نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره هشتم / بهار ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 8 / June 2016

شبیه‌سازی نشت در بدنه سد خاکی با استفاده از روش عددی بدون شبکه المان طبیعی، مطالعه موردی: سد درودزن

الهام دلاور[۱]
محمد ذونعمت کرمانی*[۲]
غلامحسین برادران[۳]

چکیده

فرسایش داخلی و تراوش در سدهای خاکی یکی از عوامل اصلی شکست سد بوده و بررسی آن از مسائل مهم در پایش و مراقبت از سد است؛ ازجمله راهکارهای مؤثر در این زمینه، مدل‌سازی عددی تراوش در بدنه سد و مشخص کردن بالاترین خط نشت (فریاتیک) است. به این منظور در این تحقیق از روش بدون شبکه المان طبیعی (NEM) با درون‌یاب سیبسون برای مدل‌سازی نشت در بدنه سد خاکی درودزن استفاده شد. در ابتدا به‌منظور صحت‌سنجی دقت روش NEM، شبیه‌سازی رفتار جریان متخلخل و میزان دبی نشت درون بدنه یک بند نیمه-تراوا انجام شد. پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل، شبیه‌سازی نشت در بدنه سد درودزن انجام شد. به‌منظور کنترل نتایج، مقادیر محاسباتی با برداشت‌های مشاهداتی تراز سطح آب پیزومترهای بدنه مقایسه شد. با توجه به میانگین خطای تفاضلی نسبی کمتر از ۵ درصد، می‌توان صحت نتایج شبیه‌سازی را تأیید کرد. یافته‌های حاصل از پژوهش، عدم وجود پدیده فرسایش داخلی و رگاب در بدنه سد را به فراخور تغییر نکردن ضریب نفوذپذیری در طی زمان و عملکرد صحیح زهکش بدنه تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

روش المان طبیعی، نشت، روش‌های بدون شبکه، درون‌یاب سیبسون، زهکش داخلی.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه شهید باهنر کرمان،کرمان، ایران.
۲*. استادیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، zounemat@uk.ac.ir.
۳. دانشیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۹

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

مقدمه

جریان آب در بدنه سدها باعث به وجود آمدن فشارهای حفره‌ای می‌شود و در صورت تجاوز از حد بحرانی می‌تواند باعث شکست و تخریب سد شود. در پی مدل‌سازی بدنه سد و تعیین خط فریاتیک[1]، می‌توان فشار آب در هر نقطه را تعیین کرد. لازم به ذکر است که تعیین دقیق موقعیت خط جریان فریاتیک در بدنه سدهای خاکی در مسائل مربوط به پایداری آن‌ها اهمیت فراوان دارد. یکی از مرسوم‌ترین و حائز اهمیت‌ترین روش‌های شبیه‌سازی رفتار جریان، روش‌های عددی هستند. روش‌های مدل‌سازی عددی به دو گروه کلی روش‌های مبتنی بر شبکه[2] و روش‌های بدون شبکه[3] تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک معایب و مزایای خاص خود را دارند. از میان روش‌های مبتنی بر شبکه، روش اجزاء محدود[4]، تفاضل محدود[5] و احجام محدود[6] به‌صورت گسترده‌ای در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای کاربرد دارند؛ شایان‌ذکر است که روش‌های احجام محدود و اجزاء محدود وابستگی زیادی به نحوه و شکل شبکه داشته و این در حالی است که توابع شکل روش‌های وابسته به شکل بر روی شبکه‌ها و مرز المان‌ها از انعطاف کافی برخوردار نیستند. افزون بر این، در حل مسائل با شرایط مرزی متغیر (همانند جریان آزاد آب در بدنه سدهای خاکی)، روش‌های عددی که نیاز به المان‌بندی ناحیه مسئله دارند، به دلیل نیاز به مش‌بندی مجدد در هر بار تحلیل، زمان‌بر بوده و توصیه نمی‌شوند (آیدلسون[7] و همکاران(۲۰۰۳) و یو[8] و همکاران(۲۰۰۴)).

یکی از روش‌های غلبه بر مشکلات موجود در روش‌های مبتنی بر شبکه، به‌کارگیری روش‌های بدون شبکه است. روند روش‌های بدون شبکه عبارت است از ایجاد یک سری نقاط گرهی در محدوده مسئله بدون پیوستگی و ارتباط از پیش تعریف‌شده بین آن‌ها. این خاصیت امکان تغییر در تعداد نقاط گرهی را به‌راحتی امکان‌پذیر می‌کند (کوئتو[9] و همکاران، ۲۰۰۳).

درواقع، روش‌های بدون شبکه بر اساس نوع تعریف توابع شکل و چگونگی کمینه کردن توابع تقریب (شکل قوی - شکل ضعیف) تقسیم‌بندی می‌شوند (شاهرخ‌آبادی و توفیق، ۱۳۸۸). از مهم‌ترین انواع روش‌های بدون شبکه می‌توان به روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده[10] (موسوی نژاد و ماکویی، ۱۳۹۲)، حرکت کمینه مربعات[11]، روش بدون شبکه گالرکین[12]، روش پتروف گالرکین (تقی پور و رحمانی فیروز جائی،۱۳۹۲) و المان طبیعی[13] (مارتینز[14] و همکاران، ۲۰۰۳) اشاره نمود. ابداع و شروع به کار روش‌های بدون شبکه را می‌توان از آغاز به کار روش هیدرودینامیک ذرات هموارشده، توسط گینگولد و مونقان[15] در سال ۱۹۷۷ دانست. این روش مبتنی بر دیدگاه لاگرانژی است (دیدگاهی که در آن دستگاه مختصات به همراه حرکت سیال جابه‌جا می‌شود) و اولین بار در مدل‌سازی پدیده‌های نجومی به کار گرفته شد. بیلیشکو[16] و همکاران در سال ۱۹۹۴ روش بدون شبکه گالرکین[17] را ارائه کردند و در ادامه روش المان طبیعی توسط سوکومار[18] و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شد (ژانگ[19] و همکاران، ۲۰۱۴). این روش بر اساس مفهوم همسایه طبیعی استوار است. مزیت عمده این روش در تعیین توابع شکل، استفاده از دیاگرام وورونی است که باعث پایداری و نهایتاً سادگی در اعمال شرایط مرزی اساسی می‌شود (شاهرخ‌آبادی و توفیق،۱۳۸۸).

