



پیش‌بینی رفتار مکانیکی سدخاکی با استفاده از روش اسپلاین‌های رگرسیونی چند متغیره تطبیقی (MARS) (مطالعه موردی سد ایوشان)

مهوش کرزبر^۱، مهدی کماسی^۲، احمدرضا مظاهری^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

مقاله پژوهشی برگرفته از پایان‌نامه دانشجوی کارشناسی ارشد

چکیده

با توجه به پیچیده بودن روش‌های تحلیلی، روش عددی بهترین راه‌حل عملی جهت سنجش رفتار سد از جمله نشت و پایداری شیروانی می‌باشد. در این پژوهش پس از مدلسازی سد خاکی ایوشان در نرم‌افزارهای Seep/w و Slope/w توسط مدل رفتاری موهرکلمب، صحت‌سنجی سد مدلسازی شده، توسط اطلاعات ایزاردقیق سد انجام شد و در ادامه به پیش‌بینی نشت و پایداری شیروانی سد توسط روش فراکاوشی اسپلاین‌های رگرسیونی چندمتغیره تطبیقی مارس (MARS) پرداخته شده است. به منظور ساخت مدل مارس، از ۲۱۴ سری داده بدست آمده از تحلیل‌های عددی نرم‌افزار Slope/w استفاده شد و مدل توسط این داده‌ها ارزیابی و اعتبارسنجی شد. مدل مارس در زمینه پیش‌بینی نشت و پایداری شیروانی به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۹۵۲ و ۰/۹۸۱۳ و جذر میانگین مربعات خطای ۰/۰۱۳۲ و ۰/۰۱۶۰ در مرحله صحت‌سنجی کارایی بالایی را از خود نشان داده است. همچنین در این پژوهش پارامترهای تأثیرگذار در تراوش و پایداری شیروانی از جمله ضریب نفوذپذیری مصالح، زاویه اصطکاک داخلی خاک، وزن مخصوص‌های مصالح سد و سطح تراز آب بالادست حساسیت‌سنجی شد. در نتیجه در بحث دبی نشت پارامترهای سطح تراز آب بالادست ۲۹/۵ درصد و نفوذپذیری هسته ۱۲/۵ درصد و در بحث پایداری شیروانی، زاویه اصطکاک داخلی پوسته ۶۹/۷ درصد بیشترین تأثیر را داشتند. همچنین ترکیب‌های مناسب از پارامترهای ورودی ارائه شد و رابطه‌ای جامع جهت برآورد صحیح زهاب و ضریب اطمینان در حالت‌های مختلف چینش لایه‌ها و مشخصات آن‌ها بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: سد ایوشان، ضریب اطمینان، مدل MARS، نرم‌افزار Slope/w، نشت.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران، mahvashkorzebor71@yahoo.com

^۲ دانشیار، گروه عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران، komasi@abru.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳ استادیار، گروه عمران، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران، a.mazaheri@abru.ac.ir



مقدمه

ممکن است اثرات نامطلوبی را در پایداری شیب سد خاکی

ایجاد کند (میائو و همکاران، ۲۰۱۸).

پایداری سد دریاچه چیتگر توسط نرم‌افزار المان محدود Plaxis و چهار روش عددی بررسی شد. با در نظر گرفتن جنس لایه‌های مختلف فونداسیون و بدنه سد، برای سد خاکی همگن و ناهمگن بر روی بستر درشت دانه و ریزدانه شبیه‌سازی و نتایج بررسی شد. با توجه به ضریب اطمینان حاصله مشخص گردید در حالت فونداسیون ضعیف، عملکرد سدهای همگن بهتر از سدهای غیرهمگن می‌باشد (دقیق و همکاران، ۱۳۹۴). جابجایی قائم و افقی سد ایوشان توسط نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis بررسی شد. نتایج، هم‌خوانی ۸۵ درصدی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد (کماسی و همکاران، ۱۳۹۹).

روش‌های فراکاوشی شامل روش‌های متفاوتی از جمله شبکه‌عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک و... می‌باشند. روش اسپلاین‌های رگرسیونی چندمتغیره تطبیقی که به اختصار (MARS)^۸ نامیده می‌شود در سال ۱۹۹۰ و توسط جروم فریدمن^۹ پیشنهاد شد که در بخش داده‌کاوی و مدلسازی‌های مختلف بکار گرفته شده است. این روش دامنه پاسخ را به چندین محدوده از متغیرهای پیش‌بینی کننده تقسیم می‌کند. علاوه بر این تکنیک مارس می‌تواند بصورت خودکار برای یافتن رابطه غیرخطی پنهان بین متغیرهای ورودی و خروجی مجموعه‌ای از داده‌های بزرگ را جستجو کند و یک مدل صریح ایجاد نماید. همچنین می‌تواند درجه اهمیت یا به عبارت دیگر وزن متغیرهای ورودی را با توجه به خروجی مدل تعیین کند (یانگ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۳). در زمینه تخمین میزان بارندگی، آبراهام^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۱) با بهره گرفتن از مدل‌های مارس و محاسبات نرم^{۱۲} به پیش‌بینی سری‌های زمانی بارش پرداختند. نتایج ارزیابی انجام شده نشان داد که تکنیک مارس دارای زمان اجرای کوتاه‌تر و میانگین مربعات خطای کمتر نسبت به دیگر روش‌های محاسبات نرم می‌باشد.

امروزه در بسیاری از موارد سدهای خاکی بر روی لایه‌های آبرفتی که از نفوذپذیری قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند احداث می‌گردند. براین اساس کنترل تراوش در پی سدهای خاکی به منظور محدود کردن میزان تراوش آب، حفظ پایداری خاکریز پائین‌دست و جلوگیری از فرسایش ذرات ریز خاک، اهمیت بالایی دارد. آنالیز نشت و بررسی پایداری شیب از موضوعات بسیار مهم در طراحی سد خاکی است. در کل، نیمی از خرابی‌های سد خاکریز به فرسایش داخلی نسبت داده شده است (رابین^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های عددی^۲ به کار گرفته شده برای حل معادلات انتگرالی و دیفرانسیلی به سه رویکرد: روش اختلاف محدود (FDM)^۳، روش المان محدود^۴ (FEM) و روش المان مرزی^۵ (BEM) تقسیم می‌گردد. روش اجزاء محدود روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی می‌باشد. در این زمینه نرم‌افزارهای زیادی با سرعت و دقت بالا از جمله نرم‌افزارهای Plaxis, Ansys, Geostudio و ... موجود می‌باشند. عبدالجبار^۶ (۲۰۱۶) با محاسبه دبی نشت توسط پارامترهای شیب بالادست و پایین‌دست سد، ارتفاع سد و ارتفاع آب بالادست نتیجه گرفت که شبکه‌عصبی مصنوعی با میزان خطای ۳ درصد نسبت به واقعیت و نرم‌افزار Seep/w با میزان خطای کمتر از ۲ درصد نزدیک‌ترین دبی نشت را نسبت به واقعیت ارائه می‌دهد. کمان‌بدست (۲۰۱۲) میزان نشت سد خاکی ماریون^۷ را توسط نرم‌افزارهای Ansys و Geostudio بررسی کرد و نتیجه گرفت که نرم‌افزار Geostudio میزان دبی نشت را ۱۸ درصد نزدیک‌تر به واقعیت نشان می‌دهد. سدهای خاکی معمولاً تحت نوسانات سطح آب در مهندسی قرار می‌گیرند که بر توزیع فشار منافذ آب در سد و مقاومت برشی خاک تأثیر می‌گذارد، در نتیجه، نوسانات سطح آب

7 Marion

8 Multivariate Adaptive Regression Spline

9 Jerome Friedman

10 Yang

11 Abraham

12 Soft Computed

1. Robbin

2 Numerical Method

3 Finite Difference Method

4 Finite Element Method

5. Boundary Element Method

6 Abdoljabbar

$$q = k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (1)$$

که در آن k_x و k_y به ترتیب ضرایب نفوذپذیری خاک در جهت افقی و قائم (متر بر ثانیه)، h پتانسیل آب در خاک

1. Durgawati

(متر) و q دبی جریان ورودی به توده خاک (مترمکعب بر ثانیه در واحد سطح) است (کرمانی، ۱۳۹۵). رابطه (۱) برای جریان در شرایط دائمی و خاک همگن صادق است و برای شرایط غیردائمی رابطه (۲) برقرار می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ تغییرات حجمی رطوبت نسبت به زمان است. برای کنترل نتایج تحلیل عددی، دبی عبوری از هر مقطع و گرادیان هیدرولیکی در بخش‌های مختلف سد دو عامل کلیدی می‌باشند. گرادیان هیدرولیکی به صورت مستقیم در خروجی‌های نرم‌افزار دیده نمی‌شود، با داشتن هد آب در دو نقطه و طول مسیر آب بین آن‌ها گرادیان هیدرولیکی و سپس دبی‌نشت به دست می‌آید (شرارد^۳، ۱۹۶۳).

