



شبیه سازی رفتار سد کبودال در زمان ساخت با مدل سازی عددی سه بعدی

فرین سلماسی*، حسین حکیمی خانسر

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

سد خاکی کبودال
پلاکسیس
المان محدود
تحلیل برگشتی
مدل رفتاری خاک سخت شونده

خلاصه: پیش بینی فشار آب حفره‌ای، نشست، تنش خاک و ضریب فشار آب حفره‌ای (R^u) در بدنه سدهای خاکی در زمان ساخت یکی از اقدامات ضروری در مدیریت پایداری سدهای خاکی است. بنابراین تخمین آن‌ها با روش‌های دقیق بسیار مهم است. چون رفتار سد خاکی غیرخطی است، بنابراین باید از روش المان محدود و مدل‌های رفتاری مناسب استفاده نمود. در تحقیق حاضر که به صورت مطالعه موردی است، شبیه‌سازی عددی به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار پلاکسیس در سد کبودال استان گلستان انجام گرفت و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی با تحلیل برگشتی با مقادیر نظیر داده‌های ابزار دقیق سد مقایسه شد و پارامترهای واقعی مصالح به کار گرفته شده در بدنه سد، با آنالیز برگشتی به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل HS با شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربع خطاها (RMSE) و نیز میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) در مقایسه با مدل رفتاری MC در بدنه سد دقت بیشتری دارد. نتایج مدل عددی واسنجی شده در پایان ساخت سد کبودال، نشان داد که بیشینه افزایش فشار آب حفره‌ای، تنش، نشست و جابجایی افقی در بخش مرکزی اتفاق افتاده و مقدار آن در محور و بخش میانی سد بیشتر از طرفین آن است. قسمت میانی و نزدیک به محور سد تغییرات مشابهی با روند بارگذاری بدنه سد دارد؛ در حالی که با دور شدن از محور سد به دلیل انتقال تنش‌ها به صورت مایل (چرخش المان تنش) تأثیرپذیری کمتری از روند خاک‌ریزی دارند، همچنین در بخش مرکزی تأثیرات ناشی از زهکشی مصالح فیلتر و زهکش حداقل است.

۱- مقدمه

سد خاکی-سنگریزه‌های هوبین در ویتنام در سال ۱۹۹۰ مورد بهره برداری قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده از مشاهدات عینی و محاسبات رایانه‌ای حاصل از رفتار نگاری ۳ بعدی، این سد تا پایان سال ۲۰۰۵، در شرایط مطلوبی از نظر پایداری و ایمنی قرار داشت [۷]. در سال ۲۰۰۵ تایفو و همکاران جریان داخل سدی در لهستان را به روش المان محدود و شبکه عصبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌سازی توسط شبکه عصبی برای بررسی سطح آب در داخل خاک، نتایج مناسبی در بر دارد [۸]. موارد زیادی از سدهای خاکی بزرگ دنیا از جمله [۹-۱۴] که به منظور پایداری هیدرولیکی در دوران ساخت، اولین آبیگری و بهره برداری مورد رفتار نگاری واقع شده‌اند، گزارش شده است. بلوری بزاز و مبینی زاده در سال ۱۳۸۹ به بررسی رفتار سد نهرین به روش اجزاء محدود با مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و سخت شونده و مقایسه نتایج آن با مقادیر واقعی حاصل از ابزار دقیق پرداختند. نتایج بیانگر نشست ۱۴۴ میلیمتری سد در تراز ارتفاع میانی سد بوده که با توجه به کمتر بودن رطوبت مصالح از حد اشباع، مقدار

سدها و مخازن ذخیره آب نقشی اساسی در توسعه مسائل اقتصادی و تأمین آب در کشور دارند [۱]. سدهای خاکی در بین انواع مختلف سدها به علت صرفه‌های اقتصادی، آسانی در اجرا، در دسترس بودن مصالح اجرایی و عملکرد سازه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارند [۲]. ابزار گذاری در حین ساخت برای اطمینان از ایمنی، حداقل نمودن هزینه‌های ساخت، کنترل روش و برنامه ساخت، فراهم نمودن محافظت قانونی و فراهم نمودن اطلاعات برای اندازه‌گیری کمیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳ و ۴]. ایمنی و عملکرد یک سد باید در حین ساخت، اولین آبیگری و در دوران بهره‌برداری کنترل شود. تنش‌های ایجاد شده و نیز فشار آب منفذی در بدنه با توجه به تراز آب و اندازه‌گیری آن‌ها با ابزار دقیق در این دوره از اهمیت ویژه برخوردار است [۵]. رفتار غیرخطی و غیر ارتجاعی مصالح سدهای خاکی در بارگذاری و باربرداری و در حالت زهکشی شده یا زهکشی نشده، استفاده از مدل‌های رفتاری که قادر به مدل‌سازی رفتار هرچه دقیقتر خاک باشند

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Salmasi@tabrizu.ac.ir



رفتار سنجی از اطلاعات ثبت شده توسط ابزارهای دقیق‌های نشست‌سنج، انحراف سنج، سلول فشاری و پیزومتر الکتریکی به دست آمده است. لازم به ذکر است مدل‌سازی عددی سد با در نظر گرفتن شرایط واقعی خاکریزی سد و به منظور تحلیل تغییرات نشست تحکیمی و اندازه‌گیری فشار آب منفذی و فشار کل خاک و نیز ضریب R_u صورت گرفته است و در پایان بهترین مدل رفتاری برای مدل کردن سد خاکی کبودوال پیشنهاد شده است. همچنین یک روند کلی از فشار آب حفره‌ای، تنش و نشست سد توضیح داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی سد و سیستم ابزار دقیق

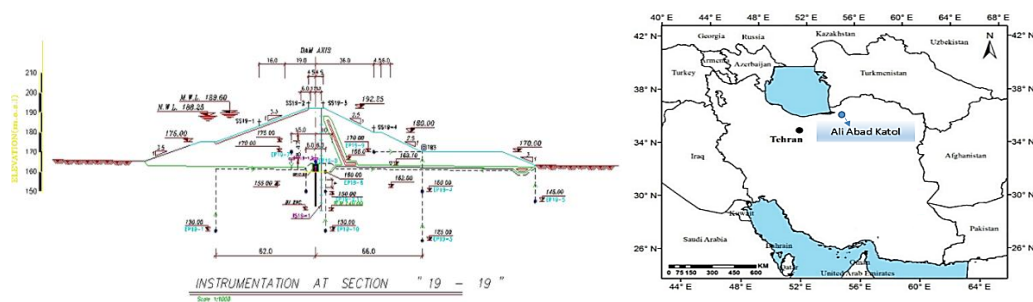
سد کبودوال در نزدیکی شهر علی‌آباد و در ۴۰ کیلومتری شرق گرگان قرار دارد. این سد در استان گلستان در شمال شرق ایران و در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۶۰ دقیقه شمالی قرار دارد. سد کبودوال همگن و دارای فیلتر و زهکش مایل است. مخزن آن خارج از حوضه آبریز اصلی است. طول تاج ۱۳۷۲ متر و حداکثر ارتفاع از پی ۳۳/۲۵ متر است. ارتفاع از بستر ۳۰/۵ متر و همچنین تراز بستر سد ۱۶۲ متر از سطح دریا و حداقل تراز آب در مخزن ۱۷۱ متر از سطح دریا و نیز حداکثر تراز نرمال آب ۱۸۸/۲۵ متر از سطح دریا است. ضخامت در پی ۱۰ متر است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و مقطع تیپ سد کبودوال نشان داده شده است [۲۱].

مقطع مورد استفاده این مطالعه مقطع ۱۹ است. در این مقطع از بدنه سد، مجموعاً ۱۱ پیزومتر الکتریکی به ترتیب ۳ پیزومتر در داخل بدنه سد، یک پیزومتر در حد فاصل پی و بدنه سد (EP۱۹.۶، EP۱۹.۷، EP۱۹.۸)، EP۱۹.۹ و ۷ پیزومتر در داخل پی سد مد نظر قرار گرفته است. در مقطع ۱۹ از دو سلول فشارسنجی TPC۱۹.۱ و TPC۱۹.۲ برای تحلیل، استفاده شده است. برای دستیابی به تغییر شکل‌های بدنه و پی، انحراف‌سنج‌های قائم به همراه صفحات مغناطیسی نشست‌سنجی در مقاطع مختلف بدنه و پی سد کبودوال به کار رفته است. جانمایی سیستم پیزومتریک (پیزومترهای الکتریکی) و فشارسنجی خاک و سیستم نشست‌سنج و انحراف‌سنج (IS۱۹-۱) مقطع ۱۹ در شکل ۲ ارائه شده است [۲۱]. از داده‌های ابزار دقیق سد برای واسنجی مدل عددی استفاده شد.

