نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ششم ، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۵

ISSN 2251-7480

اصلاح معادلات تجربی برآورد نشت با استفاده از تشابه ابعادی (کانال خاکی بلداجی، استان چهارمحال و بختیاری)

احسان توکلی[۱*]، بهزاد قربانی[۲]، حسین صمدی بروجنی[۳]، مهدی رادفر[۲] و بیژن قهرمان[٤]

۱*) دانشجو دکتری تخصصی؛ گروه مهندسی آب؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: eh_ta84@yahoo.com

۲) دانشیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران

۳) استادیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران

٤) استاد؛ گروه مهندسی آب؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۳۰

چکیده

تلفات زیاد از کانال‌های آبیاری سبب شده که پوشش‌دهی کانال‌های انتقال به عنوان یکی از راهکارهای مهم در افزایش بازده انتقال آب مطرح شود. توجیه فنی پوشش انهار خاکی نیاز به بررسی میزان نشت و نفوذ آب در آن‌ها دارد. در پژوهش حاضر، میزان نشت و نفوذ از کانال خاکی بلداجی، شهرستان بروجن استان چهارمحال و بختیاری، با بافت خاک لومی، با استفاده از مدل فیزیکی و روابط تشابه ابعادی، در محدوده دبی‌های ۴۰ تا ۱۰۰ لیتر در ثانیه اندازه‌گیری شد. بدین منظور از معادلات تجربی موریتز، اینگهام، هندوستان، مولس‌ورس و ینی‌دومیا، آفنگندن و دیویس–ویلسون برای تخمین نشت و نفوذ استفاده شد. نتایج نشان داد پیش از اصلاح ضرایب معادلات، نتایج روش اینگهام بیشترین مقدار R^2 (۰/۹۱۷) را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. در این روش، متغیرهای مستقل، عمق آب، طول کانال و محیط خیس‌شده می‌باشند. ولی پس از واسنجی معادلات تجربی برای کانال مورد نظر و اصلاح ضرایب آنها نیز روش موریتز و اینگهام، با بیشترین مقدار R^2 (> ۰/۹۰) و کمترین مقدار RMSE (< ۳/۲ لیتر) به عنوان روابط برتر تخمین نشت در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شدند. تمامی معادلات نشت، در ابتدا کم‌برآورد نشان دادند که اصلاح ضرایب، منجر به رفع این مشکل گردید. استفاده از تشابه ابعادی و انتقال شرایط کانال به آزمایشگاه سبب کاهش هزینه و صرفه‌جویی در وقت شد که با حصول نتایج قابل قبول و قابل مقایسه با مطالعات پیشین، می‌توان به‌کارگیری این روش را در شرایط کنترل شده‌ی آزمایشگاه برای مناطق مشابه نیز پیشنهاد نمود.

کلید واژه‌ها: روش اینگهام؛ روش موریتز؛ مدل فیزیکی؛ نشت و نفوذ

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک چون ایران، عدم دسترسی به منابع آب کافی است. با این وجود، متاسفانه از منابع آب موجود هم استفاده بهینه نمی‌شود. مقادیر بازده انتقال و توزیع آب در مناطق مختلف ایران بسیار متغیر است. طبق گزارش معاونت بهره‌برداری و مدیریت منابع آب کشور (۱۳٦۹) بازده انتقال حدود ٦۸ درصد می‌باشد. مقادیر اندک راندمان انتقال آب در کانال‌های توزیع عمدتا ناشی از تلفات نشت و نفوذ در کانال‌های خاکی است (Sepaskhah

Archive of SID

www.SID.ir

and Salemi، 2004). نشت و نفوذ، مهم‌ترین بخش تلفات در حین انتقال آب کشاورزی (Wang *et al.*, 2002) و یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در طراحی شبکه‌های آبیاری به شمار می‌رود. با توجه به اهمیت حیاتی آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مثل ایران، حفاظت از منابع آب و استفاده بهینه از آن امری ضروری است. بنابراین، شناخت و کمی‌کردن فرایند نشت و نفوذ از کانال به منظور حفاظت منابع آب، مدیریت آب‌های سطحی و زیرزمینی، تعیین شدت عوارض مرتبط با نشت و نفوذ و نیز ارزیابی منافع فنی و مادی بالقوه روش‌ها و فناوری‌های کاهش نشت، اجتناب‌ناپذیر است (Gates and Martin, 2014). روش‌های متعددی برای کمی‌کردن و تخمین نشت و نفوذ از کانال‌ها معرفی شده‌اند که به طور کلی عبارتند از: روش‌های مستقیم که شامل انواع روش‌های میدانی (روش ورودی–خروجی، روش حوضچه، seepage meter) می‌شوند و روش‌های غیرمستقیم (روش‌های مبتنی بر روابط تجربی از جمله روش اینگهام[1]، دیویس–ویلسون[2]، موریتز[3]، روش هندوستان[4]، مولس‌ورس و ینی‌دومیا[5]، آفنگندن[6]، ودرنیکف[7]، موسکات[8]، کوستیاکف[9]، سوبرامانیا[10]، میسرا[11]، روش‌های حل تحلیلی و روش‌های قیاسی[12] (Ali, 2011).

روش‌های مستقیم اندازه‌گیری نشت آب از کانال‌ها کاربردی‌تر و دقیق‌تر هستند ولی نیاز به صرف هزینه و وقت بیشتری نسبت به روش‌های غیرمستقیم دارند. انتقاد اصلی وارد بر روش‌های غیرمستقیم، فرض شرایط طبیعی همگن است که در طبیعت به ندرت روی می‌دهد. با این حال، این روش‌ها می‌توانند تلفات نشت را به صورت کمی پیش‌بینی نمایند (Moghazi and Ismail, 1997). روابط تجربی تخمین نشت از کانال براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای در شرایط مختلف توسعه داده شده‌اند (Cui *et al.*, 2004)؛ لذا، با توجه به منطقه‌ای بودن ضرایب معادلات تجربی ارایه شده، کاربرد این روابط در هر منطقه نیاز به واسنجی دارد (سالمی و سپاسخواه، ۱۳۸۵).

عراق علوی (۱۳۷۳) برای ۱۸ کانال خاکی درجه ۳ و ٤ زیردست زاینده‌رود (مناطق جوزدان، گرگن لنجان و نجف‌آباد در استان اصفهان)، روش‌های تجربی برآورد نشت را مقایسه نمود. سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) پس از بررسی ۹ کانال خاکی در رودشت اصفهان با بافت سنگین، متوسط و سبک و پوشش گیاهی کم، متوسط و زیاد، با روش جریان ورودی–خروجی، به واسنجی و صحت‌سنجی معادلات تجربی نشت (اینگهام، دیویس–ویلسون، آفنگندن، موریتز، مولس‌ورس و ینی‌دومیا، میسرا و روش هندوستان) پرداختند و معادلات رگرسیونی خطی بین نشت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برقرار کردند. نوری محمدیه و همکاران (۱۳۸۹) دقت معادلات تجربی اینگهام، موریتز، دیویس–ویلسون، مولس‌ورس و ینی‌دومیا و میسرا را نسبت به روش حوضچه در سه کانال موجود در دشت قزوین بررسی نمودند. حیدری‌زاده و سالمی (۱۳۹۳) از داده‌های اندازه‌گیری شده نشت برای برآورد نشت آب در ۹ کانال خاکی با ۳ تکرار استفاده کردند و معادله اینگهام (بهترین معادله تجربی واسنجی شده در کانال‌های خاکی رودشت اصفهان) را با معادله تئوری ودرنیکف مقایسه نمودند. استدلال ایشان برای انتخاب معادله اینگهام این بود که اگر نتایج برآورد نشت از معادله تئوری بر نتایج بهترین معادله تجربی رجحان داشت بر بقیه هم برتری خواهد داشت. Salemi و Sepaskhah (۲۰۰۱) معادلات تجربی برآورد نشت آب از کانال‌های خاکی را در شبکه آبیاری دشت برخوار استان اصفهان مورد بررسی قرار دادند. رستمیان و عابدی کوپایی (۱۳۹۰) توانایی مدل

[1] Ingham
[2] Davis-Wilson
[3] Moritz
[4] India
[5] Molesworth and Yennidumia
[6] Offengenden
[7] Vedernikov
[8] Muscat
[9] Kostiakov
[10] Subramanya
[11] Misra
[12] Analogues

Archive of SID
www.SID.ir

SEEP/W را برای تخمین مقدار نشت از ۷ کانال خاکی درجه ۳ و ٤ پایین‌دست سد زاینده‌رود مورد بررسی قرار داده و نتایج را با روش بیلان آبی و روش‌های تجربی (دیویس–ویلسون، موریتز، اینگهام و مولس‌ورس و ینی-دومیا) مقایسه کردند. به طور کلی در مطالعات پیشین، نتایج نشت محاسبه شده با معادلات تجربی با مقادیر نشت اندازه‌گیری شده از کانال، مقایسه شده و تنها در برخی پژوهش‌ها (سالمی و سپاسخواه، ۱۳۸۵ و Sepaskhah and Salemi, 2004) ضرایب معادلات واسنجی شده‌اند. عدم واسنجی ضرایب معادلات تجربی که برای شرایط خاص منطقه‌ای تعیین شده‌اند، از نقاط ضعف بیشتر مطالعات بررسی شده است. از سوی دیگر، نیاز به انجام آزمایش‌های برآورد نشت در محل کانال، این مطالعات را وقت‌گیر و پرهزینه کرده است. در این راستا می‌توان از مدل‌سازی فیزیکی برای انجام آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده‌ی آزمایشگاه بهره برد.

