



بررسی عددی نشت از کانال های خاکی و مقایسه با اندازه گیری صحرائی

فرزین سلماسی*، رضا حسین زاده اصل، هادی ارونقی

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶-۱۱-۱۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۱-۲۷

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۱-۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۲-۰۸

کلمات کلیدی:

نشت

کانال خاکی

روش عددی

شرایط مرزی

رگرسیون

خلاصه: تلفات نشت از کانال های خاکی سهم زیادی در تلفات آب در بخش کشاورزی دارد. درک بهتر از ماهیت تلفات نشت می تواند به افزایش راندمان انتقال آب کمک نموده و راه حل هایی برای حل مشکلات کمبود آب ارائه نماید. در این تحقیق برای بررسی عوامل موثر بر نشت از کانال های خاکی از شبیه سازی عددی استفاده شد. جهت صحت سنجی از اطلاعات موجود از برخی از کانال های خاکی شبکه آبیاری زاینده رود استفاده گردید. تعداد ۲۴۶ مدل عددی شامل مقاطع مختلف کانال خاکی دوزنقه ای، مستطیلی و مثلثی در نرم افزار SEEP/W اجرا شد. نتایج نشان داد که برای شبیه سازی عددی، عرض محدوده ای معادل ۱۵ برابر عرض سطح آب در کانال برای عدم تاثیر مرزهای کناری بر دبی نشت نیاز خواهد بود. مقایسه دبی نشتی با روابط تجربی نشان داد که روابط تجربی خطای زیادی در برآورد نشت نشان می دهند، هر چند رابطه موریتز با ضریب تبیین ۰/۳۷۳ بهتر از بقیه بود. روابط رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی تطابق مناسبی را برای تخمین دبی نشت ارائه نمود. رابطه خطی به دلیل دارا بودن ریشه میانگین مربعات خطای کم و سهولت کاربرد توصیه می شود. محیط خیس شده کانال عامل مهمی در نشت از کانال تشخیص داده شد، ولی شیب جداره کانال اثر اندکی بر نشت داشت. پیشنهاد می شود تا در مطالعات آینده، اثر عمق آب زیرزمینی نیز بر دبی نشتی از کانال بررسی گردد.

۱ - مقدمه

آن، انتقال آب باید براساس یک راندمان قابل قبول سیستم آبیاری انجام پذیرد [۲]. روش های متداول مورد استفاده برای محاسبه تلفات نشت از کانال عمدتاً شامل آزمایش های میدانی (روش عملی اندازه گیری نشت از کانال)، روابط تجربی و روش های عددی می باشد. آزمایش های میدانی (اندازه گیری مستقیم تلفات نشت کانال) شامل آزمون حوضچه، عکس برداری با اشعه مادون قرمز، نشت سنج های شیپوری، مقاومت الکتریکی و اندازه گیری دبی ورودی - خروجی جریان می باشد [۳]. روش دبی ورودی - خروجی برای محاسبه تلفات نشت از کانال از طریق اندازه گیری جریان ورودی - خروجی کانال توسط جریان سنج ها یا سازه های اندازه گیری جریان (نظیر سرریزها، فلوم ها و یا روزنه ها) به کار برده می شود. مزیت اصلی این روش این است که تلفات نشت می تواند تحت شرایط عملکردی نرمال کانال اندازه گیری شود. در هر حال این روش دقت کمی دارد و

در طرح های آبیاری کانال ها به طور گسترده برای انتقال آب از مخزن سد به زمین های کشاورزی به کار برده می شوند. هم چنین انتقال آب به وسیله کانال ممکن است برای رفع نیازهای صنعتی و شهری باشد. در اغلب موارد، مقدار واقعی آب موجود در انتهای کانال به مقدار قابل توجهی کمتر از مقدار آب وارد شده در ابتدای کانال است و یکی از مهم ترین علل این تلفات، نشت آب از کانال ها می باشد. بنابراین، شناخت و کمی کردن فرآیند نشت و نفوذ از کانال به منظور حفاظت منابع آب، مدیریت آب های سطحی و زیرزمینی، تعیین شدت عوارض مرتبط با نشت و نیز ارزیابی منافع فنی و مادی بالقوه روش ها و فناوری های کاهش نشت، اجتناب ناپذیر است [۱].