آن قابل قبول است [۶]. حکیمی خاسر و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی به بررسی رفتار سد خاکی قره‌سو و زرین گل در استان گلستان پرداختند و فشار آب حفره‌ای، تنش‌های ایجاد شده و نیز نشست سد در دوران ساخت با مقادیر حاصل از تحلیل عددی را مقایسه کردند [۳]. سلماسی و همکاران سال ۱۳۹۷ در تحقیقی به بررسی نشست سدی خاکی در استان گلستان پرداختند و در انتها بهترین مدل رفتاری برای شبیه‌سازی سد خاکی پیشنهاد شد [۱۵]. سهیل قره و رضا نوروززاده (۱۳۹۷) به بررسی رفتار سد خاکی تبارک شهر قوچان از استان خراسان رضوی پرداختند. نتایج نشان داد مدل رفتاری الاستوپلاستیک، مدلی مناسب به منظور ارزیابی رفتار سد تبارک آباد بود [۱۶]. سد کرخه به کمک نرم‌افزار GeoStudio با فرض خاک نیمه اشباع توسط موهبت‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) مدل‌سازی عددی گردید که مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی عددی دو برابر مقادیر واقعی ارزیابی گردید [۱۷]. شمس و حقایق (۱۳۹۴) با کمک نرم‌افزار GeoStudio ابتدا رفتار سد بینی و سپس با استفاده از نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی، مدل رفتاری مناسبی از سد را ارائه نمودند [۱۸]. اسدیان و همکاران [۱۹] به رفتار نگاری سد دوستی تا انتهای ساخت به کمک داده‌های ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی پرداختند. مدل‌های رفتاری استفاده شده در آنالیز، مدل الاستیک خطی و مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل موهبرکولمب بود. از مقایسه نتایج مدل‌سازی و ابزار دقیق به این نتیجه رسیدند که سد دوستی در شرایط پایدار و ایمنی قرار دارد.

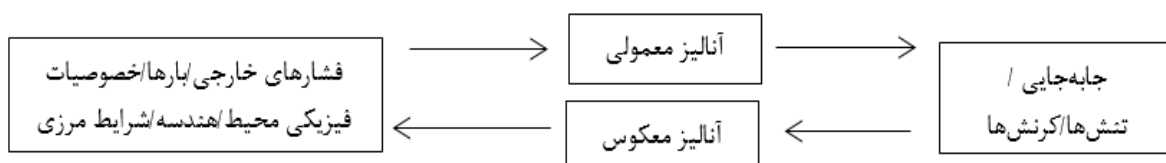
برای تحلیل تنش-کرنش سدهای خاکی و سنگریزه‌ای معمولاً از روش اجزای محدود به صورت دو بعدی در شرایط کرنش صفحه‌ای که موجب ساده شدن محاسبات گشته، استفاده می‌شود [۶]. تحقیقات نشان داده که تحلیل دو بعدی سدهای خاکی که نسبت طول تاج به ارتفاع بزرگی دارند، دارای تقریب خوبی از واقعیت است [۲۰]؛ اما این کار باعث می‌شود که دقت محاسبات کم شده و شرایط واقعی سد که به صورت سه بعدی است در مدل دیده نشود.

بررسی منابع نشان می‌دهند که تحقیقات کمی با مدل‌سازی عددی سه بعدی در زمان ساخت سدهای خاکی در ایران صورت گرفته است. به همین دلیل، این پژوهش قصد دارد تا کاربرد یک مدل عددی سه بعدی را برای یک سد خاکی در حین دوره ساخت بررسی کند. در این پژوهش با ادغام اطلاعات ابزار دقیق نصب شده و مدل عددی سه بعدی بر اساس مدل‌های رفتاری موهبر-کلمب (MC) و خاک سخت شونده (HS)، به بررسی موردی رفتار سد کبودوال در زمان ساخت پرداخته خواهد شد. نتایج



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و مقطع تیب و جانمایی ابزار دقیق نصب شده در مقطع عرضی شماره ۱۹

Fig. 1. Cross-section and location of instruments installed in cross-section No. 19



شکل ۲. رابطه بین تحلیل معمولی و تحلیل معکوس

Fig. 2. Relation between usual and inverse analyses

۲-۲- آنالیز برگشتی

تحلیل برگشتی به طور عام به عنوان روشی تعیین می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل‌کننده به کمک تحلیل رفتار خروجی را تأمین کند [۲۵-۲۲]. در تحلیل برگشتی می‌توان به دو صورت عمل کرد، روش معکوس و روش مستقیم [۲۲]. در روش معکوس با معکوس کردن روابط ریاضی تحلیل تنش و کرنش سیستم توده خاک و نگهداری، ثابت‌های مکانیکی توده خاک و تنش برجای آن تعیین می‌شود، سپس با توجه به جابجایی‌های اندازه‌گیری شده، تنش‌ها و مشخصه‌های ژئومکانیکی را به دست می‌آورند. رابطه بین تحلیل برگشتی معکوس و روش تحلیل معمولی در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۴].

۲-۲-۱- روش انجام تحلیل برگشتی

تحلیل برگشتی مستقیم بر اساس کاهش مقدار اختلاف بین مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده از تحلیل عددی معمول با فرض پارامترهای مجهول استوار است [۲۳]. این عمل توسط تابعی موسوم به تابع خطا انجام می‌شود که در رابطه ۱ نشان داده می‌شود.

$$E = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \quad (1)$$

که در رابطه بالا E تابع خطا و P_i مقدار پارامتر به دست آمده از تحلیل عددی و O_i مقدار پارامتر واقعی از ابزار دقیق سد و n تعداد داده‌های مورد استفاده است. در روش تحلیل برگشتی مستقیم سه الگوریتم به کار رفته عبارت‌اند از روش تک متغیره و روش تک متغیره متناوب و روش جستجوی الگویی. در روش تک متغیره همه پارامترهای مجهول به جز یکی ثابت در نظر گرفته می‌شود و با تکرار تحلیل به اندازه N-1 مرتبه مقدار پارامتر مذکور را با توجه به معادله ۱، بهینه می‌کنند. سپس متغیر بهینه شده ثابت در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای دیگری در این چرخه قرار می‌گیرند؛ و در زمان واحد فقط یک پارامتر تکرار می‌شود. روش تک متغیره متناوب مانند روش تک متغیره است؛ با این تفاوت که در زمان واحد چند پارامتر مجهول می‌تواند تغییر کند. این مقدار تا زمانی که تابع خطا به میزان حدی خود برسد ادامه پیدا می‌کند. در روش تک متغیره مقدار اولیه X_1 برای متغیر در نظر گرفته می‌شود و در مراحل بعدی برای تغییر پارامتر مجهول از رابطه (۲) استفاده می‌کنند [۲۴].

نرخ کرنش از دو بخش الاستیک و پلاستیک تشکیل می‌شوند. مطابق رابطه (۴) داریم:

$$\underline{\sigma}' = \left(\frac{D^e}{0} - \frac{a}{d} \frac{D^e}{0} \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^t}{\partial \sigma'} \frac{D^e}{0} \right) \varepsilon^{0'} \quad (4)$$

بر اساس نظریه پلاستیسیته، کرنش‌های پلاستیک متناسب با مشتق تابع تسلیم نسبت به تنش‌ها است. به عبارتی کرنش‌های پلاستیک را می‌توان به صورت بردارهایی عمود بر سطح تسلیم در نظر گرفت. بر این اساس می‌توان رابطه بین نرخ تنش مؤثر و کرنش مؤثر را به دست آورد.

در این رابطه $d = \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{D^e}{0} \frac{\partial f^t}{\partial \sigma'}$ است. معیار تسلیم موهرکلمب از شش تابع تسلیم که بر حسب تنش‌های اصلی بوده و یک مخروط شش وجهی را در فضای تنش‌های اصلی تشکیل می‌دهند می‌توان به صورت رابطه کلی زیر نشان داد.

$$\begin{aligned} \sigma'_{(j,i,k)} &= \frac{1}{2} \left| \left(\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)} \right) \right| \times \\ &\frac{1}{2} \left| \left(\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)} \right) \right| \sin \psi \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

که i, j, k به ترتیب برابر ۱ و ۲ و ۳ هستند. دو پارامتر در این مدل c چسبندگی و φ زاویه اصطکاک خاک هستند. هم چنین شش تابع پتانسیل پلاستیک را برای این مدل را به صورت رابطه کلی زیر می‌توان تعریف کرد.

$$\begin{aligned} g_{(j,i,k)} &= \frac{1}{2} \left| \left(\sigma'_{(j,k,i)} - \sigma'_{(k,i,j)} \right) \right| \times \\ &\frac{1}{2} \left| \left(\sigma'_{(j,k,i)} + \sigma'_{(k,i,j)} \right) \right| \sin \psi \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

پارامتر θ زاویه اتساع بوده که به کمک آن می‌توان کرنش حجم خاک‌های متراکم را مدل کرد [۲۶]. این مدل به دلیل سادگی و عدم نیاز به پارامترهای متعدد، در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده واقع می‌شود.

۲-۴ مدل سخت شونده (HS)

در مدل رفتاری سخت شونده سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی محدود نبوده و به علت وجود کرنش‌های پلاستیک سطح مزبور توسعه می‌یابد. در این مدل دو رفتار برشی و فشاری سخت شونده که به ترتیب

$$X_{i+1} = X_i + \gamma_i S_i \quad (2)$$

که در آن γ_i نسبت بین پارامتر به دست آمده از مرحله قبلی به مقدار اندازه‌گیری شده است که به آن طول پله می‌گویند [۹]. S_i جهت جستجو است که با توجه به روش استفاده شده تعیین می‌شود. روش جستجوی الگویی به عبارت گسترده‌تر همان روش تک متغیره است. در این روش یک پارامتر به صورت تک متغیره n مرتبه تکرار می‌شود، سپس نقطه بهینه مورد نظر در فاصله S_p و S_p معرفی شده است به دست می‌آید.