بررسی ضریب اطمینان در پایداری شیروانی

یکی از روش‌های طراحی شیروانی‌های مسلح روش اشمرتمن^۴ می‌باشد. در این روش از فرضیاتی استفاده می‌شود که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

۱- خاک شیروانی دانه‌ای است ($C=0$ و $\phi=0$).

۲- خصوصیات خاک یکنواخت در نظر گرفته شده است.

۳- فشار آب منفذی صفر است.

۴- خاک زیر خاکریز پایدار در نظر گرفته می‌شود.

۵- اثر نیروهای زلزله نادیده گرفته می‌شود.

ضریب اطمینان به دست آمده از نیروهای حاصل از تحلیل از رابطه (۵) بدست می‌آید.

(۵)

$$FS = \frac{R(\sum(W \cos \theta \cdot \tan \varphi) + T_{all} \sin \theta \cdot \tan \varphi) + T_{all} \times H}{(\sum(W \sin \theta)) \times R}$$

W : وزن هر قطعه در محاسبه ضریب اطمینان شیروانی

T_{all} : نیروی کششی مجاز هر مسلح‌کننده

θ : زاویه انحراف مماس بر انتهای هر قطعه نسبت به افق

φ : زاویه اصطکاک داخلی خاک

پایداری شیروانی سد خاکی درگاواتی^۱ با استفاده از مدل MARS انجام شده است. ضریب اطمینان محاسبه شده در شرایط مختلف سد در مقایسه با واقعیت نشان داد که عملکرد مدل MARS رضایت‌بخش است (۲۰۱۹) (Kumar). در این پژوهش با رویداشت به پیشینه پژوهش و مطالعات انجام گرفته گویای این واقعیت است که میزان نشت به کمیت‌های مختلفی وابسته است بدین جهت یافتن ترکیبی از هندسه سد و آب‌بندها که کم‌ترین میزان نشت و به‌طور هم‌زمان دارای کم‌ترین مقدار هزینه اجرایی باشد از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش تلاش می‌گردد که ارتباط میان این کمیت‌های هندسی و هیدرولیکی سد با میزان دبی نشت و سپس پایداری شیروانی توسط روش (MARS) بررسی گردد. بررسی مطالعات موجود در زمینه دبی نشت نشان می‌دهد که تا به امروز مطالعه‌ای برای بررسی پتانسیل مدل ماریس در دبی نشت صورت نگرفته، از سوی دیگر مطالعات صورت گرفته توسط این مدل در سایر حوزه‌ها نشان از کارایی بالای آن دارد. به کمک این مدل رابطه‌ای پیشنهاد می‌شود که با استفاده از آن می‌توان بدون نیاز به ساختن و همچنین ویرایش مجدد مدل ماریس به پیش‌بینی دبی نشت و ضریب پایداری سد پرداخت. در این رابطه بدلیل انجام مراحل صحت‌سنجی در مرحله مدل‌سازی سد، نتایج بدست آمده با تقریب مناسبی به داده‌های واقعی برازش می‌یابد.

مواد و روش‌ها

معادلات حرکت آب در خاک

فضای خالی و به هم پیوسته در خاک این اجازه را می‌دهد که آب از یک نقطه با انرژی بیشتر به سمت نقطه با انرژی کمتر حرکت کند. خاصیتی از خاک که اجازه نشت مایعات از بین فضاها خالی به هم پیوسته را می‌دهد، نفوذپذیری نامیده می‌شود (کماسی، ۱۳۹۵).

معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل معادله پواسون^۲ است که شکل تعمیم‌یافته معادله معروف لاپلاس می‌باشد.

4 . Schmertmann

1 Durgawati

2 . Poisson

3 . Sherard



اسپلاین‌های رگرسیونی چند متغیره تطبیقی (MARS)

در دو دهه قبل یک مدل رگرسیونی انطباقی به نام مارس معرفی گردید. این مدل در بررسی مسایل رگرسیونی و انطباقی سریع، انعطاف‌پذیر و دقیق می‌باشد. تکنیک مارس بر اساس توابع پایه ساده‌ای بصورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$|x-t|_+ - \max(0, x-t) = \begin{cases} x-t & x > t \\ 0 & x \leq t \end{cases} \quad (8)$$

$$|t-x|_+ - \max(0, t-x) = \begin{cases} t-x & x < t \\ 0 & x \geq t \end{cases}$$

t نمایانگر تعداد گره‌ها می‌باشد.

مجموعه این توابع به صورت تابع (۹) تعریف می‌شود.

$$c = \{(x_j - t)_+, (t - x_j)_+\}; \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}$$

$$j = 1, n \quad (9)$$

فرم کلی مدل مارس در رابطه (۱۰) خلاصه می‌شود.

$$Y = f(x) = B_0 + \sum_{m=1}^M B_m H_m(x) \quad (10)$$

که در آن Y متغیر هدف (خروجی)، B_0 یکی از توابع پایه با مقدار ثابت، M تعداد توابع پایه، $H_m(x)$ امین تابع پایه و B_m ضریب متناظر $H_m(x)$ می‌باشد.

جهت ساخت مدل مارس در ابتدا تمام توابع پایه ایجاد می‌شوند. برای جلوگیری از بیش برآزش شدن مدل، توسط رابطه (۱۱)، شاخص اعتبارسنجی متقابل^۱ (GCV) محاسبه و توابع کم اهمیت حذف می‌گردند.

$$GCV = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n ((y_i - f(x_i))^2)}{(1 - \frac{C(B)}{n})^2} \quad (11)$$

n تعداد داده‌های قرائت شده واقعی، $C(B)$ معیار پیچیدگی است که با توجه به تعداد توابع پایه افزایش می‌یابد.

برای ارزیابی کارایی مدل ساخته‌شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی از جذرمیانگین مربعات خطا^۲ ($RMSE$) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شده است. در یک مدل مناسب

R : شعاع دایره لغزش

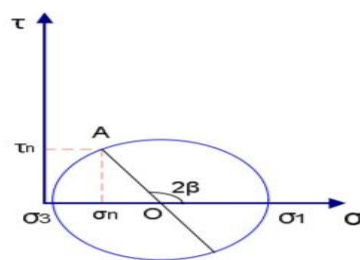
H : فاصله قائم هر مسلح کننده تا مرکز دایره لغزش (اشمرتمن، ۱۹۸۷).