در پروژه ها و طرح های آبی به منظور تولید محصولات یا افزایش

* نویسنده عهده دار مکاتبات: ferzin.salmasi@gmail.com



کنترل تلفات آب نسبت به پوشش سنگی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که اختلاف معنی داری بین میانگین تلفات نشت از کانال های بتنی و پوشش سنگی مشاهده نشده است. محمدرضاپورطبری و مزک‌ماری [۱۱]، به کمک بسته نرم‌افزاری SEEP/W میزان نشت در کانال برای حالت‌های مختلف را مدل‌سازی نمودند و مناسب‌ترین رابطه ریاضی بین داده‌های ورودی و خروجی را استخراج کرده و با سایر روابط تجربی مقایسه کردند و نتایج را در قالب نمودارهایی بی‌بعد ارائه نمودند.

چاهر [۱۲] از یک روش تحلیلی برای ارزیابی میزان نشت از کانال دوزنقه‌ای استفاده نمود. وی بیان کرد که روش پیشنهادی برای تعیین میزان نشت موثر بوده و بر اساس آن می‌توان مقدار تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی از کانال‌های دوزنقه‌ای را به‌دست آورد. کنزلی [۱۳] با استفاده از داده‌های دستگاه ADCP⁶ به تخمین میزان نشت از کانال‌های آبیاری پرداخته و بر اساس مشخصات هندسی کانال و سرعت جریان، رابطه تخمین نشت از کانال‌ها را ارائه نمود. پوگنانت و همکاران [۱۴] به کمک روش القای الکترومغناطیس اقدام به اندازه‌گیری میزان نشت از کانال‌های آبیاری نمودند و نتایج، حاکی از مناسب بودن این روش در تخمین میزان نشت از کانال در کاوش‌های میدانی است.

رستمیان و عابدی‌کوپایی [۱۵]، به بررسی میزان نشت آب در هفت کانال خاکی درجه ۳ و ۴ شبکه آبیاری زاینده‌رود پرداختند. نتایج نشان داد که معادلات تجربی با مشاهدات اختلاف زیادی داشته و در عین حال شبیه‌سازی عددی نشت از کانال با نرم‌افزار SEEP/W با دقت قابل‌قبولی با اندازه‌گیری‌ها مطابقت داشت. در تحقیقی که توسط سهرابی و جوادپور بروجنی [۱۶]، انجام شد، راندمان انتقال و توزیع کانال‌های درجه ۱ تا ۴ شبکه آبیاری دشت قزوین به ترتیب ۹۵/۲، ۹۰/۵، ۸۶/۱ و ۷۷/۱ درصد به‌دست آمد. نتایج عملکرد شبکه مذکور نشان دهنده این است که به دلیل عدم کنترل، بازبینی و مرمت قسمت‌های تخریب شده سیستم، پس از گذشت حدود ۳۰ سال از اجرای شبکه، بهره‌وری شبکه رو به کاهش می‌باشد [۱۷].

ملک‌پور و همکاران [۱۸]، به بررسی اثر سطح آب زیرزمینی و ضخامت لایه‌آبدار بر میزان نشت معکوس به کانال با استفاده از

نتایج آزمایش رضایت بخش به سختی حاصل می‌شود. در مقایسه با روش دبی ورودی-خروجی، نتایج اندازه‌گیری آزمون حوضچه دقیق‌تر است. آزمون حوضچه می‌تواند در طول دوره انسداد جریان آب کانال، بلافاصله پس از قطع جریان نرمال در حالی که کناره‌های کانال تقریباً هنوز اشباع هستند، اجرا شود. اشکال اصلی روش حوضچه‌ای این است که بار کاری سنگین است و تعداد زیادی کارگر مورد نیاز است. بنابراین هزینه نیز بالاست و به ندرت در کانال‌های آبیاری بزرگ و یا کانال‌هایی با انشعاب‌های زیاد و یا پرشیب استفاده می‌شود.

