

برآورد نشت در کانال‌های انتقال آب با معادلات تجربی و مدل SEEP/W

احسان توکلی^{۱*}، بهزاد قربانی، مهدی رادفر، حسین صمدی بروجنی و بیژن قهرمان

فارغ‌التحصیل دکتری تخصصی؛ آبیاری و زهکشی؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران.

eh_ta84@yahoo.com

دانشیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران.

behzad.ghorbani55@gmail.com

استادیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران.

mahdi1010@yahoo.com

دانشیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران.

samadi153@yahoo.com

استاد؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد؛ ایران.

bijangh@um.ac.ir

چکیده

افزایش بازده آبرسانی و کاهش تلفات آب در کانال‌های انتقال، اهمیت بسیار زیادی دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی معادلات تجربی و مدل SEEP/W در برآورد نشت از کانال‌های خاکی انجام شد. کانال خاکی بلداجی با خاک لومی واقع در پایین‌دست شبکه آبیاری و زهکشی گندمان و بلداجی، شهرستان بروجن استان چهارمحال و بختیاری، به عنوان نمونه مورد مطالعه انتخاب شد. ابعاد کانال یادشده و دبی‌های مورد بررسی براساس روابط تشابه ابعادی و با در نظر گرفتن مقیاس ۰/۱۳ به مدل آزمایشگاهی انتقال یافت. در این پژوهش، نه دبی (۴۰ تا ۱۶۱ لیتر در ثانیه) به دبی قابل کاربرد در مدل تبدیل شد. آزمایش‌ها برای چهارسطح ایستابی مختلف، دو مقطع مثلثی و ذوزنقه ای، در سه تکرار انجام شد و مقدار نشت با معادلات تجربی واسنجی شده موریتز، اینگهام، هندوستان، مولس ورس و ینی‌دومیا، آفنگندن و دیویس-ویلسون نشت و مدل SEEP/W برآورد شد. نتایج نشانگر آن است که در همه حالت‌های بررسی شده، با در نظر گرفتن معیارهای r ، R^2 ، RMSE و MAE، روش موریتز تخمین بهتری از نشت را ارائه می‌دهد ($R^2=0.992$ ، $RMSE=0.48$ ، $r=0.996$ و $MAE=0.44$). همچنین، معادلات مولس ورس و ینی‌دومیا و هندوستان به دلیل نتایج ضعیف برای منطقه مورد نظر قابل توصیه نیستند. مدل SEEP/W با وجود برآورد مطلوب در مقطع ذوزنقه ای، برای مقطع مثلثی عملکرد مطلوبی نداشت. با توجه به کاهش هزینه و صرفه‌جویی در وقت در نتیجه استفاده از تشابه ابعادی، بکارگیری این روش در شرایط کنترل شده آزمایشگاه برای مناطق مشابه پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تشابه ابعادی، کانال خاکی، مدل‌سازی فیزیکی، معادله اینگهام، معادله موریتز، نفوذ.

۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

* - دریافت: بهمن ۱۳۹۵ او پذیرش: شهریور ۱۳۹۶

مقدمه

معرفی کردند. روابط تجربی تخمین نشت از کانال براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای در شرایط مختلف توسعه داده شده‌اند؛ 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).

شبیه‌سازی عددی و استفاده از مدل، ابزاری برای درک بهتر فرایندهای دخیل در نشت از کانال بوده که در تعدادی مطالعات به آن پرداخته شده است. رستمیان و عابدی کوپایی (۱۳۹۰) توانایی مدل Seep/W را برای تخمین مقدار نشت از کانال‌های خاکی زیردست سد زاینده‌رود را مورد بررسی قرار داده و نتایج را با روش بیلان آبی و روش‌های تجربی (دیویس-ویلسون، موریتز، اینگهام و مولس‌ورس و ینی‌دومیا) مقایسه کردند. ضریب تبیین برای مدل ۰/۸۷۹ و برای روش‌های تجربی به ترتیب ۰/۰۹۳، ۰/۳۷۳، ۰/۱۸۳ و ۰/۰۶۷ به دست آمد. اقوامی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون تکاملی چند جمله‌ای (EPR) و Seep/W میزان نشت از کانال را در برخی از کانال‌های اصفهان و قزوین مورد مطالعه قرار دادند و نتایج رضایت‌بخشی برای مدل Seep/W گزارش کردند. کریمی و ابریشمی (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های عددی به تحلیل نشت در شرایط اشباع-غیراشباع پرداختند و توانایی مدل نرم‌افزاری Seep/W را در تخمین نشت آب از کانال بتنی حوضه رودخانه زیانگ در چین بررسی کردند. مقایسه نتایج مطالعه ایشان با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده از مدل Seep/W با نتایج مدل‌های فیزیکی سازگاری دارند.

بررسی منابع انجام شده حاکی از نتایج متفاوت و بعضاً متضاد در زمینه کارایی معادلات تجربی نشت و مدل نرم‌افزاری Seep/W در مناطق مختلف است. از سوی دیگر، چنانچه از منابع برمی‌آید تاکنون از مدل‌سازی فیزیکی برای تخمین نشت از کانال استفاده نشده است. بنابراین، با توجه به صرف وقت و هزینه‌ی بسیار کمتر در

افزایش بازده انتقال و کاهش تلفات آب در کانال‌های توزیع، اهمیت بسیار زیادی دارد. مقادیر اندک راندمان انتقال آب در کانال‌های توزیع و انتقال آب عمدتاً ناشی از تلفات نشت در کانال‌های خاکی است (سپاسخواه و سالمی، ۲۰۰۴). نشت، مهم‌ترین بخش تلفات در حین انتقال آب کشاورزی و از مهم‌ترین مشکلات موجود در طراحی شبکه‌های آبیاری به شمار می‌رود (علی، ۲۰۱۱). شناخت و کمی کردن فرایند نشت و نفوذ از کانال به منظور حفاظت منابع آب بسیار ضروری است.

روش‌های تخمین نشت و نفوذ از کانال‌ها به طور کلی شامل روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم (روش‌های مبتنی بر روابط تجربی از جمله روش اینگهام، دیویس-ویلسون، موریتز، روش هندوستان، مولس‌ورس و ینی‌دومیا، آفنگندن، ودرنیکف، موسکات، کوستیاکف، سوبرامانیا و میسرا)، روش‌های حل تحلیلی و روش‌های قیاسی است (علی، ۲۰۱۱).

سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵) پس از بررسی نه کانال خاکی در رودشت اصفهان، به واسنجی و صحت-سنجی معادلات تجربی نشت (اینگهام، دیویس-ویلسون، آفنگندن، موریتز، مولس‌ورس و ینی‌دومیا، میسرا و روش هندوستان) پرداختند. نوری محمدیه و همکاران (۱۳۸۹) دقت معادلات تجربی اینگهام، موریتز، دیویس-ویلسون، مولس‌ورس و ینی‌دومیا و میسرا را در سه کانال موجود در دشت قزوین بررسی نموده و روش‌های میسرا و موریتز را به عنوان روش‌های قابل اعتماد توصیه کردند. حیدری‌زاده و سالمی (۱۳۹۳) معادله اینگهام را با معادله تئوری ودرنیکف مقایسه نموده و نتیجه گرفتند معادله واسنجی شده ودرنیکف بهتر از معادله اصلاح‌شده اینگهام قادر به برآورد نشت آب از کانال‌های منطقه رودشت اصفهان است. سالمی و سپاسخواه (۲۰۰۱) معادلات تجربی برآورد نشت را در شبکه آبیاری دشت برخوار اصفهان بررسی کرده و معادلات دیویس-ویلسون و مولس‌ورس و ینی-دومیا را به‌عنوان مناسب‌ترین معادلات تخمین نشت

کانال درجه دو خاکی پایین دست 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 ۵۶ دقیقه شمالی و ارتفاع ۲۲۴۹ متر از سطح دریا انتخاب شد. به منظور ساخت مدل فیزیکی، حدود ۲۰۰۰ کیلوگرم خاک از کانال بلداجی به آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد منتقل شده و آزمایش‌های بررسی میزان نشست در فلوم این آزمایشگاه (مدل) انجام شد (شکل ۱).

