

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

الهام دلاور<sup>۱</sup>

محمد ذونعمت کرمانی<sup>۲\*</sup>

غلامحسین برادران<sup>۳</sup>

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؛ از جمله راهکارهای مؤثر در این زمینه، مدل‌سازی عددی تراوش در بدنه سد و مشخص کردن بالاترین خط نشت (فرياتيک) است. به اين منظور در اين تحقيق از روش بدون شبکه المان طبیعی (NEM) با درون‌باب سيبسون برای مدل‌سازی نشت در بدنه سد خاکی درودزن استفاده شد. در ابتدا بهمنظور صحت‌سننجی دقت روش NEM، شبیه‌سازی رفتار جريان متخلخل و ميزان دibi نشت درون بدنه يك بند نيمه-تراوا انجام شد. پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل، شبیه‌سازی نشت در بدنه سد درودزن انجام شد. بهمنظور كنترل نتایج، مقادیر محاسباتی با برداشت‌های مشاهداتی تراز سطح آب پیزومترهای بدنه مقایسه شد. با توجه به ميانگين خطای تفاضلی نسبی كمتر از ۵ درصد، می‌توان صحت نتایج شبیه‌سازی را تأیید کرد. يافته‌های 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، درون‌باب سيبسون، 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](mailto:zounemat@uk.ac.ir).

۳. دانشیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

## مقدمه

گرهی را به راحتی امکان‌پذیر می‌کند (کوئتو<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۳).

در واقع، 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<sup>۱۰</sup> (موسی نژاد و ماکویی، ۱۳۹۲)، حرکت کمینه مربعات<sup>۱۱</sup>، روش بدون شبکه گالرکین<sup>۱۲</sup>، روش پتروف گالرکین (تقی پور و رحمانی فیروز جائی، ۱۳۹۲) و المان طبیعی<sup>۱۳</sup> (مارتینز<sup>۱۴</sup> 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 مونقلان<sup>۱۵</sup> در سال ۱۹۷۷ دانست. این روش مبتنی بر دیدگاه لاغرانژی 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<sup>۱۶</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۴ روش بدون شبکه گالرکین<sup>۱۷</sup> را ارائه کردند و در ادامه روش المان طبیعی توسط سوکومار<sup>۱۸</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شد (زانگ<sup>۱۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). این روش بر اساس مفهوم همسایه طبیعی استوار است. مزیت عمدی 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). درون‌بابهای مورداستفاده در NEM درون‌باب سیبیسون و غیر سیبیسون<sup>۲۰</sup> است که درون‌باب غیر سیبیسون، قابلیت اعمال دقیق شرایط مرزی اساسی را در مرزهای محدب و غیر محدب دارد (سوکومار<sup>۲۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۱). در مقایسه با MLS، درون‌باب همسایه طبیعی برخی ویژگی‌های جذاب و تمایز از جمله خواص درون‌بابی گرهها و سهولت در اعمال شرایط مرزی را ارائه می‌دهد. روش بدون شبکه‌ی المان

جريان 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<sup>۱</sup>، 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 اهمیت ترین روش‌های شبیه‌سازی رفتار جریان، روش‌های عددی هستند. روش‌های مدل‌سازی عددی به دو گروه کلی روش‌های مبتنی بر شبکه<sup>۲</sup> و روش‌های بدون شبکه<sup>۳</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک معاایب و مزایای خاص خود را دارند. از میان روش‌های مبتنی بر شبکه، روش اجزاء محدود<sup>۴</sup>، تفاضل محدود<sup>۵</sup> و احجام محدود<sup>۶</sup> به صورت گسترده‌ای در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای کاربرد دارند؛ شایان ذکر 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 محدد در هر بار تحلیل، زمان بر بوده و توصیه نمی‌شوند (آیدلسون<sup>۷</sup> و همکاران<sup>۸</sup> و همکاران<sup>۹</sup>) و یو<sup>۱۰</sup> و همکاران<sup>۱۱</sup>).