نوری‌محمدیه و همکاران [۴] به ارزیابی روش‌های تجربی اینگهام^۱، دیویس و ویلسون^۲، مولس‌ورث و ینی‌دومیا^۳، میسرا^۴ و روش موریتز^۵ نسبت به روش ذخیره آب در کانال خاکی پرداختند و نتایج نشان دادند که در بین روش‌های تجربی، روش‌های میسرا و موریتز دقت قابل‌قبولی در تخمین نشت در دشت قزوین داشته‌است.

سوامی و کشیپ [۵] با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، میزان نشت از کانال‌ها در حالتی که سطح آب زیرزمینی در عمق بی‌نهایت قرار دارد را به‌دست آوردند و تحقیقات آن‌ها در این زمینه منجر به ارائه دیاگرام‌هایی شد که کاسیمو [۶] با جزئیات بیشتری این دیاگرام‌ها را توضیح داده‌است. سالمی و سپاس‌خواه [۷] معادلات تجربی تخمین نشت آب از کانال‌های خاکی در شبکه آبیاری دشت برخوار استان اصفهان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که مناسب‌ترین معادلات برآورد نشت آب از کانال‌های این شبکه، معادله دیویس - ویلسون و پس از آن مولس‌ورث و ینی‌دومیا می‌باشد. حیدری‌زاده [۸] با مقایسه مقادیر نشت کانال‌های خاکی منطقه رودشت با معادله تجربی اینگهام و معادله تئوری نشت ودرینیکف، به واسنچی ضرایب این دو معادله پرداخت. بهرام‌لو [۹] در مطالعه‌ای موردی در استان همدان اقدام به ارزیابی تلفات نشت در کانال‌های آبیاری با پوشش سنگی در مناطق سردسیر و تاثیر آن بر ذخایر منابع آب پرداخته‌است. هم‌چنین ایشان در تحقیقی دیگر [۱۰] تاثیر پوشش بتنی بر کنترل تلفات نشت آب از کانال‌های آبیاری استان مذکور را مورد بررسی قرار داده‌است. در این تحقیق تاثیر پوشش بتنی در

- 1 Ingham
- 2 Davis Wilson
- 3 Moleswerth & Yennidumia
- 4 Misra
- 5 Moritz

کاهش زیرفشار و جلوگیری از تخریب پوشش بتنی کانال با استفاده از روش عددی SEEP/W پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد افزایش شعاع تاثیر باعث کاهش نیروی زیرفشار شده و افزایش ضخامت لایه آبدار باعث افزایش نیروی زیرفشار می شود. همچنین نشان داده شد که استفاده از سیستم زه کشی در کف کانال و گوشه های تحتانی کانال بیشترین تاثیر را در حفاظت از پوشش کانال دارد. شیرافروس و نیرمانی [۲۵] میزان نشت از چند کانال خاکی با تغییرات در ارتفاع و کناره های کانال و شیب جانبی داخلی ۰/۵ و ۱ را با استفاده از نرم افزار MSEEP مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. پس از استخراج نشت نهایی از مقاطع عرضی کانال ها مشاهده گردید که در شرایط یکسان با دبی های برابر با افزایش ارتفاع و کناره های کانال، تلفات نشت کم تر می شود.

