

تأثیر پارامترهای هیدرولیکی در تحلیل نشت ناپایدار از پی و بدنه سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد خاکی دریک)

حجت احمدی^{۱*}، طیبه ابطحی^۲ و نصرت آقازاده^۳

چکیده

در این تحقیق تأثیر هدایت هیدرولیکی بر پدیده نشت غیرماندگار از بدنه سد خاکی غیرهمگن به وسیله نرم‌افزار GeoStudio و زیرمجموعه آن، SEEP/W بررسی شد. هدایت هیدرولیکی در دو حالت مختلف به صورت تابعی از مقدار مکش و به صورت مقدار ثابت در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی با داده‌های پیزومترهای نصب شده در بدنه سد نشان می‌دهد که با اعمال هدایت هیدرولیکی متغیر، مقدار خطا در پیش‌بینی فشار آب منفذی تا ده برابر کاهش پیدا می‌کند. همچنین مقایسه نتایج حاکی از آن است در حالتی که هدایت هیدرولیکی به صورت تابع اعمال می‌شود، مقدار فشار آب منفذی حاصل از تحلیل، بیشتر از حالتی است که مقدار هدایت هیدرولیکی ثابت فرض شود. مقایسه مقادیر نشت محاسبه شده در حالت‌های مختلف نیز نشان داد که مقدار نشت در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر کمتر از حالتی است که هدایت هیدرولیکی به صورت ثابت اعمال می‌شود در برخی موارد این اختلاف بیش از بیست برابر است. همچنین این بررسی نشان می‌دهد که به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت، توزیع فشار در پی را دقیق‌تر برآورد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تابع هدایت هیدرولیکی، فشار آب منفذی، نرم‌افزار SEEP/W، نشت.

ارجاع: احمدی ح. ط. و آقازاده ن. ۱۳۹۶. تأثیر پارامترهای هیدرولیکی در تحلیل نشت ناپایدار از پی و بدنه سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد خاکی دریک). مجله پژوهش آب ایران. ۲۷: ۱-۱۱.

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر.

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه.

* نویسنده مسئول: h.ahmadi@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵

مقدمه

عددی پیشنهادی را در تفکیک ناحیه اشباع و غیراشباع ایجاد شده در بدنه سد را تأیید کرد. جی و همکاران (۲۰۰۵) روش فشار مبسوط پیشنهاد شده توسط باردت و توبیتا (۲۰۰۲) را توسعه دادند و همگرایی روش عددی مبتنی بر تفاضل محدود را بهبود بخشیدند. در این روش مسأله نشت غیرمحصور در محیط‌های متخلخل همگن به روش ساده‌تری تحلیل می‌شود. میزیمورا و کاندا (۲۰۱۰) شرایط مرزی در محیط‌های متخلخل با سطوح شیب‌دار مشابه سدهای خاکی را در حالت همگن به صورت عددی و مدل‌های آزمایشگاهی هلی شاو بررسی کردند در این بررسی روابطی برای تعیین زوایای برخورد سطح فریاتیک با مرزهای شیب‌دار ارائه شده است.

نورانی و همکاران (۲۰۱۴)، با ارائه یک روش آزمایشگاهی موسوم به تیوب‌های چند مخزنه^۱ پدیده نشت از بدنه سدهای خاکی را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. نتیجه مقایسه روش ایشان با داده‌های پی‌زومتری و همچنین روش تفاضل محدود صحت مدل پیشنهادی را تأیید کرد. در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای مؤثر بر پدیده نشت در محیط‌های غیرهمگن و سدهای خاکی ناحیه‌بندی شده با هسته رسی بررسی می‌شود تا اهمیت پارامترهای مؤثر بر نشت و نحوه انتخاب و به کارگیری آن‌ها به عنوان خصوصیات هیدرولیکی مصالح مورد ارزیابی قرار بگیرد.

مواد و روش‌ها

روابط حاکم: معادله دیفرانسیل حاکم بر نشت در حالت جریان دو بعدی را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial q}{\partial t} m \quad (1)$$

در این رابطه، H بار کل، k_x هدایت هیدرولیکی در جهت x ، k_y هدایت هیدرولیکی در جهت y ، Q شار مرزی اعمال شده، θ محتوای آب حجمی، t زمان را نشان می‌دهد. طبق رابطه (۱)، اختلاف میان جریان (شار) ورودی و خروجی از المان حجمی در یک نقطه در زمان معین تغییرات حجم ذخیره شده در المان مورد نظر برابر است. مسأله اساسی‌تری که این معادله نشان می‌دهد این است که مجموع تغییرات جریان‌ها در جهات x و y به علاوه شار سطحی اضافه شده برابر است با میزان تغییرات محتوای آب حجمی نسبت به زمان. تغییرات محتوای آب حجمی