مدل رفتاری مور-کلمب

یکی از روش‌های نمایش تغییرات تنش، روش ترسیمی دایره مور است. اگر نمونه‌ای تحت تأثیر تنش سه محوره قرار گیرد به طوری که $\sigma_2 = \sigma_3 > \sigma_1$ باشد پس از آن که اختلاف تنش‌ها به حداکثر مقدار خود رسید، بر روی صفحه‌ای که ضعیف‌ترین پیوند مولکولی را شامل می‌شود شکست رخ می‌دهد. این صفحه شکست با تنش کمینه زاویه β می‌سازد. مطابق شکل (۱) اگر محورهای متعامد σ , τ در نظر گرفته شود و روی محور σ طول‌های σ_1 , σ_3 جدا شود و دایره‌ای به قطر σ_1 , σ_3 رسم گردد دایره مور به دست می‌آید. مختصات نقطه‌ای روی این دایره مانند A به نحوی که σ_1 در جهت خلاف حرکت عقربه‌های ساعت نسبت به σ_1 , O برابر با 2β باشد، عبارت است از:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 + \sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \quad (6)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad (7)$$



شکل (۱): نمایش صفحه شکست بر روی دایره مور

¹Generalized cross-validation

²Root Mean Square Error

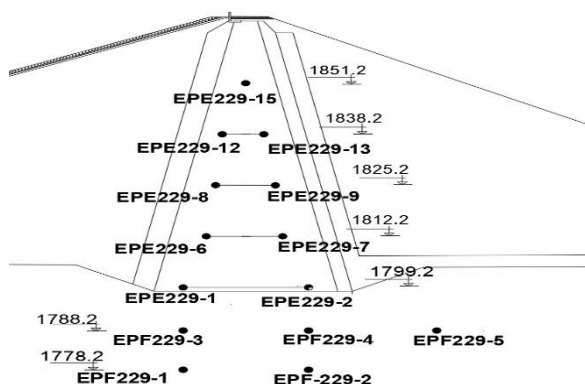
به طور رسمی انجام شد. شکل (۲) موقعیت قرارگیری سد را نشان می دهد (مهندسین مشاور آبدان فراز).



شکل (۲) دریاچه سد ابوشان

مشخصات سد و ابزار دقیق

نفوذپذیری مصالح مورد استفاده در قسمت های مختلف سد و پارامترهای مورد استفاده در آنالیز تنش-کرنش به ترتیب در جدول های (۱) و (۲) ارائه گردیده است. در شکل (۳) محل جانمایی پیزومترهای سد نشان داده شده است (مهندسین مشاور آبدان فراز).



شکل (۳): پیزومترهای نصب شده در بدنه و پی سد ابوشان

مقدار ($RMSE$) باید به صفر و مقدار (R^2) به عدد یک نزدیک باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (dF_o - dF_p)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (dF_o - dF_p)^2}{\sum_{i=1}^N (dF_o - \bar{dF_o})^2} \quad (13)$$

در این روابط N تعداد داده ها، dF_o داده مشاهداتی، dF_p متوسط داده مشاهداتی و dF_o داده پیش بینی شده می باشد (فریدمن، ۱۹۹۱).

معرفی نرم افزارهای مورد استفاده

نرم افزار Seep/w از جمله نرم افزارهایی است که برای حل معادلات نشت با استفاده از روش اجزاءمحدود مورد استفاده قرار می گیرد. داده های ورودی Seep/w شامل مشخصات هندسی سد، ضریب نفوذپذیری بخش های مختلف سد و شرایط مرزی هیدرولیکی سد می باشد (پاک نیت، ۱۳۸۸).

Slope/w برای بررسی پایداری سطوح شیب دار و تعیین ضریب اطمینان (FOS) در طراحی شیب کاربرد دارد. ضریب اطمینان با استفاده از لنگر نیروها و به صورت نسبت لنگرهای مقاوم حول مرکز دوران به لنگرهای محرک حول مرکز دوران طبق رابطه (۱۴) تعریف می شود.

$$F_s = \frac{M_r}{M_d} \quad (14)$$

M_r مجموع لنگر های مقاوم و M_d مجموع لنگرهای

محرک می باشد. (خلیلی، ۱۳۹۵).

معرفی مطالعه موردی (سد ابوشان)

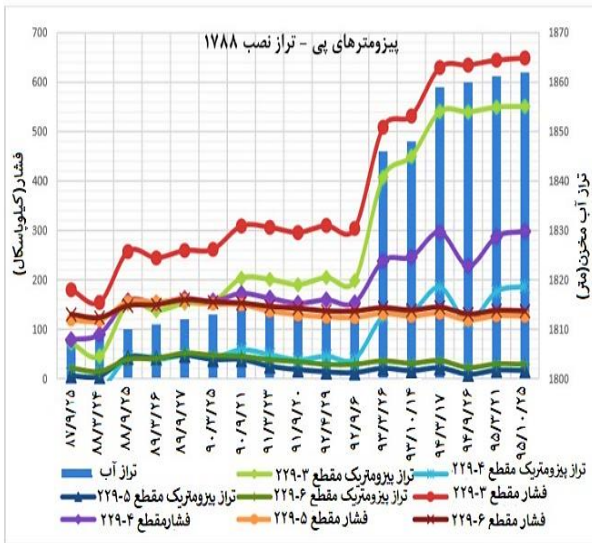
ساختمان سد مخزنی ابوشان در شرق شهرستان خرم آباد جنوب شرقی شهرستان بروجرود در دشت محصور بین دو گردنه رازان و زاغه قرار دارد. از نظر جغرافیایی جایگاه سد دارای مختصات جغرافیایی $2^{\circ}49'48''$ و $31^{\circ}28'33''$ عرض شمالی است. عملیات اجرایی احداث سد از اوایل سال ۸۳ آغاز گردید. در سال ۱۳۹۳ آبگیری سد

جدول (۱): نفوذپذیری مصالح مختلف سد ایوشان

مصالح	$K_x(m/sec)$	K_y/K_x
هسته	$2/5 \times 10^{-9}$	۰/۲
پوسته	1×10^{-3}	۱
فیلتر	1×10^{-4}	۰/۵
زهکش	2×10^{-2}	۱
پی	1×10^{-9}	۱
پرده آب بند	1×10^{-7}	۱

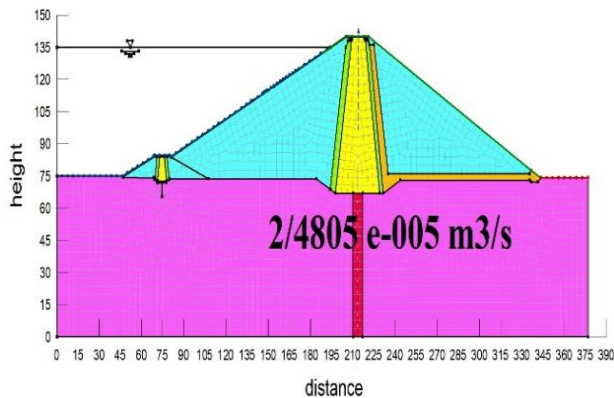
جدول (۲): پارامترهای مصالح مورد استفاده در آنالیز تنش-کرنش

مصالح	چسبندگی ی	وزن مخصوص	وزن مخصوص الاستیسی	مدول
هسته	C(CU) kPa	اشباع	مخصوص	۳۵
پوسته	-	۲۴/۵	مرطوب	۷۰
فیلتر	-	۲۲	γ_{wet} kN/m ³	۴۵
زهکش	-	۲۳	γ_{sat} kN/m ³	۵۵
پی	-	۲۵/۵		۲۵۰۰
پرده آب بند	-	۲۴		۵۰۰۰



شکل (۳): پیزومترهای پی - تراز نصب ۱۷۸۸

شکل (۴): پیزومترهای پی - تراز نصب ۱۷۷۸



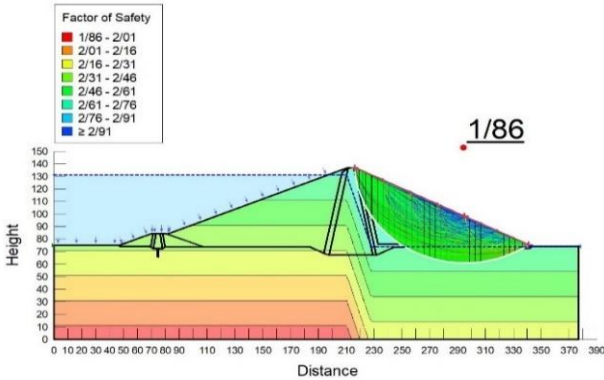
شکل (۵): دبی تراوش در واحد عرض از بدنه سد ایوشان

مدلسازی و نتایج

پس از مدلسازی سد جهت صحت‌سنجی داده‌های خروجی از تحلیل عددی مدل در نرم‌افزار Seep/w، فشار آب منفذی سد توسط پیزومترهای نصب شده در پی و بدنه آن قرائت، سپس با کانتورهای فشار آب منفذی خروجی نرم‌افزار Seep/w مقایسه شد. نتایج پیش‌بینی شده با اختلاف دبی قابل قبولی نسبت به دبی قرائت شده بدست آمدند. دبی تراوش حاصل از تحلیل عددی سد مطابق شکل (۵) مقدار $2/48e-005$ معادل $0/0167$ مترمکعب بر ثانیه در واحد طول سد (۶۷۶ متر) می‌باشد. دبی تراوش محاسبه شده توسط تجهیزات ابزار دقیق سد $0/01-0/02$ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. فشار آب موجود در پیزومترهای نصب شده در تراز ۱۷۸۸ متر در شکل (۴) نشان داده می‌شود (مهندسین مشاور آبدان فراز).