یکی از روش‌های غلبه بر مشکلات موجود در روش‌های مبتنی بر شبکه، به کارگیری 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 تعریف شده بین آن‌ها. این خاصیت امکان تغییر در تعداد نقاط

<sup>۱۳</sup> Natural Element Method

<sup>۱۴</sup> Martinez

<sup>۱۵</sup> Gingold & Monaghan

<sup>۱۶</sup> Belyschko

<sup>۱۷</sup> EFG

<sup>۱۸</sup> Sukumar

<sup>۱۹</sup> Zhang

<sup>۲۰</sup> Non-Sibson

<sup>۲۱</sup> Sukumar

<sup>۱</sup> Feryatic Line

<sup>۲</sup> Mesh base Method

<sup>۳</sup> Mesh free Method

<sup>۴</sup> Finite Element Method

<sup>۵</sup> Finite Difference Method

<sup>۶</sup> Finite Volume Metod

<sup>۷</sup> Idelsohn

<sup>۸</sup> Yoo

<sup>۹</sup> Cueto

<sup>۱۰</sup> SPH

<sup>۱۱</sup> MLS

<sup>۱۲</sup> EFG

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه و سد درودزن

سد درودزن از جمله مفیدترین سدهای حاضر کشور است. این سد با سابقه بیش از ۴۰ سال بهره‌برداری، نقش حیاتی را در تأمین آب شرب شهر شیراز، آب صرفی 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 کرو در حوزه آبریز دریاچه‌ی 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 نصب شده‌اند (شکل ۱-ب).

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

### معادلات حاکم پرنشت

معادله حاکم بر نشت جریان اشباع برای سیال تراکم‌ناپذیر و همگن، در مسائل دو بعدی به شکل زیر است (جی و همکاران (۲۰۱۲) و شاهرخ‌آبادی و توفیق<sup>۲</sup> (۲۰۱۳)):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

که  $k_x$  و  $k_y$  = به ترتیب ضریب نفوذپذیری در جهت x و y

= هد یا بار آبی کل که طبق معادله برتوالی برابر است با:

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

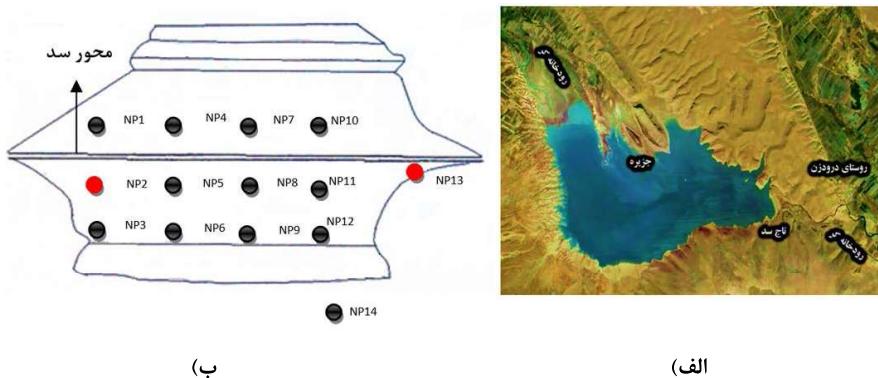
در معادله فوق  $\frac{p}{\gamma_w}$  = هد معادل فشار،  $y$  = هد ارتفاع و  $\frac{v^2}{2g}$  = هد معادل سرعت.

طبیعی در مسائل مقدار مرزی کاربرد فراوان دارد ضمن اینکه برای مدل کردن ناپیوستگی‌ها (همچون ترک) نیز به خوبی از این روش استفاده می‌شود. امروزه NEM به طور معمول در دینامیک سیالات، مکانیک جامدات، شکل‌دهی فلزات، اتصال ساختار سیال، بیومکانیک و غیره استفاده می‌شود (جی 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-ترava 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 مقایسه قرار گرفت.

