷ روز مربوط به دوره شبیه‌سازی، $۲۶۳۴/۷۴$ متر حفاری در تونل شمالی اتفاق افتاده است. وضعیت حفاری برای تونل جنوبی نیز به‌گونه‌ای است که متر از حفاری در

مقایسه سری زمانی دبی هجوم آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای تونل‌های شمالی و جنوبی در شکل‌های (۸) و (۹) نمایش داده شده است.



شکل (۸): مقایسه سری زمانی دبی هجوم آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در تونل شمالی



شکل (۹): مقایسه سری زمانی دبی هجوم آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در تونل جنوبی

همچنین، این مقایسه روی پروفیل افقی مسیر تونل‌های شمالی و جنوبی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به نمایش گذاشته شده است.

است و از آن می‌توان جهت کاربرد در مسائل و پروژه‌های مشابه استفاده کرد.

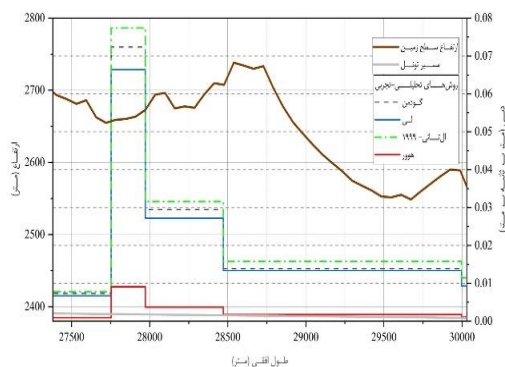
همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که دامنه کلی تغییرات هدایت هیدرولیکی در نواحی همگن منطقه مورد مطالعه بسیار پایین است و این موضوع به دلیل شرایط آبخوان سنگی درز و شکاف‌دار است که البته این موضوع خود باعث پیچیده‌تر شدن شرایط مدل‌سازی شد. علاوه بر این، بررسی نتایج بدست آمده اثبات کرد که شرایط هیدروترمال، خردشدگی و مسائل زمین‌شناسی نقش بسیار مهمی در تغییرات مقادیر هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری دارد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که شرایط هیدروترمال موجود در منطقه موجب دگرسانی ساختار سنگ‌ها و کانی‌ها شده است و این موضوع باعث تغییرات شدید نفوذپذیری گردیده است. از بررسی نتایج مشخص شد ماهیت دگرسانی از نوع پروپلیتیک دمای پایین (شدت پایین دگرسانی) است و این موضوع باعث شده تا ساختار سنگ متلاشی شود اما رسی نشده و موجب افزایش تخلخل و نفوذپذیری سنگ شده است.

یافته‌های این پژوهش اثبات کرد که مدل عددی بدون شبکه که در این پژوهش از آن استفاده شد، از قابلیت بسیار خوبی در تخمین ارتفاع سطح آب زیرزمینی و دبی هجوم آب به درون تونل برخوردار است. نتایج مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی ارتفاع سطح آب زیرزمینی در حالت غیرماندگار مشخص کرد که روش عددی بدون شبکه به خوبی توانسته است روند و نوسانات مربوط به ارتفاع سطح آب زیرزمینی را برآورد کند. همچنین، یافته‌های این پژوهش در این باره مشخص کرد که شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب زیرزمینی در محیط‌های سنگی همراه با درز و شکاف در مقایسه با محیط‌های آبرفتی بسیار پیچیده‌تر و سخت‌تر بوده و این عامل در کنار نیاز داشتن به تسلط بیشتر و در نظر گرفتن ملاحظات بیشتر در مدل‌سازی، خود باعث افزایش خطای مدل نیز خواهد شد.

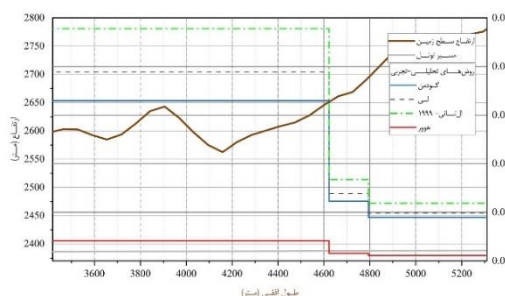
نتایج این پژوهش در خصوص تخمین دبی هجوم آب به درون تونل نیز نشان داد که ساختار پیشنهاد شده در این پژوهش جهت تخمین دبی از کارایی خوبی برخوردار است. یافته‌های این پژوهش در خصوص مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی دبی هجوم آب با مقادیر شبیه‌سازی شده اثبات کرد که بین آن‌ها نزدیکی بسیار قابل توجهی برقرار است و از منظر شاخص‌های ارزیابی دقت و عملکرد مدل در تخمین دبی هجوم آب بسیار قابل قبول بوده است.

یافته‌های این پژوهش در خصوص مقایسه عملکرد روش‌های تحلیلی-تجربی نیز اثبات کرد که به صورت کلی تمامی روش‌های مقادیر دبی هجوم آب به درون تونل را همراه با یک کم‌تخمینی برآورد می‌کنند. در این بین دبی هجوم آب بدست آمده از روش‌های فریز و چری (۱۹۷۹)، ال تانی (۱۹۹۹)، لومباردی (۱۹۹۹)، کالسرود (۲۰۰۲)، کالسرود (۲۰۰۲) بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و در

دبی هجوم آب افزایش پیدا کرده است. مقایسه دبی اندازه‌گیری شده و مشاهداتی روی پروفیل افقی مسیر تونل در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به نمایش گذاشته شده است.