مطالعات آزمایشگاهی نسبت به شرایط صحرائی و امکان کنترل بیشتر شرایط در محیط آزمایشگاهی، پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه معادلات تجربی و مدل Seep/W در برآورد نشست از کانال‌های خاکی، براساس تشابه ابعادی انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی کانال مورد مطالعه



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد

بیشتر پدیده‌های هیدرولیکی، به ویژه در جریان‌های باز (سازه‌های هیدرولیکی، موج‌ها، مبدل‌های انرژی موج و ...) با استفاده از عدد فرود مدل‌سازی می‌شوند (اتما، ۲۰۰۰؛ هلر، ۲۰۱۲). به منظور بررسی اثرات مقیاسی مدل-سازی فیزیکی، عدد رینولدز و عدد وبر نیز کنترل شد. عدد فرود، رینولدز و وبر به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند (چنسون، ۲۰۰۴):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times L}} \quad (2)$$

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (3)$$

$$We = \frac{V^2 \times \rho \times D}{\sigma} \quad (4)$$

تشابه ابعادی و مدل فیزیکی

برای انتقال شرایط نمونه مورد مطالعه به مدل آزمایشگاهی از روابط تشابه ابعادی استفاده شد. برای تشابه هندسی از مقیاس طولی مشخص و مناسب استفاده می‌شود (معادله ۱).

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (1)$$

که در آن:

L_r نسبت طول مدل به نمونه مورد مطالعه، L_p طول در نمونه مورد مطالعه و L_m طول نظیر در مدل فیزیکی است.

که در آن‌ها:

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)، v لزجت سینماتیک (10^{-6} متر مربع بر ثانیه)، ρ دانسیته (۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و σ کشش سطحی آب (۰/۰۷۳۳ نیوتن بر متر) است.

از برابری عدد فرود در مدل و نمونه مورد مطالعه، رابطه (۵) و از آن رابطه (۶) حاصل می‌شود:

$$V_r = L_r^{1/2} \quad (5)$$

$$Q_r = L_r^{5/2} \quad (6)$$

که در آن‌ها:

V_r و Q_r به ترتیب نسبت دبی و سرعت مدل به نمونه مورد مطالعه است. بدین منظور، ابعاد کانال براساس روابط تشابه ابعادی و با در نظر گرفتن مقیاس مناسب (نسبت عرض سطح آب در مدل به عرض سطح آب در نمونه مورد مطالعه، $L_r=0.13$) به فلوم انتقال یافت و دبی‌های نمونه مورد مطالعه با لحاظ کردن اصول تشابه ابعادی به دبی مدل تبدیل شد (جدول ۱). 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 ۱۰۵ و عدد وبر بزرگتر از ۱۰۰ به دست آمد) (چنسون، ۲۰۰۴).

جدول ۱- دبی (لیتر در ثانیه) در کانال بلداجی و مدل

کانال	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۳۱	۱۶۴
مدل	۰/۲۵*	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۶۱	۰/۸	۱/۰

*محاسبه شده با استفاده از معادله ۶

اندازه‌گیری آزمایشگاهی

شرایط طبیعی قرار داده شد تا بخشی از رطوبت خود را از دست بدهد. در پژوهش حاضر دو سطح مقطع مثلثی و دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).

برای اندازه‌گیری تلفات نشت از یک مخزن ۲۴۰ 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 (چهار ساعت) ادامه داشت. بافت خاک به روش هیدرومتری (گی و بادر، ۱۹۷۹) تعیین و با توجه به آن، ۴۴/۵ درصد شن، ۲۹/۵ درصد سیلت و ۲۶ درصد رس به دست آمده و لوم تشخیص داده شد که تا عمق سطح ایستابی که در ۶۷۹ متری از سطح زمین قرار داشت، ثابت بود. به منظور بررسی اثر سطح ایستابی بر میزان نشت از کانال، چهار سطح ایستابی مختلف (به فاصله ۰/۹، ۰/۸۵، ۰/۸ و ۰/۷۵ متر از سطح خاک مدل آزمایشگاهی) نیز آزمایش شد. برای ایجاد یکنواختی در تراکم، پس از ریختن هر لایه خاک به کمک غلتک، در جهات مختلف و به میزان یکسان متراکم شد. 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. سپس، خاک مدل به مدت یک هفته در

معادلات تجربی مورد استفاده

معادلات تجربی مورد استفاده برای برآورد میزان تلفات نشت و نفوذ آب در خاک عبارتند از موریتز، دیویس-ویلسون، اینگهام، مولس‌ورس و بینی‌دومیا، روش هندوستان و آفنگندن که در ادامه به ترتیب ارائه شده‌اند (علی، ۲۰۱۱):

$$S_m = 0.0186 \times C_m \times \sqrt{\frac{Q}{V}} \quad (7)$$

$$S_d = 0.45 \times C_d \times \frac{P \times L \times H^{1/3}}{4 \times 10^6 + 3650 \sqrt{V}} \quad (8)$$

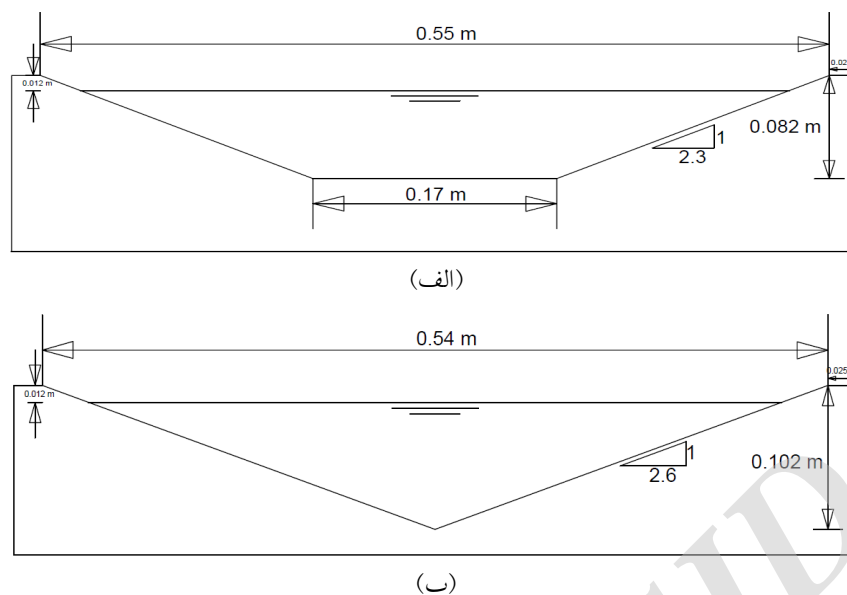
$$S_n = 0.55 \times C_n \times P \times L \times 10^{-6} \times (H^{0.5}) \quad (9)$$

$$S_y = C_y \times L \times P \times \sqrt{R} \quad (10)$$

$$S_i = C_i \times a \times d \quad (11)$$

$$S_o = S \times Q \times L / 100 \quad (12)$$

$$S = A \times S_o^{-m} \quad (13)$$



شکل ۲- نمای شماتیک و ابعاد سطح مقطع (الف) ذوزنقه‌ای و (ب) مثلثی در مدل آزمایشگاهی

دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) و S_0 نشت آب از کانال (مترمکعب بر ثانیه) است. همچنین A و m ضرایبی هستند که به نفوذپذیری آب در خاک بستگی داشته و بین 0.3 تا 0.5 برای m و 0.7 تا $3/4$ برای A در نوسان هستند.