مدل‌سازی فیزیکی، بررسی یک پدیده و یا پیش‌بینی رفتار در نمونه اصلی[1] از طریق یک مدل مشابه کوچکتر یا بزرگتر (مدل) و مطالعه آن در مدل فیزیکی است. به این منظور، ابتدا با استفاده از روابط ریاضی، طرح اولیه برای ساخت مدل فیزیکی ارائه می‌شود. پس از ساخت و انجام آزمایش روی مدل، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها از مدل به نمونه اصلی قابل تعمیم خواهد بود (Streeter و Wylie، ۱۹۷۹).

برای شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی در قالب مدل‌های فیزیکی یا آزمایشگاهی از تشابه ابعادی استفاده می‌گردد (Streeter and Wylie, 1979). یک مدل فیزیکی کاملا مشابه نمونه اصلی است معیارهای سه‌گانه زیر را در تشابه ابعادی برآورده می‌نماید (Chanson, 2004):

تشابه هندسی: تشابه در شکل، یعنی همه ابعاد طولی در مدل، L_r برابر کوچکتر/بزرگتر از نمونه اصلی باشند.

تشابه کینماتیکی: تشابه حرکت و سرعت بین اجزای مدل و نمونه اصلی

تشابه دینامیکی: نیازمند تشابه هندسی و کینماتیکی است؛ به علاوه‌ی اینکه تمام نسبت‌های نیرو در دو سیستم یکسان باشند.

در مدل‌سازی فیزیکی برای تعیین مقیاس و ابعاد مدل هندسی از معادله ۱ استفاده می‌شود:

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \qquad (۱)$$

که در آن، L_r نسبت طول ابعاد مدل به نمونه اصلی، L_p طول بعد در نمونه اصلی و L_m طول بعد نظیر در مدل فیزیکی است.

بیشتر پدیده‌های هیدرولیکی، به ویژه در جریان‌های باز (سازه‌های هیدرولیکی، موج‌ها، مبدل‌های انرژی موج و ...) با استفاده از عدد فرود (نسبت نیروی اینرسی به نیروی جاذبه) مدل‌سازی می‌شوند (Ettema, 2000. Heller, 2012). به منظور بررسی اثرات مقیاسی مدل‌سازی فیزیکی، عدد رینولدز و عدد وبر نیز کنترل می‌شود. عدد فرود، رینولدز و وبر به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند (Chanson, 2004):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times L}} \qquad (۲)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{V \times D}{\nu} \qquad (۳)$$

$$We = \frac{V^2 \times \rho \times D}{\sigma} \qquad (٤)$$

که V سرعت متوسط (متر بر ثانیه) و L مقیاس طول (در اینجا عمق متوسط جریان)، g شتاب جاذبه (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، D عمق هیدرولیکی (متر)، ν لزجت سینماتیک (10^{-6} مترمربع بر ثانیه)، ρ دانسیته (۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و σ کشش سطحی آب (۰/۰۷۳۳ نیوتن بر متر) است.

از برابری عدد فرود در مدل و نمونه اصلی، رابطه (۵) حاصل می‌شود:

$$V_r = L_r^{1/2} \qquad (۵)$$

[1] Prototype

Archive of SID

www.SID.ir

که V_r نسبت سرعت نمونه اصلی به مدل است. با توجه به رابطه (۵)، رابطه (٦) قابل استنتاج است:

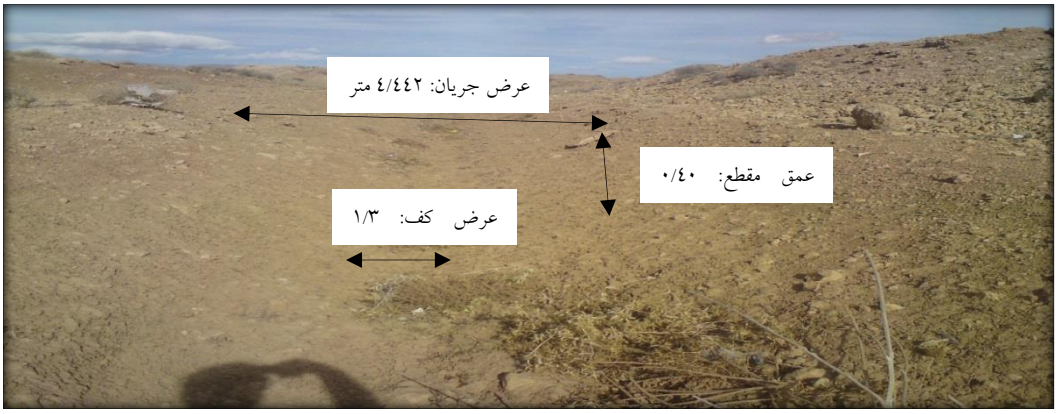
$$Q_r = L_r^{5/2} \qquad (٦)$$

در این رابطه Q_r نسبت دبی مدل به نمونه اصلی می‌باشد.

با توجه به هزینه اجرایی و زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌ها در مدل‌های فیزیکی در مقایسه با مدل‌های ریاضی، مطالعات زیادی در این زمینه صورت نگرفته است. یاسی و عزیزپناه (۱۳۸۵) در تحقیقی با هدف مقایسه نتایج شبیه‌سازی جریان پایدار از مدل‌های ریاضی شناخته شده با نتایج نظیر از یک مدل فیزیکی رودخانه‌ای، مدل فیزیکی بستر ثابت یک بازه از رودخانه نازلو را طراحی، ساخته و مطالعه نمودند. نجف‌پور و همکاران (۱۳۹۳) مدلی فیزیکی از یک سد خاکی همگن در فلوم آزمایشگاهی با هدف بررسی الگوی عبور خطوط نشت و تعیین زاویه بهینه در طراحی زهکش پنجه‌ای، طراحی کردند. در برخی مطالعات نیز از مدل فیزیکی برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان استفاده شده است؛ از جمله می‌توان به نوسانات سطح ایستابی و خصوصیات هیدرولیکی خاک در تهران (ولی سامانی و فتحی، ۱۳۸٤)، کنترل نشت از پی‌های آبرفتی در تهران (صدقی اصل و همکاران، ۱۳۸۹)، مدل‌سازی جریان نشت به چاه افقی در چین (Chen *et al.*, 2003)، بررسی جریان در آبخوان آزاد در نزدیکی یک مرز نشت در استرالیا (Simpson *et al.*, 2003)، پایداری سد در برابر نشت در چین (Luofeng و Xiangbao، ۲۰۱۲) و شبیه‌سازی نشت از یک سد خاکی براساس الگویی توزیعی از یک مدل آنالوگ مایع در تبریز (Nourani *et al.*, 2014) اشاره کرد. بررسی منابع انجام شده حاکی از آنست که تاکنون از تشابه ابعادی و مدل‌سازی فیزیکی برای تخمین نشت از کانال استفاده نشده است. از سوی دیگر، نظر به قرار گرفتن منابع آب کشور در وضعیت بحران شدید آبی و با درنظر گرفتن این‌که بخش عمده (بیش از ۹۰ درصد) مصرف آب ایران که عمدتا از منابع زیرزمینی تامین می‌شود، صرف کشاورزی می‌گردد؛ و همچنین با لحاظ کردن این مساله که تلفات انتقال آب کشاورزی از طریق کانال‌ها سهم عمده‌ای در اتلاف این ماده حیاتی دارد، تعیین میزان نشت از کانال‌ها به منظور مدیریت صحیح و حفاظت منابع آب، امری ضروری است. بنابراین، با توجه به اینکه وقت و هزینه‌ی انجام آزمایش در آزمایشگاه با شرایط صحرایی به هیچ وجه قابل مقایسه نیست و نظر به امکان کنترل بیشتر شرایط در محیط آزمایشگاهی، پژوهش حاضر با هدف واسنجی و اصلاح ضرایب معادلات تجربی نشت، براساس تشابه ابعادی انجام شد.