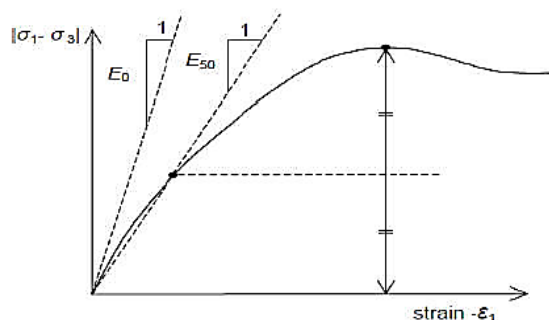
$$S_p = X_i - X_{i-n} \quad (3)$$

که در این معادله مقدار X_i نقطه به دست آمده پس از پایان یک مرحله از انجام روش تک متغیره است و X_{i-n} مقدار متغیر قبل از انجام تحلیل برگشتی است [۲۴ و ۲۳].

۲-۳ مدل موهر-کولمب (MC)

پلاکسیس از جمله نرم‌افزارهایی است که دارای قابلیت‌های مناسبی جهت مدل‌سازی بوده و می‌توان از آن برای تحلیل انواع مختلفی از مسائل ژئوتکنیکی به روش اجزاء محدود استفاده نمود [۲۶]. در یک تحلیل ژئوتکنیکی از آنجایی که رفتار الاستوپلاستیک حاکم است، محاسبه دقیق نمو کرنش‌های پلاستیک و الاستیک و همچنین نمو تنش بسیار حیاتی خواهد بود، که این کار به کمک مدل‌های رفتاری صورت می‌گیرد. هر مدل رفتاری دارای نقاط قوت و ضعف‌های خاص خود است [۶]. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار پلاکسیس و از مدل رفتاری موهر-کولمب و خاک سخت شونده استفاده شد. دلیل انتخاب این دو مدل این بوده که در مطالعات انجام شده با این نرم‌افزار در مورد سدهای خاکی این دو مدل بیش‌ترین کاربرد را نسبت به سایر مدل‌ها داشته است.

مدل موهر-کولمب شامل پنج پارامتر ورودی است. پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون برای الاستیسیته خاک و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک برای پلاستیسیته خاک و زاویه اتساع است. مفهوم پلاستیسیته اصولاً به کرنش‌های غیر قابل برگشت مربوط می‌شود. به این منظور یک تابع تسلیم تنش-کرنش به عنوان یک سطح در فضای تنش‌های اصلی معرفی می‌شود تا نقاط پلاستیک را بتوان ارزیابی کرد. بدیهی است نقاطی داخل سطح تسلیم رفتار ارتجاعی کامل دارند. بر اساس این مدل، کرنش و



شکل ۳. تعریف برای نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده

Fig. 3. Results for three axial experiment with drainage condition

مماسی برای بارگذاری ادنومتر اولیه که برای مقدار میانگین برای انواع مختلف خاک داریم.

$$E_{oed} = E_{50} \text{ و } E_{ur} = 3E_{50} \quad (12)$$

فرق اساسی مدل موهركلمب و خاک سخت شونده این است که مدل خاک سخت شونده تابع تنش بودن مدول سختی را لحاظ کرده است. یعنی تمام سختی‌ها با فشار افزایش می‌یابند. بنابراین هر سه سختی ورودی وابسته به تنش مرجع ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته می‌شود. نرم‌افزار پلاکسیس مدول یانگ را مانند مدل سختی پایه در مدل الاستیک و مدل موهركلمب استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در مکانیک خاک شیب اولیه معمولاً به عنوان E_0 و مدول سکانت در مقاومت ۵۰ درصد به عنوان E_{50} نوشته می‌شود. برای مواد با یک محدوده الاستیک خطی بزرگ استفاده از E_{50} واقع بینانه است، برای بارگذاری خاک‌ها عموماً از E_{50} استفاده می‌شود [۲۷].

۲-۵- ارزیابی مناسب بودن مدل

قضایات‌های کیفی در مورد کاربرد هر مدل موضوعی است که در ارزیابی مدل‌ها لحاظ می‌گردد. این معیارها روش هدفمند را برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها فراهم می‌کنند [۲۸]. در این تحقیق از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و نیز میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) به منظور بررسی و ارزیابی دقت مدل‌ها

برای مدل کردن کرنش‌های پلاستیک غیر قابل برگشت در اثر تنش انحرافی و تنش فشاری همه جانبه به کار می‌روند وجود دارد. هم‌چنین این مدل برای شبیه‌سازی رفتار انواع خاک‌های نرم و سخت کاربرد دارد. هنگامی که خاک تحت تنش انحرافی قرار می‌گیرد، سختی خاک کاهش یافته و کرنش‌های پلاستیک غیر قابل برگشت توسعه می‌یابد. یکی از ویژگی‌های این مدل وابستگی سختی خاک به تنش است که در شرایط تحکیمی به صورت زیر قابل بیان است.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\sigma / p^{ref} \right)^m \quad (7)$$

برای خاک‌های نرم فرض $m=1$ به واقعیت نزدیک است. در این حالت:

$$E_{oed}^{ref} = p^{ref} / \lambda^* \quad (8)$$

$$\lambda^* = \lambda / (1 + e_0) \quad (9)$$

در این روابط p^{ref} تنش مرجع و m اندیس فشردگی اصلاح شده و λ^* ضریب فشار اصلاح شده است. به گونه‌ای مشابه، ضریب ارتجاعی باربرداری- بارگذاری مجدد را می‌توان به ضریب تورم اصلاح شده k^* مرتبط کرد، به عبارتی می‌توان نوشت:

$$E_{ur}^{ref} = 3p^{ref} (1 - 2v_{ur}) / k^* \quad (10)$$

$$k^* = k / (1 + e_0) \quad (11)$$

که v_{ur} در این مدل اثر خزش یا نشست ثانویه که معمولاً در دراز مدت اتفاق می‌افتد در نظر گرفته نمی‌شود. این مدل یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار خاک است و برای مدل موهركلمب حالات محدود تنش به وسیله زاویه اصطکاک و چسبندگی C زاویه اتساع ψ توصیف می‌شود. اگر چه سختی خاک با استفاده از سه ورودی متفاوت سختی بسیار دقیق تر توصیف می‌شود. سختی سکانت در آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد E_{50} ، سختی باربرداری- بارگذاری مجدد E_{oed} و E_{ur} سختی

استفاده به عمل آمد. شاخص‌های یاد شده به ترتیب با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right)^2 \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - O_i)^2}{N}} \quad (14)$$

$$GMER = \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{P_i}{O_i} \right) \right] \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{P_i}{O_i} \right) \right] \quad (15)$$

در روابط اخیر P_i مقدار پارامتر محاسبه شده از تحلیل عددی و O_i مقدار پارامتر واقعی از ابزار دقیق سد و N نمایانگر تعداد داده‌ها است.

۲-۶- مدل‌سازی عددی سد کبودال، با روش تک متغیره متناوب

در این پژوهش اطلاعات جمع‌آوری شده توسط ابزار دقیق سد کبودال در چهار سال متوالی یعنی از سال ۱۳۸۷ تا سال ۱۳۹۱ که زمان مراحل پایانی سد است، با نتایج حاصل از مدلسازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه در یکی از مقاطع میانی سد کبودال (مقطع ۱۹) که دارای ابزار دقیق است، بین داده‌های ابزار دقیق و مدل نرم‌افزاری انجام شده است. پس از ساخت مدل، شبکه اجزای محدود مش بندی مقطع ایجاد شد.

پس از ساخت هندسه مدل عددی، با توجه به طبیعت غیرخطی مصالح پروفیل خاک، بایستی مدل رفتاری مناسبی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۲۹]. به منظور شبیه‌سازی رفتار خاک، پارامترهای مقاومتی مصالح به هندسه مدل تخصیص داده شد. مقادیر وزن مخصوص مرطوب و وزن مخصوص از آزمایش تراکم و پارامترهای رفتاری خاک از آزمایش‌های سه محوری روی نمونه‌هایی که با همان وزن مخصوص مرطوب تهیه شده بودند، به دست آمده است که این پارامترها به عنوان پارامترهای اولیه برای گام اول آنالیز برگشتی، استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات مصالح نهایی پس از تحلیل برگشتی به روش تک متغیره متناوب در مدل رفتاری سخت

شونده و موهر-کلمب آورده شده است. مشخصات مصالح تشکیل دهنده بدنه سد کبودال که شامل سه بخش اصلی فیلتر و پوسته و پی است که با دو مدل رفتاری موهر-کلمب و سخت شونده مدل‌سازی انجام گرفت. هم‌چنین مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری مدل سخت شونده نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

در جداول ۱ و ۲ عوامل ژئوتکنیکی و مکانیکی خاک عبارت‌اند از: c_{ref} چسبندگی (موثر)، Φ زاویه اصطکاک داخلی (موثر)، ν نسبت پواسون، \bar{a}_{sat} وزن مخصوص اشباع، \bar{a}_{unsat} وزن مخصوص غیراشباع آب، E_{ref} ضریب پواسون و k هدایت هیدرولیکی خاک، E-Muduls مدول یانگ می‌باشند. به وسیله نرم‌افزار، ساخت لایه لایه و مرحله ای سد و پدیده تحکیم شبیه سازی شد. در ساخت سد از ۸ لایه استفاده شد. زمره‌بندی و چوچی [۳۰] اثر تعداد لایه‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های رایانه‌ای روی پارامترهایی عددی کنترل کننده در سدهای خاکی با هسته رسی قائم مسجد سلیمان را بررسی کرده‌اند. پیشنهاد حداقل تعداد لایه‌های لازم برای رسیدن به نتایج معقول در مدل‌های رایانه‌ای $H/10$ ارائه کرده‌اند و که H ارتفاع سد از پی است. در این پژوهش از این پیشنهاد استفاده شد.