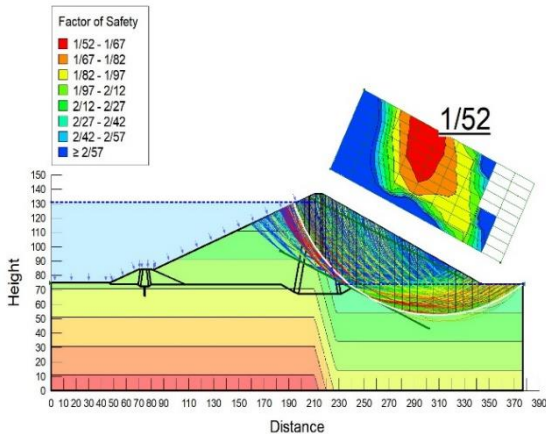
صحت‌سنجی فشار آب حفره‌ای

شکل (۴) پیژومتر (۲۲۹-۳) نصب شده در پی سد را نشان می‌دهد. این پیژومتر فشار منفذی نزدیک به ۷۰۰ کیلوپاسکال را در شکل (۴) نشان می‌دهد. این مقدار معادل فشاری است که کانتور فشار حاصل از تحلیل عددی در شکل

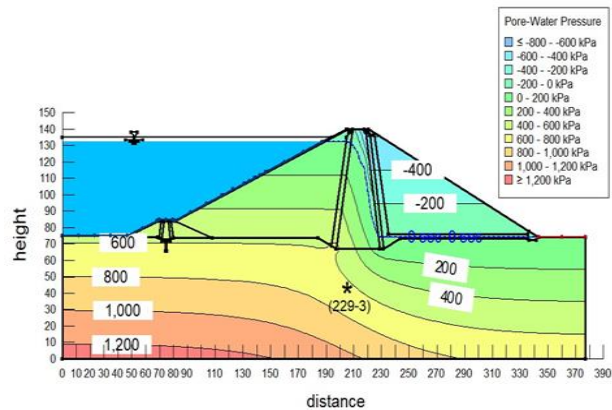


شکل (۷): محاسبه ضریب اطمینان به روش ورود و خروج

جهت صحت‌سنجی روش ورود و خروج از روش شبکه و شعاع نیز در سنجش پایداری استفاده گردید. در این روش شبکه و شعاع‌هایی در مکانی که سطح لغزش در آن مکان بررسی می‌شود توسط کاربر تعریف می‌شود. نرم‌افزار به مرکزیت هرکدام از گره‌ها به خطوط موازی دوایری مماس ترسیم می‌کند و مطابق شکل (۸) از بین مسیرهای رسم شده مسیر بحرانی لغزش را انتخاب می‌کند.



شکل (۸): انتخاب مسیر بحرانی لغزش توسط روش شبکه و شعاع

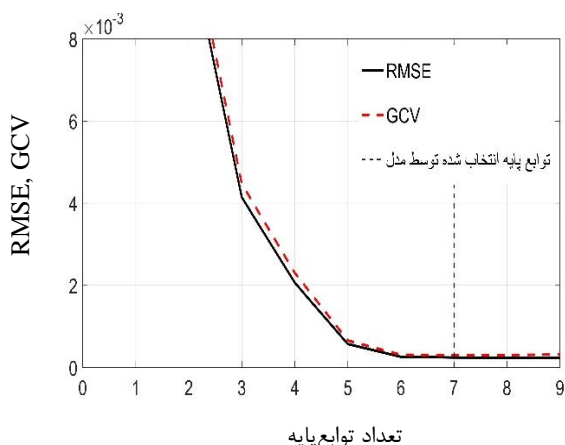


(۶) نشان می‌دهد. نتایج عددی سد مدلسازی شده و سد واقعی جهت صحت‌سنجی سد مدلسازی شده مقایسه شده است.

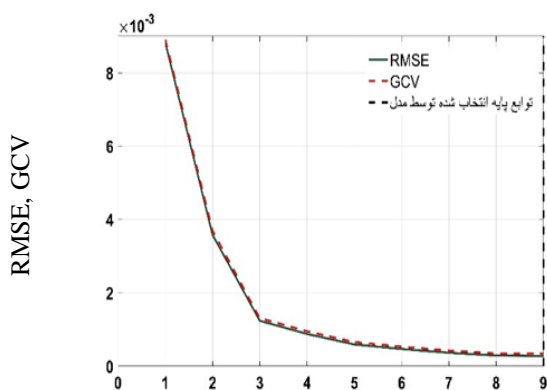
شکل (۶): کانتور فشار آب منفذی بدنه و پی سد ایوشان

ارزیابی پایداری شیروانی سد

جهت محاسبه ضریب اطمینان سطح لغزش، روش ورود و خروج و مش‌بندی با ابعاد ریز مثلثی استفاده شد، زیرا این امکان به نرم‌افزار داده می‌شود که نقاط بیشتری را در یک ناحیه مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد و نتایج دقیق‌تری را حاصل شود. این برنامه تعداد زیادی سطح لغزش را بررسی نموده و ضریب اطمینان مربوطه را نمایش می‌دهد. همچنین سطح لغزش با کم‌ترین مقدار ضریب پایداری را به عنوان سطح لغزش بحرانی تعیین می‌نماید. در شکل (۷) نتایج آنالیز به روش ورود و خروج نشان داده شده است.



شکل (۹): تعیین تعداد توابع پایه توسط مدل مارس براساس دبی نشت



شکل (۱۰): تعیین تعداد توابع پایه توسط مدل مارس براساس ضریب اطمینان

ارزیابی مدل ساخته شده توسط مدل مارس

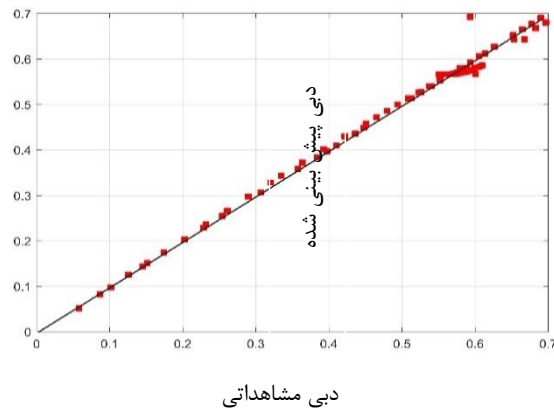
پس از ساخت مدل، بررسی و اعتبارسنجی آن انجام شد و در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب پراکندگی مناسب داده‌های محاسباتی نسبت به مقادیر قرائت شده واقعی آن‌ها در طول مراحل واسنجی و صحت‌سنجی براساس دبی نشت نشان داده شده است. مقادیر دبی پیش‌بینی شده توسط مدل مارس بسیار نزدیک به مقادیر مشاهداتی سد می‌باشد.