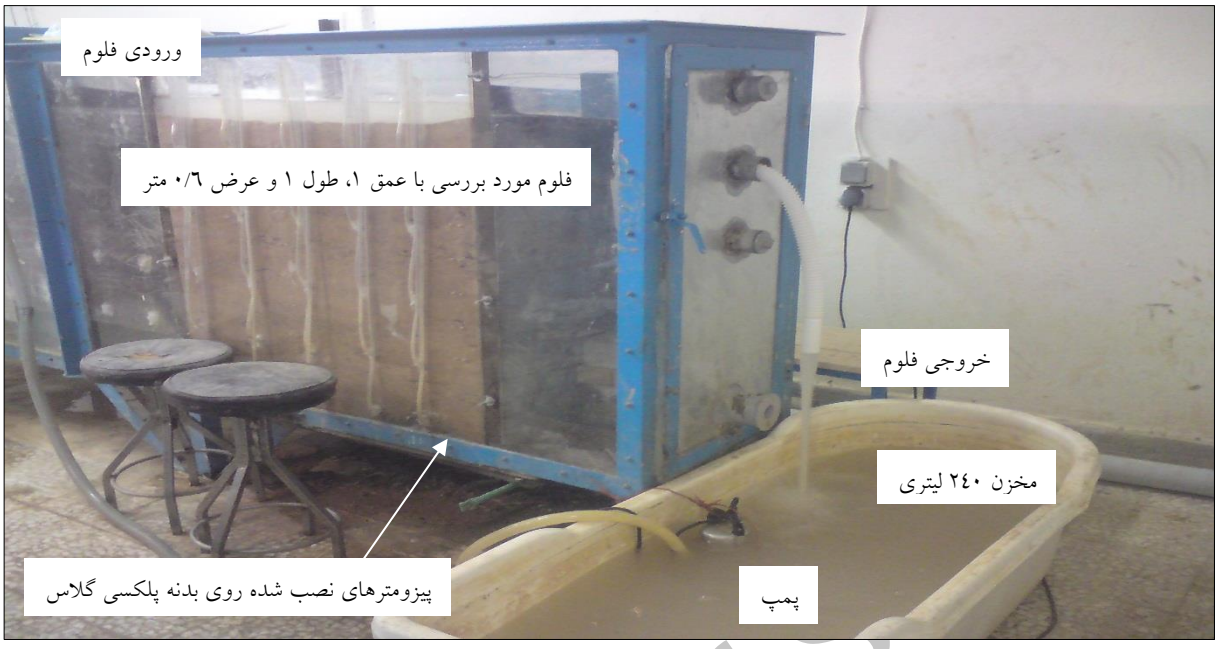
مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، کانال درجه دو خاکی پایین‌دست شبکه آبیاری و زهکشی گندمان و بلداجی در شهرستان بروجن استان چهارمحال و بختیاری واقع در طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ٥٦ دقیقه شمالی و ارتفاع ۲۲٤۹ متر از سطح دریا (به عنوان مطالعه موردی و نمونه اصلی) انتخاب شد (شکل ۱).



شکل ۱. نمایی از کانال درجه ۲ بلداجی

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. مدل آزمایشگاهی، آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد

داده‌برداری دبی در شبکه آبیاری و زهکشی بلداجی از اول مهر ۱۳۸۸ شروع شده و تاکنون ادامه دارد. براساس داده‌های دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری، حداقل دبی ۳٤/۷۲ لیتر در ثانیه (در روزهای ٦ تا ۱۰ آبان ماه ۱۳۸۹) و حداکثر آن ٦۸۰۵/٥٦ لیتر در ثانیه (در تاریخ ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۱) بوده است. منبع جریان آب کانال، بند انحرافی بالادست است.

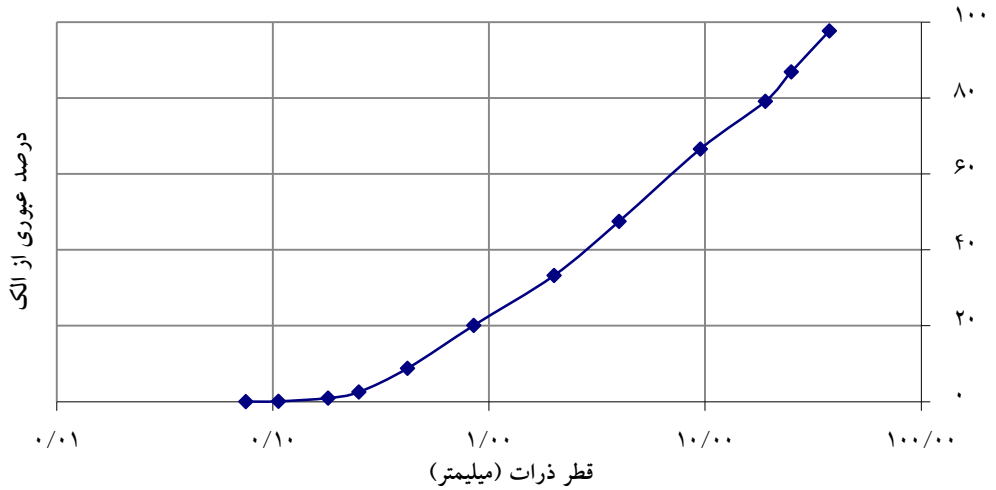
به منظور ساخت مدل، حدود ۲۰۰۰ کیلوگرم خاک از کانال بلداجی به آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد منتقل شده و آزمایش‌های بررسی میزان نشت در فلوم این آزمایشگاه (مدل) انجام شد (شکل ۲).

بدین منظور، ابعاد کانال براساس روابط تشابه ابعادی و با درنظر گرفتن مقیاس مناسب به فلوم انتقال یافت و دبی‌های ٤۰، ٥۰، ٦۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ لیتر در ثانیه با لحاظ کردن اصول تشابه ابعادی به دبی قابل کاربرد در مدل تبدیل شد. معیار انتخاب این محدوده از دبی‌ها، با توجه به محدودیت کاربرد دبی‌های خیلی زیاد در فلوم آزمایشگاه، استفاده از دبی نزدیک به حداقل دبی ثبت‌شده در کانال مورد نظر برای بررسی میزان نشت بوده است. مقیاس مورد استفاده برای انتقال ابعاد نمونه اصلی به مدل، با توجه به روابط ۱ تا ۳ و با درنظر گرفتن (نسبت عرض سطح آب در مدل به عرض سطح آب در نمونه اصلی)، L_r=0.13 تعیین شد. برای به حداقل رساندن اثرات مقیاسی بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی، پارامترهای عدد رینولدز و عدد وبر کنترل و مشخص شد در بازه قابل قبول قرار دارند (عدد رینولدز برای دبی‌های مورد استفاده بزرگتر از ۱۰٥ و عدد وبر بزرگتر از ۱۰۰ به دست آمد) (Chanson, 2004).

برای اندازه‌گیری تلفات نشت از یک مخزن ۲٤۰ لیتری استفاده شد، چرخه آب از کانال به مخزن و سپس از مخزن به کانال انجام شد. این چرخه بسته تا انتهای زمان انجام آزمایش‌ها ادامه داشت. با در اختیار داشتن حجم اولیه آب مخزن و حجم نهایی، حجم آب نفوذکرده به دست آمد.

بافت خاک به روش هیدرومتری (خوشگفتارمنش، ۱۳۸٦) تعیین و براساس درصد ذرات به دست آمده (٤٤/٥ درصد شن، ۲۹/٥ درصد سیلت و ۲٦ درصد رس)، لوم تشخیص داده شد. به منظور تعیین دانه‌بندی خاک مورد استفاده، آزمایش دانه‌بندی (ASTM D422-63(2007)e2, 2007) با استفاده از سری الک‌های استاندارد و به روش الک خشک انجام و منحنی دانه‌بندی رسم گردید (شکل ۳).

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک کانال بلداجی

با توجه به این نمودار، مقادیر D_{10}، D_{30} و D_{60} به دست آمده و ضرایب یکنواختی (C_u) و دانه‌بندی (C_c) طبق معادلات (۷) و (۸) محاسبه شد.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad (۷)$$

$$C_c = \frac{{D_{30}}^2}{D_{10} \times D_{60}} \qquad (۸)$$

چگالی حقیقی خاک مورد بررسی به وسیله آزمایش تعیین چگالی حقیقی (پیکنومتر) (ASTM D854-14, 2014 تعیین گردید (جدول ۱). با توجه به روابط ۱ و ۲ و با درنظر گرفتن L_r=0.13 (نسبت عرض سطح آب در مدل به عرض سطح آب در نمونه اصلی) ابعاد فلوم و دبی مورد استفاده در آن به شرح جدول ۲ تعیین شد.