برای بررسی تأثیر بخش‌های غیراشباع در بدنه یک سد خاکی بر جریان نشت، به کارگیری توابع هیدرولیکی مصالح در قالب تابع هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه رطوبتی خاک ضروری است (کراهن، ۲۰۰۴). از جمله دلایل اصلی تخریب سدهای خاکی در جهان فرسایش درونی و دلیل دیگر، تخریب سازه‌های خاکی تحت نیروهای اشباع و نشت کنترل نشده است که در اثر تغییرات ناگهانی سطح آب مخزن رخ می‌دهد (برونز و آکوستا، ۲۰۱۱). فشار آب منفذی ایجاد شده بر اثر نشت، تأثیر مستقیم روی مقاومت برشی و تغییرات حجمی خاک دارد. طبق تحقیقات صورت گرفته در زمینه تحلیل نشت از بدنه سدهای خاکی، مدل‌سازی دقیق سرعت اشباع شدن بدنه سد در حالت آبیگری و همچنین سرعت زهکشی و زائل شدن فشار آب منفذی در حالت پایین افتادن سطح آب مخزن وابسته به نوع هدایت هیدرولیکی لحاظ شده در مدل عددی است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین مطالعات احمدی و رضوردی‌نژاد (۱۳۹۳) نشان می‌دهد که در سدهای ناحیه‌بندی شده بدون هسته رسی، اعمال خصوصیات هیدرولیکی مصالح پایین‌دست برای حصول نتایج صحیح ضروری است. پژوهش نوری و اسماعیل (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که نسبت نفوذپذیری مصالح روی موقعیت سطح آزاد تأثیر مستقیمی دارد. اغلب تحلیل مسائل مربوط به جریان نامحدود مشکل‌تر است؛ چراکه برای تحلیل نشت، تعیین موقعیت سطح آزاد الزامی است (ژو و همکاران، ۲۰۰۳). معمولاً سطح آزاد به عنوان مرز فوقانی جریان در نظر گرفته شده و همه جریان نشتی که ممکن است در حاشیه مویینه، در بالای سطح آزاد موجود باشند، نادیده گرفته می‌شوند. چن و همکاران (۲۰۰۸) به صورت عددی، پدیده نشت از بدنه سدهای خاکی غیرهمگن را در شرایط بکارگیری سیستم‌های زهکشی پیچیده مورد بررسی قرار دادند. این پژوهشگران به منظور اعمال شرایط مرزی خاص هیدرولیکی در زهکش‌های بدنه سد روش‌هایی را پیشنهاد کردند. جان فنگ و شنگ (۲۰۰۹) جریان عبوری از بدنه سدهای خاکی همگن را در حالت ناپایدار با ارائه روش عددی بر پایه اجزای محدود مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی این پژوهشگران با داده‌های مشاهده‌ای، دقت بسیار خوب روش

منحنی مشخصه رطوبتی به صورت ثابت و متغیر در نظر گرفته شده است، مشخصات مربوط به هدایت هیدرولیکی ثابت براساس نتایج آزمایش‌های مستقیم انجام شده روی نمونه مصالح منابع قرضه سد تعیین گردید. برای تعیین خصوصیات مربوط به هدایت هیدرولیکی مصالح بدنه در حالت تابعی از مقدار مکش (درصد رطوبت) از روش‌های تخمین توابع انتقالی ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و روش فردلاند و زینگ (۱۹۹۴) استفاده شد. جدول ۲، خصوصیات هیدرولیکی بخش‌های مختلف بدنه را برای حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و شکل ۲، منحنی مربوط به هدایت هیدرولیکی مصالح مختلف بدنه را نشان می‌دهد. در این بررسی به دلیل ضخامت کم لایه فیلتر و زهکش، از تابع هدایت هیدرولیکی پوسته برای این دو لایه استفاده شده است.

صحت‌سنجی مدل

در سد در یک در چهار مقطع عرضی و یک مقطع طولی ابزارهای دقیق برای کنترل رفتار سد استفاده شده است که برای ارزیابی دقت عملکرد و مقایسه و بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی، داده‌های پیژومترهای الکتریکی پی و بدنه واقع شده در سطح مقطع اصلی سد انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفتند. این پیژومترها شامل پیژومترهای الکتریکی بدنه (EPE1- EPE4- EPE5) و پیژومترهای الکتریکی پی (EPF21- EPF22- EPF23- EPF24) می‌باشند. شکل ۳ موقعیت قرارگیری پیژومترهای اشاره شده را نشان می‌دهد.

پس از انجام آنالیز نشت با مشخص کردن مکان هر پیژومتر نصب شده در بدنه و پی سد، نمودار فشار آب منفذی مربوط به هر یک از پیژومترها در حالت آنالیز نشت ناپایدار با هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر ترسیم شد که این نمودارها با داده‌های مشاهده‌ای حاصل شده از گزارش‌های روزانه ابزارهای نصب شده در بدنه و پی سد به مدت حدود چهار سال مورد مقایسه قرار گرفته و میزان خطای مدل در دو حالت مذکور با استفاده از شاخص خطای میانگین مربعات (RMSE) و معیار نش- ساتکلایف (NSE) محاسبه شد.

$$RMSE = n^{-1} \left[\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2 \right] \quad (4)$$

به تغییرات وضعیت تنش و خصوصیات خاک وابسته است. وضعیت تنش در شرایط خاک‌های اشباع و غیراشباع می‌تواند به وسیله شرایط دو متغیر توصیف شود. این دو متغیر $(S-u_a)$ و $(u_a - u_w)$ هستند که در این روابط S تنش کل، u_a فشار هوای منفذی، و u_w فشار آب منفذی است. SEEP/W براساس شرایط ثابت تنش فرمول‌بندی شده است؛ یعنی هیچ‌گونه بارگذاری یا باربرداری روی توده خاک انجام نمی‌شود. همچنین SEEP/W فشار هوای منفذی را در طول جریان ناپایدار برابر فشار اتمسفریک فرض می‌کند. در واقع $(S-u_a)$ ثابت بوده و هیچ تأثیری روی تغییر محتوای آب حجمی ندارد. در نتیجه تغییرات محتوای آب حجمی فقط به تغییرات تنش وابسته است و با ثابت ماندن u_a تغییرات محتوای آب حجمی فقط تابع تغییرات فشار آب منفذی است؛ بنابراین طبق رابطه (۲)، تغییرات محتوای آب حجمی می‌تواند وابسته به تغییرات فشار آب منفذی باشد.