پس از ساخت هندسه مدل و وارد کردن متغیرهای اولیه مصالح، تحلیل اولیه قابل انجام است و پس از آن تحلیل‌های برگشتی انجام می‌شود. هم‌چنین با توجه به طبیعت غیرخطی مصالح پروفیل خاک، بایستی مدل رفتاری مناسبی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. هدف اصلی از انجام آنالیزهای برگشتی، رسیدن به متغیرهای واقعی مصالح ساختمانی مصرفی در زمان ساخت است؛ بنابراین با توجه به رفتار واقعی سد که از اطلاعات ابزار دقیق به دست آمده است، لازم است متغیرهای ورودی تغییر داده شوند تا جایی که رفتار واقعی سد، در مدل هم ایجاد شود. شایان ذکر است که این کار بسیار حساس و پیچیده است؛ زیرا تقریباً همه متغیرها به نوعی بر یکدیگر تأثیر دارند؛ با تغییر یکی، بقیه متغیرها نیز تغییر می‌کنند. در مورد تراز آب مخزن باید این نکته را متذکر شد که تراز نرمال آبیگری ۱۸۹ متر است در حالی که تراز آبیگری اولیه سد ۱۷۴ متر بوده است؛ بنابراین آبیگری کامل زمان ساخت صورت نگرفته و فقط آبیگری مرده آن هم با ملاحظات طراحی در زمان ساخت سد صورت پذیرفته است [۲۱]. روند خاک ریزی طبق برنامه زمان‌بندی اجرا سد شبیه‌سازی شد و در خود نرم‌افزار هنگام خاکریزی، آبیگری با فعال کردن تراز سطح آب در ارتفاع خواسته شده ایجاد شد.

جدول ۱. مشخصات مصالح نهایی پس از تحلیل برگشتی در مدل رفتاری سخت شونده و موهر-کلمب

Table 1. Specifications of final materials after back analysis with HS and MC models

$K_{x,y,z}$ (m/day)	Φ (°)	c_{ref} (kN/m ²)	ν	E_{ref} (kN/m ²)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	نوع مصالح	خصوصیات مصالح
۰/۰۰۰۰۸۷	۲۹	۱۸	۰/۳	۱۰۰۰۰	۲۰	۱۷	Undrain	پی
۰/۰۰۰۰۱	۲۵	۲۲	۰/۴	۱۰۰۰۰	۲۳	۱۹	Drained	بدنه
۸/۶۴	۳۶	۱۲	۰/۲۵	۲۵۰۰	۲۱	۲۰	Drained	فیلتر و زهکش

جدول ۲. مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری سخت شونده

Table 2. Characteristics of materials in hardening soil (HS) model

k_0^{nc}	E_{ur} (kN/m ²)	E_{oed} (kN/m ²)	E_{50} (kN/m ²)	κ^*	λ^*	خصوصیات مصالح
۰/۵	۵۰۰۰۰	۲۳۷۰۰	۲۵۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	بدنه

این پارامتر، در تمام مراحل اجرای خاکریزی و بهره برداری سد به منظور

حفظ ایمنی سد از اهمیت قابل توجهی برخوردار است [۱۶].

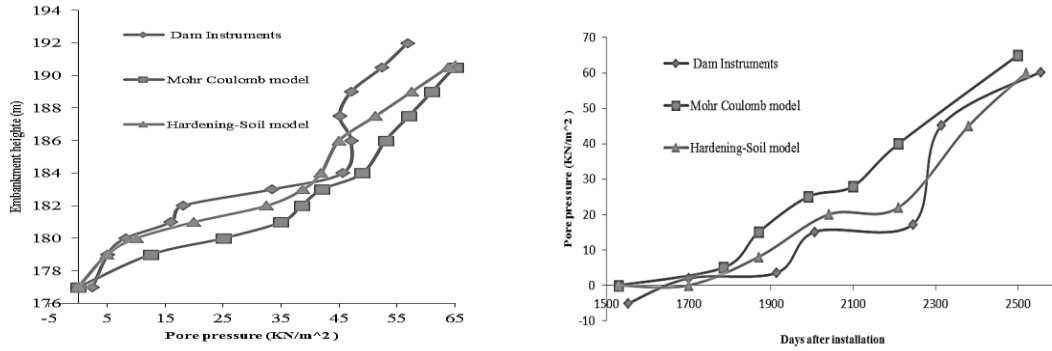
تغییرات فشار آب حفره‌ای در یک نقطه که دارای ابزار دقیق است، به دو صورت محاسبه می‌شود. یکی تغییرات این پارامتر با زمان ساخت سد و دیگری تغییرات این پارامتر با تراز خاکریزی است. همان طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، با ساخت مرحله‌ای به علت افزایش حجم سربار مقدار فشار آب حفره‌ای با افزایش زمان ساخت سد، روند افزایشی دارد. پیزومترهای واقع در محور سد عددی بیشتری را نسبت به پیزومترهای بالادست و پایین‌دست سد نشان می‌دهند که علت آن این است که سد در زمان انجام خاکریزی آبدگیری نیز شده است و به علت دور بودن پیزومترهای واقع در پایین‌دست محور سد از آب نفوذی در سد عددی کمتری را نسبت به سایر پیزومترها نشان می‌دهد، اما تفاوت آن زیاد نیست.

همچنین با افزایش تراز خاکریزی مقدار فشار آب حفره‌ای روند افزایشی دارد. نتایج ثبت شده در پیزومترها نشان می‌دهند که افزایش زیادی در فشار

۳- نتایج و بحث

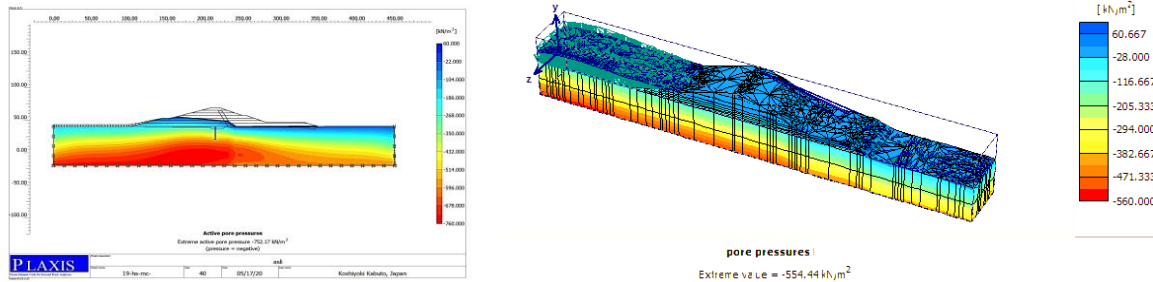
در این قسمت داده‌های ثبت شده از ابزار دقیق فشارسنجی شامل فشارسنج‌های کل خاک و پیزومترهای الکتریکی اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای و نشست مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت و داده‌ها با نتایج مدل عددی واسنجی شده، مقایسه شد. مهم‌ترین عواملی را که در دوران ساخت باید دائم بررسی کرد فشار آب منفذی، تنش‌های ایجاد شده و نشست در بدنه و پی سد است. نظر به اینکه برای اجرای بدنه سد رطوبت خاک حوالی رطوبت بهینه و درصد تراکم حدود ۹۸ درصد است، هنگام متراکم کردن، خاک حالت بیش تحکیم یافته پیدا می‌کند و ممکن است فشار منفذی منفی در بدنه به وجود آید [۳۱]. این موضوع با توجه به شکل ۴ در سد کبودوال نیز اتفاق افتاده است.