شکل (۱۲): مقایسه روش‌های تحلیلی-تجربی در تخمین دبی هجوم آب در تونل شمالی



شکل (۱۳): مقایسه روش‌های تحلیلی-تجربی در تخمین دبی هجوم آب در تونل جنوبی

براساس نتایج بدست آمده از روش‌های تحلیلی-تجربی می‌توان نتیجه گرفت دبی هجوم آب بدست آمده از روش‌های فریز و چری (۱۹۷۹)، ال تانی (۱۹۹۹)، لومباردی (۲۰۰۲)، کالسرود (۲۰۰۲) بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و بیشتر از دبی تخمین زده شده با روش‌های گودمن (۱۹۶۵)، لی (۱۹۹۳) و هوور (۱۹۹۵) است. همچنین، روش ال تانی (۱۹۹۹) در تمامی زون‌های انتخاب شده بیشترین دبی و روش هوور (۱۹۹۵) کمترین میزان دبی هجوم آب به درون تونل برآورد گردید. به استثناء این‌که در تونل شمالی، مقدار کم تخمینی کمتر از تونل جنوبی است، در مابقی موارد نتایج مشابه‌ای برای تونل جنوبی نیز به دست آمد. شکل‌های (۱۱-۳) و (۱۲-۳) بیشترین دبی تخمین زده شده توسط روش‌های تحلیلی-تجربی را به ترتیب برای تونل‌های شمالی و جنوبی نشان می‌دهد.

۴-۲- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که ساختار پیشنهادی فرآیند شبیه‌سازی-بهبینه‌سازی جهت تعیین مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب زیرزمینی از قابلیت خوبی برخوردار

[7] 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.

[8] Meiri, D. (1985). Unconfined groundwater flow calculation into a tunnel. *Journal of Hydrology*, 82(1-2), 69-75.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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 heterogenous geological media during

مقایسه با دبی تخمین زده شده روش‌های گودمن (۱۹۶۵)، لی (۱۹۹۳) و هوور (۱۹۹۵) بیشتر است. همچنین، روش ال‌تانی (۱۹۹۹) در تمامی زون‌های انتخاب شده بیشترین دبی و روش هوور (۱۹۹۵) کمترین میزان دبی هجوم آب به درون تونل را برآورد کرد.

مقایسه عملکرد روش‌های تحلیلی- تجربی با روش عددی در خصوص تخمین دبی هجوم آب نیز حاکی از آن بود که دبی هجوم آب بدست آمده از روش‌های تحلیلی- تجربی نسبت به خروجی روش عددی و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار کمتر است. همچنین مقایسه ساختاری این روش‌ها مشخص کرد که در روش عددی علاوه بر این که خطاهای ساختاری روش‌های تحلیلی-تجربی را دارا نمی‌باشد، شرایط برای در نظر گرفتن اثر عوامل تأثیرگذاری نظیر شرایط مرزی، منابع برداشت، شرایط گسله و حتی درزه و شکاف‌ها بسیار راحت‌تر و کاربردی تر وجود دارد.

۳-۵- مراجع

[1] Hamzehee, S., & Mortezaei, M. (2022). Risk Analysis of Khansar Tunnel Rock Mass Collapse. *Construction science and technology*, 2(4), 57-63. (in Persian).

[2] Karimi, M., Arab, M. R., Eslami, M., & Roshani, O. (2021). Interaction of cavities and underground structures on subsidence. *Construction science and technology*, 1(4), 27-33. (in Persian).

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

- Solutions in Groundwater Simulation (case study: Birjand aquifer). *Hydrogeology*. (in Persian).
- [28] Jafarzadeh, A., Pourreza-Bilondi, M., Akbarpour, A., Khashei-Siuki, A., & Samadi, S. (2021c). Application of multi-model ensemble averaging techniques for groundwater simulation: synthetic and real-world case studies. *Journal of Hydroinformatics*, 23(6), 1271-1289.
- [29] Jafarzadeh, A., Khaseii, A., & Shahidi, A. (2016). Designing a multiobjective decision-making model to determine optimal crop pattern influenced by climate change phenomenon (case study: Birjand plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 849-859. (in Persian).
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Hashemnejad, A., Aghda, S. M. F., & Talkhablou, M. (2020). Mechanized tunnelling in hydrothermally altered grounds: The effect of hydrothermal fluids on the rock behaviour in the central Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, 103340.
- [35] Hydrogeological studies of Safarood Kerman water transfer tunnel, (2022). Sahel Omid Iranian consulting engineers company. (in Persian).
- [36] Katibeh, H., & Aalianvari, A. (2012). Common Approximations to the water inflow into Tunnels. *Drainage systems*, 75-88.
- [17] continuing excavation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 341-350.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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*.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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>
- [25] Crist, J. (2019). *Advantages of Mesh Free Methods for Structural and Fluid Analysis* (No. 2019-01-0939). SAE Technical Paper.
- [26] 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.
- [27] Jafarzadeh, A., Khashei, A., PurrezaBilondi, M. (2021b). Performance Assessment of Numerical