درون‌یاب‌های مورداستفاده در NEM درون‌یاب سیبسون و غیر سیبسون[20] است که درون‌یاب غیر سیبسون، قابلیت اعمال دقیق شرایط مرزی اساسی را در مرزهای محدب و غیر محدب دارد (سوکومار[21] و همکاران، ۲۰۰۱). در مقایسه با MLS، درون‌یاب همسایه طبیعی برخی ویژگی‌های جذاب و متمایز ازجمله خواص درون‌یابی گره‌ها و سهولت در اعمال شرایط مرزی را ارائه می‌دهد. روش بدون شبکه‌ی المان

[1] Feryatic Line
[2] Mesh base Method
[3] Mesh free Method
[4] Finite Element Method
[5] Finite Difference Method
[6] Finite Volume Metod
[7] Idelsohn
[8] Yoo
[9] Cueto
[10] SPH
[11] MLS
[12] EFG
[13] Natural Element Method
[14] Martinez
[15] Gingold & Monaghan
[16] Belyschko
[17] EFG
[18] Sukumar
[19] Zhang
[20] Non-Sibson
[21] Sukumar

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

طبیعی در مسائل مقدار مرزی کاربرد فراوان دارد ضمن اینکه برای مدل کردن ناپیوستگی‌ها (همچون ترک) نیز به‌خوبی از این روش استفاده می‌شود. امروزه NEM به‌طورمعمول در دینامیک سیالات، مکانیک جامدات، شکل‌دهی فلزات، اتصال ساختار سیال، بیومکانیک و غیره استفاده می‌شود (جی[1] و همکاران، ۲۰۱۳).

هدف از انجام این تحقیق مدل‌سازی نشت در بدنه سد خاکی درودزن به‌منظور تعیین موقعیت خط فریاتیک است؛ برای نیل به این هدف از روش عددی بدون شبکه المان طبیعی استفاده شده است. در ابتدا به‌منظور صحت سنجی روش مورداستفاده، میزان نشت در یک بند خاکی نیمه-تراوا مورد مدل‌سازی قرار گرفت و نتایج با مشاهدات صحرایی و حل عددی به روش‌های اجزای محدود و المان مرزی مقایسه شد. در ادامه نشت در سد خاکی درودزن مدل‌سازی و خط فریاتیک و خطوط کنتور سرعت در بدنه سد تعیین شد و نتایج آنالیز با گزارش پیزومترهای موجود در بدنه سد مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول (۱): مشخصات ساختمانی و تأسیسات سد درودزن

عنوان	مقدار/مشخصات
نوع بدنه سد	خاکی همگن با زهکش دودکشی
ارتفاع از پی	۵۷ متر
ارتفاع از بستر	۸۴ متر
طول تاج	۷۱۰ متر
نسبت طول به ارتفاع	۱۲
عرض تاج سد	۷ متر
بیشترین عرض بدنه در پی	۴۰۰ متر
تراز تاج سد	۱۶۸۳/۵
نوع سرریز	بتنی آزاد
ظرفیت سرریز	۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه
دوره بازگشت سیلاب طراحی	۱۰۰۰۰ ساله

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه و سد درودزن

سد درودزن ازجمله مفیدترین سدهای حاضر کشور است. این سد با سابقه بیش از ۴۰ سال بهره‌برداری، نقش حیاتی را در تأمین آب شرب شهر شیراز، آب مصرفی صنایع پتروشیمی شیراز، تأمین آب کشاورزی برای اراضی پایین‌دست و تولید برق ایفا نموده و از سازه‌های آبی ارزشمند جنوب کشور به شمار می‌رود. این سد در محدوده ۳۰ درجه عرض شمالی و ۵۲ درجه طول شرقی در جنوب مرکزی ایران و در فاصله‌ی ۸۵ کیلومتری شمال باختری شهر شیراز قرار دارد (شکل ۱-الف). سد درودزن بر روی رودخانه کر و در حوزه آبریز دریاچه-ی بختگان احداث شده است (شکل ۱-الف)؛ در جدول (۱) مشخصات کلی سد درودزن ارائه شده است (شرکت آب منطقه‌ای فارس، ۱۳۹۲).

ابزارهای اندازه‌گیری تراز پیزومتریک در سد درودزن شامل ۱۲ دستگاه پیزومتر کاساگرانده و ۲ دستگاه پیزومتر لوله قائم است. پیزومتر کاساگرانده در ۳ مقطع طولی و ۴ مقطع عرضی در بدنه و پی سد نصب‌شده‌اند (شکل ۱- ب).

در ادامه از پیزومترهای شماره ۲ و ۱۳ به‌منظور کنترل محاسبات از گزارش‌های ایجادشده استفاده شده است (شرکت آب منطقه‌ای فارس، ۱۳۹۲).

معادلات حاکم بر نشت

معادله حاکم بر نشت جریان اشباع برای سیال تراکم‌ناپذیر و همگن، در مسائل دوبعدی به شکل زیر است (جی و همکاران (۲۰۱۲) و شاهرخ‌آبادی و توفیق[2] (۲۰۱۳)):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = 0 \qquad (۱)$$

که k_y و k_x = به ترتیب ضریب نفوذپذیری در جهت x وy و h=هد یا بار آبی کل که طبق معادله برنولی برابر است با:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + y + \frac{v^2}{2g} \qquad (۲)$$

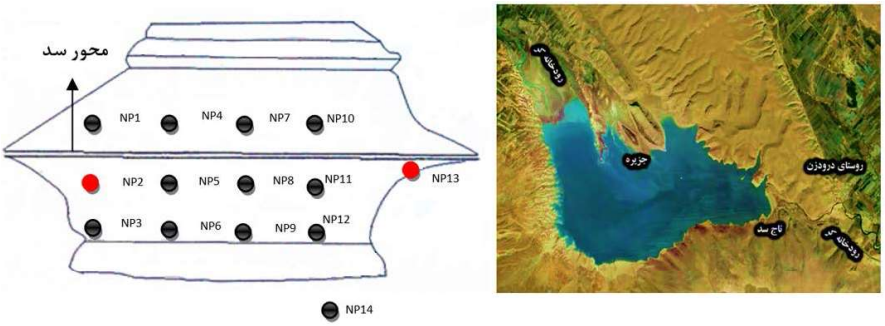
در معادله فوق $\frac{p}{\gamma w}$ = هد معادل فشار، y= هد ارتفاع و $\frac{v^2}{2g}$ = هد معادل سرعت.