در مطالعه حاضر، از ضرایب اصلاح شده معادلات تجربی بالا برای منطقه مورد بررسی استفاده شد (توکلی و همکاران، ۱۳۹۵). این ضرایب برای معادلات موریتز، دیویس-ویلسون، اینگهام، مولس ورس و ینی-دومیا، روش هندوستان و آفنگندن به ترتیب $2/709$ ، $278/101$ ، $103/715$ ، $0/895$ ، $2665/53$ و $9/129$ هستند.

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Seep/W

داده‌های به دست آمده از نشت و نفوذ آب از کانال، وارد مدل Seep/W که یکی از نرم‌افزارهای بسته GEO-SLOPE است، شده و نتایج مدل با مقادیر اندازه-گیری شده مقایسه شد. این مدل، یک مدل هیدرولوژی دوعبدهی است که در شرایط جریان اشباع و غیراشباع، معادله ریچاردز را حل می‌کند (رستمیان و عابدی کوپایی،

در این معادلات، 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 0.41 تا 0.66 برای بافت سنگین تا سبک متغیر است؛ 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 15 تا 25 برای بافت سنگین تا سبک متغیر است؛ S_n میزان نشت در طول کانال (مترمکعب بر ثانیه) و C_n ضریب ثابتی که بسته به نوع خاک بین $1/5$ تا $5/5$ برای بافت سنگین تا سبک متغیر است؛ 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 0.0015 تا 0.003 برای بافت سنگین تا سبک متغیر است؛ 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 $1/1$ تا $1/8$ برای بافت سنگین تا سبک متغیر است؛ S نشت از کانالی به طول یک کیلومتر، L طول کانال (کیلومتر)، Q

نتایج و بحث

مقادیر نشت برآورد شده با مدل Seep/W با مقادیر نشت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و همچنین مقادیر محاسبه شده نشت با استفاده از معادلات تجربی در جدول ۲ آمده است. به منظور کاهش حجم جدول، مقادیر نشت تنها برای یک سطح ایستابی ارائه شد و برای سایر عمق‌های ایستابی فقط مقادیر شاخص‌های آماری نشان داده شده است. مقادیر محاسبه شده نشت با معادلات تجربی و مدل Seep/W در برابر مقادیر نشت اندازه‌گیری شده، در شکل‌های ۳ تا ۱۰ ترسیم شده است. با توجه به ثابت نبودن عمق (با افزایش دبی، سطح آب در مقطع بالا آمده و عمق متغیر است)، سطح مقطع خیس شده نیز افزایش یافته و با توجه به ثابت بودن زمان در آزمایش‌ها (چهار ساعت)، نرخ نشت با افزایش دبی کاهش نشان می‌دهد که در اعداد نرخ نشت اندازه‌گیری شده مشخص است. بررسی اعداد جدول ۲ نشانگر آن است که با یک سطح مقطع خاص (دوزنقه یا مثلث)، تغییر در عمق سطح ایستابی تقریباً تاثیری بر میزان نشت از کانال نداشته و مقادیر اندازه‌گیری شده نشت بسیار نزدیک به هم هستند. به عبارت دیگر، وابستگی میزان نشت از کانال به عمق سطح ایستابی، کمتر از دبی ورودی است؛ چنانچه با تغییر دبی از ۰/۲۵ به یک لیتر در ثانیه، میزان نشت اندازه‌گیری شده به نصف کاهش می‌یافت، ولی با تغییر عمق سطح ایستابی از ۰/۹ به ۰/۷۵ متر، تغییر قابل توجهی در نشت مشاهده نشده است. همچنین، این موضوع را می‌توان به بافت خاک مورد بررسی (لوم) و فاصله عمق ایستابی از سطح خاک نسبت داد که به دلیل عمق زیاد سطح ایستابی از سطح خاک (بیشتر از ۷۵ سانتی‌متر) و صعود موئینگی اندک در بافت متوسط، عمق ایستابی تاثیری بر میزان نشت نداشته است. انتخاب روش موریتز به عنوان معادله برتر تخمین نشت (که در ادامه مطالعه به تفصیل به آن پرداخته شده) موید نقش موثرتر دبی ورودی نسبت به عمق سطح ایستابی در نشت از کانال است. علاوه بر این، میزان نشت در مقطع دوزنقه‌ای نسبت به

(۱۳۹۰). اساس مدل‌سازی در این نرم‌افزار بر پایه روش اجزای محدود بوده و کاربردهای آن در مدل‌سازی جریان آب و همچنین توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل مانند خاک است. Seep/W با فرمول‌بندی جامع خود قادر است مسائل ساده و پیچیده مربوط به نشت را حل نماید. مدل یادشده، آبخوان را همروند و ناهمگن فرض می‌کند (GEO-SLOPE International Ltd.). برای مقاطع مثلثی و دوزنقه‌ای معرفی شده در شکل ۲، شرایط مرزی به صورت نقاط داخل کانال: بار آبی؛ نقاط هم‌تراز سطح ایستابی: بار فشاری صفر؛ و نقاط واقع بر سطح نفوذناپذیر کف: بار فشاری معادل تراز سطح ایستابی، تعریف شده است.

ارزیابی معادلات تجربی و نرم‌افزار مورد استفاده

برای ارزیابی دقت نتایج معادلات نشت و مدل، از معیارهای ضریب تبیین R² و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) (به ترتیب معادله ۱۴ و ۱۵) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{inf}} - S_i)^2}{n}} \quad (14)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{\text{inf}} - S_i|}{n} \quad (15)$$

که در آن‌ها:

V_{inf} حجم اندازه‌گیری شده نشت در دبی i ام (لیتر)، S_i نشت محاسبه شده در دبی i ام (لیتر) و n تعداد داده‌های مورد بررسی است. براساس نه دبی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی (۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۳۶، ۰/۴۳، ۰/۴۹، ۰/۵۵، ۰/۶۱، ۰/۸ و ۱/۰ لیتر در ثانیه)، چهار سطح ایستابی مختلف (۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ متر)، دو سطح مقطع (مثلثی و دوزنقه‌ای) و سه تکرار در این مطالعه، ۲۱۶ آزمایش انجام شد. بررسی آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد.

دهد و بنابراین برای منطقه مورد مطالعه به هیچ وجه قابل توصیه نیست. دیگر روش غیر قابل توصیه در منطقه بلداجی، معادله هندوستان است که همواره کم‌برآورد نشان می‌دهد. این روش هرچند در مقادیر کوچک و بزرگ نشت تخمینی بهتر از سایر مقادیر نشان داده است، ولی اختلاف زیادی با مقدار نشت اندازه‌گیری شده دارد. مدل Seep/W با وجود تخمین نسبتاً خوب نشت در مقطع دوزنقه، در تمامی شرایط قرارگیری سطح ایستابی، نشت مقطع مثلثی را بیش‌برآورد می‌کند (شکل ۷ تا ۱۰). به جز موریتز که بهترین تخمین را ارائه داده است، سه روش دیگر با اندکی کم و بیش‌برآورد، نشت را محاسبه می‌کند. وقتی عمق سطح ایستابی به ۰/۸۵ متر می‌رسد، به ترتیب مدل‌های موریتز، اینگهام، Seep/W، دیویس-ویلسون، آفنگندن، مولس‌ورس و ینی‌دومیا و هندوستان نزدیک‌ترین تخمین را از نشت ارائه نمودند. در شرایط قرارگیری عمق سطح ایستابی در ۰/۸ متری، مدل‌های منتخب به ترتیب موریتز، Seep/W، اینگهام، دیویس-ویلسون، آفنگندن، مولس‌ورس و ینی‌دومیا و هندوستان هستند؛ و در مورد سطح ایستابی ۰/۷۵ متری از سطح خاک نیز، به ترتیب مدل‌های موریتز، اینگهام، Seep/W، آفنگندن، دیویس-ویلسون، مولس‌ورس و ینی‌دومیا و هندوستان عملکرد بهتری را نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده داشتند. به طور کلی، مدل Seep/W در شرایط قرارگیری سطح ایستابی در اعماق مختلف بررسی شده برای مقطع دوزنقه عملکرد قابل قبولی داشته است (ضریب R^2 بالا و RMSE و MAE کم).