با افزایش مقادیر فشار آب منفذی، تنش مؤثر میان ذرات خاک کاهش خواهد یافت که این امر موجب کاهش مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش احتمال بروز گسیختگی هیدرولیکی می‌شود. بر این اساس کنترل



شکل ۴. تغییرات فشار آب حفره‌ای با زمان ساخت و رقوم مختلف خاک ریزی مقطع ۱۹، ابزار دقیق و آنالیز برگشتی مدل HS

Fig. 4. Pore water pressure changes with time and filling levels, instrumentation and back analysis in the HS model in cross-section No. 19



شکل ۵. تغییرات فشار آب حفره‌ای مقطع ۱۹، آخرین مرحله خاکریزی مدل سخت شونده در حالت دو و سه بعدی

Fig. 5. Pore water pressure changes in the last fill level, in HS model in cross-section No. 19 (2D and 3D simulations)

$$R_U = 1 - \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \quad (3)$$

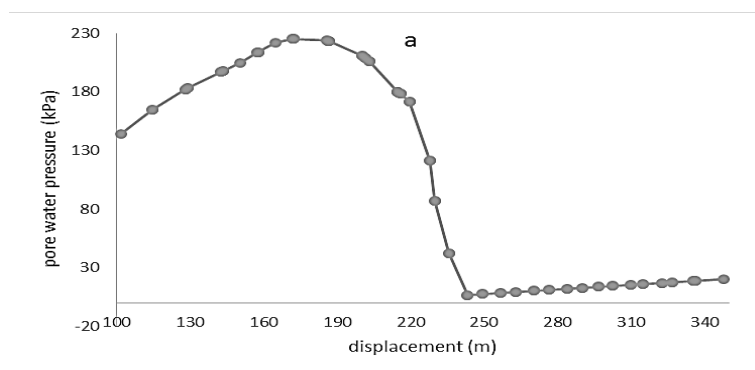
ضریب فشار آب حفره‌ای شاخص مهم در ارزیابی فشار آب حفره‌ای است، از محاسبه نسبت فشار آب حفره‌ای ثبت شده (U) به فشار خاک اندازه‌گیری شده (σ_v')، می‌توان ضریب R_U را برای دوران ساخت با توجه به رابطه ۱۶ تعیین نمود [۳].

$$R_U = \frac{U}{\sigma_v'} \quad (16)$$

فشار قائم خاک از حاصل ضرب وزن مخصوص خاک ضرب در ارتفاع خاکریزی به دست می‌آید. ثبات نسبی ضریب فشار آب حفره‌ای در طول عملیات خاکریزی و نیز قبل و بعد از آن آبیگری سد نشان دهنده مناسب

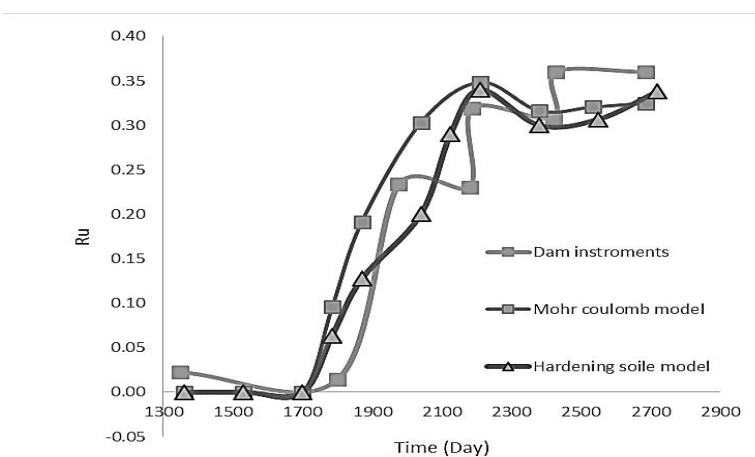
آب حفره‌ای در سال ۱۳۹۰ رخ داده است. قسمت عمده این فشار تا پایان سال ۱۳۹۰ زهکشی شده است. علت آن می‌تواند بارندگی‌های سال ۱۳۹۰ و نیز خاکریزی با حجم بالا در طول این سال باشد. با توجه به شکل ۵ بیشینه افزایش فشار آب حفره‌ای در پایان ساخت در بخش مرکزی اتفاق می‌افتد که در آن فشار سربار بیش‌تر و تأثیرات ناشی از زهکشی مصالح فیلتر حداقل است.

با توجه به شکل ۶ در راستای طولی در بدنه سد فشار آب حفره‌ای از سمت بالا دست به سمت پایین دست در حال افزایش و به علت وجود زهکش و فیلتر روند کاهش پیدا می‌کند و بیش‌ترین مقدار آن در قبل از فیلتر و زهکش و در قسمت مرکزی رخ می‌دهد. این مطلب نشان دهنده عملکرد مناسب فیلتر و زهکش است.



شکل ۶. تغییرات فشار آب حفره‌ای در راستای طولی سد آخرین مرحله خاک ریزی مدل سخت شونده

Fig. 6. Pore water pressure changes in the last fill level, in HS model in dam longitudinal direction



شکل ۷. وضعیت تغییرات پارامتر Ru مقطع ۱۹ در محور سد حاصل از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی

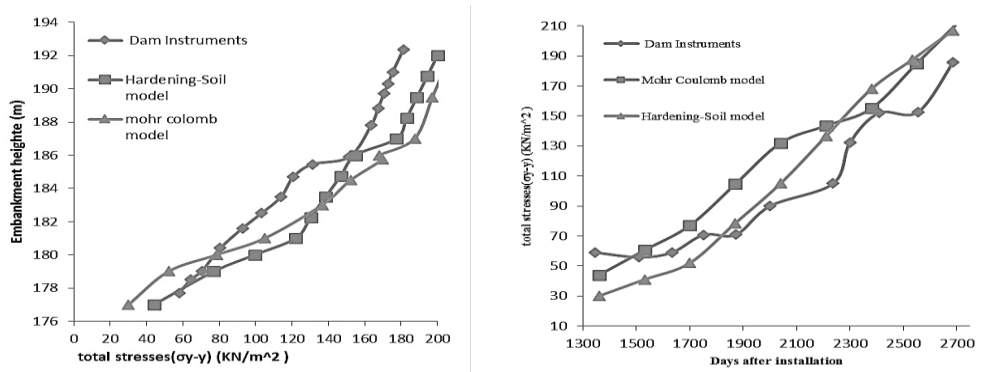
Fig. 7. Variation of Ru in cross-section No. 19 in dam axis obtained from instrumentation and back analysis

$$Ru_{19.2} = \frac{EP19.8}{TPC19.2} \quad (18)$$

$Ru_{19.1}$ در بالادست سد و $Ru_{19.2}$ در مرکز مقطع عرضی سد نزدیک پی قرار دارند. همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود مقدار ضریب فشار آب حفره‌ای در طول ساخت کمتر از ۰/۴۰ است. عملاً بیش‌ترین مقدار این ضریب طی سال ۱۳۹۰ اتفاق افتاده است که دلایل آن آبیگری مخزن و به ویژه به علت بارگذاری بدنه سد (تکمیل خاکریزی بدنه سد) بوده است. در مجموع، این تغییرات در محدوده مجاز قرار دارد.

بودن سرعت عملیات خاکریزی و غیر محتمل بودن بروز پدیده شکست هیدرولیکی است [۳]. از آنجایی که فشارسنج TPC۱۹.۱ در مجاورت پیژومتر EP۱۹.۷ و فشارسنج TPC۱۹.۲ در مجاورت پیژومتر EP۱۹.۸ نصب شده است، از محاسبه نسبت فشار آب حفره‌ای ثبت شده به فشار خاک اندازه‌گیری شده، می‌توان ضریب R_u را برای دوران ساخت و آبیگری اولیه در دو موقعیت بالادست و محور سد مقطع ۱۹ تعیین نمود. بنابراین مقدار این پارامتر در این مقطع از روابط زیر به دست می‌آید.

$$Ru_{19.1} = \frac{EP19.7}{TPC19.1} \quad (17)$$



شکل ۸. وضعیت تغییرات تنش کل با زمان ساخت و ارتفاع خاکریزی مقطع ۱۹، ابزار دقیق و آنالیز برگشتی مدل HS

Fig. 8. Total stress changes with construction time and and soil filling levels, instrumentation and back analysis in HS model

پارامترهای مقاومتی خاک است که اصولاً با گذشت زمان و افزایش سربار مقدار آن‌ها تغییر می‌یابد که در مدل دیده نمی‌شود. تحلیل تنش و نشست بیانگر هم‌خوانی خوب بین داده‌های واقعی و مدل‌سازی است. علت اصلی اختلاف میان نتایج ابزار دقیق و مدل عددی مربوط به مقادیر پارامترهای مقاومتی مصالح است که در عمل ناهمسان گرد بوده ولی برای تحلیل به صورت همسان گرد مدل شده است. همچنین برخی مشخصات مکانیکی مصالح در سه جهت متفاوت است و این مسئله در تمام بدنه سد وجود دارد، در حالی که مدل‌سازی در نرم‌افزار پلاکسیس به صورت یکپارچه صورت گرفته است. در عمل مصالح در نقاط مختلف سد رفتار یکسانی ندارند چون دقیقاً مصالح به کار رفته در بدنه سد از یک دانه‌بندی و یا یک ضریب تخلخل یکسان برخوردار نیستند و حتی ممکن است جنس، ریزی و درشتی آن‌ها با هم فرق داشته باشند، با این وجود ما مجبوریم در تمام نقاط با یک مدل رفتاری سد را شبیه‌سازی کنیم. جدول ۳ مقایسه نتایج آنالیز برگشتی با ابزار دقیق سد کبودال بلافاصله پس از ساخت، در نقاط دیگر سد که دارای ابزار دقیق است را نشان می‌دهد. این کار به این دلیل صورت گرفته است که نشان دهد که آیا علاوه بر نقطه مورد نظر که نتایج آن بررسی شد، در نقاط دیگر نیز تطابق خوبی بین نتایج مدل عددی و ابزار دقیق وجود دارد. در جدول ۳ مقادیر EP مربوط به فشارسنج‌های الکتریکی و مقادیر TPC مربوط به مقادیر سلول‌های فشاری است (به شکل ۱ مراجعه شود). از مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی و ابزار دقیق در جدول ۳ ملاحظه می‌شود که مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی عددی در جهت اطمینان است.