مدلسازی زه آب و پایداری شیروانی توسط مدل مارس

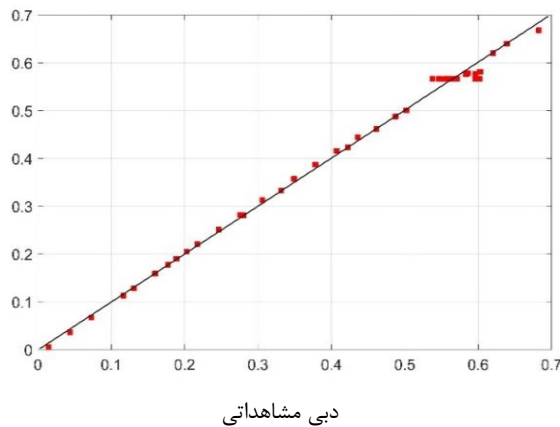
به منظور ساخت مدل، از ۲۱۴ سری داده بدست آمده از تحلیل‌های عددی Seep/w و ۳۰۰ سری داده بدست آمده از تحلیل عددی Slope/w، استفاده شده و لازم است که قبل از هرچیز این داده‌ها مورد بررسی دقیق قرار گرفته و از صحت کاربرد مناسب آن‌ها در مدلسازی مذکور اطمینان حاصل کرد. داده‌های انتخابی جهت تحلیل عددی نرم‌افزار باید در بازه مناسبی نسبت به مقدار قرائت شده واقعی انتخاب شوند که مدل بتواند از طیف وسیع‌تری از داده‌ها با خواص و ویژگی‌های متفاوت استفاده کرده و پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه دهد.

انتخاب تعداد توابع پایه توسط مدل مارس

در شکل (۹) و (۱۰) چگونگی تغییرات مقادیر میانگین مربعات خطا (RMSE) و اعتبارسنجی متقابل (GCV) در طول تکرار مرحله ساخت مدل، به ترتیب توسط نتایج Seep/w و Slope/w نشان داده شده است. همچنین در این شکل‌ها نحوه تعیین تعداد توابع پایه توسط مدل مارس نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها مدل تعداد توابع پایه بهینه را به گونه‌ای تعیین می‌کند که هم‌زمان، (RMSE) و (GCV)، کم‌ترین مقدار را داشته باشند و از آن مرحله به بعد مدل تکرار می‌شود و تغییراتی در مقادیر خطا و ضریب تبیین نداریم. در این مطالعه شرایط مذکور در تعداد توابع پایه ۷ و ۹ رخ می‌دهد.

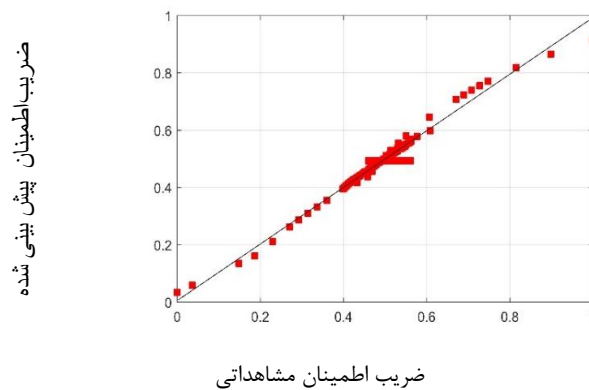


شکل (۱۱): همبستگی مدل مارس با مقادیر قرائت شده واقعی در مرحله واسنجی مدل براساس دبی نشت

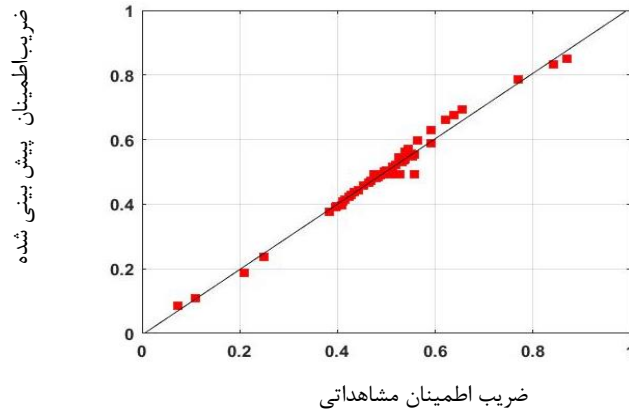


شکل (۱۲): همبستگی نتایج مدل مارس با مقادیر قرائت شده واقعی در مرحله صحت‌سنجی مدل براساس دبی نشت

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب پراکندگی مناسب پایداری نشان داده شده است. مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مارس بسیار نزدیک به ضریب اطمینان سد می‌باشد. در طول مراحل واسنجی و صحت‌سنجی براساس ضریب

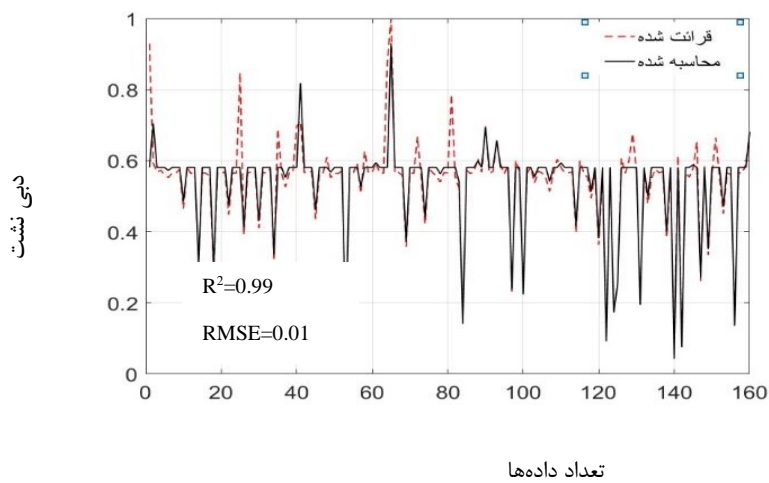


شکل (۱۳): همبستگی نتایج مدل مارس با مقادیر مشاهداتی در مرحله واسنجی مدل براساس ضریب اطمینان

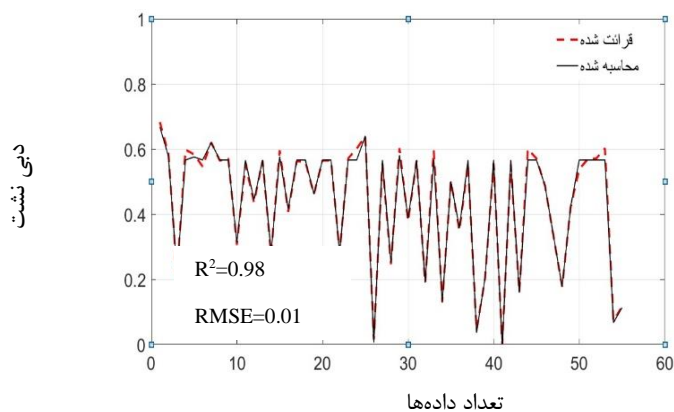


شکل (۱۴): همبستگی نتایج مدل مارس با مقادیر مشاهداتی در مرحله صحت سنجی مدل براساس ضریب اطمینان

براساس شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، مدل مارس با ضرایب تعیین نزدیک به ۱ و همچنین مقادیر میانگین مربعات خطای نزدیک به صفر به ترتیب برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، کارایی بالایی را در پیش‌بینی دبی نشت از خود نشان داده است.