اقوامی و همکاران [۲۶] به بررسی مدل های SEEP/W و EPR برای تخمین میزان نشت از کانال های دشت قزوین و اصفهان با مقاطع و عمق های مختلف آب پرداختند که هر دو مدل عملکردهای رضایت بخشی را نشان دادند. شمسانی و محمودی [۲۷] برای تطبیق روش تجربی موریتز با روش تئوری نشت آب از کانال با مدل SEEP3D مقدار ضریب C را برای ۱۹۲ حالت در قالب شش جدول برای سه میزان ارتفاع آب درون آن ارائه دادند. ملاحظه شد که روش تجربی موریتز به بسیاری از پارامترهای موثر در نشت حساسیت لازم ندارد. به نظر می رسد چنانچه مستقیماً روش تئوری با واسنجی ضریب نفوذپذیری K مورد استفاده قرار گیرد، این روش می تواند دقت بیشتری نسبت به روش های تجربی ارائه کند.

مطالعات زیادی نیز با نرم افزار SEEP/W، در مورد نشت آب از درون سدهای خاکی، نشت آب از زیر پی سدهای بتنی وزنی و نیروی بالابرنده ناشی از آن انجام گردیده است. به عنوان مثال می توان به مطالعات منصور و همکاران [۲۸]، احمد و همکاران [۲۹]، اکوزو [۳۰] و جین و ردی [۳۱] اشاره نمود. به دلیل این که هدف تحقیق حاضر شبیه سازی عددی نشت از کانال های خاکی است، لذا به جزئیات تحقیقات فوق الذکر اشاره ای نمی گردد.

در طول سالیان گذشته محققین مختلف، روابط تجربی را جهت محاسبه دبی نشتی از کانال های انتقال آب ارائه نموده اند که در زیر به چهار نمونه معروف آن ها اشاره می گردد:

دیویس و ویلسون، فرمول تجربی زیر را برای محاسبه دبی نشتی

نرم افزار SEEP/W پرداختند. سوامی و همکاران [۱۹] با استفاده از روابط بیان شده توسط هار^۱ (۱۹۶۲) و مورل - استوکس^۲ (۱۹۶۴)، موفق به یافتن رابطه ای صریح برای محاسبه نشت از کانال ها شدند که از آن در بهینه سازی غیرخطی مقطع کانال برای کمینه کردن تلفات نشت از کانال استفاده کرده اند. ایشان طراحی اقتصادی کانال را بررسی کرده و تلفات نفوذ و تبخیر در قالب هزینه را تحلیل کردند. سپس بر اساس رابطه ای غیر از رابطه مانینگ اقدام به بهینه سازی طراحی کانال نمودند [۲۰].

پایدار [۲۱] تلفات نشت از کانال های آبیاری را به وسیله یک مدل ریاضی بررسی کرد. مدل ریاضی تهیه شده پدیده نشت را به صورت یک جریان دو بعدی اشباع و ماندگار^۳ در محیط متخلخل اطراف کانال فرض کرده و معادله جریان را با روش عددی تفاضل های محدود حل نموده است. نتایج به دست آمده از مدل ریاضی برای دو کانال با نتایج اندازه گیری نشت به روش حوضچه ای مقایسه گردید. مقدار نشت اندازه گیری شده برای دو کانال ۱/۱۷ و ۰/۴ و نتیجه مدل ۱/۲۱ و ۰/۴۹ مترمکعب بر متر در روز به دست آمد. ایشان چنین نتیجه گرفت که مدل ریاضی تهیه شده با تقریب نسبتاً خوبی، میزان نشت از کانال را پیش بینی می کند.

حیدری زاده و سالمی [۲۲]، بررسی کاربردی معادله تجربی اینگهام و معادله ی تئوری ودرنیکو در برآورد نشت آب از کانال های منطقه رودشت اصفهان را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که رابطه تئوری ودرنیکو بر رابطه تجربی اینگهام برتری دارد و دقت میزان نشت بیشتر است. واپیان و روشتن [۲۳] با بررسی تاثیر هدایت هیدرولیکی بر نشت، حالتی که در آن خاکی با هدایت هیدرولیکی پایین تر K_e ، در زیر خاکی با هدایت هیدرولیکی K قرار بگیرد و همچنین میزان نشت در حالت پوشش های مختلف را بررسی نمود و به این نتیجه رسیدند که اگر کف کانال افته باشد و دیواره ها بدون پوشش، نشت ۴ درصد نسبت به حالت بدون پوشش کاهش می یابد و اگر دیواره ها پوشش یافته و کف بدون پوشش باشد، نشت ۲ درصد نسبت به حالت بدون پوشش کاهش می یابد.