۳-۲- بررسی تنش کل خاک

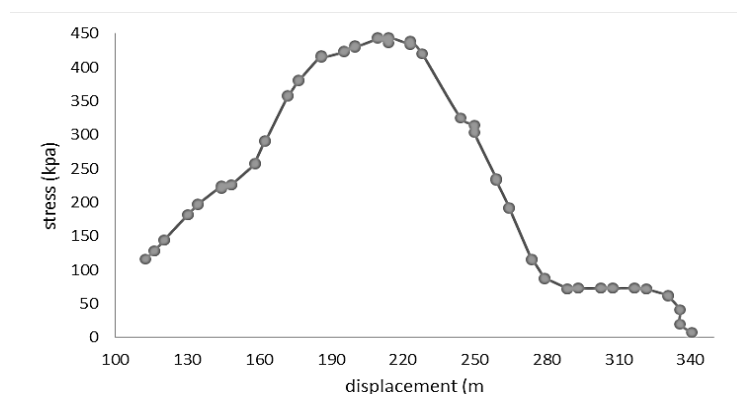
وضعیت تنش در بدنه سدهای خاکی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی جهت ارزیابی ایمنی سد است. این پارامتر در مرحله ساخت سد برای کنترل خاکریزی و انتخاب سرعت بهینه و در زمان بهره‌برداری جهت بررسی و انتقال تنش‌های حاصل از خاکریز به پی سد تأثیرگذار است [۱۶]. تنش خاک در بدنه سد خاکی در زمان ساخت به عواملی مانند مدت زمان ساخت سد، تراز و سرعت خاکریزی، تراز و سرعت تراز آب مخزن و ... در زمان ساخت سدهای خاکی، بستگی دارد که توزیع آن در هر پروژه تصادفی است [۳۲]. اصولاً تنش سنج‌هایی که در سدهای خاکی نصب می‌شوند فقط تنش‌های عمودی را اندازه‌گیری کرده و قادر به اندازه‌گیری تنش‌های برشی نیستند. در حالت کلی بر اساس روابط مکانیک جامدات هنگامی که مقادیر تنش‌های عمودی در یک نقطه و در سه جهت دلخواه مشخص باشند تنش‌های اصلی را در آن نقطه می‌توان محاسبه کرد [۶]. اصولاً تغییرات تنش کل خاک در یک نقطه که دارای ابزار دقیق است، همانند فشار آب حفره‌ای به دو صورت محاسبه می‌شود. یکی تغییرات این پارامتر با زمان ساخت سد و دیگری تغییرات این پارامتر با تراز خاکریزی است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود با افزایش تراز خاک ریزی و هم‌چنین زمان ساخت مقدار تنش کل افزایش پیدا می‌کند. علت این امر این است که با افزایش تراز خاکریزی مقدار سربار و حجم خاک بیشتر شده و باعث می‌شود تنش کل افزایش یابد.

عدم انطباق کامل نمودارهای مدل عددی و ابزار دقیق سد مربوط به

جدول ۳. مقایسه نتایج آنالیز برگشتی با ابزار دقیق سد کبودال بلافاصله پس از ساخت

Table 3. Comparison of results with accurate instrumentation in Kabudval Dam immediately after construction

ابزار	ابزار و موقعیت		نتایج ابزار دقیق سد				نتایج مدل عددی		
	مقطع نصب	تراز نصب	موقعیت نسبت به محور سد	فشار آب منفذی (kPa)	تنش کل (kPa)	Ru (pp/gH)	فشار آب منفذی (kPa)	تنش کل (kPa)	Ru (pp/gH)
Ep19-7, Tpc19-1	۱۹	۱۷۰	-۱۵	۵۱	۱۴۵	۰/۳۵	۵۰	۱۵۱	۰/۳۲
Ep19-8, Tpc19-2	۱۹	۱۶۳	۰	۵۳/۷۴	۱۸۹	۰/۲۸	۷۰	۲۰۰/۵	۰/۳
Ep19-6	۱۹	۱۶۰	+۶	۳۸/۴۳	-	-	۴۰	-	-
Ep19-9	۱۹	۱۷۰	+۶	۱۸۴	-	-	۲۰۰	-	-

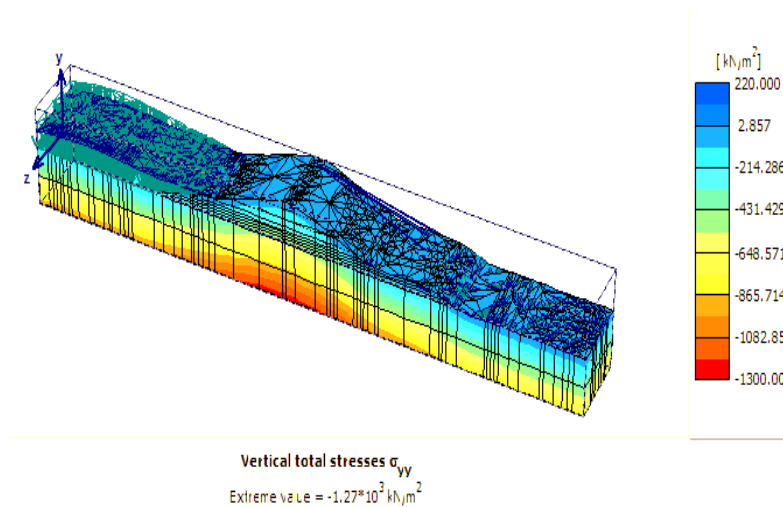


شکل ۹. تغییرات فشار قائم خاک مقطع ۱۹، آخرین مرحله خاک ریزی مدل سخت شونده

Fig. 9. Variation of vertical soil pressure in the last filling level for hardening soil (HS) model in cross-section No. 19

چرخش المان تنش) تأثیرپذیری کمتری از روند خاکریزی دارند. تنش در محور سد بیش از طرفین آن بوده و بیشترین تغییرات تنش در پایین دست ثبت شده است.

نتایج مدل عددی واسنجی شده در شکل ۹ نشان داد که قسمت میانی و نزدیک به محور سد تغییرات مشابهی با روند بارگذاری بدنه سد دارد؛ در حالی که با دور شدن از محور سد به دلیل انتقال تنش‌ها به صورت مایل



شکل ۱۰. تغییرات فشار قائم خاک در راستای طولی سد آخرین مرحله خاکریزی مدل سخت شونده

Fig. 10. Variation of vertical soil pressure in the last filling level for hardening soil (HS) model in dam longitudinal direction

ساخت، فشار آب حفره‌ای با تراز خاکریزی، ضریب فشار آب منفذی، تنش کل با زمان ساخت، تنش کل با تراز خاکریزی را پیش‌بینی کند. همچنین با توجه به شاخص GMER در تمام موارد بیش برآورد در مدل‌ها رخ داده است. هر چند که اختلاف در دقت مدل‌ها کم است، می‌توان گفت هر دو مدل جواب قابل قبول و نزدیک به هم داده و قابل استفاده هستند، لذا می‌توان آن‌ها را در تخمین رفتار سدهای خاکی زمان ساخت سد به کار بست. ولی همان‌گونه که گفته شد مدل‌های مبتنی رفتار خاک سخت شونده، دارای ارجحیت نسبی در مقایسه با مدل موهر-کلمب می‌باشند. مدل سخت شونده چون پارامترهای بیشتری از خاک را وارد مدل‌سازی می‌کند، بهتر می‌تواند رفتار سدهای خاکی را مدل‌سازی کند. چون در زمان ساخت سدهای خاکی اغلب نشست‌های اولیه اتفاق می‌افتد، مدل سخت شونده کارایی بهتری می‌تواند داشته باشد. استفاده از مدل خاک سخت شونده در پروژه‌هایی که باربرداری یا بارگذاری به میزان زیاد انجام می‌شود با توجه به تغییرات سختی بسته به مسیر بارگذاری و تنش، توصیه می‌شود. در مدل خاک سخت شونده، اثر خزش یا نشست ثانویه که معمولاً در زمان طولانی رخ می‌دهد، در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین چون در طول ساخت سد خاکی اغلب نشست‌های اولیه رخ می‌دهد، مدل سخت شونده کارایی بهتری می‌تواند داشته باشد. دقت بیشتر مدل سخت شونده توسط پژوهشگران دیگر نیز به اثبات رسیده

همچنین همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود در راستای طولی در بدنه سد فشار قائم خاک از سمت بالادست به سمت پایین‌دست در حال افزایش و سپس روند کاهشی پیدا می‌کند و بیش‌ترین مقدار آن در قسمت مرکزی رخ می‌دهد.