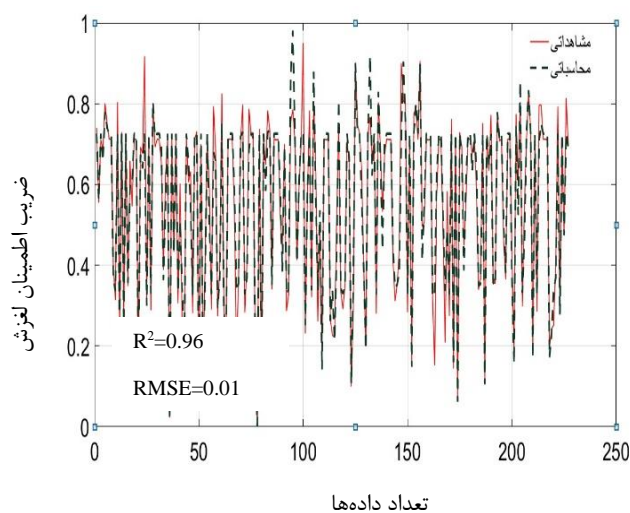
شکل (۱۵): ارزیابی کارایی مدل مارس در مرحله واسنجی مدل براساس دبی نشت



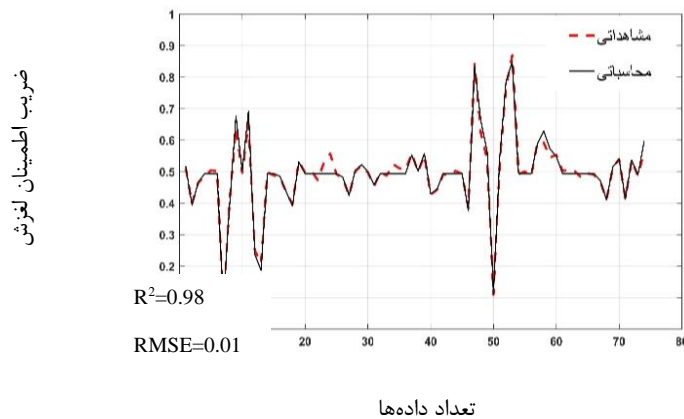
شکل (۱۶): ارزیابی کارایی مدل مارس در مرحله صحت‌سنجی مدل براساس دبی‌نشت

براساس شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مدل مارس برای پیش‌بینی ضریب اطمینان پایداری شیب سد با ضرایب تبیین نزدیک به یک و همچنین مقادیر میانگین مربعات خطای

نزدیک به صفر به ترتیب برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی کارایی بالایی را در پیش‌بینی ضریب اطمینان نشان داده است.



شکل (۱۷): ارزیابی کارایی مدل مارس در مرحله واسنجی مدل براساس ضریب اطمینان



شکل (۱۸): ارزیابی کارایی مدل مارس در مرحله صحت‌سنجی مدل براساس ضریب اطمینان لغزش

ورودی اصلی ضریب تبیین بالاتر و خطای کمتری به ترتیب در پیش‌بینی دبی نشت و ضریب اطمینان لغزش می‌باشند.

$$(K_c - NWL - K_{FO} - K_s)$$

$$(\theta_c - \psi(w)_f - \theta_s - \psi(w)_s)$$

مشهود است که مدل مارس با توجه به ضریب خطای نزدیک به صفر و ضریب تبیین نزدیک به ۱، کارایی قابل قبولی در پیش‌بینی دبی نشت و ضریب اطمینان لغزش می‌دهد. پارامترهای اثرگذار در مدلسازی بررسی شده است. این دو ترکیب از میان ترکیب‌های متعدد پارامترها نسبت به ترکیب

جدول (۴): تأثیر پارامترها بر نتایج دبی نشت

پارامتر	درصد تاثیر
KC	۱۲/۵
NWL	۲۹/۵
KF	۲/۲
KS	۴۵
Kfill	۱/۳
Kd	۱
Kcut	۱/۲
Kb	۱/۵

جدول (۳): تأثیر پارامترها بر نتایج ضریب اطمینان لغزش

پارامتر	درصد تاثیر
θ_s	۶۹/۷
Cs	۲/۸
$\psi(\text{sat})_s$	۰/۱
$\psi(w)_s$	۸
θ_c	۴
Cc	۲/۵
$\psi(w)_c$	۱/۱
θ_f	۲/۳
Cf	۲/۲
$\psi(w)_f$	۵

جدول (۶): توابع پایه مدل مارس در حالت خطی مربوط به ضریب اطمینان لغزش

توابع	معادله
H ₁ (X)	BF1 = C(Øs +1,0.265,0.529,0.765)
H ₂ (X)	BF2 = C(Øs -1,0.265,0.529,0.765)
H ₃ (X)	BF3 = C(γw(s) +1,0.286,0.536,0.732)
H ₄ (X)	BF4 = C(γw(s) -1,0.286,0.536,0.732)
H ₅ (X)	BF5 = C(γw(f) +1,0.284,0.568,0.784)
H ₆ (X)	BF6 = C(γw(f) -1,0.284,0.568,0.784)
H ₇ (X)	BF7 = BF6 * C(Øc +1,0.238,0.476,0.738)
H ₈ (X)	BF8 = BF6 * C(Øc -1,0.238,0.476,0.738)
Y=	0/544+0/583*BF1 -1.23*BF2 -0.0848*BF3 +0.222*BF4 -0.173*BF5 +0.201*BF6 +0.257*BF7 -0.317*BF8

جدول (۵): توابع پایه مدل مارس در حالت خطی مربوط به نشست

توابع پایه	معادله
H ₁ (X)	BF1 = C(kS +1,0.268,0.478,0.739)
H ₂ (X)	BF2 = C(kS -1,0.268,0.478,0.739)
H ₃ (X)	BF3 = BF1 * C(NWL +1,0.37,0.739,0.87)
H ₄ (X)	BF4 = BF1 * C(NWL -1,0.37,0.739,0.87)
H ₅ (X)	BF5 = C(kc +1,0.0178,0.0356,0.518)
H ₆ (X)	BF6 = C(kFO +1,0.009,0.018,0.509)
Y=	0/5 + 0/817*BF1 -1.07*BF2 +5.6*BF3 - 5.35*BF4 +0.385*BF5 +0.127*BF6

آنالیز حساسیت مدل^۱

آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ورودی مدل بر اساس نتایج تحلیل عددی Seep/w و Slope/w جهت تعیین

جدول (۷) جمع‌بندی کلی برای میزان خطا و دقت مدل مارس جهت پیش‌بینی دبی نشست و ضریب اطمینان پایداری نشان می‌دهد.

جدول (۷): نتایج ارزیابی مدل مارس در دو نرم‌افزار Seep/w و Slope/w

نرم افزار	واسنجی		صحت‌سنجی	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Seep/w	۰/۹۸۵۲	۰/۰۱۶۸	۰/۹۹۵۲	۰/۰۱۳۲
Slope/w	۰/۹۶۷۷	۰/۰۱۶۹	۰/۹۸۱۳	۰/۰۱۶۰

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر در چهارچوب تحلیل عددی سدهای خاکی و با تکیه بر مطالعات نشست و ضریب اطمینان لغزش سد انجام پذیرفته است. سدمخزنی‌ا پوشان در نرم‌افزار Geo-Studio مدل‌سازی و صحت مدل موجود توسط اطلاعات ابزار دقیق سد بررسی شد. آنالیز سد در نرم‌افزارهای Seep/w و Slope/w جهت تحلیل عددی نشست و ضریب پایداری شیروانی بررسی شد. با کمک نتایج حاصل از تحلیل عددی Geo-Studio مدل فراکوشی مارس تعریف و با توجه به نتایج ارزیابی مدل مارس، با توجه به مقادیر خطا و ضریب تبیین حاصل از آنالیز مدل مارس که به ترتیب به صفر و یک نزدیک هستند نتیجه می‌گیریم که مدل مارس ظرفیت بالایی در

پیش‌بینی دبی نشست و ضریب اطمینان لغزش نشان داده است. تأثیر هر پارامتر در مقادیر پیش‌بینی شده حساسیت‌سنجی شد و همچنین مناسب‌ترین ترکیب پارامترها که ضریب تبیین بیشتری و میانگین مربعات خطای کمتری را دارا باشد، برای دبی نشست و پایداری شیروانی معرفی شد. همچنین رابطه‌ای صحت‌سنجی شده جهت پیش‌بینی دبی نشست و ضریب اطمینان لغزش ارائه گردید. با استفاده از رابطه استخراج شده از این پژوهش و بدون نیاز به ساخت و همچنین ویرایش مجدد مدل MARS با صرف زمان کمتری می‌توان به پیش‌بینی دبی نشست و ضریب پایداری شیروانی پرداخت. همچنین به عنوان پیشنهاد، انجام رویکرد ارایه شده در مقاله برای سایر آنالیزهای دینامیکی سد خاکی و نیز مقایسه روش MARS با سایر الگوریتم‌های داده‌کاوی

¹ Sensivity Analysis



و یا فراکوشی برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

از سازمان آب منطقه ای استان لرستان به‌ویژه مهندسین مشاور سد ایوشان که اطلاعات مورد نیاز سد را در اختیار نویسندگان قرار دادند و کمال همکاری را با محققین این پژوهش داشتند سپاسگزاری می‌گردد.