قبادیان و همکاران [۲۴] به تعیین محل بهینه لوله بارباکان جهت

1 Harr

2 Morl - Sytoks

3 Steady saturated

4 Finite difference

از کانال پیشنهاد نمودند [۳۲]:

$$q = 0.45C \frac{P_w L}{4 \times 10^6 + 3650\sqrt{V}} H_w^{1/3} \quad (1)$$

در معادله ۱ مقدار C ضریبی است که بسته به نوع پوشش کانال از یک تا ۷۰ تغییر می‌کند و برای کانال‌های بتنی برابر با عدد یک می‌باشد. پارامتر P_w (متر) محیط خیس شده، L طول کانال (متر)، V سرعت متوسط در کانال (متر بر ثانیه)، H_w عمق آب در کانال (متر) و q نشت از کانال (متر مکعب بر ثانیه در طول کانال) می‌باشند. موریتز بر اساس مطالعات اداره احیای اراضی آمریکا، برای تخمین تلفات نشت رابطه ۲ را پیشنهاد کرد [۳۲]:

$$q = 0.0186C(Q/V)^{0.5} \quad (2)$$

که مقدار C ضریب ثابت و برای جداره رس و رس لومی ۰/۴۱ و لوم شنی ۰/۶۶ می‌باشد. q میزان نشت از کانالی به طول یک کیلومتر (مترمکعب بر ثانیه)، V سرعت جریان آب در کانال (متر بر ثانیه) و Q مقدار دبی آب (مترمکعب بر ثانیه) در کانال می‌باشند. رابطه ۳، رابطه مولس‌ورث ینی دومیا می‌باشد که توسط اداره آبیاری مصر برای تخمین نشت در کانال‌ها به کار برده شده است [۳۲].

$$q = 86.4C\sqrt{R} \quad (3)$$

در رابطه ۳، q میزان نشت آب (مترمکعب بر مترمربع در روز)، R شعاع هیدرولیکی (متر) و C ضریب ثابت که برای خاک‌های رسی ۰/۰۱۵ و برای خاک‌های شنی ۰/۰۰۳ است. رابطه ۴ مربوط به اینگهام می‌باشد که به شرح زیر است [۳۲]:

$$q = 0.55CPL(10^{-6})H^{0.5} \quad (4)$$

در رابطه ۴، q میزان نشت در طول کانال (مترمکعب بر ثانیه)، P محیط خیس شده (متر)، L طول کانال (متر)، H عمق آب در کانال (متر) و C ضریبی است که بسته به نوع خاک بین ۱/۵ تا ۵/۵ متغیر است.

با توجه به گزارشات حاصل از تحقیقات گذشته راجع به عدم دقت کافی روابط تجربی موجود به دلیل وسیع بودن دامنه ضرایب ثابت در این معادلات و این که انتخاب یک مقدار صحیح اصولاً بسیار مشکل است و باید ضرایب معادلات برای شرایط محلی واسنجی گردد، در این تحقیق شبیه‌سازی عددی نشت از کانال‌های خاکی با استفاده نرم‌افزار SEEP/W انجام می‌شود تا از متغیر هدایت هیدرولیکی