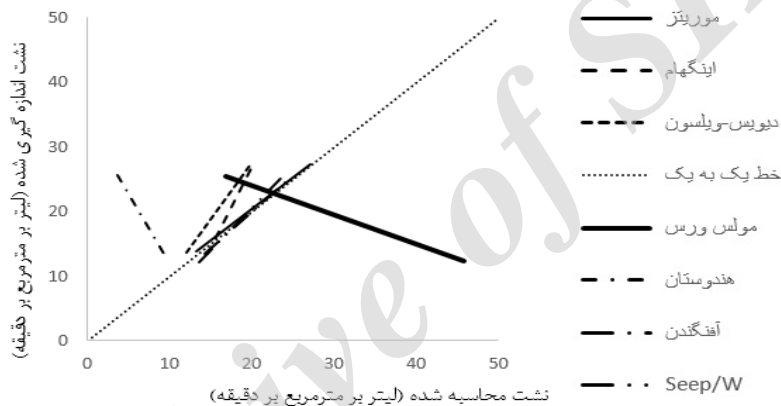
چنانچه از مقادیر جدول ۲ و شکل‌های ۳ تا ۶ پیداست، برای مقطع دوزنقه، روند تغییرات نتایج نشت محاسبه شده به مقدار قابل توجهی برای معادله هندوستان و مولس‌ورس و ینی‌دومیا افزایشی است. مقادیر منفی ضریب I بین نتایج روش‌های مولس‌ورس و ینی‌دومیا و هندوستان با نشت اندازه‌گیری شده، موید این روند معکوس است. شیب نمودارهای روش هندوستان بیشتر از مولس‌ورس و ینی‌دومیاست. کم‌برآورد زیاد (هرچه نمودار

مثلثی بیشتر بوده که ناشی از سطح مقطع بزرگ‌تر و محیط خیس شده بیشتر است. نتایج ضرایب همبستگی نشان داد تمامی روش‌ها (به جز آفنگندن در مقطع دوزنقه و عمق سطح ایستابی ۰/۸ متر که در سطح پنج درصد معنی‌دار شد) همبستگی بالا و معنی‌داری ($p\text{-value} < 0.01$) با روش اندازه‌گیری دارند. علاوه بر این، براساس مقادیر R^2 ، RMSE، MAE و محاسبه شده در این جدول، در مقطع دوزنقه‌ای و عمق سطح ایستابی ۰/۹ متر، روش موریتز بهترین برآورد را از میزان نشت ارائه داده است ($RMSE=0.48$ ، $MAE=0.44$ و $R^2=0.992$) مترمربع بر دقیقه) و پس از آن به ترتیب مدل Seep/W، معادله اینگهام، دیویس-ویلسون، آفنگندن، مولس‌ورس و ینی‌دومیا و هندوستان جای دارند. دلیل تفاوت در نتایج معادلات مختلف را می‌توان در داده‌های ورودی و شرایط منطقه‌ای توسعه جستجو کرد. شرایط منطقه‌ای توسعه معادلات با واسنجی ضرایب تجربی تا اندازه‌ای برطرف شده است، لذا داده‌های ورودی ملاک بررسی قرار گرفت. چنانچه از فرمول معادلات به کار رفته پیداست، در معادله موریتز دبی ورودی به صورت مستقیم در نشت موثر است و در معادله آفنگندن این متغیر رابطه عکس با نشت دارد؛ لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که دبی نقشی تعیین کننده در برآورد صحیح نشت ایفا می‌کند. از سوی دیگر، ورود جذر سرعت آب در مخرج معادله نشت موریتز سبب حصول نتیجه نزدیک به مقدار واقعی شده، هرچند این عمل در معادله دیویس-ویلسون تاثیر کمتری بر افزایش دقت داشته است. با این حال، می‌توان مساله اخیر را به ورودی‌های دیگر دیویس-ویلسون (محیط خیس شده، طول و عمق آب) نسبت داد. استفاده از این سه متغیر در معادله اینگهام (که عدم کاربرد جذر سرعت در مخرج معادله، وجه تمایز آن با دیویس-ویلسون است)، سبب حصول تخمین‌های مناسب شده است.

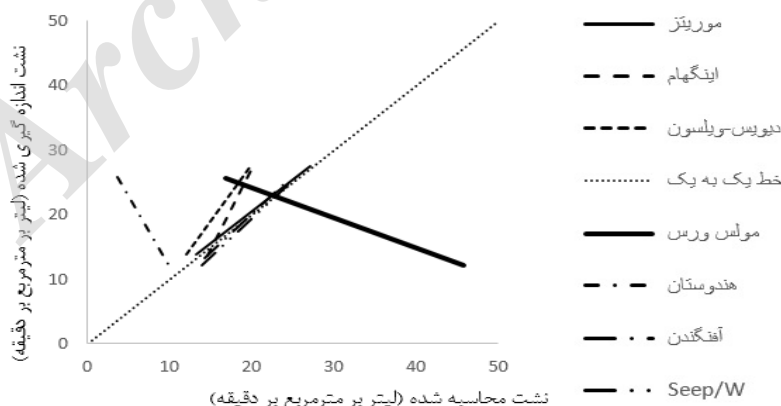
چنانچه از شکل‌های ۳ تا ۱۰ پیداست، در هر دو مقطع بررسی شده مولس‌ورس و ینی‌دومیا در ابتدا نشت را کم‌برآورد می‌کند و سپس بسیار بیش‌برآورد نشان می-

معادلات هندوستان و مولس ورس و ینی‌دمیا برای تخمین نشت از کانال خاکی بلداجی با بافت لوم را می‌توان به تفاوت این دو معادله با سایر معادلات استفاده شده نسبت داد. در محاسبات این دو معادله به ترتیب سطح مقطع و شعاع هیدرولیکی به کار رفته‌اند، در حالی که در دیگر معادلات از این دو عامل استفاده نشده است. با توجه به تفاوت فاحش نتایج این دو روش نسبت به مقادیر فاحش نتایج این دو روش نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده نشت، می‌توان چنین استنباط نمود که ورود سطح مقطع خیس شده جریان به صورت مستقیم، تاثیر مثبتی در تخمین نشت ندارد.