آماده‌سازی فلوم

به منظور آماده‌سازی فلوم، خاک برداشت شده از محل بدون الک‌کردن و به صورت لایه لایه وارد مدل فیزیکی از جنس پلکسی‌گلاس که با چارچوب فلزی برای استحکام ساختمان درست شده بود، گردید. بخشی از مدل به طول ۱ متر، عرض ۵۹ سانتیمتر و ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتر به وسیله دو ورق گالوانیزه جدا شد و آزمایش‌ها در این بخش از مدل انجام گرفت. برای تراکم نمونه خاک مدل، آزمایش‌های تراکم آزمایشگاهی (پراکتور استاندارد) (ASTM D1557-12e1, 2012) انجام شد و برای تراکم به صورت درجا، آزمایش تراکم صحرایی (مخروط ماسه) (ASTM D1556 / D1556M-15e1, 2015) به منظور تعیین تعداد رفت و برگشت‌های غلتک ۳۰ کیلوگرمی برای رسیدن به رطوبت بهینه و تراکم بالای ۹۰ درصد انجام گردید. نتایج نشان داد لایه‌های ۵ سانتیمتری خاک با ۳۰ دور رفت و برگشت غلتک با میزان رطوبت بهینه ۸ درصد حجمی به تراکم بالای ۹۰ درصد (۹۳/۹ درصد) می‌رسند.

جدول ۱. ویژگی‌های مکانیکی خاک مورد استفاده

چگالی حقیقی (گرم بر سانتیمتر مکعب)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Cc^{++}	Cu^{+}
۲/۵۱	۰/۴۵	۱/۸	۷	۱/۰۲۸	۱۵/۵

$^{+}$ ضریب یکنواختی (معادله ۷)، $^{++}$ضریب دانه‌بندی ذرات خاک (معادله ۸)

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی نمونه اصلی و مدل

عنوان	نام کانال	طول بازه	دبی ۱	دبی ۲	دبی ۳	دبی ٤	دبی ٥	دبی ٦	دبی ۷	شیب طولی	عرض کف	عرض جریان	عمق جریان
واحد	–	متر	لیتر در ثانیه							متر در متر	متر		
۱	نمونه اصلی	۷/۷	٤۰	۵۰	٦۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۷۱	۱/۳	٤/٤٤۲	–
۲	مدل	۱	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۳٦	۰/٤۳	۰/٤۹	۰/۵۵	۰/٦۱	۰/۰۰۰۷۱	۰/۵۹[+]	۰/۵۹	۰/۰٤۲۵

[+] با توجه به استفاده از سطح مقطع مستطیلی برای انجام آزمایش‌ها، عرض کف و عرض جریان در مدل یکسان هستند.

برای ایجاد یکنواختی در تراکم، پس از ریختن هر لایه خاک به کمک غلتک، در جهات مختلف و به میزان یکسان متراکم شد (تراکمی نزدیک به شرایط موجود در طبیعت). به منظور بازگشت ساختمان خاک ریخته شده در مدل به حالت اولیه، خاک درون مدل یک بار با ورود آب از کف و به آرامی اشباع شد. فرایند ٢٤ ساعتی اشباع کردن، حضور حباب‌های هوا در خاک را به حداقل ممکن می‌رساند. سپس، خاک مدل به مدت یک هفته در شرایط طبیعی قرار داده شد تا بخشی از رطوبت خود را از دست بدهد. پس از این مرحله، عرض سطح آب، طول کانال و شدت جریان براساس مفاهیم تشابه ابعادی به فلوم انتقال یافت. با توجه به محدودیت شکل فلوم مورد استفاده، سطح مقطع مستطیلی برای بررسی آزمایشگاهی انتخاب شد. با این وجود، با توجه به ناچیز بودن میزان تبخیر در آزمایشگاه و با عنایت به مساحت تقریبا یکسان سطح مقطع مستطیلی (۰/۰۲۵ مترمربع) و سطح مقطع ذوزنقه‌ای (۰/۰۲۰ مترمربع)، این امر تاثیر چندانی در محاسبات نداشت.

سپس، آزمایش‌های تعیین مقدار نشت بر روی مدل انجام گردید. در این پژوهش روش سنجش دبی، روش حجمی بوده که با سه تکرار و به وسیله استوانه مدرج انجام شد. سپس، با داشتن دبی و سطح مقطع، سرعت جریان به دست آمد. برای تعیین حجم آب نفوذکرده در خاک، حجم آب موجود در منبع ۲٤۰ لیتری مورد استفاده، در ابتدا و انتهای آزمایش تعیین و از تفاضل این دو عدد، مقدار مورد نظر حاصل شد. طول مدت انجام آزمایش‌ها از ۳۵ دقیقه تا ۷۱ دقیقه متغیر بود. مبنای اتمام آزمایش، رسیدن رطوبت به سطح ایستابی بود. عمق سطح سفره آب زیرزمینی از عواملی است که می‌تواند بر میزان نشت و نفوذ آب در خاک موثر باشد؛ لذا اطلاعات لازم در این خصوص از شرکت آب منطقه‌ای دریافت شد که سطح ایستابی برای منطقه مورد نظر ٦/۷۹ متر بود؛ و براساس تبدیل‌های صورت گرفته براساس تشابه ابعادی، عمق سطح ایستابی در داخل کانال آزمایشگاهی در طول آزمایش ثابت نگهداشته شد.

معادلات تجربی نشت و نفوذ

معادلات تجربی مورد استفاده جهت برآورد میزان تلفات نشت و نفوذ آب در خاک عبارتند از موریتز، دیویس–ویلسون، اینگهام، مولس‌ورس و ینی‌دومیا، روش هندوستان و آفنگندن (Ali, 2011):

– معادله موریتز به شرح زیر است:

$$S_m = 0.0186 \times C_m \times \sqrt{\frac{Q}{V}} \qquad (۹)$$

که S_m تلفات نشت (مترمکعب بر ثانیه در کیلومتر طول کانال)، Q دبی (مترمکعب بر ثانیه)، V سرعت جریان (متر بر ثانیه) و C_m ضریب ثابتی که به نوع خاک بستگی دارد و از ۰/٤۱ تا ۰/٦٦ برای بافت سنگین تا سبک متغیر است.

– معادله دیویس–ویلسون به صورت زیر:

$$S_d = 0.45 \times C_d \times \frac{P \times L \times H^{1/3}}{4 \times 10^6 + 3650\sqrt{V}} \qquad (۱۰)$$

که S_d تلفات نشت (مترمکعب بر ثانیه)، H عمق آب در کانال (متر)، L طول کانال (متر)، P محیط خیس شده (متر) و C_d ضریب ثابتی است که به نوع پوشش کانال بستگی دارد و از ۱۵ تا ۲۵ برای بافت سنگین تا سبک متغیر است.

– معادله اینگهام به شکل زیر است:

$$S_n = 0.55 \times C_n \times P \times L \times 10^{-6} \times (H^{0.5}) \qquad (۱۱)$$

Archive of SID

www.SID.ir

که در آن S_n میزان نشت در طول کانال (مترمکعب بر ثانیه) و C_n ضریب ثابتی که بسته به نوع خاک بین ۱/۵ تا ۵/۵ برای بافت سنگین تا سبک متغیر است.

- نشت و نفوذ مولس‌ورس و ینی‌دومیا از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_y = C_y \times L \times P \times \sqrt{R} \qquad (۱۲)$$

که در این معادله S_y میزان نشت (مترمکعب بر مترمربع در روز)، R شعاع هیدرولیکی (متر)، L طول کانال (کیلومتر)، P محیط خیس شده (متر) و C_y ضریب ثابتی که بسته به نوع خاک بین ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۳ برای بافت سنگین تا سبک متغیر است.

- معادله هندوستان به صورت زیر است:

$$S_i = C_i \times a \times d \qquad (۱۳)$$

در این معادله S_i نشت کل از کانال (فوت مکعب بر ثانیه)، a مساحت خیس شده کانال (میلیون فوت مربع)، d عمق آب (فوت) و C_i ضریب ثابتی که بسته به نوع خاک بین ۱/۱ تا ۱/۸ برای بافت سنگین تا سبک متغیر است.

- معادله آفنگندن به شکل زیر است:

$$S_o = S \times Q \times L / 100 \qquad (۱٤)$$

$$S = A \times S_o^{-m} \qquad (۱۵)$$

در این معادله S نشت از کانالی به طول یک کیلومتر، L طول کانال (کیلومتر)، Q دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) و S_o نشت آب از کانال (مترمکعب بر ثانیه) است. همچنین A و m ضرایبی هستند که به نفوذپذیری آب در خاک بستگی داشته و بین ۰/۳ تا ۰/۵ برای m و ۰/۷ تا ۳/٤ برای A در نوسان هستند.