۳-۳- بررسی آماری بین مدل‌های رفتاری خاک

جداول ۴ و ۵ مقادیر مربوط به هر یک از شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های رفتاری مختلف خاک را نشان می‌دهد. هر اندازه که جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به صفر و ضریب تبیین (R^2) به یک نزدیک‌تر باشند، نشان می‌دهد که خروجی‌ها دقیق‌تر بوده و مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده به هم نزدیک‌ترند [۳۳]. از شاخص میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) برای مشخص نمودن بیش برآورد و یا کم برآورد مدل، استفاده شد. هر چه شاخص GMER به عدد یک نزدیک‌تر باشد، مدل بهترین برازش را دارد و دقت آن بالاتر است. علت استفاده از شاخص GMER ارجحیت آن نسبت به سایر شاخص‌ها است. اگر مقدار GMER کمتر یا بیشتر از یک باشد به ترتیب بیان‌کننده کم برآورد یا بیش برآورد مدل‌ها است [۳۴]. با توجه به جداول ۴ و ۵ و همچنین شاخص‌های آماری، نتایج نشان داد که در همه حالت‌ها، مدل HS بهتر توانسته مقادیر فشار آب حفره‌ای با زمان

جدول ۴. پارامترهای آماری فشار آب حفره‌ای و ضریب R_u برای دو مدل رفتاری خاک

Table 4. Statistical measures for pore water pressure and R_u for two soil model behaviors

R^2	شاخص‌های آماری		مدل	پارامتر
	GMER	RMSE (kN/m ²)		
۰/۹۵۸۵	۱/۰۶۱۵	۱۱/۹۳۳۱	MC	فشار آب حفره‌ای با زمان ساخت
۰/۹۷۴۸	۱/۰۳۶۴	۷/۷۷۳۸	HS	
۰/۹۵۰۶	۱/۰۲۵۲	۱۲/۷۲۰۵	MC	فشار آب حفره‌ای با تراز خاک ریزی
۰/۹۶۵۷	۱/۰۱۱۱	۷/۹۴۴۲	HS	
۰/۹۸۴۶	۱/۰۲۶۸	۰/۰۵۸۶	MC	ضریب R_u
۰/۹۸۹۳	۱/۰۱۷۵	۰/۰۳۸۷	HS	

جدول ۵. پارامترهای آماری تنش کل خاک برای دو مدل رفتاری خاک

Table 5. Statistical measures for total stress for two soil model behaviors

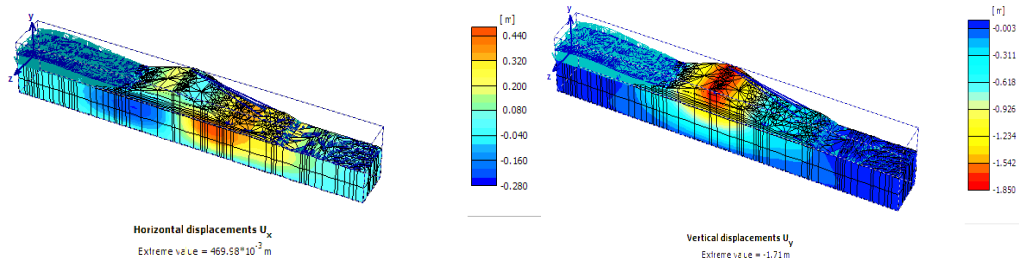
R^2	شاخص‌های آماری		مدل	پارامتر
	GMER	RMSE (kN/m ²)		
۰/۹۴۷۴	۱/۰۱۹۵	۲۷/۲۳۷۱	MC	تنش کل با زمان ساخت
۰/۹۷۳۳	۱/۰۰۷۷	۲۲/۹۲۹۲	HS	
۰/۹۷۲۴	۱/۰۰۸۳	۲۴/۲۰۶۳	MC	تنش کل با تراز خاک ریزی
۰/۹۷۹۴	۱/۰۰۷۶	۱۶/۶۶۵۷	HS	

سنجش و ارزیابی نشست بدنه سد همزمان با مراحل اجرای خاکریزی سد ضروری است [۱۶]. مقطع شماره ۱۹ در کیلومتر ۰+۶۶۰ واقع گردیده، می‌تواند به عنوان اولین مقطع بخش میانی بدنه سد مورد بررسی قرار گیرد. بیش‌ترین نشست تجمعی بدنه و پی این مقطع در دوران ساخت سد ۱۸۵۰ میلی‌تر بوده است که نتایج خرجی مدل عددی تطابق خوبی دارد (شکل ۱۱). با توجه به شکل ۱۱ مقدار نشست در محور و بخش میانی سد بیشتر از طرفین آن بوده و مقدار آن در بخش پایین‌دست در مقایسه با بالادست تقریباً برابر است و بیش‌ترین تغییرات آن در محور و بخش میانی ثبت شده است. در مورد تغییرات مقدار نشست پی سد، می‌توان گفت که هر چه قدر به سمت مناطق پایین‌تر برویم از نشست خاک کم می‌شود و مقدار نشست در پی کمتر از بدنه است. هر چه قدر از محور و بخش میانی سد به سمت

است. به عنوان مثال ۶ و ۱۵ نشان دادند که مدل سخت شونده در زمان ساخت سدهای خاکی بهتر می‌تواند آن را مدل‌سازی کند. تفاوت پژوهش حاضر با آن‌ها این است که این پژوهشگران با مدل عددی دو بعدی و فرض کرنش صفحه‌ای به این نتیجه رسیده‌اند در حالی که مدل به کار رفته در این تحقیق به صورت سه بعدی است، هم‌چنین ساختگاه سد مورد مطالعه و رفتار ژئوتکنیکی مصالح آن با پژوهشگران قبلی فرق دارد.

۳-۴- بررسی جابجایی‌ها

نشست سد به دو بخش نشست در طول ساخت و پس از ساخت (دوران بهره‌برداری) می‌توان تقسیم کرد [۳۵]. نشست پدیده‌ای مستمر است که همزمان با ساخت سد در لایه‌های خاکریزی شده، آغاز می‌شود، بنابراین



شکل ۱۱. مقادیر نشست و جابجایی افقی در آخرین مرحله خاک ریزی مقطع ۱۹، مدل سخت شونده

Fig. 11. Variation of settlements and horizontal deformations in the last filling level for hardening soil (HS) model in cross-section No. 19

طراحی و مدیریت سدهای خاکی و منابع آب است. در این پژوهش مدل سازی عددی سد کبودال با لحاظ کردن شرایط واقعی خاکریزی سد و به منظور تحلیل تغییرات نشست تحکیمی، فشار آب منفذی و تنش صورت گرفته است. نتایج نشان داد که روش های عددی هم چون المان محدود قادر به مدل کردن سدهای خاکی و پیش بینی رفتار آنها است. یکی از اهداف این پژوهش رسیدن به پارامترهای واقعی مصالح به کار گرفته شده در بدنه سد است که با آنالیز برگشتی محقق شد. نتایج حاصل از نشست ابزار دقیق و مدل عددی (آنالیز برگشتی) نشان می دهد که این دو تطابق خوبی با هم دارند. مقایسه نتایج تغییرات پارامتر R_{II} مقطع ۱۹ با مدل سازی در بدنه سد نشان می دهد که مقدار آن کمتر از ۰/۴۰ است. این تغییرات در محدوده مجاز قرار دارد. با توجه به نتایج آنالیز، می توان نتیجه گرفت که آنالیز ساخت مرحله ای سد، در این تحقیق به طور مناسبی توانسته است رفتار سد را در دوران ساخت بیان کند. کارایی روش و نرم افزار به کار رفته جهت مدل نمودن رفتار سدهای خاکی در زمان و انتهای ساخت مناسب است. نتایج نشان داد که علاوه بر همخوانی مناسب هر دو مدل رفتاری با داده های ابزار دقیق، مدل سخت شونده دارای انطباق بیشتری است؛ زیرا مدل HS با شاخص های آماری R^2 ، RMSE و نیز GMER در مقایسه با مدل رفتاری MC دقت بیشتری دارد. انتخاب مدل رفتاری خاک سخت شونده، سبب تغییر و بهبود نسبی در مدل های عددی برای شبیه سازی رفتار سدهای خاکی در زمان ساخت می شود. علت اصلی اختلاف میان نتایج ابزار دقیق و مدل عددی مربوط به مقادیر پارامترهای مقاومتی مصالح است که در عمل ناهمسان گرد بوده ولی برای تحلیل به صورت همسان گرد مدل شده است.

پایین دست حرکت کنیم مقدار جابجایی افقی بدنه سد، افزایشی و هر چه قدر به سمت بالادست حرکت کنیم، مقدار آن، کاهشی است. بیشترین جابجایی افقی در بدنه سد در انتهای پایین دست سد رخ داده است. در مورد تغییرات مقدار جابجایی افقی پی سد، می توان گفت که مقدار جابجایی افقی پی در پایین دست به مراتب بیشتر و در جهت مخالف هم هستند.

همچنین در راستای طولی در بدنه سد نشست از سمت بالادست به سمت پایین دست در حال افزایش و سپس روند کاهشی پیدا می کند و بیشترین مقدار آن در قسمت مرکزی رخ می دهد. در راستای ارتفاع سد در بدنه، نشست تا ارتفاع میانی سد روند افزایشی و سپس روند کاهشی دارد یعنی در ترازهای بالاتر بدنه سد مقدار نشست کاهش یافته است. حداکثر نشست در بدنه سد در تراز حدود ۱۷۸ متر رخ داده است. به عبارتی حداکثر نشست بدنه سد در حدود ثلث ارتفاعی بدنه اجرا شده از سطح آن ایجاد شده است. با توجه به حجم خاکریزی بدنه سد و هندسه اجرای خاکریزی این مقطع، حداکثر نشست بدنه سد در تراز میانی بدنه، رخ داده است. در راستای طولی در بدنه سد جابجایی افقی از سمت بالادست به سمت پایین دست در حال افزایش و سپس روند کاهشی پیدا می کند و بیشترین مقدار آن در قسمت مرکزی رخ می دهد. در راستای ارتفاع سد در بدنه، جابجایی افقی تا ارتفاع میانی سد روند افزایشی و سپس روند کاهشی دارد.