جدول (۱): مشخصات ساختمانی و تأسیسات سد درودزن

عنوان	مقدار/مشخصات
نوع بدنه سد	خاکی همگن با زهکشی 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 متر مکعب بر ثانیه
دوره بازگشت سیلان	۱۰۰۰۰ ساله
طراحی	



شکل (۱): سد درودزن (الف) تصویر ماهواره‌ای سد و (ب) پلان جانمایی پیزومترهای موجود در سد (پیزومترهای شماره ۲ و ۳ مربوط به بدنه سد هستند)

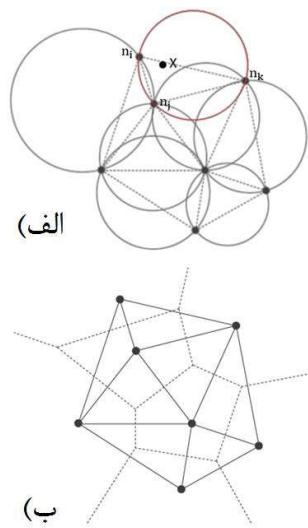
ناحیه به گره  $n_I$  نزدیک‌تر از هر گره دیگر است (شکل ۲). به این نواحی  $V_I$  سلول‌های وورونی مرتبه اول گفته می‌شود:

$$V_I = \{X(x, y) \in R^2 : d(x, X_1) \leq (d(x, X_j) \forall j \neq I\} \quad (3)$$

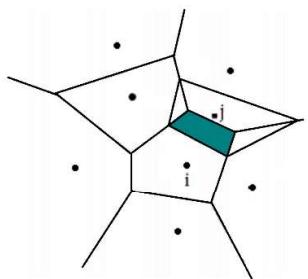
به طوری که  $X(x, y) = X(x, y)$  = مختصات نقطه‌ای در فضای دوبعدی و محدود به دامنه حل و  $d(x, X_1) = d(x, X_I)$  = فاصله اقلیدسی بین  $x$  و  $X_I$  در محاسبات دستی دیاگرام وورونی را می‌توان با رسم  $X_I$  در محاسبات دستی دیاگرام وورونی را می‌توان با رسم عمودمنصف‌های بین هر دو گره به دست آورد. اگر گره‌های 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 داده شده است (دربانی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). این مثلث‌ها دارای این خصوصیت هستند که اگر دایره محیطی گذرنده از سه رأس 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  $DT(n_i, n_j, n_k)$  قرار گیرد به این معناست که  $n_i, n_j, n_k$  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).

**الگوریتم حل روش بدون شبکه المان طبیعی**  
در روش المان طبیعی به منظور جداسازی معادله دیفرانسیل، ابتدا فرم ضعیف استخراج شده و پس از آن انتگرال فرم ضعیف، به انتگرال روی مثلث‌های دلاونی شکسته می‌شود. لازم به ذکر است که در روش المان طبیعی روی هم‌گذاری معادلات بر اساس موقعیت گره‌های محاسباتی است. به این ترتیب 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 به صورت  $\{n_1; n_2; \dots; n_M\}$  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 به طوری که هر نقطه دلخواه در این



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



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

#### تابع شکل سیبسون

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

$$\emptyset_i(X) = \frac{A_i(X)}{A(X)} \quad (6)$$

همچنین مشتق تابع شکل به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \emptyset_i(X)}{\partial X_j} = \emptyset_{i,j}(X) = \frac{A_{i,j} - \emptyset_i(X)A_{i,j}(X)}{A(X)} \quad (7)$$

$(j=1,2,3)$  (7)

#### دیاگرام وورونی مرتبه دوم

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

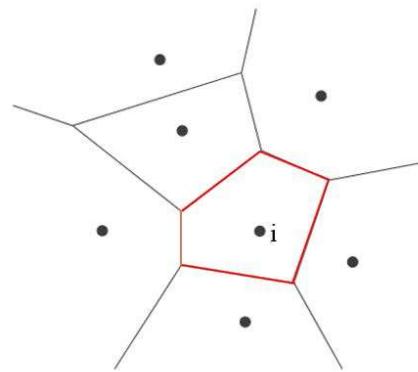
$$V(i, j) = \{X \in R^2 | d(x, X_j) \leq (d(x, X_i) \leq (d(x, X_k) \forall k \neq i, j\}) \quad (4)$$

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  $i$ ،  $V(i)$  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  $j, i$  برابر با اشتراک دو محدوده  $V(i)$  و  $V(j)$  است (رابطه (۵)) و شکل (۴).