ارزیابی معادلات نشت

در این پژوهش به منظور ارزیابی دقت نتایج معادلات نشت از معیارهای ضریب همبستگی R^2 و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (معادله ۱۵) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (V_{\text{iinf}} - S_i)^2}{n}} \qquad (۱۶)$$

که $V_{i\,inf}$ حجم اندازه‌گیری شده نشت در دبی i ام (لیتر)، S_i نشت محاسبه شده با معادله تجربی i ام (لیتر) و n تعداد داده‌های مورد بررسی است. براساس ۷ دبی مورد استفاده در این مطالعه، ۷ آزمایش انجام شد، برای واسنجی معادلات تجربی حدود ٦۰ درصد از داده‌ها (٤ داده) به‌گونه‌ای انتخاب شد که تمام محدوده دبی را شامل شود. برای اعتبارسنجی نتایج نیز، باقیمانده داده‌ها (۳ داده) به کار رفت. فرآیند واسنجی بدین شکل انجام شد که ابتدا ضریب تجربی معادله با مبنا قرار دادن معادله تجربی پیشنهاد شده، از معادله خارج و مقادیر نتیجه شده‌ی نشت در این شرایط، در برابر مقادیر نشت اندازه‌گیری شده رسم شد. در نمودار به دست آمده، عرض از مبدا برابر صفر درنظر گرفته شد تا ضریب اصلاحی (شیب خط) (جایگزین ضریب تجربی) مشخص شود. با جایگزین کردن ضریب اصلاحی به جای ضریب معادله تجربی، معادله اصلاح شده‌ی نشت حاصل شد. در فرآیند اعتبارسنجی نیز با استفاده از معادله اصلاح شده برای ۳ داده‌ی باقیمانده، مقادیر نشت محاسبه شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید.

نتایج و بحث

تعیین میزان نشت

با توجه به ناچیز بودن تلفات تبخیر در آزمایشگاه، تلفات این پژوهش فقط شامل نشت می‌شود. مقادیر اندازه‌گیری شده نشت صورت گرفته در جدول ۳ ارائه شده است. علاوه بر این، در این جدول مقادیر محاسبه شده نشت با استفاده از معادلات تجربی معرفی‌شده پیش از اصلاح ضرایب مشاهده می‌شود.

چنانچه از اعداد جدول ۳ پیداست، کلیه روش‌های مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه، پیش از اصلاح ضرایب، مقدار نشت را بسیار کم‌برآورد می‌نمایند؛ که بیشترین کم‌برآورد مربوط به رابطه هندوستان و کم‌ترین آن مربوط به رابطه موریتز و آفنگندن است. از سوی دیگر، وجود حفرات و درز و ترک‌ها در خاک انهار سنتی و بدنه‌ی کانال‌های خاکی، منجر به افزایش مقدار نشت اندازه‌گیری شده و اختلاف آن با مقدار نشت محاسباتی می‌شود که البته این مشکل غیرقابل اجتناب است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳. مقایسه مقادیر نشت اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده به وسیله معادلات تجربی پیش از اصلاح ضرایب

ردیف	دبی مورد بررسی در مدل (لیتر در ثانیه)	نشت اندازه‌گیری شده (لیتر)	نشت محاسبه شده (لیتر)					
			موریتز	دیویس- ویلسون	اینگهام	مولس‌ورس و ینی‌دومیا	هندوستان	آفنگندن
۱	۰/۲۵	٥٤	۱۰/۰۲۲	۲/۹۸۲	۱/٦۲٥	۰/۳٦۹	۰/۰۰٦	۸/٥۰۸
۲	۰/۳۰	٤٥	۹/٦٦۱	۲/۸٤۰	۱/٥۹٦	۰/٤۹۰	۰/۰۰۷	۸/٥۲۹
۳	۰/۳٦	٦۰	۱۲/۸۰۳	۳/۷٤٥	۲/۱۳۷	۰/٥٦٦	۰/۰۱۱	۱۲/۲۹۱
٤	۰/٤۳	٤٥	۸/۷۷۰	۲/٥٦٤	۱/٤٦٦	۰/٥۷۷	۰/۰۰۸	۹/٤۹۹
٥	۰/٤۹	٥٦	۱۰/۷٥۲	۳/۱۳٥	۱/۸۱۱	۰/٦۳٤	۰/۰۱۰	۱۲/۰۳۸
٦	۰/٥٥	٦۰	۱۱/٥٥۹	۳/۳٥۱	۱/۹۹۹	۰/۸٥۷	۰/۰۱٥	۱۳/۱٥٤
۷	۰/٦۱	۷۲	۱٤/۳۷۰	٤/۱٦۱	۲/٥۳٥	۱/۰٤۸	۰/۰۲۳	۱٦/٥۲۱
RMSE	-	–	٤٥/٤۱	٥۳/۳۹	٥٤/۷۷	٥٦/۰۱	٥٦/٦٦	٤٤/۹٥
R^2	-	–	۰/۹۰۱	۰/۹۰٤	۰/۹۱۷	۰/٥۸٦	۰/۷۷۷	۰/۸٤۱

RMSE : ریشه میانگین مربعات خطا

کم‌برآورد شدن مقادیر نشت اندازه‌گیری شده با معادلات تجربی در این مطالعه، مشابه نتیجه سالمی و سپاسخواه (۱۳۸٥) است. این پژوهشگران روش‌های اینگهام، میسرا، آفنگندن، دیویس–ویلسون، موریتز، مولس-ورس و ینی‌دومیا و هندوستان را نسبت به روش ورودی–خروجی ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند تمام روش‌ها مقدار نشت را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زنند. با وجود مقادیر بالای R^2 برای اکثر معادلات، اختلاف بسیار زیاد بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده‌ی نشت نیاز به اصلاح ضرایب معادلات تجربی را دوچندان می‌نماید.

اصلاح ضرایب معادلات تجربی

به منظور اصلاح ضرایب معادلات و تصادفی بودن مقادیر به کار رفته، داده‌های جدول ۳ به ترتیب با نسبت ٦۰ و ٤۰ درصد برای واسنجی و اعتبارسنجی به‌گونه‌ای تفکیک شدکه در هر دو سری داده، دبی‌های کم (۰/۲٥ و ۰/۳)، متوسط (۰/۳٦، ۰/٤۳ و ۰/٤۹) و زیاد (۰/٥٥ و ۰/٦۱) گنجانده شود. ترکیب دبی‌ها به شکلی انجام شد که در هر سری واسنجی و اعتبارسنجی، ۱ دبی کم، ۲ دبی متوسط و ۱ دبی زیاد قرار گیرد. بنابراین، ۱۲ سری داده برای واسنجی و اعتبارسنجی حاصل شد (جدول ٤).

جدول ٤. مجموعه‌های داده‌ی مورد استفاده برای واسنجی و اعتبارسنجی

سری داده‌ها	دبی‌های مورد استفاده برای واسنجی (لیتر در ثانیه)	دبی‌های مورد استفاده برای اعتبارسنجی (لیتر در ثانیه)
۱	۰/۲٥، ۰/۳٦، ۰/٤۳، ۰/٦۱	۰/۳، ۰/٤۹، ۰/٥٥
۲	۰/۲٥، ۰/۳٦، ۰/٤۹، ۰/٦۱	۰/۳، ۰/٤۳، ۰/٥٥
۳	۰/۲٥، ۰/٤۳، ۰/٤۹، ۰/٦۱	۰/۳، ۰/۳٦، ۰/٥٥
٤	۰/۲٥، ۰/۳٦، ۰/٤۳، ۰/٥٥	۰/۳، ۰/٤۹، ۰/٦۱
٥	۰/۲٥، ۰/۳٦، ۰/٤۹، ۰/٥٥	۰/۳، ۰/٤۳، ۰/٦۱
٦	۰/۲٥، ۰/٤۳، ۰/٤۹، ۰/٥٥	۰/۳، ۰/۳٦، ۰/٦۱
۷	۰/۳، ۰/۳٦، ۰/٤۳، ۰/٦۱	۰/۲٥، ۰/٤۹، ۰/٥٥
۸	۰/۳، ۰/۳٦، ۰/٤۹، ۰/٦۱	۰/۲٥، ۰/٤۳، ۰/٥٥
۹	۰/۳، ۰/٤۳، ۰/٤۹، ۰/٦۱	۰/۲٥، ۰/۳٦، ۰/٥٥
۱۰	۰/۳، ۰/۳٦، ۰/٤۳، ۰/٥٥	۰/۲٥، ۰/٤۹، ۰/٦۱
۱۱	۰/۳، ۰/۳٦، ۰/٤۹، ۰/٥٥	۰/۲٥، ۰/٤۳، ۰/٦۱
۱۲	۰/۳، ۰/٤۳، ۰/٤۹، ۰/٥٥	۰/۲٥، ۰/۳٦، ۰/٦۱

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵. ضرایب معادلات تجربی مورد استفاده قبل و بعد از اصلاح براساس ۱۲ مجموعه داده‌ی انتخاب شده در جدول ٤