علائم و نشانه‌ها	توضیح
پارامتر	
NWL	سطح تراز نرمال آب
K _{SHELL}	نفوذپذیری پوسته
K _{Fill}	نفوذپذیری فیلتر
K _{drain}	نفوذپذیری زهکش
K _{core}	نفوذپذیری هسته
K _{foundation}	نفوذپذیری فونداسیون
K _{Cut}	نفوذپذیری پرده آب‌بند
K _{Blanket}	نفوذپذیری بلانکت
\emptyset_{shell}	زاویه اصطکاک داخلی پوسته
\emptyset_{core}	زاویه اصطکاک داخلی هسته
$\emptyset_{foundation}$	زاویه اصطکاک داخلی فونداسیون
C _{core}	چسبندگی هسته
C _{shell}	چسبندگی پوسته
C _{foundation}	چسبندگی فونداسیون
$\gamma_{(sat)shell}$	وزن مخصوص اشباع پوسته
$\gamma_{w(shell)}$	وزن مخصوص اشباع نشده پوسته
$\gamma_{w(core)}$	وزن مخصوص اشباع نشده هسته
$\gamma_{w(filter)}$	وزن مخصوص اشباع نشده فیلتر

منابع

- . پاک نیت، ا. جواهری، ا. (۱۳۸۸). تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از GeoStudio. نشر علم عمران.
. خلیلی، م. عبداللهی، ح. (۱۳۹۵). بررسی تاثیر انواع زهکش‌ها بر میزان جریان نشت و پایداری شیروانی سدهای خاکی (سد ایزد خواست) سومین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های نوین در عمران معماری و شهرسازی.
. دقیق، ح. حسن پور درویشی، ح. موسوی جهرمی، ح. آنالیز ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی نسبت به زمان نشریه آبیاری و آب ایران، سال ۵، شماره ۲، ص ۲۸-۱۵.



- . دلاور، ا. ذو نعمت کرمانی، م. برادران، غ. (۱۳۹۵). شبیه سازی نشت در بدنه سد خاکی با استفاده از روش عددی بدون شبکه المان طبیعی (سد درودزن)، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، دوره ۳، شماره ۸، ص ۵۵-۴۵.
- . کماسی، م. بیرانوند، ب. بررسی جابجایی‌های قائم و افقی سد خاکی ایوشان با استفاده از ابزار دقیق و تحلیل عددی نشریه آبیاری و آب ایران، دوره ۵۱، شماره ۱، ص ۲۴۵-۲۵۶.

- Abraham, A., Philip, N. S., & Saratchandran, P. (2004). Modeling chaotic behavior of stock indices using intelligent paradigms. arXiv preprint cs/0405018.
- . Friedman, J. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *The annals of statistics*, 19(1), 1-67.
- . Fakhari, A., & Ghanbari, A. (2013). A simple method for calculating the seepage from earth dams with clay core. *Geoengineering*, 8(1), 27-32.
- Jamel, A. A. J. (2016). Analysis and Estimation of Seepage through Homogenous Earth Dam without Filter. *Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 38-49.
- . Kamanbedast, A., & Delvari, A. (2012). Analysis of earth dam: Seepage and stability using Ansys and Geo-studio software. *Sciences Journal*, 17(9), 1087.
- . Kumar, V., Samui, P., Himanshu, N., & Burman, A. (2019). Reliability-Based Slope Stability Analysis of Durgawati Earthen Dam Considering Steady and Transient State Seepage Conditions Using MARS and RVM. *Indian Geotechnical Journal*, 49(6), 650-666.
- Miao, F., Wu, Y., Li, L., Tang, H., & Li, Y. (2018). Centrifuge model test on the retrogressive landslide subjected to reservoir water level fluctuation. *Engineering Geology*, 245, 169-179.
13. Robbins, B. A., van Beek, V. M., López-Soto, J. F., Montalvo-Bartolomei, A. M., & Murphy, J. (2018). A novel laboratory test for backward erosion piping. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(5), 266-279.
- .Sherard, J. L. ,Woodward, RJ, Gizienski, SF, and Clevenger, WA, 1963, Earth and earth-rock dams.
- . Schmertmann, G.R., V.E. Chourey - Curtis. Johansson, R.D., and Bonaparte,R. ,(1987). " Design charts for Geogrid-r-." *J. Eng. Tech* 23.12 (2004): 750-766.
- . Yang, C. C., Prasher, S. O., Lacroix, R., & Kim, S. H. (2003). A multivariate adaptive regression splines model for simulation of pesticide transport in soils. *Biosystems Engineering*, 86(1), 9-15.



Seepage Forecasting in Earth Dam Using Multivariate Adaptive Regression Spline Method (MARS), Case Study: Eyvashan Dam

Mahvash Korzebor¹, Mehdi Komasi², Ahmadreza Mazaheri³

Abstract

The accurate design of the geometry and the sealing layers of the earth dam to obtain the optimum structure are important from a practical and economic point of view. Due to the complexity of the analytical methods, the numerical method is the best practical solution for measuring the mechanical behavior of the dam including seepage and slope stability. In this study, reliability analysis of seepage and slope stability of Eyvashan dam has been performed using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). The Eyvashan earth dam was modeled in Seep/w and Slope/w Software's and the model was validated by observational data of instruments. Then, forecasting of seepage and slope stability was investigated by MARS method. For this purpose, 214 data series from Seep/w numerical analysis and 300 data series from Slope/w numerical analysis were used to establish the MARS model. The model was evaluated and validated by these data. The MARS model showed high performance in modeling process with determination coefficients of 0.98 and 0.97 and the root mean square error of 0.0132 and 0.0160 for seepage discharge and safety of factor of slope stability, respectively. Also, in this study, the effective parameters in seepage and slope stability such as permeability of materials, internal friction angle of soil, specific weight of materials and upstream water level were sensitized to determine the best combination of modeling input's structure. The parameters of the upstream water level 29.5% and the permeability of the core 12.5% had the greatest effect on the seepage and internal friction angle of shell with 69.7% had the greatest effect on the factor of safety. Also, suitable combinations of input parameters were presented and a comprehensive relationship was obtained to accurately estimate the seepage discharge and factor of safety in different modes of layer arrangement and their characteristics.

Keywords: Seepage, Factor of Safety, MARS model, Eyvashan dam, Slope/w Software.

¹ Master of Science Civil Engineering, Water Engineering and Hydraulic Structures of University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran. mahvashkorzebor71@yahoo.com.

² Associate Professor of Civil Engineering Department, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran, Komasi@abru.ac.ir. (Corresponding Author)

³ Assistant Professor of Civil Engineering Department, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran. a.mazaheri@abru.ac.ir.

Extended Abstract

Research Paper

Seepage Forecasting in Earth Dam Using Multivariate Adaptive Regression Spline Method (MARS), Case Study: Eyvashan DamMahvash Korzebor¹, Mehdi Komasi² Ahmadreza Mazaheri³

1. Master of Science Civil Engineering, Water Engineering and Hydraulic Structures of University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran. mahvashkorzebor71@yahoo.com.

2. Associate Professor of Civil Engineering Department, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran, Komasi@abru.ac.ir. (Corresponding Author)

3. Assistant Professor of Civil Engineering Department, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Iran. a.mazaheri@abru.ac.ir.