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

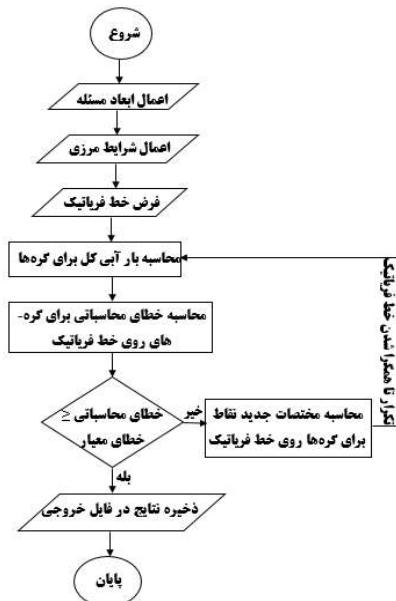
$$V(j) = \{x \in R^d | d(x, X_j) \leq (d(x, X_k) \forall k \neq i, j)\} \quad (5)$$

$$V(i, j) = \{x \in (V(i), V(j))\}$$



شکل(۲): دیاگرام وورونی مرتبه اول گره  $i$

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 (روننما) شکل (۶) ارائه شده است.



شکل (۶): روننمای 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.

### صحبت سنجی مدل عددی

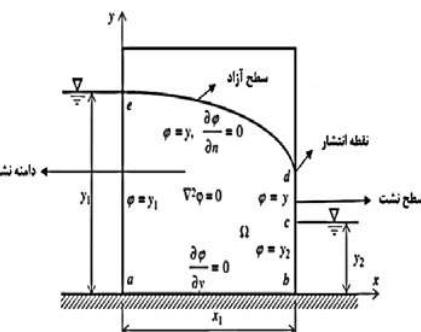
بهمنظور صحبت‌سنجی مدل عددی، جریان نشت درون محیط متخالل یک بند خاکی مستطیل شکل نیمه-ترراوا به ابعاد ۱۲ متر ارتفاع و ۱۰ متر عرض موربدرسی قرار گرفت (شکل ۷-الف). ضریب هدایت هیدرولیکی برابر با  $k_x = k_y = 0.12 m/d$  در نظر گرفته شده است. بهمنظور گسته سازی فضای فیزیکی بند، محیط متخالل با روش بدون شبکه المان طبیعی در سه حالت توزیع گره‌های با تعداد ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ گره، گره‌گذاری شد و سپس نتایج به دست آمده در هر سه حالت با گزارش‌های مشاهداتی و نتایج

واضح است گره‌های همسایه نقطه  $X$  روی نقطه  $X$  مقدار تابع شکل غیر صفر دارند (فرین<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳).

### شرایط مرزی

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

از آنچاکه تابع شکل المان طبیعی در نواحی مرزی به صورت خطی است و فقط گره‌های مرزی در آن نواحی مؤثرند لذا می‌توان گفت که اعمال شرایط مرزی در روش المان طبیعی نیز مانند روش اجزای محدود است (اندرسون و ووزنر<sup>۲</sup>، ۱۹۹۲). بهمنظور مدل‌سازی نشت در بدن سدهای خاکی، سه نوع شرایط مرزی بر مسئله حاکم خواهد بود. به طور مثال در بند شرایط مرزی ab می‌توان گفت که میزان نشت در بند cd شرایط مرزی cd می‌باشد. در شکل (۵) مرزهای ae و bc و cd شرایط مرزی از نوع دریشه است. در مرز ab شرایط مرزی نیومن حاکم است چراکه مشتق  $h$  برابر با  $\frac{\partial h}{\partial y} = 0$  مشخص است. در مرز cd شرایط مرزی از نوع مخلوط تعریف می‌شود. (ذکر این نکته الزامی است که بار آبی کل را در مسائل نشت هم با  $h$  و  $\phi$  نمایش می‌دهند).