[2] Shahrokhabadi & Toufigh

[1] Jie

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]



الف) ب)

شکل (۱): سد درودزن الف) تصویر ماهواره‌ای سد و ب) پلان جانمایی پیزومترهای موجود در سد (پیزومترهای شماره ۲ و ۱۳ مربوط به بدنه سد هستند)

الگوریتم حل روش بدون شبکه المان طبیعی

درروش المان طبیعی به‌منظور جداسازی معادله دیفرانسیل، ابتدا فرم ضعیف استخراج‌شده و پس‌ازآن انتگرال فرم ضعیف، به انتگرال روی مثلث‌های دلاونی شکسته می‌شود. لازم به ذکر است که درروش المان طبیعی روی هم‌گذاری معادلات بر اساس موقعیت گره‌های محاسباتی است. به‌این‌ترتیب که نقاط گوس لازم برای محاسبه انتگرال در داخل هر مثلث دلاونی مشخص می‌شود و سپس در روند تحلیل عددی برنامه، محاسبات لازم برای هر یک از نقاط گوس انجام می‌گردد. برای هر نقطه گوسی، ابتدا تمامی گره‌های مؤثر بر نقطه گوس موردنظر تعیین می‌شوند، سپس جملات ماتریس سختی مرتبط با گره‌های موردنظر محاسبه شده و با توجه به شماره عمومی گره‌ها در محل صحیح از ماتریس سختی جای می‌گیرند. در پایان این رویه ماتریس سختی کامل می‌شود.

دیاگرام وورونی مرتبه اول

دیاگرام وورونی و شبکه‌بندی دلاونی یکی از اساسی‌ترین و مفیدترین ابزارهایی هستند که یک مجموعه نامنظم نقاط (گره‌ها) را تعریف می‌کنند. مجموعه‌ای از گره‌های مجزا به‌صورت $N=\{n_1; n_2; \dots n_M\}$ را در فضای R^2 در نظر بگیرید (شکل ۲) دیاگرام وورونی مرتبه اول برای مجموعه N، تقسیمی از دامنه مسئله به نواحی است که هر ناحیه‌ی V_I به گره n_I نسبت داده می‌شود به‌طوری‌که هر نقطه دلخواه در این ناحیه به گره n_I نزدیک‌تر از هر گره دیگر است (شکل ۲). به این نواحی V_I سلول‌های وورونی مرتبه‌ی اول گفته می‌شود:

$$V_I = \{X(x,y) \in R^2 : d(x,X_1) \le (d(x,X_J) \forall I \ne J\} \quad (۳)$$

به‌طوری‌که $X(x,y)$ = مختصات نقطه‌ای در فضای دوبعدی و محدود به دامنه حل و $d(x,X_1)$ = فاصله اقلیدسی بین x و X_J. در محاسبات دستی دیاگرام وورونی را می‌توان با رسم عمودمنصف‌های بین هر دو گره به دست آورد. اگر گره‌های سلول‌های وورونی که باهم مرز مشترک دارند با خط به هم وصل شوند مثلث‌هایی تشکیل می‌شود که به آن‌ها مثلث‌های دلاونی گفته می‌شود که در شکل (۳-الف) نشان داده‌شده است (دربانی[1] و همکاران، ۲۰۱۱). این مثلث‌ها دارای این خصوصیت هستند که اگر دایره محیطی گذرنده از سه رأس هر یک از این مثلث‌ها رسم شود هیچ گره دیگری درون این دایره قرار نمی‌گیرد (شکل ۳-ب). ازنقطه‌نظر درون‌یابی همسایه طبیعی به این دایره‌ها، دایره‌های محیطی همسایه طبیعی گفته می‌شود که می‌توان جهت پیدا کردن هم‌جوارهای طبیعی از آن‌ها استفاده نمود. بدین نحو که اگر نقطه X داخل دایره مثلث DT(ni, nj, nk) قرار گیرد به این معناست که ni , nj ,nk هم‌جوارهای طبیعی X خواهند بود. به همین روش همه گره‌های اطراف X به همین صورت کنترل می‌شوند تا تمامی هم‌جوارهای طبیعی آن مشخص شود (سوکومار و همکاران، ۱۹۹۸).

[1] Darbani

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

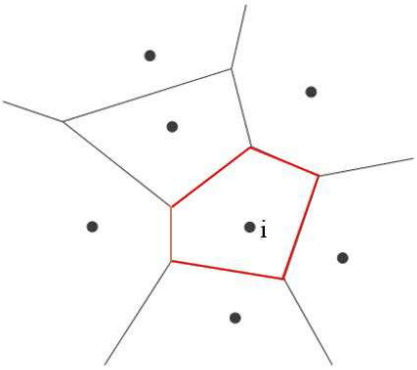
دیاگرام وورونی مرتبه دوم

دیاگرام وورونی مرتبه دوم برای دو نقطه i, j به این صورت تعریف می‌شود که مجموعه نقاطی از محدوده هستند که پس از گره j با گره i کمترین فاصله را داشته باشند.