خاک بدون نیاز به ضریب ثابت C روابط تجربی، در محاسبات تلفات آب از کانال‌های خاکی استفاده کند. زیرا مدل SEEP/W بدون نیاز به واسنجی محلی توانایی خوبی در برآورد میزان نشت منطقه داشته‌است. صحت‌سنجی مدل عددی توسط اطلاعات موجود از برخی کانال‌های خاکی شبکه آبیاری زاینده‌رود انجام می‌گردد. هم‌چنین تاثیر فاصله مرزهای چپ و راست از مرکز کانال بر مقدار نشت مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در نتیجه فاصله‌ای برای مرزهای چپ و راست از مرکز کانال که در آن‌ها تبادل آبی به صفر کاهش می‌یابد، توصیه شده‌است. برای بررسی نشت از کانال‌ها سه مقطع دوزنقه ای، مستطیلی و مثلثی مورد بررسی قرار گرفته و ۲۴۶ مدل عددی ساخته شد. در ادامه، روابط رگرسیونی از عوامل بی‌بعد جهت کاربردی‌تر نمودن یافته‌های مدل عددی ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آنالیز ابعادی

عوامل گوناگونی میزان نشت از کانال‌های خاکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این عوامل شامل هندسه مقطع کانال و نیز شرایط هیدرولیکی کانال می‌باشند. طبق رابطه ۵ دبی نشت در واحد طول کانال (q_s)، به صورت تابعی از محیط خیس شده (P)، عمق آب در کانال (y)، عرض سطح آب کانال (W)، عرض کف کانال (b)، شعاع هیدرولیکی (R)، سطح مقطع جریان (A)، شیب جانبی (z) و هدایت هیدرولیکی خاک (K) فرض می‌شود. در این تحقیق فرض بر این است که عمق آب زیرزمینی در عمق زیادی از کف کانال قرار داشته و لذا بر مقدار نشت بی‌تاثیر است.

$$f(q_s, P, y, W, b, R, A, z, K) = 0 \quad (5)$$

با استفاده از تئوری باکینگهام، معادله بدون بعد به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد.

$$\frac{q_s}{Ky} = f\left(\frac{P}{y}, \frac{W}{y}, \frac{b}{y}, \frac{R}{y}, \frac{A}{y^2}, z\right) \quad (6)$$

با توجه به این که شعاع هیدرولیکی خود برابر حاصل تقسیم سطح مقطع جریان بر محیط خیس شده‌است، لذا می‌توان عامل بی‌بعد $\frac{A}{y^2}$ را حذف نموده ولی $\frac{P}{y}$ نگه داشته می‌شود. از طرف دیگر چون در محاسبه عرض سطح آب به صورت $W = b + 2zy$ ، $W = b$ به ترتیب برای کانال دوزنقه ای، مثلثی و مستطیلی، از عوامل b, z, y استفاده گردیده و این عوامل در محیط خیس شده نیز حضور

جدول ۱. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی
Table 1. Geometric and hydraulic parameters studied.

پارامتر های مورد بررسی	مقادیر پارامترهای مورد بررسی در مدل عددی
هدایت هیدرولیکی بر حسب متر بر ثانیه	۰/۰۰۰۰۰۲
عرض سطح آب کانال (W) بر حسب متر	۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸
عرض کف کانال (b) بر حسب متر	۰، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷، ۸، ۷/۵
عمق آب در کانال (y) بر حسب متر	از ۰/۲ تا ۴
شیب جانبی کانال (z)	۰، ۱/۵، ۲، ۲/۵

ساختار به قطعات کوچک بوده که توصیف‌گر رفتار و یا عملکرد این المان‌ها است و سپس متصل سازی این المان‌ها برای مدل سازی کل ساختار می‌باشد. این روند تحت عنوان شبکه‌بندی نامیده می‌شود. شبکه‌بندی یکی از سه جنبه اصلی و اساسی مدل سازی المان محدود می‌باشد و دو جنبه دیگر خصوصیات مواد و تعریف شرایط مرزی می‌باشد. دبی نشت از قانون دارسی پیروی می‌کند:

$$q = -KA \frac{\partial h}{\partial x} \quad (8)$$

که در آن q دبی نشت (مترمکعب بر ثانیه)، K ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)، A سطح مقطع جریان آب و خاک (مترمربع) و $\frac{\partial h}{\partial x}$ شیب هیدرولیکی جریان است.

معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل معادله پواسون است که شکل تعمیم یافته معادله معروف لاپلاس است:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = q \quad (9)$$

که در آن K_x و K_y به ترتیب هدایت هیدرولیکی خاک در دو جهت افقی و قائم (متر بر ثانیه)، h پتانسیل آب در خاک (متر) و q دبی جریان ورودی یا خروجی به توده خاک (مترمکعب بر ثانیه در واحد سطح) است. اگر دبی ورودی به توده خاک وجود داشته باشد علامت q مثبت و برعکس اگر دبی خروجی وجود داشته باشد، علامت q منفی خواهد بود. رابطه ۹ برای جریان در شرایط دائمی صادق است و برای شرایط غیردائمی (وابسته به زمان) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (10)$$

که در آن $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ ، تغییرات حجمی رطوبت نسبت به زمان است.

دارند، لذا عامل $\frac{W}{y}$ نیز از معادله نهایی حذف می‌گردد. بنابراین خواهیم داشت:

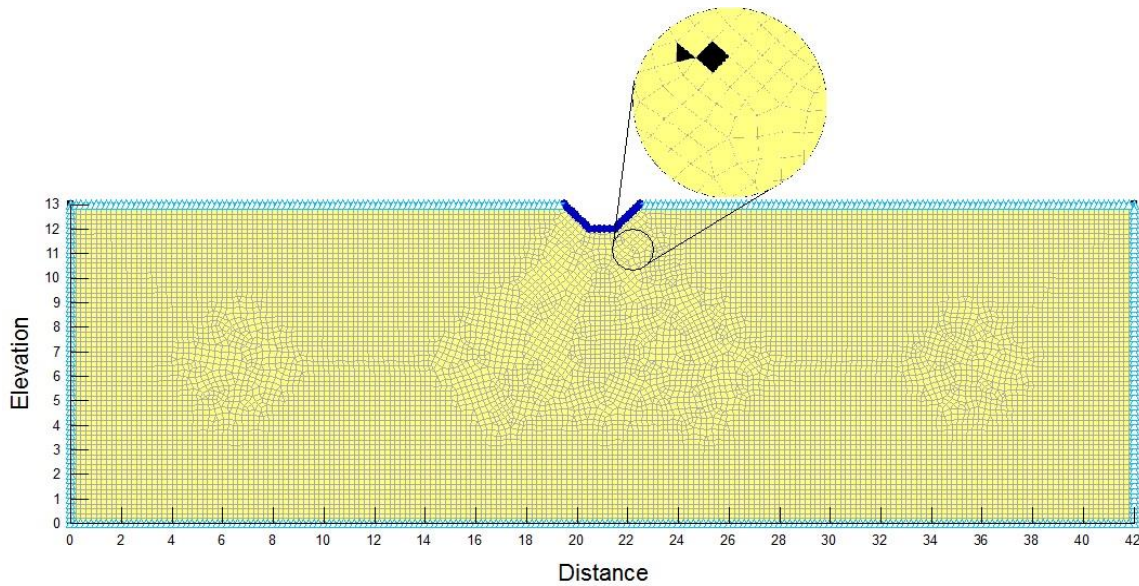
$$\frac{q_s}{Ky} = f\left(\frac{P}{y}, \frac{b}{y}, \frac{R}{y}, z\right) \quad (7)$$