ردیف	نام معادله	ضریب قبل از اصلاح	ضریب بعد از اصلاح براساس مجموعه داده‌ی										میانگین
			۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	
۱	موریتز	۰/۵٤	۲/۷	۲/۷۱۳	۲/۷۸۱	۲/۷۲٦	۲/۷۳۹	۲/۸۲۵	۲/٦۲۹	۲/٦٤۷	۲/۷۰۵	۲/٦٤۵	۲/٦٦٤	۲/۷۳٦	۲/۷۰۹
۲	د-و*	۱۷/۵	۲۹۹/۳۷	۳۰۰/۹۵	۳۰۸/٦۸	۳۰۱/۷٦	۳۰۳/۳۸	۳۱۲/۸۹	۲۹۲/۱۱	۲۹٤/۱۹	۳۰۰/۸۷	۲۹۳/٤٤	۲۹۵/۷۲	۳۰۳/۸۵	۲۷۸/۱۰۱
۳	اینگهام	۳/۵	۱۰۳	۱۰۳/٤۵	۱۰۵/٦۷	۱۰۵/۳٤	۱۰۵/٦۸	۱۰۸/۸	۱۰۰/۰٦	۱۰۰/۷۱	۱۰۲/٤۹	۱۰۱/۸۸	۱۰۲/۵	۱۰۵	۱۰۳/۷۱۵
٤	م‌و-ی‌د**	۰/۰۰۲۲۵	۰/۱۸۵	۰/۰۷۳	۰/۱۷۹	۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۷٤	۰/۰۷۲	۰/۰۷۲	۰/۰۷۱	۰/۰۵۱	۰/۰۸۹۵
۵	هندوستان	۱/٤۵	۵۸۰۰	۲۰٤۱	۵۷٦۸/۲	۲۰٤۰/۵	۲۰٤۳/٦	۲۰٤۱/۱	۲۰٤۰/۵	۲۰٤۰/۵	۲۰٤۷	۲۰٤۰/۵	۲۰٤۰/۵	۲۰٤۳	۲٦٦۵/۵۳
٦	آفنگندن	۱/۹	۹/۱۱٤	۹/۰٦۷	۹/۰۰۳	۹/٤۲۲	۹/۳۳٦	۹/٤۲۲	۹/٤۲۲	۸/۸۳۸	۸/۷۵	۹/۱۲	۹/۰٦۵	۸/۹۸۷	۹/۱۲۹

* دیویس-ویلسون، ** مولس‌ورس و ینی‌دومیا

نظر به اینکه انتخاب تنها ۱ مورد از این ۱۲ مجموعه، نتیجه قابل اطمینانی به دست نمی‌دهد، با استفاده از ۱۲ مجموعه، ضریب اصلاحی محاسبه و از نتایج میانگین‌گیری شد (جدول ۵).

از مقادیر جدول ۵ پیداست که بیشترین تغییر در ضرایب معادلات تجربی مربوط به معادله هندوستان و کمترین تغییر مربوط به روش موریتز بوده است. یادآور می‌شود که این دو روش پیش از اصلاح ضرایب، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار RMSE را به خود اختصاص داده بودند. با استفاده از مقادیر میانگین ضرایب اصلاح شده، مقادیر نشت آب به وسیله معادلات تجربی برای تمامی ۷ داده موجود، محاسبه و در جدول ٦ و شکل ٤ ارائه شده است. چنانچه از جدول ٦ پیداست، مقادیر R^2 پس از اصلاح نسبت به اعداد به دست آمده پیش از اصلاح ضرایب، تنه در معادله موریتز افزایش اندکی پیدا کرده است (از ۰/۹۰۱ به ۰/۹۰۷) و در سایر موارد کاهش نشان می‌دهد.

بیشترین مقدار ضریب تبیین متعلق به معادله موریتز و اینگهام است، که پیش از اصلاح نیز در کنار دیویس-ویلسون بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده بودند، و کمترین مقدار مربوط به معادله هندوستان. با این حال، معیار تصمیم‌گیری درباره عملکرد ضریب اصلاحی جدید، تنها R^2 نیست. کاهش محسوس مقادیر RMSE نشان از بهبود معادلات اصلاح‌شده دارد.

جدول ٦. مقایسه مقادیر نشت اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده به وسیله معادلات تجربی پس از اصلاح ضرایب

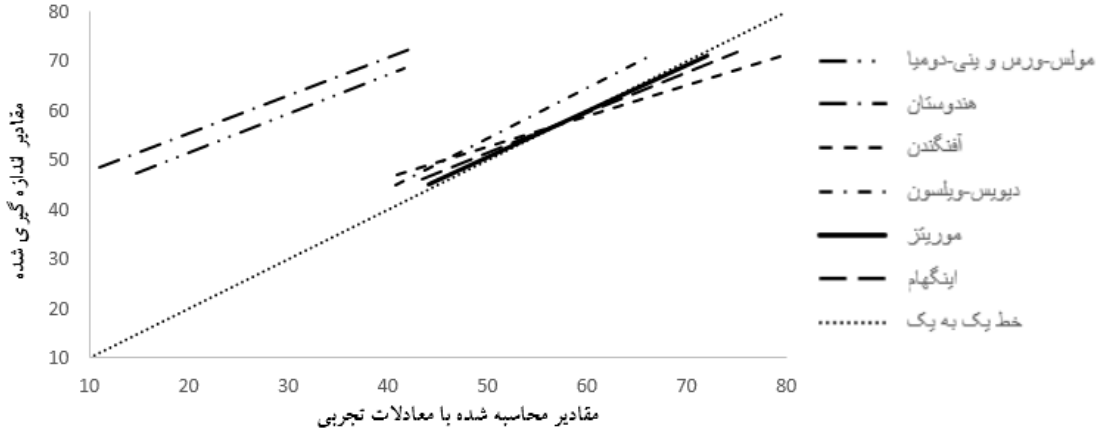
ردیف	دبی مورد بررسی در مدل (لیتر در ثانیه)	نشت اندازه‌گیری شده (لیتر)	نشت محاسبه شده (لیتر)					
			موریتز	دیویس-ویلسون	اینگهام	مولس‌ورس و ینی‌دومیا	هندوستان	آفنگندن
۱	۰/۲۵	۵٤	۵۰/۲۷۷	٤۷/۳۸۷	٤۸/۱٦٦	۱٤/٦۷۸	۱۱/۰۲۹	٤۰/۸۷۹
۲	۰/۳۰	٤۵	٤۸/٤٦٦	٤۵/۱۳۱	٤۷/۲۸۹	۱۹/٤۹۱	۱۲/۸٦۸	٤۰/۹۷۹
۳	۰/۳٦	٦۰	٦٤/۲۲۸	۵۹/۵۱٤	٦۳/۳۳۱	۲۲/۵۱٤	۲۰/۲۲۱	۵۹/۰۵۵
٤	۰/٤۳	٤۵	٤۳/۹۹٦	٤۰/۷٤۳	٤۳/٤٤۷	۲۲/۹۵۲	۱٤/۷۰٦	٤۵/٦٤
۵	۰/٤۹	۵٦	۵۳/۹۳۹	٤۹/۸۱۳	۵۳/٦۵۹	۲۵/۲۱۹	۱۸/۳۸۳	۵۷/۸۳۹
٦	۰/۵۵	٦۰	۵۷/۹۸۷	۵۳/۲٤۹	۵۹/۲۲٦	۳٤/۰۸۹	۲۷/۵۷٤	٦۳/۲۰۱
۷	۰/٦۱	۷۲	۷۲/۰۸۹	٦٦/۱۱۸	۷۵/۱۱۹	٤۱/٦۸۷	٤۲/۲۸۱	۷۹/۳۷۹
RMSE	-	-	۲/۷۵۳	۵/۰۷۸	۳/۱۳	۳۰/۷٦	۳۵/۳۱	٦/۰٦۸
R^2	-	-	۰/۹۰۷	۰/۹۰۲	۰/۹۰٦	۰/۵۰۳	۰/٤۷۵	۰/۷۸

RMSE : ریشه میانگین مربعات خطا

Archive of SID
www.SID.ir

در این بین، کمترین مقدار این آماره متعلق به روش موریتز و اینگهام (به ترتیب ۲/۷۵۳ و ۳/۱۳) و بیشترین آن مربوط به معادله هندوستان (۳۵/۳۱) است. بررسی اعداد به دست آمده توسط معادلات تجربی حاکی از آن است که به جز معادلات دیویس–ویلسون، مولس–ورس و ینی‌دومیا و هندوستان، بقیه معادلات، پس از اصلاح ضرایب، مقدار نشت را بدون کم/بیش‌برآورد تخمین می‌زنند (شکل ٤). براساس معیارهای RMSE و R^2 می‌توان معادلات تجربی مورد استفاده را پس از اصلاح ضرایب به ترتیب زیر رتبه‌بندی نمود: موریتز، اینگهام، دیویس–ویلسون، آفنگندن، مولس‌ورس و ینی‌دومیا و هندوستان. بنابراین، در هر دو حالت پیش و پس از اصلاح ضرایب، روش‌های موریتز، اینگهام و دیویس–ویلسون روش‌های برتر هستند.