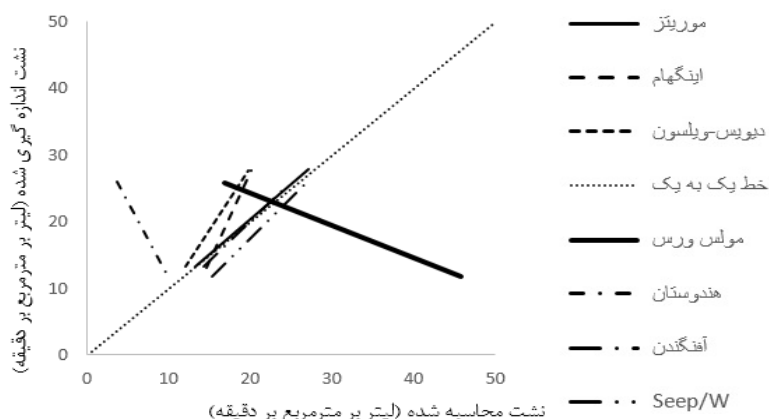
از خط ۱:۱ دورتر باشد نشانگر کم‌برآورد بیشتر است) روش هندوستان حاکی از نامناسب بودن این روش، حتی پس از اصلاح ضریب، برای منطقه مورد نظر است. با کاهش عمق سطح ایستابی از ۰/۹ به ۰/۷۵ متر، برآوردهای مدل Seep/W به تدریج از خط ۱:۱ دور می‌شود و مطلوبیت کمتری پیدا می‌کند. برای مقطع مثلث، همانند مقطع دوزنقه، موریتز تخمین بهتری را ارائه داده است. مدل Seep/W در تمامی شرایط قرارگیری سطح ایستابی، نشت مقطع مثلثی را بیش‌برآورد می‌کند و با کاهش عمق سطح ایستابی از ۰/۹ به ۰/۷۵ متر، برآوردهای مدل Seep/W به تدریج از خط ۱:۱ دور می‌شود و مطلوبیت کمتری پیدا می‌کند (شکل ۷ تا ۱۰). نامناسب بودن



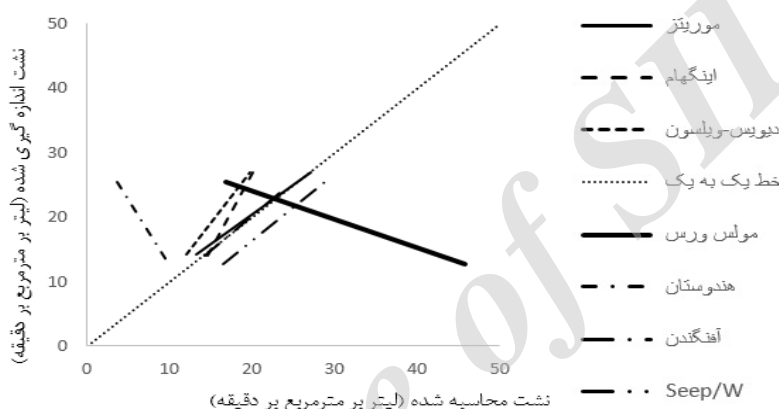
شکل ۳- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۹ متر و مقطع دوزنقه)



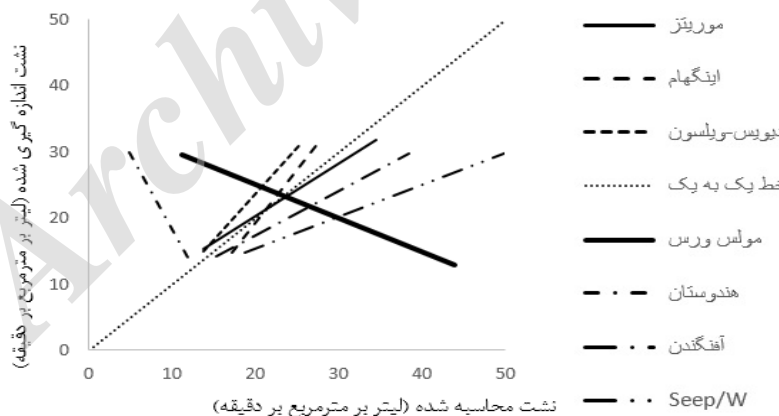
شکل ۴- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۸۵ متر و مقطع دوزنقه)



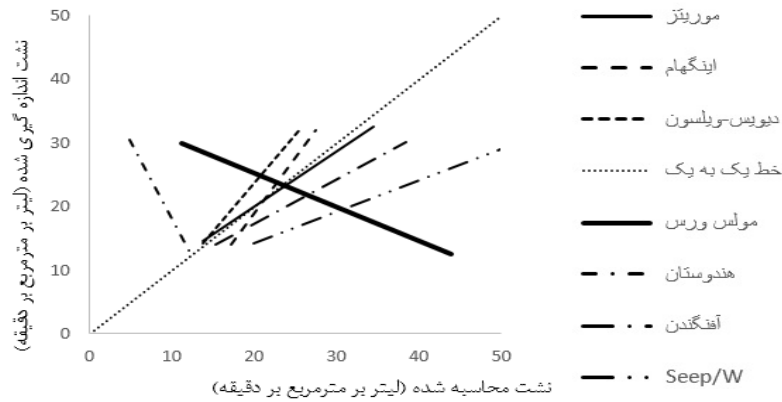
شکل ۵- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۸ متر و مقطع ذوزنقه)



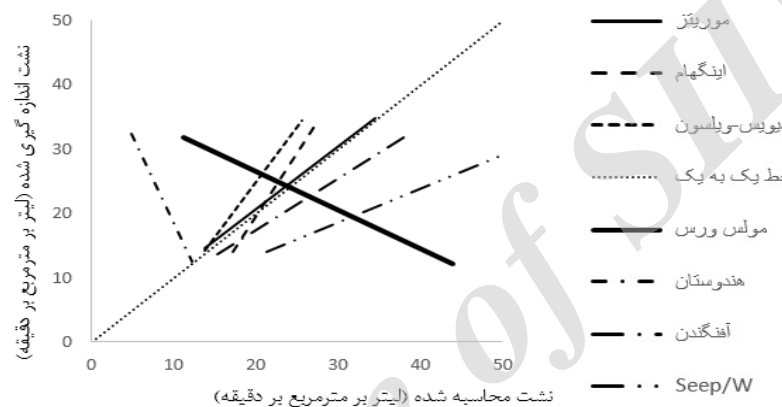
شکل ۶- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۷۵ متر و مقطع ذوزنقه)



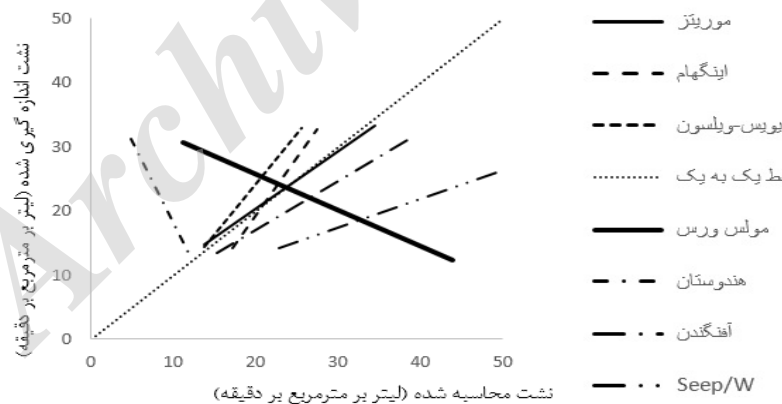
شکل ۷- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۹ متر و مقطع مثلث)



شکل ۸- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۸۵ متر و مقطع مثلث)



شکل ۹- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۸ متر و مقطع مثلث)



شکل ۱۰- مقدار نشت محاسبه شده با روش‌های مختلف در برابر نشت اندازه‌گیری شده (عمق ایستابی ۰/۷۵ متر و مقطع مثلث)

جدول ۲- مقادیر نشت متوسط اندازه گیری شده در مدل و محاسبه شده با معادلات تجربی و مدل Seep/W (زمان انجام آزمایش چهار ساعت)