شکل (۵): جریان عبوری از یک بند مستطیل شکل دوبعدی (چایو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۱)

### تعیین موقعیت خط فریاتیک

به طور کلی در حل مسائل نشت بهمنظور تعیین خط فریاتیک، دو استراتژی در گره‌گذاری وجود دارد؛ در حالت اول می‌توان

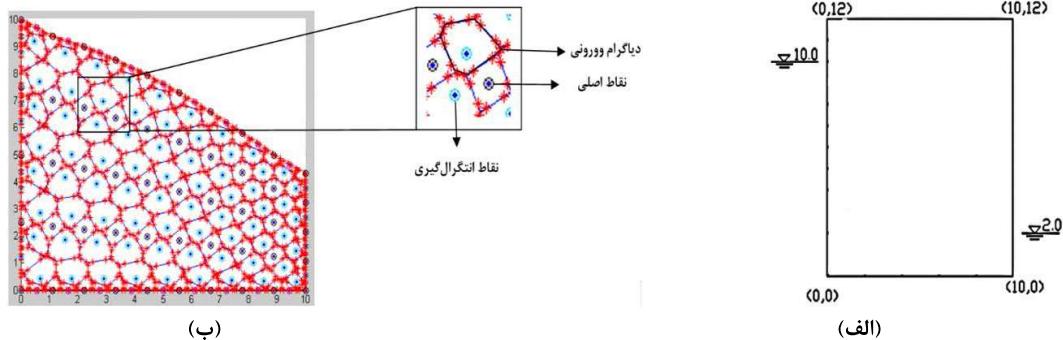
<sup>3</sup> Chayo

<sup>1</sup> Farin

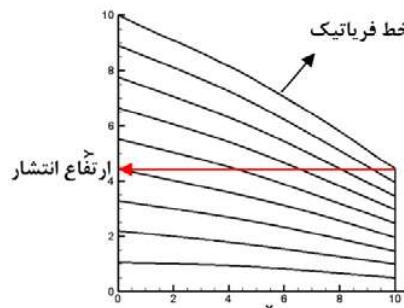
<sup>2</sup> Anderson & Woesnser

تحلیل نشت در بند خاکی در حالت توزیع ۱۲۰ گره، شامل خط فریاتیک و خطوط جریان حاصل، در شکل (۸) ارائه شده.

حاصل از روش‌های عددی روش‌های اجزای محدود 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



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 اجزای محدود و المان آزاد

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

جدول (۲)). با توجه به میزان خطای نسبی به دست‌آمده 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

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 روشن<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۷۹) و نتایج عددی اجزاء محدود و المان آزاد در دستور کار قرار گرفت

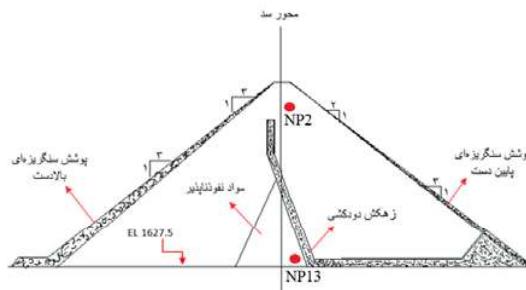
زهکش  $-4^{\circ}$  متر بر ثانیه و مواد نفوذناپذیر در مرکز  $-8^{\circ}$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مدل‌سازی در پنج مرحله با توجه به تغییرات تراز سطح آب در بالادست (جدول (۳)) انجام شد. برای گسسته سازی فضای فیزیکی سد، محیط متخلخل در حالت توزیع گره‌ای با تعداد ۴۰۰ گره، گره‌گذاری شد. برای نمونه، موقعیت گره‌ها پس از تحلیل معادلات به همراه نتایج آنالیز سد برای تعیین موقعیت خط فریاتیک در هنگام رقوم سطح آب بالادست برابر با  $51/1$  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.