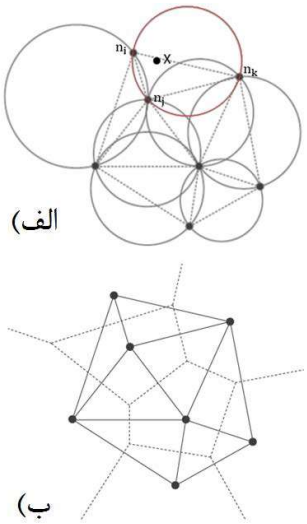
$$V(i,j) = \{X \in R^2 | d(x,X_j) \leq (d(x,X_i) \leq (d(x,X_k) \forall k \neq i,j\} \quad (۴)$$

برای رسم دیاگرام وورونی مرتبه دوم $V(i,j)$ می‌توان ابتدا بدون در نظر داشتن نقطه j دیاگرام وورونی را برای بقیه نقاط رسم کرد در این حالت قلمرو گره i، $V(i)_{-j}$ نام گذاری می‌شود سپس با در نظر گرفتن گره j، مجدداً اقدام به ترسیم دیاگرام وورونی نمود، در این حالت قلمرو گره j را $V(j)$ می‌نامند. دیاگرام وورونی مرتبه دوم گره‌های i , j برابر با اشتراک دو محدوده‌ی $V(i)_{-j}$ و $V(j)$ است (رابطه (۵) و شکل (۴)).

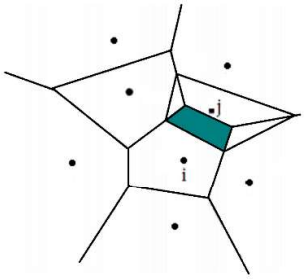
$$V(i)_{-j} = \{x \notin R^d | d(x,X_k) \forall k \neq i,j\}$$
$$V(j) = \{x \in R^d | d(x,X_j) \leq (d(x,X_k) \forall k \neq i,j\}\} \quad (۵)$$
$$V(i,j) = \{x \in (V(i), V(j))\}$$



شکل(۲): دیاگرام وورونی مرتبه اول گره i



شکل(۳): الف) مثلث‌های دلاونی و ب) دایره‌های محیطی همسایه طبیعی متشکل از ۷ گره



شکل(۴): دیاگرام وورونی مرتبه دوم گره‌های i, j

تابع شکل سیبسون

درروش سیبسون برای به دست آوردن مقدار تابع گره i روی نقطه دلخواه X با مختصات $X=[x, y]$ (در حالت دوبعدی) به‌صورت زیر عمل می‌شود. با در نظر داشتن مساحت (حجم برای مسائل سه‌بعدی- طول برای مسائل یک‌بعدی) دیاگرام وورونی مرتبه اول برای نقطه X را $A(X)$ و مساحت (حجم/طول) دیاگرام وورونی مرتبه دوم برای گره i و نقطه X را با $A_i(X)$ مشخص کنیم، تابع شکل گره i روی نقطه X به‌صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\emptyset_i(X) = \frac{A_i(X)}{A(X)} \quad (۶)$$

همچنین مشتق تابع شکل به‌صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \emptyset_i(X)}{\partial X_j} = \emptyset_{i,j}(X) = \frac{A_{i,j} - \emptyset_i(X) A_{i,j}(X)}{A(X)}$$

(j=1,2,3) (۷)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

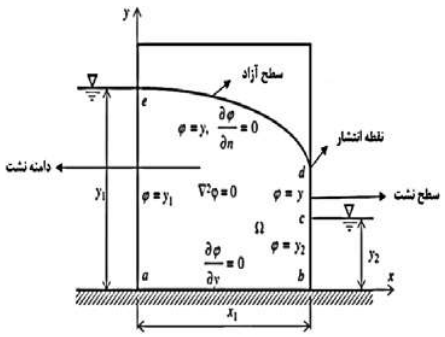
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

واضح است گره‌های همسایه نقطه X روی نقطه X مقدار تابع شکل غیر صفر دارند (فرین[1]، ۲۰۰۳).

شرایط مرزی

برای حل هر معادله دیفرانسیل احتیاج به شرایط مرزی و اولیه است. به‌طوری‌که انتخاب شرایط مرزی نامناسب ممکن است منجر به ایجاد خطا در مدل و تفاوت بین پاسخ مدل و سیستم واقعی گردد. درروش المان‌های طبیعی به دلیل تأمین خاصیت دلتاکرونکر، اعمال شرایط مرزی چندان سخت نیست به‌طوری‌که تحلیل‌گر می‌تواند این شرایط را روی هندسه مسئله پیاده کند.

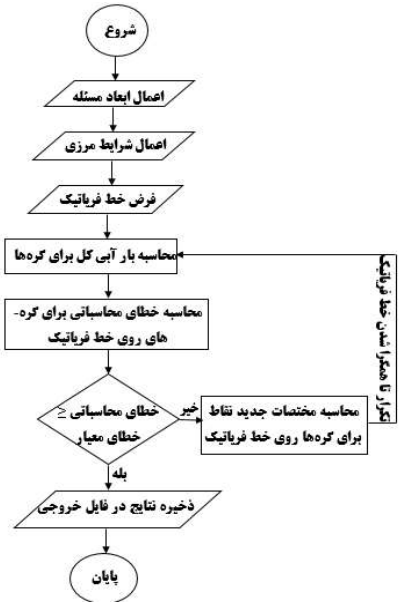
ازآنجاکه تابع شکل المان طبیعی در نواحی مرزی به‌صورت خطی است و فقط گره‌های مرزی در آن نواحی مؤثرند لذا می‌توان گفت که اعمال شرایط مرزی درروش المان طبیعی نیز مانند روش اجزای‌محدود است (اندرسون و ووزنر[2]، ۱۹۹۲). به‌منظور مدل‌سازی نشت در بدنه سدهای خاکی، سه نوع شرایط مرزی بر مسئله حاکم خواهد بود. به‌طور مثال در بند نشان داده‌شده در شکل (۵) مرزهای ae و bc و cd شرایط مرزی از نوع دریشله است. در مرز ab شرایط مرزی نیومن حاکم است چراکه مشتق h برابر با $\frac{\partial h}{\partial y}=0$ مشخص است. در مرز ed شرایط مرزی از نوع مختلط تعریف می‌شود. (ذکر این نکته الزامی است که بار آبی کل را در مسائل نشت هم با h و هم با ϕ نمایش می‌دهند).