Seep/W	نشت محاسبه شده (l/m ² /min)						نشت اندازه گیری شده (l/m ² /min)	Q _m (L/s)	متوسط عمق (متر)	مقطع	WT (m)	ردیف
	آفنگندن	هندوستان	م-ی	اینگهام	د-و	موریتز						
۲۴/۰۰	۲۲/۰۱	۳/۶۴	۱۶/۹۰	۲۰/۰۷	۱۹/۷۸	۲۷/۰۵	۲۶/۴۱	۰/۲۵	۰/۰۳	دوزنقه	۰/۹۰	۱
۲۳/۴۲	۲۲/۵۷	۳/۹۰	۱۸/۰۹	۱۹/۵۱	۱۸/۹۹	۲۵/۵۸	۲۶/۳۷	۰/۳۰	۰/۰۳۲۵	دوزنقه	۰/۹۰	۲
۲۲/۸۹	۲۳/۳۲	۴/۲۱	۱۹/۴۰	۱۹/۱۱	۱۸/۳۴	۲۴/۴۳	۲۴/۹۰	۰/۳۶	۰/۰۳۵	دوزنقه	۰/۹۰	۳
۲۲/۲۲	۲۴/۰۰	۴/۴۷	۲۰/۵۳	۱۸/۵۸	۱۷/۶۲	۲۳/۱۸	۲۳/۴۴	۰/۴۳	۰/۰۳۷۵	دوزنقه	۰/۹۰	۴
۲۱/۶۰	۲۳/۴۲	۴/۹۴	۲۲/۳۸	۱۸/۱۳	۱۶/۹۴	۲۱/۸۸	۲۱/۹۹	۰/۴۹	۰/۰۴۱	دوزنقه	۰/۹۰	۵
۲۱/۲۷	۲۳/۹۱	۵/۱۸	۲۳/۴۸	۱۷/۹۰	۱۶/۵۹	۲۱/۲۰	۲۱/۷۴	۰/۵۵	۰/۰۴۳	دوزنقه	۰/۹۰	۶
۱۹/۸۶	۲۰/۲۶	۶/۱۴	۲۷/۷۴	۱۶/۹۵	۱۵/۲۷	۱۸/۸۱	۱۹/۱۲	۰/۶۱	۰/۰۵۱	دوزنقه	۰/۹۰	۷
۱۸/۴۷	۱۹/۴۱	۷/۲۱	۳۲/۶۴	۱۶/۰۶	۱۴/۰۸	۱۶/۶۷	۱۷/۱۲	۰/۸۰	۰/۰۶	دوزنقه	۰/۹۰	۸
۱۳/۵۰	۱۴/۲۸	۹/۸۳	۴۵/۷۱	۱۴/۵۵	۱۲/۰۹	۱۳/۱۹	۱۳/۵۶	۱/۰۰	۰/۰۷	دوزنقه	۰/۹۰	۹
۰/۹۴	۰/۶۷۸	۰/۹۵۱	۰/۹۳۵	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۲	-	-	-	دوزنقه	۰/۹۰	R ²
۱/۵۹	۲/۳۷	۱۷/۱۸	۱۳/۱۲	۴/۴۸	۵/۳۱	۰/۴۸	-	-	-	دوزنقه	۰/۹۰	RMSE
۱/۲۹	۲/۰۱	۱۶/۱۳	۹/۴۰	۳/۹۷	۴/۹۹	۰/۴۴	-	-	-	دوزنقه	۰/۹۰	MAE
۰/۹۶۹**	۰/۸۲۴**	۰/۹۷۵**	۰/۹۶۷**	۰/۹۹۶**	۰/۹۹۶**	۰/۹۹۶**	-	-	-	دوزنقه	۰/۹۰	r
۰/۹۴۱	۰/۷۳۵	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۸۹	۰/۹۸۷	۰/۹۸۶	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۵	R ²
۱/۲۴	۲/۲۴	۱۷/۳۴	۱۳/۱۵	۴/۶۳	۵/۴۷	۰/۶۷	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۵	RMSE
۰/۹۹	۱/۸۵	۱۶/۲۷	۹/۴۳	۴/۱۵	۵/۱۴	۰/۵۹	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۵	MAE
۰/۹۷۰**	۰/۸۵۷**	۰/۹۸۲**	۰/۹۷۴**	۰/۹۹۴**	۰/۹۹۳**	۰/۹۹۳**	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۵	r
۰/۹۳۱	۰/۶۳۳	۰/۹۳۸	۰/۹۹۲	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴	۰/۹۹۴	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۰	R ²
۲/۲۸	۲/۷۳	۱۷/۴۳	۱۳/۳۳	۴/۷۸	۵/۵۶	۰/۶۰	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۰	RMSE
۱/۹۶	۲/۲۳	۱۶/۲۸	۹/۵۲	۴/۲۰	۵/۱۵	۰/۴۹	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۰	MAE
۰/۹۶۵**	۰/۷۹۵*	۰/۹۶۹**	۰/۹۶۰**	۰/۹۹۷**	۰/۹۹۷**	۰/۹۹۷**	-	-	-	دوزنقه	۰/۸۰	r