در این معادله m_w شیب منحنی ذخیره است.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = m_w \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (2)$$

باجایگذاری رابطه (۲) در معادله (۱) و لحاظ بار هیدرولیکی به‌عنوان فشار آب در هر نقطه از هندسه مسأله، معادله اصلی حاکم بر جریان نشت که در مدل SEEP/W مورد استفاده واقع شده به صورت زیر است (کراهن، ۲۰۰۴):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w g_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

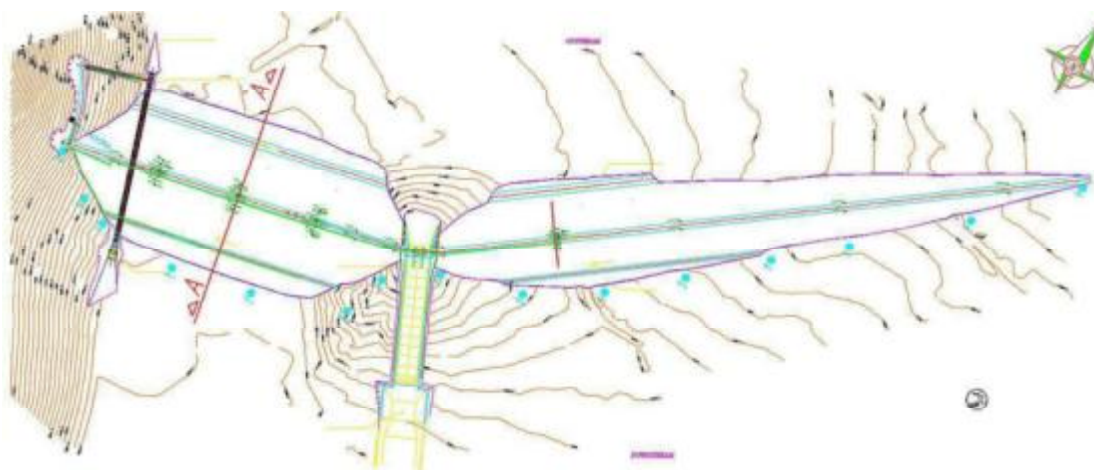
هندسه مسأله و مشخصات مصالح

برای بررسی تأثیر توابع هیدرولیکی در تحلیل نشت از پی و بدنه سدهای خاکی، هندسه و خصوصیات مصالح سد خاکی در یک استفاده شده است. این سد از نوع خاکی با هسته رسی قائم بوده و در فاصله ۱۳ کیلومتری جنوب غرب شهرستان سلماس واقع شده است. شکل ۱ پلان سد و همچنین مقطع اصلی مطالعه شده این سد را نشان می‌دهد. برای آب‌بندی پی از پرده آب‌بند با عمق تقریباً ۲۵ متر در زیر هسته سد استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات عمومی بدنه این سد را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه خصوصیات مصالح شامل هدایت هیدرولیکی و

و NSE ضریب کارایی مدل است که نشان‌دهنده میزان انطباق داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی است. تغییرات این ضریب بین ۱ و $-\infty$ است و ۱ بهترین انطباق بین این دو را نشان می‌دهد و زمانی که مقدار این ضریب نزدیک به ۱ باشد، نشان‌دهنده این است که داده‌های مشاهده‌ای، پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل دارند. دقت و نتایج مدل تا زمانی که مقدار این ضریب بیشتر از صفر باشد قابل قبول است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{mean}^{obs})^2} \quad (5)$$

y_i^{obs} داده‌های مشاهده‌ای، y_i^{sim} داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، y_{mean}^{obs} میانگین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی است. RMSE معیاری است که در واقع اختلاف مقادیر مدل‌سازی و یا شبیه‌سازی شده را با مقادیر واقعی مشاهده شده، اندازه‌گیری می‌کند. این معیار خطاهای بزرگ را بیشتر از خطاهای کوچک جذب می‌کند



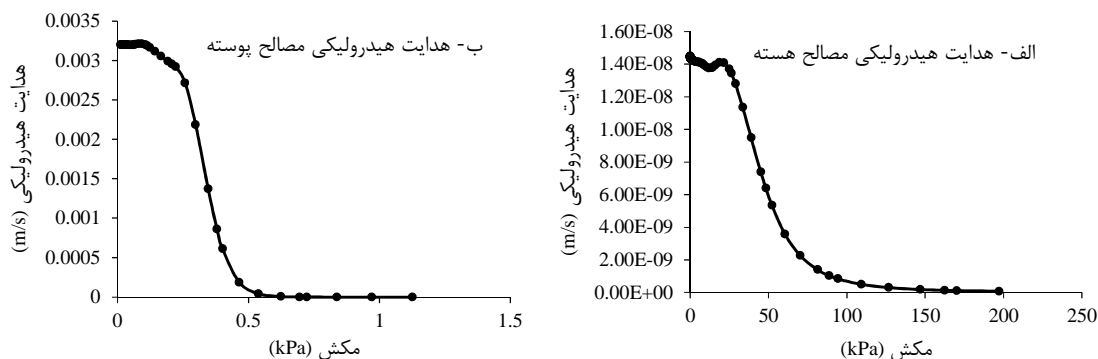
شکل ۱- پلان سد دریک و مقطع مطالعه شده آن (A-A)

جدول ۱- مشخصات کلی هندسه سد دریک در مقطع A-A

N.W.L (m)	عمق دیوار آب‌بند (m)	ضخامت پی (m)	ضخامت زهکش (m)	ضخامت فیلتر (m)	عرض هسته در تاج (m)	عرض تاج (m)	ارتفاع سد (m)
۴۸	۲۵	۲۵	۲	۲	۵	۸	۳۱

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی مصالح (در حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت)

درصد رطوبت اشباع	نفوذپذیری اشباع ($\frac{m}{sec}$)	مصالح
۰/۴	$1/45 \times 10^{-8}$	هسته
۰/۳	$3/2 \times 10^{-3}$	فیلتر
۰/۳۲	$3/2 \times 10^{-3}$	پوسته
۰/۳	$3/2 \times 10^{-3}$	زهکش
۰/۳	$3/2 \times 10^{-3}$	فرازبند
۰/۰۵	$5/5 \times 10^{-9}$	دیوار آب‌بند
۰/۳	$2/62 \times 10^{-3}$	پاشنه سنگریزه‌ای
۰/۳۵	$1/2 \times 10^{-5}$	پی
۰/۴	$1/45 \times 10^{-8}$	هسته