شکل(۵): جریان عبوری از یک بند مستطیل شکل دوبعدی (چایو[3] و همکاران، ۲۰۱۱)

تعیین موقعیت خط فریاتیک

به‌طورکلی در حل مسائل نشت به‌منظور تعیین خط فریاتیک، دو استراتژی در گره‌گذاری وجود دارد؛ در حالت اول می‌توان تمام دامنه‌ی مسئله را گره‌گذاری کرد و در حالت دوم به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی، در لحظه شروع محاسبات سطح آزاد اولیه را فرض نمود؛ در این تحقیق روال حل مسئله بر پایه‌ی استراتژی دوم است که در ادامه فرآیند مربوطه در فلوچارت (روندنما) شکل (۶) ارائه شده است.



شکل(۶): روندنمای فرآیند تعیین موقعیت خط فریاتیک

نتایج

تهیه و توسعه مدل عددی

به‌منظور برپایی و اجرای مدل عددی، یک برنامه رایانه‌ای در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار "MATLAB" توسط نگارندگان تهیه و توسعه داده شد.

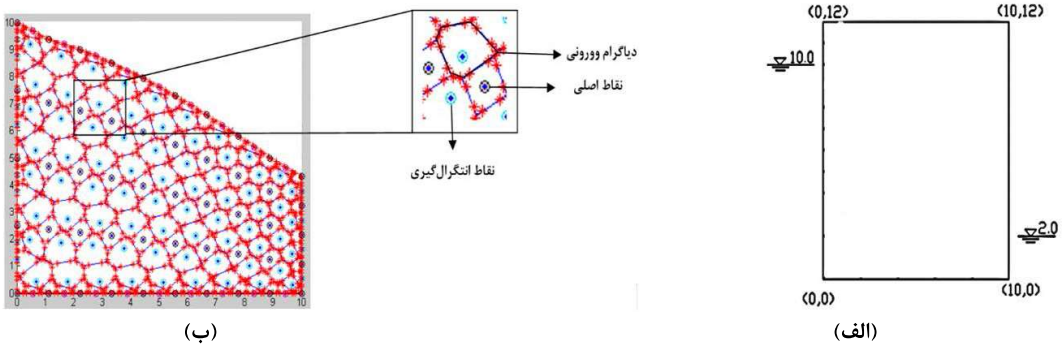
صحت سنجی مدل عددی

به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی، جریان نشت درون محیط متخلخل یک بند خاکی مستطیل شکل نیمه-تراوا به ابعاد ۱۲ متر ارتفاع و ۱۰ متر عرض موردبررسی قرار گرفت (شکل ۷-الف). ضریب هدایت هیدرولیکی برابر با $k_x = k_y = 0.12m/d$ در نظر گرفته‌شده است. به‌منظور گسسته سازی فضای فیزیکی بند، محیط متخلخل با روش بدون شبکه المان طبیعی در سه حالت توزیع گره‌ای با تعداد ۱۲۰، ۱۰۰ و ۵۰ گره، گره‌گذاری شد و سپس نتایج به‌دست‌آمده در هر سه حالت با گزارش‌های مشاهداتی و نتایج

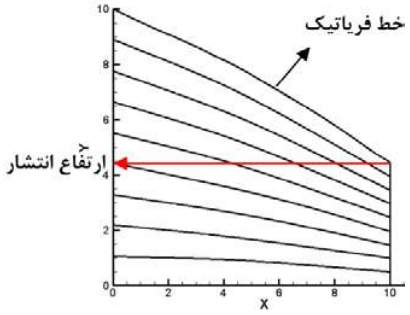
[1] Farin
[2] Anderson & Woesnser
[3] Chayo

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

حاصل از روش‌های عددی روش‌های اجزای‌محدود و المان آزاد مورد مقایسه قرار گرفت. شکل (۷-ب) محیط گسسته‌سازی شده بند خاکی را پس از تثبیت موقعیت خط فریاتیک و در حالت ۵۰ گره نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج حاصل از تحلیل نشت در بند خاکی در حالت توزیع ۱۲۰ گره، شامل خط فریاتیک و خطوط جریان حاصل، در شکل (۸) ارائه شده است.



شکل(۷): الف) وضعیت هندسی بند خاکی و ب) نمای شماتیک از دیاگرام‌های وورونی و مکان نقاط گرهی پس از تثبیت موقعیت خط فریاتیک در حل مسئله نشت از بند خاکی



شکل(۸): موقعیت نهایی خط فریاتیک و خطوط جریان حاصل از مدل‌سازی جریان نشت

جدول(۲): نتایج حاصل از مقایسه نتایج آنالیز به روش المان طبیعی، با نتایج حل تحلیلی و روش عددی اجزای‌محدود و المان آزاد

روش حل	آزمایش صحرایی (روشتن[2] و همکاران،۱۹۷۹)	اجزای‌محدود	المان آزاد (لی[1] و همکاران، ۲۰۰۳)	المان طبیعی با ۵۰ گره	المان طبیعی با ۱۰۰ گره	المان طبیعی با ۱۲۰ گره
میزان تخلیه q (m^3/d)	۰/۵۸۳	۰/۵۷۶	۰/۵۷۱	۰/۵۷۳	۰/۵۷۹	۰/۵۸۱
ارتفاع انتشار a (m)	۴/۷۳	۴/۲۲	۴/۶۲	۴/۴۱	۴/۴۶	۴/۴۷
خطای نسبی	میزان تخلیه	-۱/۲۰	-۲/۰۶	-۱/۷۲	-۰/۶۸	-۰/۳۴
	ارتفاع انتشار	-۱۰/۷۸	-۲/۳۳	-۶/۷۶	-۵/۷	-۵/۴۹