۴- نتیجه گیری

پیش بینی پارامترهای ژئوتکنیکی و مکانیکی خاک و مدل سازی آنها در زمان ساخت سدهای خاکی یکی از اقدامات اساسی در زمینه برنامه ریزی،

Mathematical Model For Monitoring The Rock-Earthen Dam of The HOABINH Hydraulic Power Systems, Power Technology and Engineering, 37 (2003) 161-166.

- [8] G.Tayfure, D. Swiatek, A. Wita, VP. Singh, Case study. Finite element method and artificial neural network models for flow through Jeziorsko earthfill dam in Poland, Journal of Hydraulic Engineering, 131(6) (2005) 431-440.
- [9] R. Tomas, M. Cano, J. Garcia-Barba, F. Vicente, G. Herrera, J. M. Lopez-Sanchez, & J. J.Mallorqu, Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry, Journal of Engineering Geology, 157 (2013) 21-32.
- [10] G.G. Yeh, T. H. Kim, J. H. Kim, & H. Y. Kim, Rehabilitation of the Core Zone of an Earth-Fill Dam, Journal of Performance of Constructed Facilities, 127 (2013) 485-495.
- [11] K. Yong-Seong, K. Byung-Tak, Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model, Journal of Computers and Geotechnics, (20013) 313-322.
- [12] A. Beheshti, A. amanbedast, & A. Akbari, Seepage Analysis of Rock-Fill Dam Subjected to Water Level Fluctuation. A case study on Gotvand-Olya Dam, Journal of Energy & Environment, 4(1) (2013) 155- 160. (in Persian)
- [13] K. M. Emre, A. Bayraktar, & H. B. Basaga. Nonlinear finite element reliability analysis of Concrete-Faced Rockfill (CFR) dams under static effects, Journal of Applied Mathematical Modelling, 36(2) (2012) 5229-5248.
- [14] M. Alba, L. Fregonese, F. Prandi, M. Scaioni, & P. Valgoi, Structural monitoring of a large dam by terrestrial LASER scanning, in. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology, Dresden, Germany. 2006, pp. 25-27.
- [15] F. Salmasi, H.K. Hakimi Khansar, B. Norani, Investigation of the Structure of the Dam Body during Construction and its Comparison with the Analytical Results Using PLAXIS Software. JWSS, 22(4) (2019)

نتایج مدل عددی واسنجی شده، در پایان ساخت نشان داد که بیشینه افزایش فشار آب حفره‌ای، نشست، تنش و جابجایی افقی در بخش مرکزی اتفاق می‌افتد. مقدار تنش در محور سد بیش از طرفین آن بوده و مقدار تنش در بخش پایین‌دست در مقایسه با بالادست بیشتر است. مقدار نشست در محور و بخش میانی سد بیشتر از طرفین آن است. در راستای طولی در بدنه سد فشار آب حفره‌ای، نشست، تنش و جابجایی افقی از سمت بالادست به سمت پایین‌دست تا محور سد در حال افزایش و سپس روند کاهشی پیدا می‌کند و بیش‌ترین مقدار آن در قسمت مرکزی رخ می‌دهد.

در راستای این تحقیق پیشنهاد می‌شود که مدل‌های رفتاری مناسبی برای زهکش و فیلتر سد برای تحقیق در آینده ارائه شود.

منابع

- [1] V. Nourani, E. Sharghi, MH. Aminfar, Integrated ANN model for earthfill dams seepage analysis. Sattarkhan dam in Iran, Artificial Intelligence Research, 1(2) (2012) 22-37. (In Persian)
- [2] M. Vafaeian, Earth dams & rockfill dams, Isfahan, Arkan Danesh, (2015) 464p.
- [3] H. Hakimi khansar, S. Golmai, M. Sheydaiyan, Investigating the behavior of Kaboudal earth dam along the finite element method with PLAXIS software and comparison with actual values obtained from instrumentation data, Journal of water science engineering, 4(9) (2014) 33-50. (In Persian)
- [4] P. Beyranvand, H. Bakhshandeh, M. Rahimi, M. Bahadori, Numerical analysis of seepage from Sardasht dam stone foundation, First National Conference on Geotechnical Engineering, Ardabil, Iran, 2014, pp. 500-524.
- [5] USBR, Safety Evaluation of Existing Dams (SEED), Manual for the Safety Evaluation of Embankment and Concrete Dams, Colorad. U.S. Department of the Interior, Denver, o, (1983).
- [6] J. Bolori Bezar, M. Mobinizad, Evaluation of the behavior of Nahreyn embankment dam during construction and comparing instrumentation data with the results of a finite element code, Iranian Water Research Journal, 4(6) (2010) 1-10. (In Persian)
- [7] V. B. Vladimirov, Yu. K. Zaretskii, & V. B. Orekhov, A

- Sci, 41(3) (2004) 235-245.
- [26] H. Hakimi khansar, S.Golmai, M. Sheydaiyan, Static and semi-static stability analysis in dam body using static software Geo-Studio and Plaxis (Case Study of Kaboodvall Dam), Journal of water science engineering, 5(11) (2015) 77-92. (In Persian)
- [27] R.B.J. Brinkgreve, and P.A. Vermeer, Plaxis 2D, general information- reference & scientific manual, Version 1. A. A. Balkema.
- [28] S. Karimi, J. Shiri, A.Nazemi, Estimation of daily evapotranspiration of reference plant using artificial intelligence systems and empirical equations, Journal of Water and Soil Science, 23(2) (2013) 139-158. (In Persian)
- [29] J. M. Duncan, C M. Chang. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5) (1970) 1629-1653.
- [30] M.A. Zomoredian, H. Chochi, Numerical analysis of soil-gravel dam behavior during construction and first dewatering (Case study. Masjed Soleiman Dam). JWSS, 16(62) (2013) 229-242. (In Persian)
- [31] R. Fell, P. MacGregor, and D. Stapledon, Geotechnical engineering of embankment dams. Balkema A. A. Publisher, Netherlands, (1992).
- [32] G. Tayfu, G. Swiate, D. Wita, and V. Singh. Case Study. Finite Element Method and Artificial Neural Network Models for Flow through Jeziorsko Earth fill Dam in Poland, Journal of Hydraulic Engineering, 131(3) (2005) 431-440.
- [33] M. Nouri, and F. Salmasi, Predicting Seepage of Earth Dams using Artificial Intelligence Techniques, Irrigation Sciences and Engineering (JISE), 42(1) (2017) 83-97. (In Persian)
- [34] F. AmiriMijan, H. Shirani, I. Esfandiarpour, A. Besaltpour, and H. Shekofteh Identifying the Determinant Factors Influencing S Index in Calcareous, Journal of Water and Soil Science, 23(3), (2019) 381-394. (In Persian)
- 155-171. (In Persian)
- [16] S. Ghareh, R. Nowroozzadeh. Back Analysis of Tabarakabad Embankment Dam Using Monitoring and Numerical Model Results, Journal of Civil and Environmental Engineering, 48(4) (2018) 51-62. (In Persian)
- [17] A. Mohebatzadeh, M. Mashal, N. Hedayat, seepage analysis in dams Soil with clay core using Seep / W software. Sixth Congress National Civil Engineering, Semnan, Iran, 2011, pp 510-524. (In Persian)
- [18] SH. Shsms, A. Haghayegh, Numerical analysis of changes in stress and water pressure in a soil dam with impermeable surface and its comparison with the results of the instrumentation of the Chitgar earth dam. In. 3rd International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management. Urban Management2016 .. (In Persian)
- [19] H. Asadian, A. Rahimi, M. Ghafouri, M. Bashir Gonbady. Behavior of the friendship barrier to the end of construction with the help of instrumentation data and numerical analysis, Journal of Earth Sciences, 25(98) (2016) 213-222. (In Persian)
- [20] L. Pagano, A. Desidri, F. Vinale, Interpreting settlement profiles of earth dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental, 124(10) (1998) 923-93221] .] Regional Water Company of Golestan, Reporting the Behavior of Kabudwal Dam Golestan. Kabudwal Dam Behavior Report, 2013.pp.100-233.
- [22] M. Karakus, R.J. Fowell, Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution, Tunnelling and Underground Space Technology, 20(1) (2005) 214-224.
- [23] Y.S. Jeon, H.S. Yang. Development of a back analysis algorithm using FLAC, Int J of Rock Mech. & Mining Sci, 41(3) (2004) 232-245.
- [24] S. Sakourai. (1993). Back analysis in rock engineering. In Porc. London. Pergamon Press. 29
- [25] Y. Say. H.S. Jeon, Development of a back analysis algorithm using FLAC, Int J of Rock Mech. & Mining

- [35] A.C. Ugural, and S.K. Fenster. Advanced strength and applied elasticity, London. Edvard Arnold Ltd, (1984). (In Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Salmasi, H. Hakimi Khansar, Simulation of behavior of the Kabudval Dam during construction with 3D numerical modeling, Amirkabir J. Civil Eng., 53(9) (2021) 3967-3984.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18172.6790](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18172.6790)