ادامه جدول ۲

نشست اندازه‌گیری شده (l/m ² /min)	Q _m (L/s)	متوسط عمق (متر)	مقطع	WT (m)	ردیف	نشست محاسبه شده (l/m ² /min)	نشست اندازه‌گیری شده (l/m ² /min)	Q _m (L/s)	متوسط عمق (متر)	مقطع	WT (m)	ردیف
۰/۹۵۹	۰/۶۷۶	۰/۹۶۳	۰/۹۵	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۵	-	-	-	دو زنته	۰/۷۵	R ²
۳/۷۱	۲/۲۳	۱۷/۱۶	۱۲/۹۲	۴/۴۱	۵/۲۹	۰/۵۵	-	-	-	دو زنته	۰/۷۵	RMSE
۳/۶۳	۱/۷۵	۱۶/۱۸	۹/۱۴	۳/۹۹	۵/۰۵	۰/۴۲	-	-	-	دو زنته	۰/۷۵	MAE
۰/۹۷۹**	۰/۸۲۲**	۰/۹۸۱**	۰/۹۷۴**	۰/۹۹۸**	۰/۹۹۸**	۰/۹۹۷**	-	-	-	دو زنته	۰/۷۵	r
۵۳/۲۲	۳۵/۵۱	۴/۹۲	۱۱/۲۷	۲۷/۲۷	۲۵/۵۷	۳۴/۳۸	۳۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۰۴۱	مثلث	۰/۹۰	۳۷
۵۱/۱۳	۳۷/۱۵	۵/۲۱	۱۲/۲۴	۲۶/۹۱	۲۵/۰۰	۳۲/۹۹	۳۰/۳۸	۰/۳۰	۰/۰۴۳	مثلث	۰/۹۰	۳۸
۴۶/۵۶	۳۵/۶۰	۵/۵۶	۱۳/۵۲	۲۵/۵۱	۲۳/۳۲	۳۰/۰۴	۲۷/۷۸	۰/۳۶	۰/۰۴۶۵	مثلث	۰/۹۰	۳۹
۴۵/۶۹	۲۸/۴۰	۵/۸۳	۱۴/۳۸	۲۵/۴۲	۲۳/۱۳	۲۹/۴۴	۲۷/۷۸	۰/۴۳	۰/۰۴۸	مثلث	۰/۹۰	۴۰
۴۱/۸۴	۳۵/۶۲	۶/۲۸	۱۶/۰۸	۲۴/۲۴	۲۱/۷۷	۲۷/۰۰	۲۶/۴۱	۰/۴۹	۰/۰۵۲	مثلث	۰/۹۰	۴۱
۳۹/۲۷	۳۴/۳۸	۶/۵۶	۱۷/۳۴	۲۳/۳۹	۲۰/۷۸	۲۵/۳۱	۲۶/۰۴	۰/۵۵	۰/۰۵۵	مثلث	۰/۹۰	۴۲
۳۶/۱۰	۳۱/۱۴	۷/۱۹	۱۹/۸۲	۲۲/۴۶	۱۹/۶۹	۳۳/۲۹	۳۴/۵۶	۰/۶۱	۰/۰۶	مثلث	۰/۹۰	۴۳
۲۵/۸۲	۲۰/۲۹	۹/۸۹	۳۱/۷۸	۱۹/۲۶	۱۶/۰۳	۱۷/۰۹	۱۷/۶۶	۰/۸۰	۰/۰۸	مثلث	۰/۹۰	۴۴
۱۸/۷۰	۱۵/۳۲	۱۲/۲۴	۴۳/۹۲	۱۷/۲۰	۱۳/۸۰	۱۳/۶۸	۱۳/۹۴	۱/۰۰	۰/۰۹	مثلث	۰/۹۰	۴۵
۰/۹۷۴	۰/۹۳۸	۰/۹۸۶	۰/۹۷۳	۰/۹۷۹	۰/۹۷۴	۰/۹۶۲	-	-	-	مثلث	۰/۹۰	R ²
۱۵/۸۶	۷/۱۰	۱۹/۴۴	۱۶/۲۵	۲/۶۰	۴/۳۳	۱/۹۵	-	-	-	مثلث	۰/۹۰	RMSE
۱۴/۸۳	۶/۵۱	۱۷/۹۱	۱۴/۷۵	۲/۵۴	۳/۹۷	۱/۵۶	-	-	-	مثلث	۰/۹۰	MAE
۰/۹۸۷**	۰/۹۶۹**	۰/۹۹۳**	۰/۹۸۶**	۰/۹۸۹**	۰/۹۸۷**	۰/۹۸۱**	-	-	-	مثلث	۰/۹۰	r
۰/۹۹۸	۰/۸۷۷	۰/۹۵۶	۰/۹۳۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۰/۹۹۴	-	-	-	مثلث	۰/۸۵	R ²
۱۸/۱۱	۶/۹۹	۱۹/۸۰	۱۶/۶۳	۲/۹۹	۰/۹۹	۱/۲۱	-	-	-	مثلث	۰/۸۵	RMSE
۱۷/۱۵	۶/۲۹	۱۸/۱۳	۱۴/۹۱	۲/۷۱	۴/۱۹	۰/۹۹	-	-	-	مثلث	۰/۸۵	MAE
۰/۹۹۹**	۰/۹۳۷**	۰/۹۷۸**	۰/۹۶۵**	۰/۹۹۸**	۰/۹۹۸**	۰/۹۹۷**	-	-	-	مثلث	۰/۸۵	r

ادامه جدول ۲

ردیف	WT (m)	مقطع	متوسط عمق (متر)	Q _m (L/s)	نشت اندازه گیری شده (l/m ² /min)	نشت محاسبه شده (l/m ² /min)	ردیف	WT (m)	مقطع	متوسط عمق (متر)	Q _m (L/s)	نشت اندازه گیری شده (l/m ² /min)	نشت اندازه گیری شده (l/m ² /min)
R ²	۰/۸۰	مثلث	-	-	-	۰/۹۸۶	۰/۹۹	۰/۹۹۱	۰/۹۱۳	۰/۹۳۹	۰/۸۹۷	۰/۸۸۷	
RMSE	۰/۸۰	مثلث	-	-	-	۰/۹۹	۶/۱۸	۴/۴۳	۱۷/۷۴	۲۱/۳۲	۵/۵۸	۱۹/۵۷	
MAE	۰/۸۰	مثلث	-	-	-	۰/۹۰	۵/۵۳	۴/۰۰	۱۶/۲۰	۱۹/۴۷	۴/۹۵	۱۸/۶۶	
r	۰/۸۰	مثلث	-	-	-	۰/۹۹۳**	۰/۹۹۵**	۰/۹۹۵**	۰/۹۵۵**	۰/۹۶۹**	۰/۹۴۷**	۰/۹۹۳**	
R ²	۰/۷۵	مثلث	-	-	-	۰/۹۶	۰/۹۷۱	۰/۹۷۵	۰/۹۴۲	۰/۹۶۱	۰/۹۵۳	۰/۹۶۷	
RMSE	۰/۷۵	مثلث	-	-	-	۱/۴۱	۵/۲۴	۳/۵۵	۱۷/۰۵	۲۰/۳۵	۶/۲۲	۲۳/۹۴	
MAE	۰/۷۵	مثلث	-	-	-	۱/۱۷	۴/۶۸	۳/۴۴	۱۵/۶۵	۱۸/۶۱	۵/۸۰	۲۲/۷۹	
r	۰/۷۵	مثلث	-	-	-	۰/۹۸۰**	۰/۹۸۵**	۰/۹۸۷**	۰/۹۷۱**	۰/۹۸۰**	۰/۹۷۶**	۰/۹۸۳**	

اعداد هر آزمایش حاصل میانگین گیری از سه آزمایش انجام شده هستند که در آن‌ها طول مورد بررسی یک متر، عرض کفا مقطع دوزنقه‌ای ۰/۱۷ متر، Z برای دوزنقه: ۲/۳۱۷ و برای مثلث ۲/۶۴۷ است. R²، RMSE و MAE: به ترتیب ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق برای نشت محاسبه شده نسبت به مقدار اندازه گیری شده. A: سطح مقطع، P: محیط خیس شده، T: عرض بالای سطح آب، Q_m: دبی در مدل آزمایشگاهی. **معنی‌دار در سطح یک درصد. *معنی‌دار در سطح پنج درصد. †: ضریب همبستگی پیرسون. †-و: دیویس-ویلسون. †-م: مولس‌ورس و ینی‌دومیا. WT: سطح ایستاباندازه‌گیری شده نشت، می‌توان چنین استنباط نمود که ورود سطح مقطع خیس شده جریان به صورت مستقیم، تاثیر مثبتی در تخمین نشت ندارد.

در مطالعه سالمی و سپاسخواه (۱۳۸۵)، مقدار R^2 برای اینگهام بعد از اصلاح ۰/۹۶ بود. در مطالعه حاضر نیز، اینگهام مقدار R^2 بالایی (در مقطع دوزنقه‌ای بیشتر از ۰/۹۸۹ و برای مقطع مثلثی همواره بزرگتر از ۰/۹۷۵) دارد. نوری محمدیه و همکاران (۱۳۸۹) نرخ نشت را در سه کانال مورد بررسی به ترتیب ۱۶۷/۹، ۵۷۲/۵ و ۳۷۹/۵ 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. در پژوهش این محققان نیز، موریتز روش قابل قبولی برای تخمین نشت معرفی شده است. در مطالعه رستمیان و عابدی کوپایی (۱۳۹۰) روش موریتز و اینگهام نسبت به روش‌های تجربی دیویس-ویلسون و مولس‌ورس و ینی دومیا 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.