در ادامه مقایسه میزان تخلیه و دبی نشت از بند (q) به همراه ارتفاع انتشار (a) حاصل از مدل عددی المان طبیعی با برداشت‌های صحرایی روشتن و همکاران (۱۹۷۹) و نتایج عددی اجزاء محدود و المان آزاد در دستور کار قرار گرفت (جدول (۲)). با توجه به میزان خطای نسبی به‌دست‌آمده از روش المان طبیعی در تحقیق حاضر نسبت به گزارش‌های صحرایی برای دبی تخلیه (معادل ۰/۳۴- درصد) و ارتفاع انتشار (معادل ۵/۴۹- درصد)، برتری نسبی مدل عددی حاضر

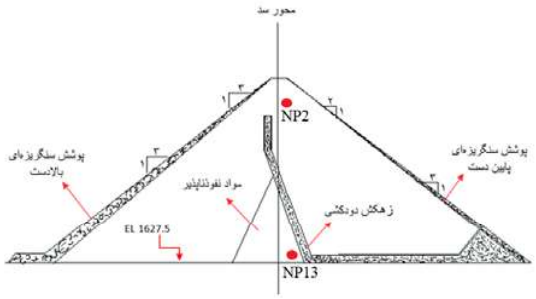
[2] Rushton
[1] Li

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

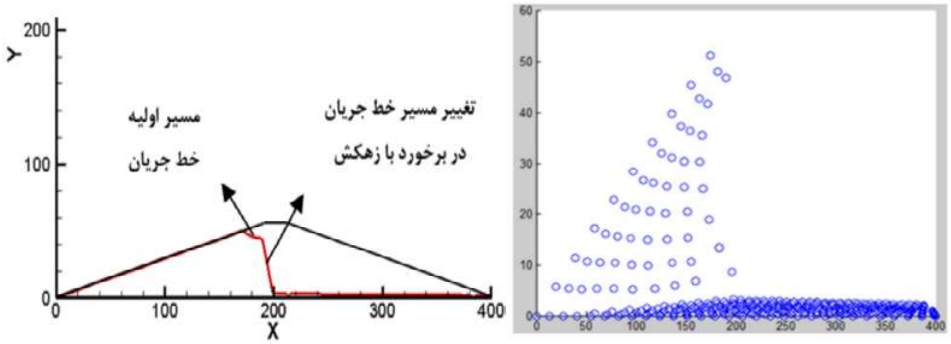
را نسبت به روش‌های اجزاء محدود و المان آزاد به کار گرفته بیان می‌دارد.

مدل‌سازی جریان نشت درون سد درودزن

به‌منظور بررسی روند نشت درون بدنه سد خاکی درودزن و اطمینان از عملکرد مناسب سد، شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از روش المان طبیعی درون سد با شرایط ضرایب نفوذپذیری متفاوت انجام شد. مقطع عرضی در شکل (۹) نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که ضرایب نفوذپذیری طبق مشخصات مصالح سد درودزن برای قسمت بالادست بدنه 10^{-7} متر بر ثانیه، قسمت پایین‌دست 10^{-6} متر بر ثانیه، زهکش 10^{-4} متر بر ثانیه و مواد نفوذناپذیر در مرکز 10^{-8} متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مدل‌سازی در پنج مرحله با توجه به تغییرات تراز سطح آب در بالادست (جدول (۳)) انجام شد. برای گسسته سازی فضای فیزیکی سد، محیط متخلخل در حالت توزیع گره‌ای با تعداد ۴۰۰ گره، گره‌گذاری شد. برای نمونه، موقعیت گره‌ها پس از تحلیل معادلات به همراه نتایج آنالیز سد برای تعیین موقعیت خط فریاتیک در هنگام رقوم سطح آب بالادست برابر با ۵۱/۱ متر (بالاترین ارتفاع آب در مخزن سد، طبق آمار ۱۵ ساله از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۲ سد درودزن) در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل(۹): نمایش مقطع عرضی سد درودزن در محور مرکزی سد به همراه موقعیت ۲ پیزومتر موردمطالعه



(ب) (الف)

شکل(۱۰): نتایج آنالیز سد درودزن الف) موقعیت گره‌های محاسباتی پس از تعیین خط فریاتیک و ب) نمایش موقعیت نهایی خط فریاتیک

برای اطمینان از صحت نتایج تحلیل، مقایسه نتایج عددی با گزارش‌ها مشاهداتی در دو پیزومتر NP2 و NP13 انجام شد (رجوع کنید به شکل (۱)). دو نقطه کنترلی در بدنه (این دو نقطه محل قرارگیری دو پیزومتر NP2 و NP13 است) که پیزومتر NP2 در فاصله ۱۲ متری از محور سد در پایین‌دست قرار دارد و فاصله آن از صفر سد ۴۰۰ متر است. رقوم کف این پیزومتر در تراز ۱۶۲۹/۳۹ متری و رقوم دهانه آن در تراز ۱۶۷۹ متری و از نوع کاساگرانده است. پیزومتر NP13 در فاصله ۳ متری از محور سد بافاصله ۶۸۰ متر از صفر سد در پایین‌دست قرار دارد که رقوم کف پیزومتر در تراز ۱۶۷۱/۸۲ متری و رقوم دهانه آن در تراز ۱۶۸۳ متری و از نوع لوله قائم است. موقعیت این دو پیزومتر در مقطع عرضی سد در شکل

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

(۹) قابل‌مشاهده است. در ادامه نتایج مقایسه تحلیل نشت در بدنه سد در قالب رقوم سطح آب در دو نقطه کنترلی مذکور با نتایج ثبت‌شده توسط پیزومتر NP2 وNP13 به ترتیب در جداول (۳) و (۴) درج شده است.

تحلیل خطای نسبی محاسبه‌شده توسط روش عددی المان طبیعی در پنج مرحله مدل‌سازی مبین توانایی مدل عددی در شبیه‌سازی جریان نشت درون بدنه سد است. به‌طوری‌که در حالت بالاتر بودن رقوم آب از کف پیزومتر (پیزومتر NP2) میزان میانگین خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد بوده و در حالت عدم وجود آب درون پیزومتر مشاهداتی NP13، نتایج توسط مدل عددی تأیید شده است. بررسی روند گذر آب درون بدنه سد بیان می‌دارد که آب نشتی موجود در بدنه، با رسیدن به زهکش دودکشی تغییر مسیر داده و سپس حرکت خود را در مسیر زهکش بدون گذر از بخش پایین‌دست سد ادامه می‌دهد.