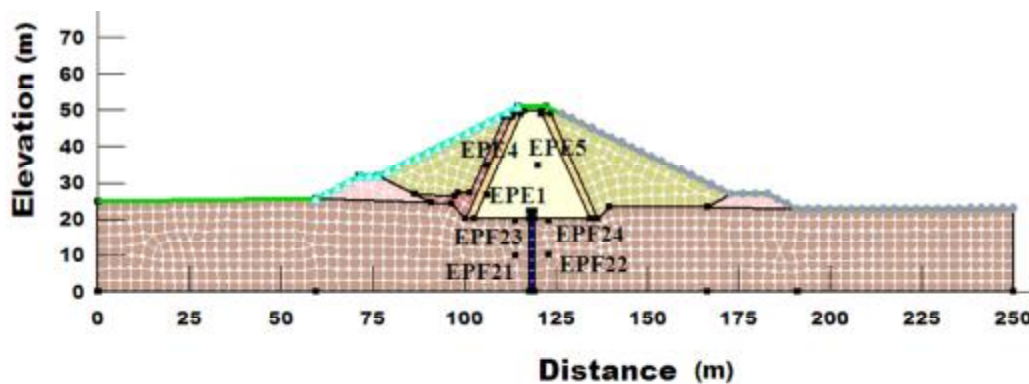
شکل ۲- تابع هدایت هیدرولیکی اعمال شده برای (الف) هسته و (ب) مصالح درشت دانه

نتایج و بحث

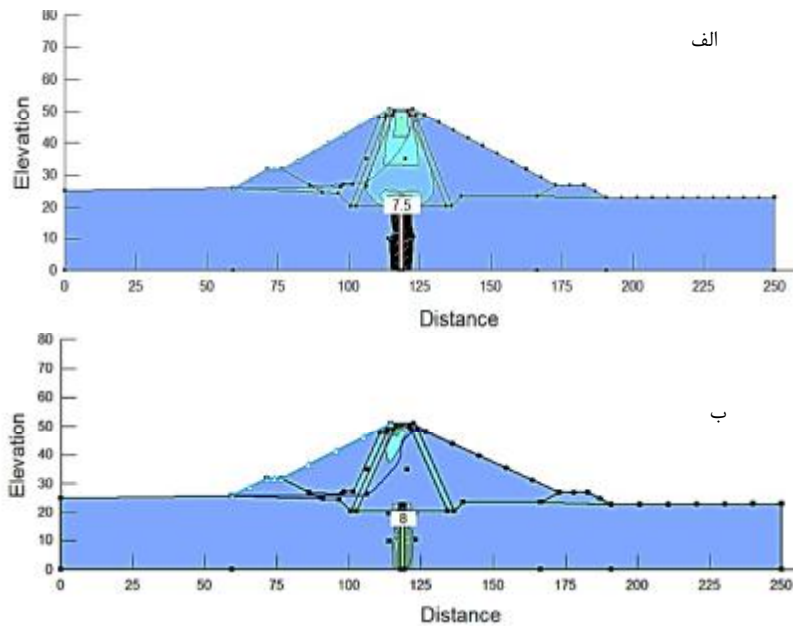
آنالیز جریان پایدار

شکل ۳ نتایج حاصل از تحلیل و شبیه‌سازی جریان از بدنه سد در حالت پایدار در شرایط تراز نرمال سطح آب در مخزن را در دو حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر (تابعی از مکش خاک) نشان می‌دهد. هر چند که شرایط نشت پایدار با توجه تغییرات سطح تراز مخزن در فصول مختلف غیرممکن است؛ ولی انجام آنالیز پایدار به‌عنوان شرط اولیه تحلیل جریان ناپایدار ضروری است. با توجه به شکل ۴، پروفیل سطح فریاتیک در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت با مبنا و شکل واقعی پروفیل سطح آب در تناقض است؛ به‌طوری که طبق سوابق و معادلات حاکم، پروفیل نشت آب با سطح فریاتیک بایستی تقعر رو به پایین داشته باشد؛ زیرا سطح فریاتیک در شرایط صحیح دارای معادله سهمی شکل است. علت ظاهر شدن چنین حالتی اعمال مقدار هدایت

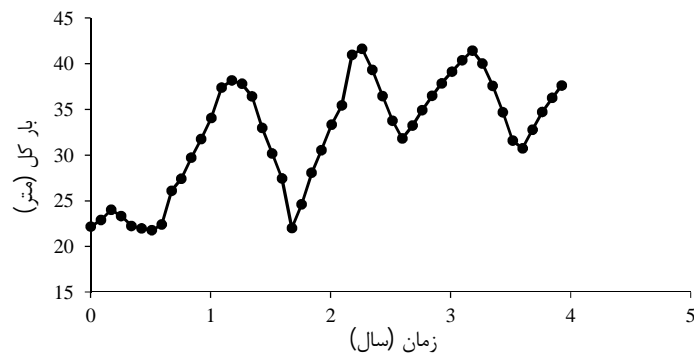
هیدرولیکی برابر با حد اشباع برای قسمت غیراشباع است. به‌طوری که این عمل باعث ایجاد حالت مکش در بخش خشک بدنه می‌شود و پروفیل نشت پایین افتادگی زیادی پیدا می‌کند که سبب افت شدید جریان در طول مسیر نشت می‌شود. در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی به‌صورت تابع هدایت هیدرولیکی شکل ۴- ب سطح نشت تقعری رو به پایین دارد که مطابق با شرایط واقعی است. همچنین مقادیر گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده در این شرایط در شکل ۴ نشان داده شده است با توجه به این شکل، در هر دو حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر مقدار و موقعیت حداکثر گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده بسیار مشابه است. مقدار آن در حالت هدایت هیدرولیکی پایدار ۷/۵ در حالت متغیر ۸ و موقعیت آن در اطراف پرده آب‌بند می‌باشد که علت آن افت شدید انرژی جریان در عرض محدود پرده آب‌بند است.