عراق علوی (۱۳۷۳) در مطالعه خود، بهترین روش تجربی برآورد نشت را ابتدا میسرا و سپس موریتز معرفی نمود که با انتخاب موریتز اصلاح شده به عنوان یکی از روش‌های برتر در پژوهش حاضر مشابهت دارد. سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) در مطالعه خود بهترین معادله غیرمستقیم تخمین نشت از کانال را پس از اصلاح ضرایب، اینگهام و موریتز بیان کردند. در مطالعه ایشان، اینگهام قبل از اصلاح بالاترین ضریب تبیین (۰/۸۷) و شیب خط برابر ۰/۲۵۵ داشت که بعد از اصلاح به ترتیب ۰/۹٦ و نزدیک واحد شدند. در مطالعه حاضر نیز، اینگهام پیش و پس از اصلاح ضرایب بالاترین مقدار R^2 (به ترتیب ۰/۹۱۷ و ۰/۹۰٦) را در میان روش‌های تجربی دارد. طول مورد بررسی در مطالعه سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) بین ۲۱٦ تا ۱۲۹۰ متر در کانال‌های مختلف با بافت‌های سبک، متوسط و سنگین، متغیر است. دو کانال در مطالعه ایشان بافت لوم داشته که طول مورد بررسی ۱۲۹۰ و ٥٤۷ متر بوده و به ترتیب درجه ٤ و ۳ هستند (کانال‌های جمبزه و زیار). مطالعه حاضر تنها در یک متر طول فلوم (معادل ۷/۷ متر نمونه اصلی) با بافت لوم انجام شد و مناسب‌ترین معادلات تجربی مشابه نتیجه پژوهش سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) است. محدوده تغییرات دبی در مطالعه پیش رو ۰/۲۵ تا ۰/٦۱ لیتر در ثانیه (معادل ٤۰ تا ۱۰۰ لیتر در ثانیه در نمونه اصلی) انتخاب شد، در حالی که این رقم برای ماه‌های مختلف (خرداد، تیر و مرداد) در پژوهش سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) از ۳۵ تا ٤۰٥ لیتر در ثانیه متغیر است. برای کانال‌های با بافت لوم در مطالعه این محققان مقدار دبی بین ۱۰۸ تا ٤۰٥ لیتر در ثانیه بوده است. با توجه به محدودیت انتخاب دبی در فلوم آزمایشگاهی، تفاوت بین مقادیر دو مطالعه دور از انتظار نیست. نوری محمدیه و همکاران (۱۳۸۹) نرخ نشت را در سه کانال مورد بررسی به ترتیب ۱٦۷/۹، ٥۷۲/٥ و ۳۷۹/٥ میلیمتر در روز به دست آوردند و گزارش کردند که روش‌های میسرا و موریتز، دقت قابل قبولی در تخمین نشت داشته و به عنوان روش‌های قابل اعتماد توصیه می‌شوند.



شکل ٤. مقایسه مقادیر نشت اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده به وسیله معادلات تجربی پس از اصلاح ضرایب در کنار خط ۱

Archive of SID

www.SID.ir

مطالعه ایشان در دو تکرار و در قطعه‌ای به طول ۲/۵ متر انجام شده که بافت خاک در دو کانال، لوم سیلتی و در دیگری لوم شنی گزارش شده است. دبی در کانال‌های مطالعه‌شده ۵۹/۲، ۸۹/۲۳ و ۹۹/۵۹ مترمکعب بر ثانیه بوده که تفاوت بسیار زیادی با دبی‌های پژوهش حاضر دارد. طول مورد بررسی در مطالعه پیش رو (نمونه اصلی) نزدیک به طول انتخاب شده توسط نوری محمدیه و همکاران (۱۳۸۹) است و در هر دو پژوهش، موریتز روش قابل قبولی برای تخمین نشت معرفی شده است. خاطرنشان می‌شود که در مقاله مذکور، معادلات تجربی نشت واسنجی نشده‌اند. در مطالعه رستمیان و عابدی کوپایی (۱۳۹۰) روش موریتز و اینگهام در مقایسه با مدل SEEP/W نسبت به روش‌های تجربی دیویس–ویلسون و مولس‌ورس و ینی‌دومیا ضرایب تبیین بهتری کسب نمودند (به ترتیب ۰/۳۷۳ و ۰/۱۸۳ در مقایسه با ۰/۰۹۳ و ۰/۰۶۷). ایشان گزارش کردند معادلات تجربی قادر به شبیه‌سازی میزان نشت نبوده‌اند و برای منطقه بسیار ضعیف عمل کرده‌اند. شایان ذکر است در مطالعه آن‌ها، معادلات واسنجی نشده‌اند. این محققان طول محدوده مورد بررسی برای نشت را ذکر نکردند ولی بیان کردند که از دلایل اختلاف بین مقادیر نشت اندازه‌گیری شده و مقادیر مدل SEEP/W، استفاده از مقادیر متوسط مشخصات هیدرولیکی در مقطع ورودی و خروجی برای شبیه‌سازی کانال‌ها و درنظر نگرفتن میزان تعرق پوشش گیاهی در کانال‌ها و حرکت ریشه گیاهان و تخریب ساختمان خاک است. دقت بسیار کم معادلات تجربی نشت پیش از اصلاح ضرایب، در کنار انتخاب روش‌های موریتز و اینگهام به عنوان روش‌های برتر نسبت به سایر معادلات تجربی، از مشابهت‌های پژوهش حاضر و مقاله رستمیان و عابدی کوپایی (۱۳۹۰) می‌باشد. البته مطالعه حاضر در کانال درجه ۲ انجام شد، حال آنکه رستمیان و عابدی کوپایی (۱۳۹۰) کانال‌های درجه ۳ و ٤ را بررسی نمودند. همچنین، ضرایب همبستگی معادلات تجربی، پیش و پس از اصلاح ضرایب به مراتب بیشتر از مقادیر مشابه در مطالعه مذکور می‌باشد (جدول ۳ و ۵). در پژوهشی دیگر، حیدری‌زاده و سالمی (۱۳۹۳) مقادیر آماره‌های RMSE و MAE (میانگین خطای مطلق) را برای روش اینگهام به ترتیب ۰/۲۷۵ و ۰/۰۱ و برای روش ودرنیکف ۰/۱٤۵ و ۰/۰۰۵ گزارش کردند و نتیجه گرفتند معادله واسنجی شده ودرنیکف بهتر از معادله اصلاح‌شده اینگهام قادر به برآورد نشت آب از کانال‌های منطقه رودشت اصفهان است. طول مورد بررسی در این مطالعه بین ۹٤ تا ۱۵۰۰ متر در کانال‌های مختلف و در ماه‌های مختلف، متغیر می‌باشد که مثل نتیجه‌گیری پایانی مقاله با نتیجه پژوهش حاضر اختلاف نشان می‌دهد. همچنین، Salemi و Sepaskhah (۲۰۰۱) از میان معادلات تجربی، معادلات دیویس–ویلسون و سپس مولس‌ورس و ینی‌دومیا را به عنوان مناسب‌ترین معادلات تخمین نشت آب از کانال‌های خاکی شمال دشت اصفهان معرفی نمودند که با نتایج پژوهش پیش رو کاملا در تضاد است. در هرحال، چنین ناسازگاری‌هایی میان پژوهش‌های مختلف، با عنایت به شرایط متفاوت منطقه، بافت خاک، درصدهای مختلف ذرات شن و ماسه و سیلت و پوشش گیاهی، امری طبیعی به نظر می‌رسد و ضرورت اصلاح ضرایب معادلات تجربی را برای مناطق مختلف نشان می‌دهد.

در پایان، ضرایب معادلات مورد استفاده قبل و بعد از تصحیح با ضرایب اصلاحی در مقاله سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) مقایسه شد (جدول ۷). چنانچه از مقادیر این جدول پیداست، ضریب اصلاحی معادله آفنگندن و مولس-ورس و ینی‌دومیا در هر دو مطالعه به یکدیگر نزدیک هستند؛ ولی سایر ضرایب تفاوت‌هایی دارد که در مورد ضریب معادله هندوستان بسیار زیاد است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۷. ضرایب معادلات تجربی مورد استفاده قبل و بعد از اصلاح در مقایسه با ضرایب اصلاحی سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵)

ردیف	نام معادله	ضریب قبل از اصلاح	ضریب بعد از اصلاح	ضرایب اصلاحی سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵)
۱	موریتز	۰/۵٤	۲/۷۰۹	۷/۷
۲	دیویس-ویلسون	۱۷/۵	۲۷۸/۱۰۱	۲۰۳
۳	اینگهام	۳/۵	۱۰۳/۷۱۵	٤۷
٤	مولس‌ورس و ینی‌دومیا	۰/۰۰۲۲۵	۰/۰۸۹۵	۰/۰۳۱
۵	هندوستان	۱/٤۵	۲٦٦۵/۵۳	۳۹/۵
٦	آفنگندن	۱/۹	۹/۱۲۹	۱۰/٦

در معادلات تجربی فقط اثر بافت خاک و عوامل هیدرولیکی کانال‌ها درنظر گرفته شده است؛ با وجودی که عوامل دیگری نیز می‌توانند بر شدت و مقدار نشت و نفوذ آب در خاک موثر باشند، مثلا پوشش گیاهی که در مطالعه سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) بدان اشاره شده است. علاوه بر این، درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک نیز می‌تواند بر نفوذ موثر باشد، هرچند دو خاک براساس روش‌های مرسوم، بافت مشابه داشته باشند. موارد بیان‌شده، لزوم بررسی و مطالعه بیشتر نشت و اثرات موثر بر آن را آشکار می‌نماید.