این مسئله حاکی از عملکرد صحیح زهکش دارد و وضعیت مناسب گذر آب درون بدنه سد را تأیید می‌کند. بررسی و مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق و سایر پژوهش‌های مرتبط نشان‌دهنده دقت رضایت‌بخش روش‌های اجزا محدود مبتنی بر شبکه و روش بدون شبکه المان طبیعی در مدل‌سازی نشت در محیط متخلخل است (کینقوی[1] و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر این، به دلیل عدم نیاز روش بدون شبکه المان طبیعی به مش‌بندی ناحیه مسئله، این روش در حل مسائل با شرایط مرزی متغیر، ازلحاظ هزینه محاسباتی نسبت به روش پرکاربردی چون اجزای‌محدود مقرون‌به‌صرفه است؛ بنابراین تلفیق دقت و زمان، روش المان طبیعی را روشی مناسب درزمینه‌ی آنالیز مسائل نشت معرفی می‌کند.

جدول(۳): نتایج مقایسه تحلیل نشت در بدنه سد درودزن در نقطه کنترلی اول، پیزومتر NP2

تاریخ	ارتفاع آب بالادست (متر)	سطح آب پیزومتر	رقوم کف پیزومتر (متر)	میزان آب در پیزومتر (متر)	نتایج مدل عددی (متر)	خطای نسبی	میانگین خطای نسبی
۱۳۷۸/۱۰/۱۵	۳۴/۷	۱۶۳۰/۰۹	۱۶۲۹/۳۹	۰/۷	۰/۹۳	٪۳۲/۸۵	٪۹/۵۴
۱۳۸۰/۰۶/۳۱	۳۱/۷۶	خشک	۱۶۲۹/۳۹	۰	۰	٪۰	
۱۳۸۲/۰۳/۱۵	۴۵/۱۴	خشک	۱۶۲۹/۳۹	۰	۰/۰۴	غیرقابل محاسبه	
۱۳۸۲/۰۴/۱۵	۴۲/۸۵	۱۶۳۰/۳۳	۱۶۲۹/۳۹	۰/۹۴	۱/۱	٪۱۷/۰۲	
۱۳۹۱/۰۲/۰۲	۵۰/۱	۱۶۳۰/۱۹	۱۶۲۹/۳۹	۰/۸	۰/۶۳	٪-۲۱/۲۵	

جدول (۴): نتایج مقایسه تحلیل نشت در بدنه سد درودزن در نقطه کنترلی دوم، پیزومتر NP13

تاریخ	ارتفاع آب بالادست (متر)	سطح آب پیزومتر	رقوم کف پیزومتر (متر)	میزان آب در پیزومتر (متر)	نتایج مدل عددی (متر)	خطای نسبی	میانگین خطای نسبی
۱۳۷۸/۱۰/۱۵	۳۴/۷	خشک	۱۶۷۱/۸۲	۰	۰	٪۰	با توجه به خشک بودن سطح پیزومتر، میانگین خطای نسبی معادل صفر درصد قابل‌بیان است.
۱۳۸۰/۰۶/۳۱	۳۱/۷۷	خشک	۱۶۷۱/۸۲	۰	۰	٪۰	
۱۳۸۲/۰۳/۱۵	۴۵/۱۴	رقوم آب پایین‌تر از کف پیزومتر	۱۶۷۱/۸۲	۰	۰	٪۰	
۱۳۸۲/۰۴/۱۵	۴۲/۸۵	خشک	۱۶۷۱/۸۲	۰	۰	٪۰	
۱۳۹۱/۰۲/۰۲	۵۰/۱	رقوم آب پایین‌تر از کف پیزومتر	۱۶۷۱/۸۲	۰	۰	٪۰	

[1] Qinghui

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی موقعیت خط جریان فریاتیک در بدنه سد درودزن، مدل‌سازی نشت در بدنه سد انجام شد. در ابتدا یک نمونه بند مستطیلی شکل نیمه-تراوا با روش بدون شبکه المان طبیعی در سه حالت توزیع گره‌ای مدل‌سازی شده و سپس نتایج با گزارش‌ها و مشاهدات صحرایی و حل عددی به روش‌های اجزای‌محدود و المان آزاد مقایسه شد. نتایج مقایسه حاکی از دقت بالای روش المان طبیعی بوده و بیانگر آن است که با افزایش تعداد گره‌های توزیع‌شده در دامنه مسئله، دقت نتایج حاصل از عددی افزایش خواهد داشت. به‌طوری‌که برای توزیع ۱۲۰ گره (بیشترین حالت توزیع گره‌ای در تحلیل بند)، درصد خطای نسبی آن در رابطه با میزان تخلیه برابر با ۰/۳۴- درصد و در رابطه با ارتفاع انتشار ۵/۴۹- درصد محاسبه شد که نتیجه‌ای رضایت‌بخش برای حل عددی مسئله محسوب می‌شود. در ادامه به تحلیل جریان نشت درون بدنه سد درودزن پرداخته شد و برای اطمینان از نتایج حاصل، نتایج تراز سطح آب با ۲ نقطه کنترلی (پیزومترها مشاهداتی) مورد مقایسه قرار گرفت. پس از تحلیل مسئله مشخص شد که نتایج در نقطه کنترلی اول، خطای نسبی تفاضلی برابر با ۹/۵۴٪ نسبت به نتایج پیزومتر و در نقطه کنترلی دوم کاملاً مطابق با پیزومتر مربوطه بوده است. با توجه به پایش نتایج حاصل از مسیر جریان نشت درون بدنه سد، این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که سیستم زهکشی موجود در بدنه‌ی سد درودزن به‌خوبی توانسته مسیر جریان آب نشتی بدنه را به سمت خود هدایت کرده و بدون گذر از بدنه در قسمت پنجه سد، از سد خارج کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پایین‌دست سد درودزن ازلحاظ پدیده‌های مخربی همچون پوسته‌پوسته شدن، رگاب و خطرات متعاقب آن در امنیت به سر می‌برد.