10.22125/IWE.2021.235780.1404

Received:**13. August.2020**

Accepted:

19. January.2020

Available online:

10. January.2022

Keywords: Seepage, Factor of Safety, MARS model, Eyvashan dam, Slope/w Software.

Abstract

The accurate design of the geometry and the sealing layers of the earth dam to obtain the optimum structure are important from a practical and economic point of view. Due to the complexity of the analytical methods, the numerical method is the best practical solution for measuring the mechanical behavior of the dam including seepage and slope stability. In this study, reliability analysis of seepage and slope stability of Eyvashan dam has been performed using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). The Eyvashan earth dam was modeled in Seep/w and Slope/w Software's and the model was validated by observational data of instruments. Then, forecasting of seepage and slope stability was investigated by MARS method. For this purpose, 214 data series from Seep/w numerical analysis and 300 data series from Slope/w numerical analysis were used to establish the MARS model. The model was evaluated and validated by these data. The MARS model showed high performance in modeling process with determination coefficients of 0.98 and 0.97 and the root mean square error of 0.0132 and 0.0160 for seepage discharge and safety of factor of slope stability, respectively. Also, in this study, the effective parameters in seepage and slope stability such as permeability of materials, internal friction angle of soil, specific weight of materials and upstream water level were sensitized to determine the best combination of modeling input's structure. The parameters of the upstream water level 29.5% and the permeability of the core 12.5% had the greatest effect on the seepage and internal friction angle of shell with 69.7% had the greatest effect on the factor of safety. Also, suitable combinations of input parameters were presented and a comprehensive relationship was obtained to accurately estimate the seepage discharge and factor of safety in different modes of layer arrangement and their characteristics.

1. Introduction

Seepage with stability analysis of dams is assessed through Plaxis 3D and then compared with the obtained results achieved by the numerical solution of Laplace equation. In their analysis through Plaxis 3D software, it is revealed that the accuracy of Plaxis 3D software is more than that of the numerical solution method of Laplace equation (Kumar, 2019). In a comparative study, Kamanbedast (2012) found that Ansys showed a seepage rate 18% lower than Geostudio. Damluji (2004) compared seepage in steady state with the FEM and BEM methods. Inefficiency in cases of nonlinear equations and non-uniform form is one of the disadvantages of the BEM. The accurate design of the geometry and the sealing layers of the earth dam to obtain the optimum structure are important from a practical and economic point of view. Due to the complexity of the analytical methods, the numerical method is the best practical solution for measuring the mechanical behavior of the dam including seepage and slope stability.

2. Materials and Methods

The presented model in this study has two steps. In the first part, the Eyvashan dam was modeled in seep/w and slope/w software and the different combinations of structure were used to produce data for MARS modeling. In this way to validate the model in seep/w software seepage, the discharge from numerical analysis of seep/w software was compared with the observational seepage discharge from the instrument mounted in the dam. Also, the pore water pressure of the piezometers mounted in the dam was compared with the pore water pressure shown in the software. In addition, both Grid & Radius and Entry & Exit methods were used to validate the model analyzed by slope/w software. In the second step, the results given by the numerical analysis of seep/w and slope/w were introduced to the MARS model. In this way, the Eyvashan earth dam was modeled in Seep/w and Slope/w Software's and the model was validated by observational data of instruments. Then, forecasting of seepage and slope stability was investigated by MARS method. For this purpose, 214 data series from Seep/w numerical analysis and 300 data series from Slope/w numerical analysis were used to establish the MARS model.

3. Results

In order to construct the model, 214 data series obtained from numerical analysis of seep/w, and 300 series of data obtained from numerical analysis of slope/w were used. Firstly, these data need to be carefully examined and assured of their proper use in the above modeling. The MARS model showed high performance in modeling process with determination coefficients of 0.98 and 0.97 and the root mean square error of 0.0132 and 0.0160 for seepage discharge and safety of factor of slope stability, respectively. Figs. 1 and 2 show the scatter plot of the actual normalized factor of safety versus predicted normalized factor of safety for training and testing data set

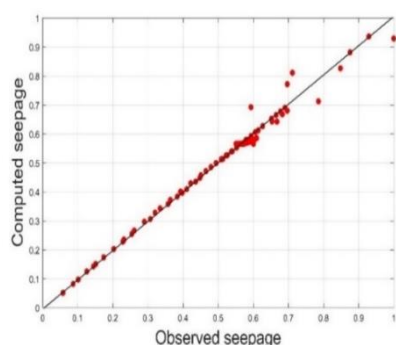


Fig. 1. Computed and observed seepage
For calibration step.

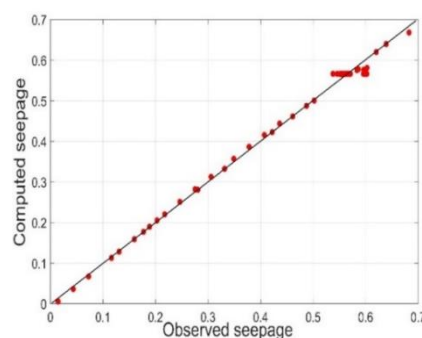


Fig. 2. Computed and observed seepage
For validation step.

Also, in this study, the effective parameters in seepage and slope stability such as permeability of materials, internal friction angle of soil, specific weight of materials and upstream water level were sensitized to determine the best combination of modeling input's structure. The parameters of the upstream water level 29.5% and the permeability of the core 12.5% had the greatest effect on the seepage and internal friction angle of shell with 69.7% had the greatest effect on the factor of safety. Also, suitable combinations of input parameters were presented and a comprehensive relationship was obtained to accurately estimate the seepage discharge and factor of safety in different modes of layer arrangement and their characteristics.

4. Discussion and Conclusion

The MARS model has shown a high capacity in predicting seepage discharge and safety factor for slope stability in earth dam. The effect of each parameter on the predicted values was sensitized and also the most suitable combination of parameters was determined via determination of coefficient and RMSE criterions. In this way, validated relationships were presented to predict for seepage discharge and slope stability. Using these relationship, less time is needed to predict seepage discharge and slope stability. It is also suggested to perform the approach presented in the paper for other dynamical analyzes of the earth dam and also to compare the MARS model with other data mining or meta-heuristic algorithms for future research.

5. Six important references

1. Abraham, A., Philip, N. S., & Saratchandran, P. (2004). Modeling chaotic behavior of stock indices using intelligent paradigms. arXiv preprint cs/0405018.

Friedman, J. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *The annals of statistics*, 19(1), 1-67.

2. Fakhari, A., & Ghanbari, A. (2013). A simple method for calculating the seepage from earth dams with clay core. *Geoengineering*, 8(1), 27-32.

Jamel, A. A. J. (2016). Analysis and Estimation of Seepage through Homogenous Earth Dam without Filter. *Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 38-49.

3. Kamanbedast, A., & Delvari, A. (2012). Analysis of earth dam: Seepage and stability using Ansys and Geo-studio software. *Sciences Journal*, 17(9), 1087.

Miao, F., Wu, Y., Li, L., Tang

4. H., & Li, Y. (2018). Centrifuge model test on the retrogressive landslide subjected to reservoir water level fluctuation. *Engineering Geology*, 245, 169-179.

5. Robbins, B. A., van Beek, V. M., López-Soto, J. F., Montalvo-Bartolomei, A. M., & Murphy, J. (2018). A novel laboratory test for backward erosion piping. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(5), 266-279.

6. Sherard, J. L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., and Clevenger, W.A., 1963, Earth and earth-rock dams.

Schmertmann, G.R., V.E. Chourey - Curtis. Johansson, R.D., and Bonaparte, R., (1987). "Design charts for Geogrid-r-." *J. Eng. Tech* 23.12 (2004): 750-766.

70Yang, C. C., Prasher, S. O., Lacroix, R., & Kim, S. H. (2003). A multivariate adaptive regression splines model for simulation of pesticide transport in soils. *Biosystems Engineering*, 86(1), 9-15

Authors declared no conflict of interest.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.