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

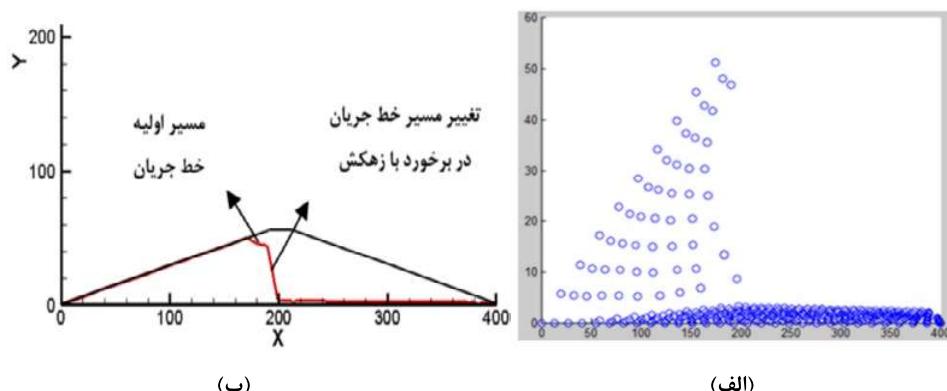
#### مدل‌سازی جریان نشست درون سد درودزن

به منظور بررسی روند نشت درون بدن سد خاکی درودزن و اطمینان از عملکرد مناسب سد، شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از روش المان طبیعی درون سد با شرایط ضرایب نفوذناپذیری متفاوت انجام شد. مقطع عرضی در شکل (۹) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ضرایب نفوذناپذیری طبق مشخصات مصالح سد درودزن برای قسمت بالادست

بدنه  $10^{\circ}$  متر بر ثانیه، قسمت پایین دست  $10^{\circ}$  متر بر ثانیه،



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



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

پیزومتر در تراز  $1629/39$  متری و رقوم دهانه آن در تراز  $1679$  متری و از نوع کاساگراند است. پیزومتر NP13 در فاصله  $3$  متری از محور سد با فاصله  $680$  متر از صفر سد در پایین دست قرار دارد که رقوم کف پیزومتر در تراز  $1671/82$  متری و رقوم دهانه آن در تراز  $1683$  متری و از نوع لوله قائم است. موقعیت این دو پیزومتر در مقطع عرضی سد در شکل

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  $12$  متری از محور سد در پایین دست NP2 در فاصله  $12$  متری از محور سد در پایین دست قرار دارد و فاصله آن از صفر سد  $400$  متر است. رقوم کف این

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<sup>۱</sup> 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، از لحاظ هزینه محاسباتی نسبت به روش پرکاربردی چون اجزای محدود مقرن به صرفه است؛ بنابراین تلفیق دقت و زمان، روش المان طبیعی را روشنی مناسب درزمینه‌ی آتالیز مسائل نشت معرفی می‌کند.

(۹) قابل مشاهده است. در ادامه نتایج مقایسه تحلیل نش特 در بدنه سد در قالب رقوم سطح آب در دو نقطه کنترلی مذکور با نتایج ثبت شده توسط پیزومتر NP13 و NP2 به ترتیب در جداول (۳) و (۴) درج شده است.

تحلیل خطای نسبی محاسبه شده توسط روش عددی المان طبیعی در پنج مرحله مدل سازی مینیموم توانایی مدل عددی در شبیه سازی جریان نشت درون بدن است. به طوری که 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 می دارد که آب نشته موجود در بدنه، با رسیدن به زهکش دودکشی تغییر مسیر داده و سپس حرکت خود را در مسیر زهکش بدون گذر از بخش پایین دست سداد امامه می - دهد.