مراجع

۱- تقی پور، ر. و رحمانی فیروزجائی، ی. (۱۳۹۲). "تحلیل جریان عبوری از زیر سد با خاک لایه‌ای ناهمسان با استفاده از روش MLPG." هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیک‌بخت، زاهدان، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲.

۲- شاهرخ‌آبادی، ش. و توفیق، م. م. (۱۳۸۸). "کاربرد روش بدون شبکه المان‌های طبیعی با درون‌یاب Non-Sibson در مدل‌سازی نشت آب از پی سد با دیواره آب‌بند." هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۸، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۳- شرکت آب منطقه‌ای فارس. (۱۳۹۲). "گزارش رفتارنگاری سد درودزن".

۴- موسوی نژاد، م. و ماکویی، م. ا. (۱۳۹۲). "تحلیل نشت جریان آب در داخل سد هسته آسفالتی با روش بدون شبکه." هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲.

5- Anderson, M. P. and Woessner, W. W. (1992). Applied groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. San Diego, California.

6- Belyschko, T., Lu, Y. Y. and Gu, I. (1994). “Element free Galerkin methods.” *International Journal for numerical methods in engineering.* 37(2), 219-256.

7- CHaiyo, Kh., Rattanadecho, ph. and Chantasiriwan, S. (2011). “The Method of Fundamental Solutions for Solving Free Boundary Saturated Seepage Problem.” *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 38(2), 249–254 .

8- Cuet, E., Sukumar, N. and Calvo, B. (2003). “Overview and Recent Advances in Natural Neighbour Galerkin Methods.” Archives of Computational Method*s in Engineering*. 10(4), 307-384.

9- Darbani, M., Ouahsine, A., Villon, P., Naceur, H. and Smaoui, H. (2011). “Meshless method for shallow water equations with free surface flow.” *Applied Mathematics and Computation.* 217(11), 5113–5124.

10- Farin, G. (2003). “Surface over Dirichlet Tessellation”. *Computer Aided Geometric Design.* 7(1), 281-292.

11- Gingold, R. A. and Monaghan, J. J. (1977). “Smoothed particle hydrodynamics: theory and applications to non-spherical stars.” *Monthly*

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

seepage through fracture networks." Journal of Hydrology. 519(27 November 2014), 881-891.

18- Shahrokhabadi, Sh. and Toufigh, M. M. (2013). "The solution of unconfined seepage problem using Natural Element Method (NEM) coupled with Genetic Algorithm (GA)." *Applied Mathematical Modelling*. 37(March 2013), 2775–2786.

19- Sukumar, N., Moran, B. and Belytschko, T. (1998). "The natural element method in solid mechanics." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 43(5), 839–887.

20- Sukumar, N., Moran, B., Semenov, Y. and Belikov, V. V. (2001). "Natural neighbour Galerkin methods." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 50(1), 1–27.

21- Yoo, J. W, Moran, B., and Chen, J. S. (2004). "Stabilized conforming nodal integration in the natural-element method." *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* 60(5), 861-890.

22- Zhang, Y., Yi, H. L. and Tan, H. P. (2014). "Natural element method analysis for coupled radiative and conductive heat transfer in semitransparent medium with irregular geometries." International Journal of Thermal Sciences. 76(February 2014), 30-42.

Notices of the Royal Astronomical Society. 181, 375-385.

12- Idelsohn, S. R., Onate, E., Calvo, N., and Del Pin, F. (2003). "The meshless finite element method." *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* 58(6), 893-912.

13- Li, G. X., Ge, J. H. and Jie, Y. X. (2003). "Free surface seepage analysis based on the element-free method, Mechanics Research Communications." *Mechanics Research Communications.* 30(1), 9-19.

14- Jie, Y. X. and Liu, Y. (2012). "Simulated annealing based algorithm for node generation in seepage analysis with meshless method." *Mechanics Research Communications*. 43(July 2012), 96–100.

15- Jie, Y. X., Liu, L. Z., Xu, W. J. and Li, G. X. (2013). "Application of NEM in seepage analysis with a free surface." *Mathematics and Computers in Simulation*. 89(March 2013), 23–37.

16- Martinez, M. A., Cueto, E., Doblare, M. and Chinesta, F. (2003). "Natural element meshless simulation of flows involving short fiber suspensions." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 115(1), 51–78.

17- Qinghui, J., Ye, Z. and Zhou. C. (2014). "A numerical procedure for transient free surface

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

Seepage Simulation through the Body of Earth Dam Using Natural Element Meshless Numerical Method, Case Study: Droodzan Dam

Elham Delavar [1]
Mohammad Zounemat-Kermani [2*]
Gholamhossein Baradaran [3]

Abstract

Internal erosion and seepage in earth dams are known as major parameters of dam break and investigation on these phenomena are important issues in monitoring and surveillance of dams. Numerical modelling of seepage in dams' body and determining the highest level of seepage line (phreatic) are the best remedies in this field. Thereafter, in this research natural element meshless numerical model (NEM) along with the Sibson's interpolation were used for simulating seepage through the body of Droodzan dam. At first, in order to validating the NEM, simulation of flow in an embankment obstacle was done. After ensuring about the accurate operation of the numerical model, seepage simulation in the Droodzan dam's body was applied and the results were checked with the observation data of dam's piezometers. Regarding an average less than 5 for the relative error, the accuracy of the NEM can be concluded. Results of the study confirm the inexistence of interior erosion or piping in the dam's body as far as the internal drain of the dam is working properly.

Keywords

Natural element method, seepage, meshless methods, Sibson's interpolation, internal drain.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.2.0]

1 MSc student of water structure engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2* Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, zounemat@uk.ac.ir.
3 Associate Professor, Department of Mechanic Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
Received: 2016/01/14 Accepted: 2016/06/08