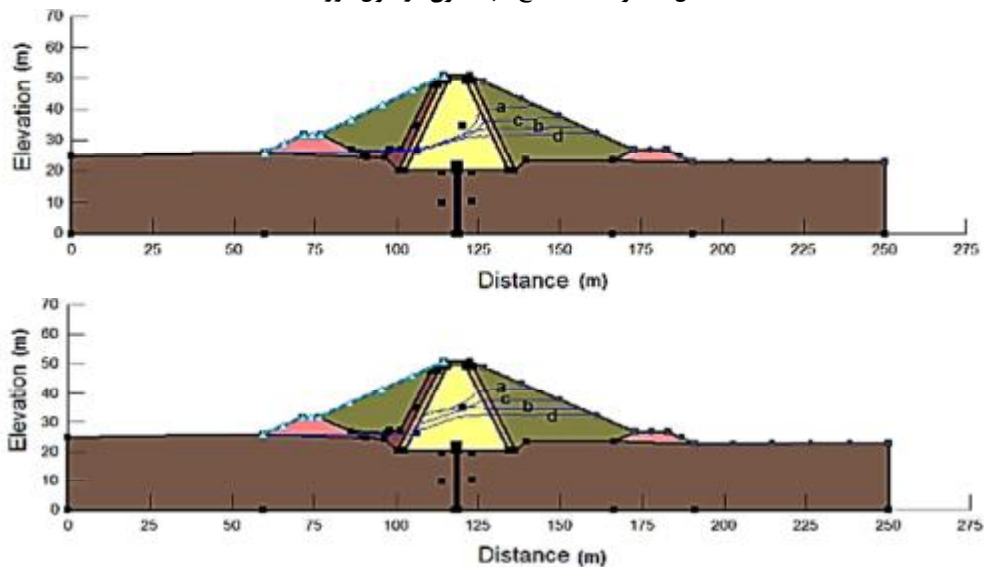
شکل ۳- موقعیت پیزومترها در مقطع عرضی A-A



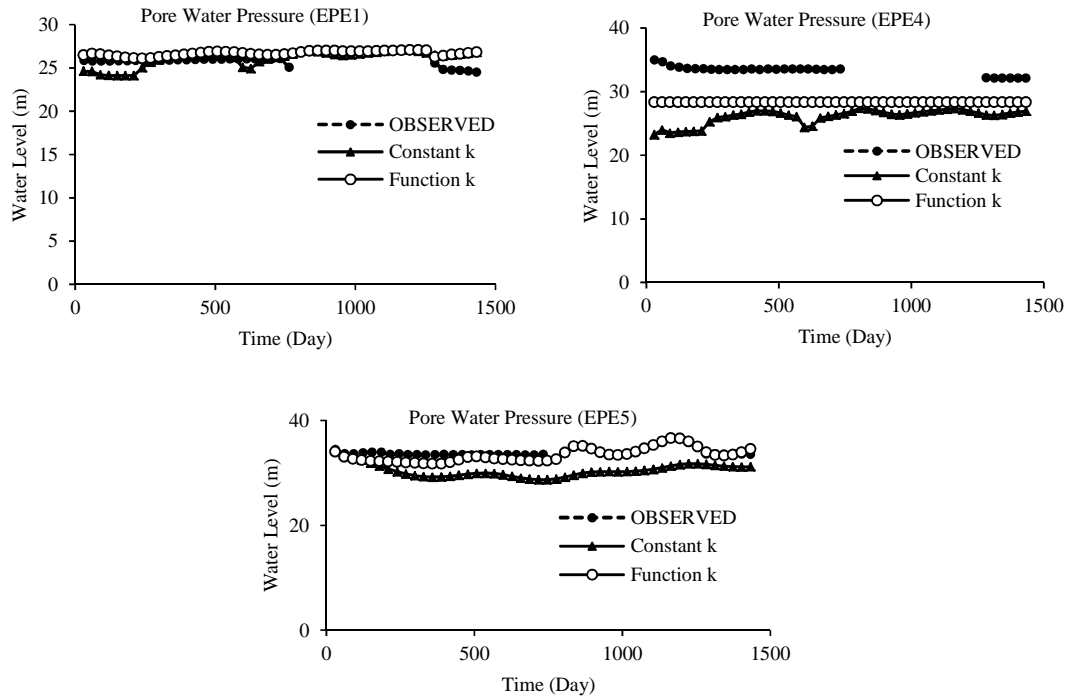
شکل ۴- موقعیت خط نشت و گرادیان هیدرولیکی در حالت پایدار. الف- با هدایت هیدرولیکی ثابت و ب- هدایت هیدرولیکی متغیر



شکل ۵- نوسانات سطح آب مخزن در طول دوره مطالعه



شکل ۶- (الف) موقعیت سطح ایستابی در حالت ناپایدار با هدایت هیدرولیکی ثابت، سال ۹۰ و (ب) موقعیت سطح ایستابی در حالت ناپایدار با هدایت هیدرولیکی متغیر، سال ۹۰. $a=3.19$, $b=3.44$, $c=3.93$, $d=3.68$



شکل ۷- مقایسه مقدار فشار آب در پیزومترهای واقع در بدنه سد با نتایج مدل عددی در حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر

در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر و مشاهداتی دیده می‌شود. در شکل ۸ خطوط a, b, c و d موقعیت سطح ایستابی را به ترتیب در زمان‌های ۳/۱۹ (سه سال و نوزده روز)، ۳/۴۴، ۳/۹۳ و ۳/۶۸ پس از شروع آنالیزهای ناپایدار نشان می‌دهد.