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

میانگین خطای نسبی	خطای نسبی	نتایج مدل عددی (متر)	میزان آب در پیزومتر (متر)	رقوم کف پیزومتر (متر)	سطح آب پیزومتر	ارتفاع آب بالادست (متر)	تاریخ
٪۹/۵۴	٪۳۲/۸۵	۰/۹۳	۰/۷	۱۶۲۹/۳۹	۱۶۳۰/۰۹	۳۴/۷	۱۳۷۸/۱۰/۱۵
	٪۰	۰	۰	۱۶۲۹/۳۹	خشک	۳۱/۷۶	۱۳۸۰/۱۰/۳۱
	غیرقابل محاسبه	۰/۰۴	۰	۱۶۲۹/۳۹	خشک	۴۵/۱۴	۱۳۸۲/۱۰/۱۵
	٪۱۷/۰۲	۱/۱	۰/۹۴	۱۶۲۹/۳۹	۱۶۳۰/۳۳	۴۲/۸۵	۱۳۸۲/۱۰/۱۵
	٪-۲۱/۲۵	۰/۶۳	۰/۸	۱۶۲۹/۳۹	۱۶۳۰/۱۹	۵۰/۱	۱۳۹۱/۱۰/۲۰

جدول (۴): نتایج مقایسه تحلیل نشت در بدن سد درودزن در نقطه کنترل، دوم، بیزومتر 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	·	·	%.	با وجود بیشک بودن سطح پیزومتر میانگین خطای نسبی معامل مضر درصد قابلیات است.
۱۳۸۰/۰۶/۳۱	۳۱/۷۷	خشک	۱۶۷۱/۸۲	·	·	%.	
۱۳۸۲/۰۳/۱۵	۴۵/۱۴	رقوم آب پایین تر از کف پیزومتر	۱۶۷۱/۸۲	·	·	%.	
۱۳۸۲/۰۴/۱۵	۴۲/۸۵	خشک	۱۶۷۱/۸۲	·	·	%.	
۱۳۹۱/۰۲/۰۲	۵۰/۱	رقوم آب پایین تر از کف پیزومتر	۱۶۷۱/۸۲	·	·	%.	

## 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 اجزای محدود و المان آزاد مقایسه شد. نتایج مقایسه حاکی از دقیقت بالای روش المان طبیعی بوده و بیانگر آن است که با افزایش تعداد گره‌های توزیع شده 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  $0/34$ - درصد و در رابطه با ارتفاع انتشار  $5/49$ - 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) موردن مقایسه قرار گرفت. پس از تحلیل مسئله مشخص شد که نتایج در نقطه کنترلی اول، خطای نسبی تفاضلی برابر با  $9/54\%$  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، این گونه نتیجه‌گیری می‌شود که سیستم زهکشی موجود در بدنه سد درودزن به خوبی 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 از لحاظ پدیده‌های محرابی همچون پوسته‌پوسته شدن، رگاب و خطرات متعاقب آن در امنیت به سر می‌برد.

## مراجع

- ۲- شاهرخ‌آبادی، ش. و توفیق، م. م. (۱۳۸۸). "کاربرد روش بدون شبکه المان‌های طبیعی با درون‌باب Non-Sibson در مدل‌سازی نشت آب از پی سد با دیواره آب‌بند." هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۲ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۸، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- ۳- شرکت آب منطقه‌ای فارس. (۱۳۹۲). "گزارش رفتار نگاری سد درودزن".
- ۴- موسوی نژاد، م. و ماكويي، م. ا. (۱۳۹۲). "تحلیل نشت جریان آب در داخل سد هسته آسفالتی با روش بدون شبکه." هشتمین 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 Advection 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 Methods 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*

- 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., Doblaré, 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

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

Elham Delavar<sup>1</sup>

Mohammad Zounemat-Kermani<sup>2\*</sup>

Gholamhossein Baradaran<sup>3</sup>

### **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 Drodzan 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 Drodzan 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.

---

<sup>1</sup> MSc student of water structure engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

<sup>2</sup>\* Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, zounemat@uk.ac.ir.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Mechanic Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Received: 2016/01/14

Accepted: 2016/06/08