نتیجه‌گیری

با استفاده از تشابه ابعادی و انتقال داده‌های کانال خاکی بلداجی در شهرستان بروجن استان چهارمحال و بختیاری، میزان نشت از خاک کانال در محدوده دبی‌های ٤۰ تا ۱۰۰ لیتر در ثانیه، با استفاده از مدل فیزیکی در آزمایشگاه تعیین شد. معادلات تجربی موریتز، اینگهام، هندوستان، مولس-ورس و ینی‌دومیا، آفنگندن و دیویس-ویلسون نیز برای تخمین نشت به کار گرفته شد. نتایج نشان داد پس از اصلاح ضرایب معادلات تجربی، روش‌های موریتز و اینگهام با داشتن بالاترین ضریب همبستگی (< ۰/۹۰) و کمترین مقدار RMSE (< ۳/۲ لیتر) روابط برتر تعیین نشت در کانال هستند. واسنجی معادلات، منجر به رفع مشکل کم‌برآورد مدل‌ها، پیش از اصلاح ضرایب، گردید. استفاده از تشابه ابعادی و انتقال شرایط کانال به آزمایشگاه سبب کاهش هزینه و صرفه‌جویی در وقت می‌شود که با حصول نتایج قابل قبول و مشابه با مطالعات پیشین، می‌توان به‌کارگیری این روش را در شرایط کنترل شده‌ی برای سایر مناطق نیز پیشنهاد نمود.

فهرست منابع

حیدری‌زاده، م. و سالمی، ح.ر. ۱۳۹۳. بررسی کاربرد معادله تجربی اینگهام و معادله تئوری ودرنیکو در برآورد نشت آب از کانال‌های منطقه رودشت اصفهان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸(٤): ۷۱۲-۷۰۳.

رستمیان، ر. و عابدی کوپایی، ج. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل نرم افزاری SEEP/W در برآورد میزان نشت آب از کانال‌های خاکی (مطالعه موردی شبکه آبیاری زاینده‌رود). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۵: ۲۲-۱۳.

سالمی، ح.ر. و سپاسخواه، ع.ر. ۱۳۸۵. اصلاح معادلات تجربی نشت آب از کانال در منطقه رودشت اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۰: ٤۲-۲۹.

صدقی اصل، م.، رحیمی، ح. و خالقی، ح. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی کنترل نشت از پی‌های آبرفتی. مهندسی عمران، ۱: ۲۱-۱۱.

عراق علوی، س. ۱۳۷۳. مدیریت توزیع آب زاینده‌رود براساس برآورد راندمان انتقال آب در کانال‌های زیردست. دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه آبیاری و زهکشی، ۱۵۰صفحه.

Archive of SID

www.SID.ir

معاونت بهره‌برداری و مدیریت منابع آب. ۱۳٦۹. گزارش سالیانه وضعیت منابع آب. وزارت نیرو، تهران، ۵: ۲۸-۲۰.

نجف‌پور، ن.، شایان‌نژاد، م. و صمدی، ح. ۱۳۹۳. بررسی الگوی عبور خطوط نشت و طراحی زهکش پنجه در سدهای خاکی همگن روی پی نفوذناپذیر با استفاده از مدل فیزیکی و نرم‌افزار PLAXIS. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)،۳: ٤٦١-٤٥١.

نوری محمدیه، م.، سهرابی، ت. و رحیمی، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های تجربی تعیین نشت در کانال‌های خاکی (مطالعه موردی: دشت قزوین). مجله پژوهش آب ایران، ٤: ۱۲۸-۱۲۵.

ولی‌سامانی، ج. و فتحی، پ. ۱۳۸٤. ارزیابی برخی مدل‌های تحلیلی غیرماندگار زهکشی در تخمین همزمان هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر خاک با روش مسئله معکوس. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۳: ۱۰-۱.

یاسی، م. و عزیزپناه، ب. ۱۳۸۵. مقایسه خصوصیات جریان در مدل فیزیکی با نتایج مدل‌های ریاضی یک بعدی، شبه دوبعدی و دوبعدی در یک بازه رودخانه. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۳: ۸۹-۷۸.

Ali, H. 2011. Practices of irrigation & on-farm water management. Springer Science & Business Media, New York, USA, 546pp.

ASTM D1556/D1556M-15e1. 2015. Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D854-14. 2014. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D1557-12e1. 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)). ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D422-63(2007) e2. 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils (withdrawn 2016). ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow. Arnold, London, 634pp.

Chen, C., Wan, J. and Zhan, H. 2003. Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well. Journal of Hydrology, 281: 159-171.

Cui, Y.L., Li, Y.H., Mao, Z., Lance, J.M. and Musy, A. 2004. Strategies for improving the water supply system in HCID, upper reaches of the Yellow River Basin, China. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript LW 02 005.

Ettema, R. 2000. Hydraulic modeling: Concepts and practice. ASCE, USA, 409pp.

Heller, V. 2012. Model-prototype similarity. 4th Coastlab Teaching School, Wave and Tidal Energy, January 17-20, Porto, Portugal.

Luofeng, X. and Xiangbao, D. 2012. Study on physical model experiment of dam's seepage stability base on coastal sand. Procedia Engineering, 28:534-541.

Martin, C.A. and Gates, T.K. 2014. Uncertainty of canal seepage losses estimated using flowing water balance with acoustic Doppler devices. Journal of Hydrology, 517: 746-761.

Moghazi, H.E.M. and, Ismail E.S. 1997. A study of losses from field channels under arid region conditions. Irrigation Science, 17(3): 105-110.

Nourani, V., Aminfar, M.H., Alam, M.T. and Sharghi, E. 2014. Liquid analog circuits for laboratory simulation of seepage. Journal of Environmental Hydrology, 22:1-15.

Salemi, H.R. and Sepaskhah, A.R. 2001. Modification of empirical equation for seepage loss estimation in small earth canals. Iranian Journal of Science and Technology, 25(B4): 661-668.

Sepaskhah, A.R. and Salemi, H.R. 2004. An empirical model for prediction of conveyance efficiency for small earth canals. Iranian Journal of Science and Technology, 28: 623-628.

Simpson, M.J., Clement, T.P. and Gallop, T.A. 2003. Laboratory and numerical investigation of flow and transport near a seepage-face boundary. Groundwater, 41(5): 690-700.

Streeter, V.L. and Wylie, E.B. 1979. Fluid mechanics. McGraw-Hill, USA, 562pp.

Wang, H., Liu, C. and Zhang, L. 2002. Water-saving agriculture in China: an overview. Advances in Agronomy, 75: 135-171.

www.SID.ir

ISSN 2251-7480

Modifying empirical equations of seepage estimation using dimensional analysis (Boldaji earth canal, Chaharmahal and Bakhtiari province)

Ehsan Tavakoli[1*], Behzad Ghorbani[2], Hossein Samadi Borujeni[2], Mehdi Radfar[3], , Bijan Ghahraman[4]

1[*]) PhD Student. Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
[*]Corresponding author email: ehta84@yahoo.com
2) Associated Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
3) Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
4) Profesor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Shahrekord, Iran

Archive of SID

Received: 02-05-2016 Accepted: 01-08-2016

Abstract

The high amounts of losses from irrigation canals have resulted in lining the conveyance canals being as an important measure in order to increase water conveyance efficiency. The economical justification of earthen canals lining requires investigating the amount of seepage and infiltration in such canals. In this study, using a physical model and dimensional analysis, the water seepage loss from Boldaji earthen canal, Borujen city, Chaharmahal and Bakhtiari province, with loamy soil, was determined in the range of 40 to 100 liters per second flow rates. The empirical equations such as Moritz, Ingham, Molesworth and Yennidumia, Offengenden, Davis-Wilson and Indian equations were chosen for seepage estimation. Results showed that before modifying the coefficients of equations, the results of the modified Ingham have the highest correlation coefficient (0.917) with measured values. Independent variables of this method are water depth, canal length and wetted perimeter. Allocating the highest value of R^2 (> 0.90) besides the lowest value of RMSE (< 3.2 liters) in comparison with measured values, after the calibration of the empirical equations for the study region and modifying their coefficients, the modified Moritz and Ingham selected as the best methods. All equations estimated the seepage loss much smaller than the measured values, which was rectified after modifying the coefficients. Utilizing dimensional analysis and transferring canal conditions to laboratory was resulted in lowering costs and less time, that according to acceptable and similar to previous studies results, it could be suggested to apply in controlled conditions of laboratory for other regions.

Keywords: infiltration and seepage, Ingham method, Moritz method, physical model

www.SID.ir