برای بررسی تغییرات فشار آب منفذی برآورد شده در پی، داده‌های حاصل از پیزومترهای اطراف پرده آب‌بند آنالیز و بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بین نتایج مربوط به پیزومترهای بالادست و پایین‌دست پرده آب‌بند اختلاف فاحشی وجود دارد. بدین صورت که در پیزومترهای پایین‌دست پرده آب‌بند (EPF21, EPF23) اختلاف بین داده‌های مدل و مشاهده‌ای بیشتر از پیزومترهای بالادست است. این موضوع عملکرد بسیار خوب پرده آب‌بند در کاهش فشار آب و عبور جریان از پی می‌باشد؛ البته این نکته هم لازم است توضیح داده شود که به دلیل نبود وجود سیستم اندازه‌گیری زهاب در سد دریکی، امکان واسنجی سیستم پرده آب‌بند در مدل براساس مقدار نشت عبوری میسر نبود؛ به همین منظور میزان هدایت هیدرولیکی در پرده آب‌بند بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته در زمان طراحی برابر

طبق نتایج ارائه شده در شکل ۷، نتایج مدل در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر تطابق بهتری با داده‌های ثبت شده دارد؛ در حالیکه اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و نتایج مدل در حالت هدایت هیدرولیکی ثابت اختلاف بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های نشان داده شده مشاهده می‌شود که بخشی از داده‌های مشاهده‌ای مربوط به پیزومترها به دلیل عدم کارکرد سیستم ثبت داده‌های ابزار دقیق، حفظ نشده است؛ ولی با توجه به داده‌های موجود مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف در داده‌های مربوط به پیزومتر شماره ۴ واقع در زهکش مایل پایین‌دست هسته است؛ به طوری که در هر دو حالت برآورد مدل از مقدار فشار کمتر از مقدار مشاهده‌ای است. علت این موضوع ممکن است به دلیل عدم کارکرد صحیح زهکش در تخلیه زهاب خروجی باشد که باعث تجمع فشار آب منفذی در این نقطه شده است. در شرایط ایده‌آل، فشار موجود در این نقطه می‌بایستی برابر فشار اتمسفر و بارکل برابر با ارتفاع استاتیکی موقعیت پیزومتر نسبت به سطح مبنا باشد. در هر حال پیزومتر ۵ واقع بر بخش میانی هسته به صورت شاخصی برای ارزیابی عملکرد مدل کامپیوتری می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد که در این پیزومتر انطباق بسیار خوبی بین نتایج داده‌های مدل

استنباط کرد که داده‌های مقدار نشت عبوری حاصل از اعمال هدایت هیدرولیکی غیراشباع نتایج بهتر و دقیق‌تری ارائه دهد؛ با وجود این نیاز به تحلیل و بررسی بیشتر در این خصوص ضروری است.

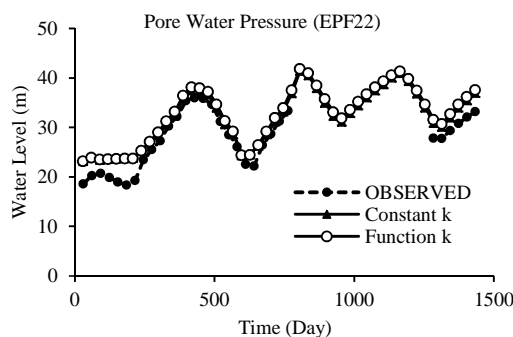
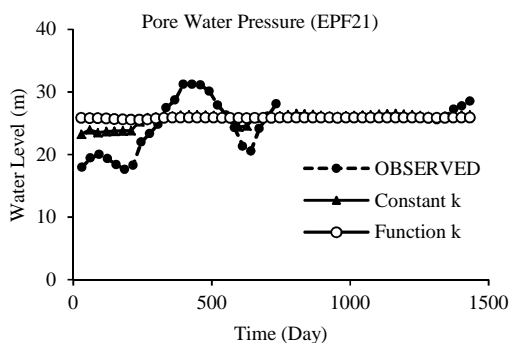
بررسی‌های مربوط به تحلیل کمی دقت نتایج حاصل از مدل عددی را در برآورد فشار آب منفذی بر مبنای دو حالت مختلف به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر و براساس شاخص‌های RMSE و NSE در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که دقت مدل در برآورد مقدار فشار آب منفذی در داخل هسته در هر دو حالت هدایت هیدرولیکی متغیر و ثابت کم است؛ با این حال دقت نتایج در شرایط اعمال هدایت هیدرولیکی متغیر تا ده برابر بهتر از حالتی است که هدایت هیدرولیکی مصالح بدنه به صورت ثابت انتخاب می‌شود. مقایسه پارامترهای آماری جدول ۴ نشان می‌دهد که نتایج محاسبه فشار در داخل پی در هر دو حالت کاربرد هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر مشابه است؛ با این حال به دلیل سرعت همگرایی بالای مدل در حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت، دقت برآورد نتایج مربوط به هدایت هیدرولیکی ثابت اندکی بیشتر از حالت مربوط به هدایت هیدرولیکی متغیر است.

بدین ترتیب می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در هر ناحیه‌ای از بدنه سد که به صورت نیمه‌اشباع باشد، استفاده از هدایت هیدرولیکی غیراشباع توصیه می‌شود و برای نواحی که به صورت اشباع کامل باشند، مانند پی سد، اعمال هدایت هیدرولیکی به صورت ثابت نتیجه بهتری می‌تواند ارائه دهد.