در مطالعه آن‌ها، معادلات واسنجی نشده‌اند. این محققان طول محدوده مورد بررسی برای نشت را ارائه نکردند ولی گزارش 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 در نظر نگرفتن میزان تعرق پوشش گیاهی در کانال‌ها و حرکت ریشه گیاهان و تخریب ساختمان خاک است. انتخاب موریتز به عنوان روش برتر نسبت به سایر معادلات تجربی، از مشابهت‌های پژوهش حاضر و مطالعه رستمیان و عابدی کوپایی (۱۳۹۰) است. مقادیر MAE برای معادله اینگهام در پژوهش حاضر برای دو مقطع بررسی شده در اعماق مختلف سطح ایستابی، بین ۲/۵۴ تا ۴ لیتر بر مترمربع بر دقیقه متغیر است که تفاوت زیادی با مقدار گزارش شده توسط حیدری‌زاده و سالمی (۱۳۹۳) (۰/۰۱) دارد. انتخاب دیویس-ویلسون و مولس‌ورس و ینی دومیا

نتیجه‌گیری

نتایج برآورد مقدار نشت برای چهار سطح ایستابی مختلف و دو مقطع مثلثی و دوزنقه، در سه تکرار به وسیله معادلات تجربی واسنجی شده موریتز، اینگهام، هندوستان، مولس‌ورس و ینی دومیا، آفنگندن و دیویس-ویلسون نشت و مدل Seep/W، نشانگر آنست که در تمامی حالات بررسی شده، با در نظر گرفتن معیارهای R^2 ، ضریب همبستگی، RMSE و MAE، روش موریتز بهترین و نزدیک‌ترین تخمین از نشت را ارائه می‌دهد ($RMSE=0.48$ ، $R^2=0.992$ و $MAE=0.44$ لیتر بر مترمربع بر دقیقه) و پس از آن برای مقطع دوزنقه به ترتیب مدل Seep/W، معادله اینگهام، دیویس-ویلسون، آفنگندن، مولس‌ورس و ینی دومیا و هندوستان جای دارند. همچنین، براساس نتایج هر دو مقطع بررسی شده، معادلات مولس‌ورس و ینی دومیا و هندوستان به دلیل نتایج ضعیف برای منطقه مورد نظر قابل توصیه نیستند. ضریب همبستگی این معادلات با مقدار نشت اندازه‌گیری شده در تمامی شرایط منفی به دست آمد. معادله هندوستان مقدار نشت را در منطقه بلداجی به شدت کم-برآورد می‌کند. مدل Seep/W با وجود برآورد مطلوب در مقطع دوزنقه ($R^2>0.931$ ، $\sigma>0.969$ ، $RMSE<1.24$)

وابستگی میزان نشت از کانال به عمق سطح ایستابی، کمتر از دبی ورودی است. براساس نتایج این مطالعه مشخص شد استفاده از تشابه ابعادی و انتقال شرایط کانال به آزمایشگاه سبب کاهش هزینه و صرفه‌جویی در وقت می‌شود؛ بنابراین، می‌توان به‌کارگیری این روش را در شرایط کنترل شده‌ی آزمایشگاه برای مناطق مشابه نیز پیشنهاد نمود.

$3.71 < MAE < 3.630.99$ لیتر بر مترمربع بر دقیقه)، برای مقطع مثالی عملکرد مطلوبی نشان نداد ($R^2 > 0.967$). $r > 0.983$ $< RMSE < 23.94$ و 15.86 و $MAE < 22.7914.83$ لیتر بر مترمربع بر دقیقه). بررسی مقادیر نشت اندازه‌گیری شده نشان داد که با یک سطح مقطع خاص (دوزنقه یا مثلث)، تغییر در عمق سطح ایستابی تقریباً تاثیری بر میزان نشت از کانال نداشته و مقادیر نشت بسیار نزدیک به هم هستند؛ به عبارت دیگر،

فهرست منابع

۱. توکلی، اب. قربانی، م. رادفر، ح. صمدی بروجنی. و ب. قهرمان. ۱۳۹۵. اصلاح معادلات تجربی برآورد نشت با استفاده از تشابه ابعادی (کانال خاکی بلداجی، استان چهارمحال و بختیاری). مجله حفاظت منابع آب و خاک. پذیرفته شده برای انتشار.
۲. حیدری‌زاده، م.، و ح.ر. سالمی. ۱۳۹۳. بررسی کاربرد معادله تجربی اینگهام و معادله تئوری ودرنیکو در برآورد نشت آب از کانال‌های منطقه رودشت اصفهان. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۴): ۷۰۳-۷۱۲.
۳. رستمیان، ر.، و ج. عابدی کوپایی. 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: ۱۳-۲۲.
۴. سالمی، ح.ر.، و ع.ر. سپاسخواه. ۱۳۸۵. اصلاح معادلات تجربی نشت آب از کانال در منطقه رودشت اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۰: ۲۹-۴۲.
۵. صدقی اصل، م.، ح. رحیمی. و ح. خالقی. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی کنترل نشت از پی‌های آبرفتی. مجله مهندسی عمران، ۱: ۱۱-۲۱.
۶. نوری محمدیه، م.، ت. سهرابی. و ح. رحیمی. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های تجربی تعیین نشت در کانال‌های خاکی (مطالعه موردی: دشت قزوین). مجله پژوهش آب ایران، ۱۲۵: ۴-۱۲۸.
۷. ولی‌سامانی، ج.، و پ. فتحی. ۱۳۸۴. 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، ۱: ۳-۱۰.
8. Aghvami, E., A. Abbaspour, M.A., Ghorbani, and F. Salmasi. 2011. Estimation of channels seepage using seep/w and evolutionary polynomial regression (EPR) modelling (Case Study: Qazvin and Isfahan channels). J. Civil Eng. Urban. 3:211-215.
9. Ali, H. 2011. Practices of irrigation & on-farm water management. Springer Science & Business Media, New York. USA.
10. Bakry, M.F., and A.A.E.M. Awad. 1997. Practical estimation of seepage losses along earthen canals in Egypt. Water Resour. Manag. 11(3): 197-206.
11. Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow. Arnold, London.
12. Chen, C., J. Wan, and H. Zhan. 2003. Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well. J. Hydrol. 281: 159-171.
13. Ettema, R. 2000. Hydraulic modeling: concepts and practice. ASCE, USA.

14. Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1979. Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43(5): 1004-1007.
15. GEO-SLOPE International Ltd. 2002. SEEP/W for finite element seepage analysis. User Guide. Version 5. Calgary, Alberta, Canada.
16. Heller, V. 2012. Model-prototype similarity. 4th Coastlab Teaching School, Wave and Tidal Energy. 17-20 Jan. Porto, Portugal.
17. Karimi, S., and S. Abrishami. 2015. Numerical analysis of seepage of concrete-coated water transmission channels considering saturated-unsaturated conditions. *Indian J. Sci. Tech.* 8(2): 152.
18. Kraatz, D.B. 1977. Irrigation canal lining. FAO Land and Water Development Series No. 1, 1977, FAO, Rome, pp. 18-50.
19. Luofeng, X., and D. Xiangbao. 2012. Study on physical model experiment of dam's seepage stability base on coastal sand. *Procedia Eng.* 28:534-541.
20. Nourani, V., M.H. Aminfar, M.T. Alam, and E. Sharghi. 2014. Liquid analog circuits for laboratory simulation of seepage. *J. Environ. Hydrol.* 22:1-15.
21. Salemi, H.R., and A.R. Sepaskhah. 2001. Modification of empirical equation for seepage loss estimation in small earth canals. *Iranian J. Sci. Tech.* 25(B4): 661-668.
22. Sepaskhah, A.R., and H.R. Salemi. 2004. An empirical model for prediction of conveyance efficiency for small earth canals. *Iranian J. Sci. Tech.* 28: 623-628.
23. Simpson, M.J., T.P. Clement, and T.A. Gallop. 2003. Laboratory and numerical investigation of flow and transport near a seepage-face boundary. *Groundwater* 41(5): 690-700.
24. Streeter, V.L., and E.B. Wylie. 1979. *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, USA.

Archive of SID