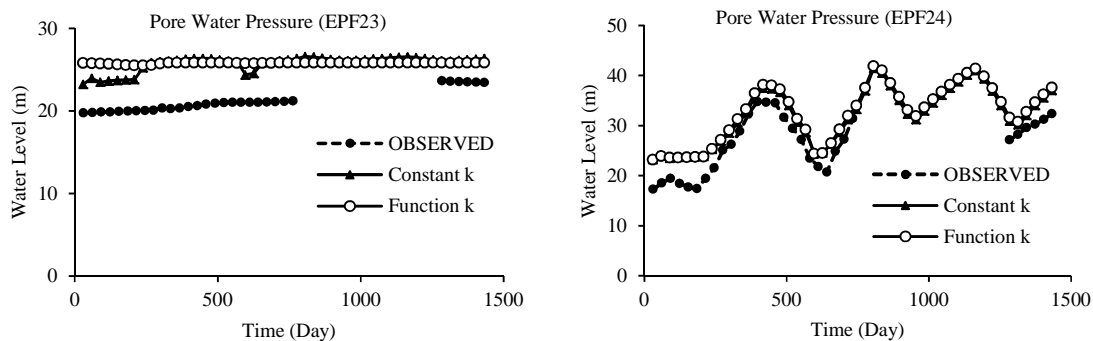
$10^{-9} \times 5/5$ (متر در ثانیه) انتخاب شد. با این حال مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های پیزومترهای بالادست پرده آب‌بند تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. به طوری که نوسانات سطح آب در مخزن به خوبی در نتایج این پیزومترها تأثیرگذار بوده و شرایط واقعی به خوبی با پیش‌بینی مدل در هر دو حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر برآورد شده است. علت تطابق خوب داده‌های حاصل از آنالیز مربوط به هدایت هیدرولیکی ثابت در این پیزومترها این است که پی همیشه در حالت اشباع است و در این بخش تغییرات مکش و به دنبال آن تغییرات هدایت هیدرولیکی اتفاق نمی‌افتد.

مقدار نشت در حالت ناپایدار (هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر)

برای بررسی مقادیر نشت و مقایسه آن‌ها در شرایط اعمال هدایت هیدرولیکی ثابت و تابع هیدرولیکی، مقدار نشت عبوری از بدنه سد برای این دو حالت محاسبه شد و نتایج این بررسی در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق جدول ۳ مقایسه مقادیر دبی نشت عبوری از بدنه سد در طی دوره‌های مختلف نشان می‌دهد که مقدار دبی عبوری در حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع بسیار کمتر از حالت هدایت هیدرولیکی ثابت است. در مواردی این اختلاف بیش از دو هزار برابر، برآورد می‌شود هرچند که برای صحت‌سنجی این بخش از نتایج، داده ثبت شده و یا مشاهده‌ای وجود ندارد. با توجه به اینکه در بخش تحلیل نشت از بدنه، نتایج مربوط به خط نشت در حالت هدایت هیدرولیکی پایدار دقت بالایی را نشان داد، می‌توان



شکل ۸- مقایسه پیزومترهای واقع بر پی با نتایج حاصل از تحلیل عددی در حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر



ادامه شکل ۸-

جدول ۳- میزان جریان عبوری از بدنه سد در یک محاسبه شده بر اساس هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر

شماره	زمان	نشست از واحد عرض سد در حالت ناپایدار (K_{var})		$\frac{K_{cons} - K_{var}}{K_{var}}$
		$(\frac{m^3}{day})$	$(\frac{m^3}{day})$	
۱	۸۹ روز و ۶ ساعت	۰/۰۹۷۳	۰/۰۰۸۶	۱۰/۱۹۹
۲	۱۷۹ روز	۰/۰۱۰۸	۰/۰۲۴	-۰/۵۵۵
۳	۲۶۹ روز	۲۰/۸۳۱	۰/۰۱۱۷	۱۷۶۷/۲۴۳
۴	۳۵۸ روز	۱۳۳/۱۵۱	۰/۰۵۸۹	۲۲۵۷/۴۵۲
۵	۱ سال و ۲۳ روز	۲۳۴/۳۷۷	۰/۰۹۷۸	۲۳۹۴/۹۵۴
۶	۱ سال و ۴۷ روز	۹۶/۷۶۸	۰/۰۴۷۲	۲۰۴۷/۹۹۲
۷	۱ سال و ۷۲ روز	$۵/۱۲ * ۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۷۵	-۰/۹۹۳
۸	۱ سال و ۹۶ روز	۱۰۷/۲۶۵	۰/۰۴۷۶	۲۲۵۰/۱۳۳
۹	۲ سال و ۲۱ روز	۳۲۲/۸۵۰	۰/۱۲۵۵	۲۵۷۱/۴۲۱
۱۰	۲ سال و ۴۵ روز	۱۸۵/۱۳۷	۰/۰۸۱۵	۲۲۶۹/۱۳۱
۱۱	۲ سال و ۷۰ روز	۱۴۲/۴۸۲	۰/۰۶۲۱	۲۲۹۲/۲۸۳
۱۲	۲ سال و ۹۴ روز	۲۳۷/۱۱۶	۰/۶۱۴۵	۳۸۴/۸۸۴
۱۳	۳ سال و ۱۹ روز	۳۱۳/۴۶۷	۰/۱۲۴۶	۲۵۱۳/۱۰۱
۱۴	۳ سال و ۴۴ روز	۱۶۵/۱۶۲	۰/۰۷۲۵	۲۲۷۵/۲۵۶
۱۵	۳ سال و ۶۸ روز	۱۲۳/۹۴۰	۰/۰۵۴۳	۲۲۷۸/۴۴۴
۱۶	۳ سال و ۹۳ روز	۲۲۶/۷۶۵	۰/۰۹۳۹	۲۴۱۳/۹۷۹

جدول ۴- مقادیر خطای محاسبه شده

پیزومتر	RMSE		NSE	
	K_{cons}	K_{var}	K_{cons}	K_{var}
EPE1	۱/۳۷۹	۱/۰۰۴	-۵/۰۱۹	-۳/۳۸۳
EPE4	۶۲/۶۷۹	۲۵/۴۱۴	-۱۲۹/۰۷	-۵۱/۷۳۸
EPE5	۱۰/۸۶۳	۱/۳۰۷	-۲۵۱/۸۴۸	-۲۹/۴۴۳
EPF21	۱۱/۱۷۱	۱۸/۴۱۵	۰/۳۷۰	-۰/۰۳۶
EPF22	۷/۴۰۹	۸/۸۳۰	۰/۷۵۹	۰/۷۱۲
EPF23	۱۹/۹۷۴	۲۳/۳۷۴	۰/۹۸۸	۰/۹۸۶
EPF24	۱۴/۴۰۳	۱۶/۶۸۲	۰/۵۴۲	۰/۴۶۹

نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نتایج زیر قابل بیان است:

در این آنالیز نوسانات سطح آب مخزن در طول یک دوره چهار ساله (سال‌های ۸۷-۹۰) تعریف و آنالیز جریان ناپایدار با هدایت هیدرولیکی اشباع و متغیر انجام گرفت. موقعیت سطح ایستابی در پایان هر دوره سه ماه و میزان گرادیان هیدرولیکی در انتهای هر فصل برای هر کدام از آنالیزها مشخص شد. نتایج به دست آمده از این آنالیزها به این شرح است: در شرایط پایدار سطح آب مخزن برابر با ۴۸ متر است و به دلیل افت ناگهانی سطح آب در حالت ناپایدار این فشار به صورت یک برآمدگی در سطح نشت داخل هسته مشاهده می‌شود که با گذشت زمان از مقدار آن کاسته می‌شود.

در حالتی که هدایت هیدرولیکی متغیر در تحلیل نشت به کار گرفته شود، مقدار فشار آب حفره‌ای و پروفیل نشت در داخل هسته و بدنه سد به‌طور دقیق‌تری قابل تعیین است و انطباق بهتر داده‌های صحرایی با داده‌های این بخش از تحلیل گواه این پدیده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقدار فشار آب منفذی در حالتی هدایت هیدرولیکی به صورت تابع بیان می‌شود، بیشتر از حالتی است که مقدار هدایت هیدرولیکی به صورت ثابت فرض شود. مقدار گرادیان هیدرولیکی در این آنالیز در محدوده پی بیشتر از به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت است. گرادیان هیدرولیکی محاسباتی در بدنه و پی سد نشان داد که مقدار آن در فصل بهار که سطح آب مخزن در بیشترین کد ارتفاعی قرار دارد، نسبتاً زیاد (در حدود ۵) و بیش از حد مجاز است. همچنین کمترین مقدار گرادیان هیدرولیکی مربوط به فصل تابستان و زمانی است که سطح آب مخزن در کد ارتفاعی پایینی قرار دارد. مقایسه مقادیر دبی نشت عبوری از بدنه سد در طی دوره‌های به مدت سه ماه (فصلی) نشان می‌دهد که مقدار نشت در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر کمتر از حالتی است که هدایت هیدرولیکی به صورت ثابت اعمال می‌شود به‌گونه‌ای که در مواردی این اختلاف بیش از دویست برابر است. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که برای بدنه سد شامل پوسته، هسته و فیلتر و زهکش اعمال هدایت هیدرولیکی به صورت تابع مناسب‌تر است؛ در حالی که

برای پی و بخش‌های اشباع به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی به‌صورت ثابت کافی است.

در نهایت در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت دبی جریان بیشتر از حالت هدایت هیدرولیکی متغیر محاسبه شده است و فشار آب منفذی ایجاد شده در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر بیشتر از حالتی است که هدایت هیدرولیکی ثابت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در شرایط اعمال هدایت هیدرولیکی متغیر، فشار آب منفذی در هسته بیشتر از حالت هدایت هیدرولیکی ثابت حاصل می‌شود و به واقعیت نزدیک‌تر است؛ بنابراین طراحی بر این اساس باعث بالا رفتن ضرایب اطمینان پایداری سد در واقعیت خواهد بود.

منابع

۱. احمدی ح. رضایی ح. و زینالزاده ک. ۱۳۹۳. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تابع هدایت هیدرولیکی بر مدل‌سازی نشت از بدنه سدهای خاکی ۸. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۳): ۲۲۹-۳۰۷.
۲. احمدی ح. و رضوردی‌نژاد و. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی در تحلیل نشت غیرمحصور (مطالعه موردی سد خاکی حسنلو). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۳): ۴۳۰-۴۴۲.
3. Bardet J. and Tobita T. 2002. A practical method for solving free-surface seepage problems. *Comput Geotech.* 29: 451-75.
4. Berrones R. F. and Acosta N. P. 2011. Internal Erosion Due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures, *Soil Erosion Studies*. Dr. Danilo Godone (Ed.) InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/soil-erosion-studies/internal-erosion-due-to-waterflow-through-earth-dams-and-earth-structures>.
5. Chen Y. Zhou C. and Zheng H. 2008. A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems. *Computers and Geotechnics.* 35: 383-393.
6. Fredlund D. G. and Anqing Xing. 1994. Equation for soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal.* 31: 521-532.
7. Ji C. Wang Y. and Shi N. 2005. Application of modified EP method in steady seepage analysis. *Computers and geotechnics.* 32: 27-35

8. Jun-feng F. and Sheng J. 2009. A study on unsteady seepage flow through dam. *Journal of Hydrodynamics*. 21(4): 499-504
9. Krahn J. 2004. Geostudio. Seepage Modeling with SEEP/W an Engineering methodology. GEO- SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
10. Mizumara K. and Kaneda T. 2010. Boundary Condition of Groundwater Flow through Sloping Seepage Face. *Journal of hydrological engineering*. 15: 718-724.
11. Noori B. and Esmaeel K. H. 2010. Evaluation of Seepage and Stability of Duhok Dam. *Al-Rafidain Engineering*. 19(1): 42-58.
12. Nourani V. Aminfar M. H. Alami M. T. Sharghi E. and Singh V. P. 2014 Unsteady 2-D Seepage Simulation Using Physical Analog, Case of Sattarkhan Embankment Dam. *Journal of Hydrology* .doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.011>
13. Van Genuchten M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44: 892-898.
14. Xu Y. Q. Unami K. and Kawachi T. 2003. Optimal Hydraulic Design of Earth Dam Cross Section Using Saturated-Unsaturated Seepage Flow Model. *Advances in water resources*. 26: 1-7.