در این مطالعه ۲۴۶ مدل شامل مقاطع مختلف کانال آبیاری دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی در نرم‌افزار SEEP/W اجرا شده‌است. همانطوری که قبلاً اشاره شد برای در نظر گرفتن جنس یا بافت خاک بر میزان نشت، از متغیر هدایت هیدرولیکی خاک در مدل سازی ها استفاده گردید. جدول ۱ عوامل متغیر مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که در نرم‌افزار SEEP/W برای شبیه سازی حرکت آب در خاک و در محیط غیراشباع، نیاز به دانستن منحنی رطوبتی خاک یعنی رابطه بین مکش و رطوبت خاک (یا مکش و هدایت هیدرولیکی خاک) می‌باشد. برای شبیه سازی در محیط اشباع، فقط به هدایت هیدرولیکی خاک اشباع نیاز می‌باشد. واضح است که مدل سازی در حالت اشباع ساده تر از حالت غیر اشباع بوده و به داده های کمتری نیازمند است. از طرفی می‌توان فرض کرد که پس از برقراری جریان آب درون کانال خاکی، بعد از مدتی خاک زیر کانال به حالت اشباع رسیده و نشت از بدنه و کف کانال صورت می‌پذیرد. با توجه به توضیحات فوق، در این تحقیق حالت اشباع خاک مدل سازی شده و از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک استفاده شده‌است.

۲-۲- معرفی نرم‌افزار SEEP/W

نرم‌افزاری SEEP/W بر اساس روش المان های محدود می‌باشد. روش‌های عددی المان محدود مبتنی بر مفهوم تقسیم کردن یک



شکل ۱. المان‌های استفاده شده در مدل‌های این پژوهش از نوع ۴ گره‌ای یا ۳ گره‌ای
Fig. 1. Elements used in the models of this study, 4-nodes or 3-nodes type.

طریقه اعمال شرایط مرزی در یک کانال در این پژوهش در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌است. کف کانال و دیواره‌های کانال دارای شرایط مرزی پتانسیل معلوم ($H=13\text{ m}$) می‌باشد. شرایط مرزی دیواره‌های مدل و کف مدل با فرض غیرقابل نفوذ بودن از نوع Total Flux و مقدار آن برابر صفر منظور گردید.

بردارهای سرعت نشان‌دهنده مقدار و جهت سرعت حرکت آب و خطوط جریان نشان‌دهنده مسیر حرکت آب در داخل محیط متخلخل از یک نقطه به نقطه دیگر می‌باشد. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب خطوط جریان و بردارهای سرعت در یک مدل عددی از کانال خاکی ذوزنقه‌ای را نشان می‌دهند. همچنین شکل‌های ۶ و ۷ خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان و مقدار نشت حاصل از آنالیز مدل توسط نرم‌افزار در مدل کانال‌های خاکی مستطیلی و مثلثی را نشان می‌دهند.

۲-۴- معیارهای ارزیابی

مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ به کمک شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مقایسه بین روش‌های عددی و تجربی برآورد میزان نشت صورت گرفت.

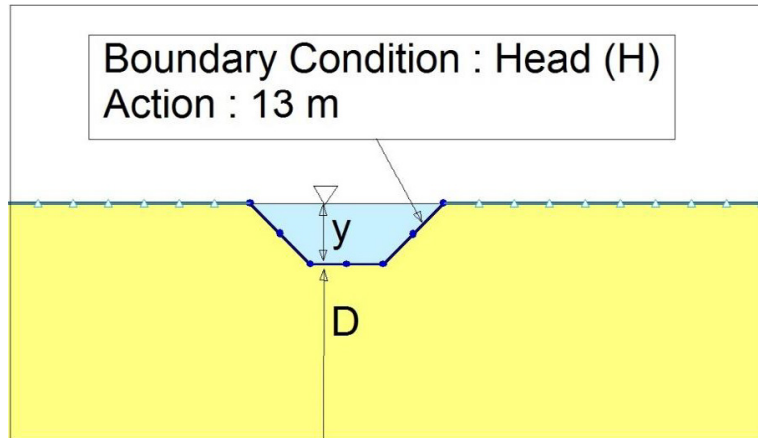
$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

حل معادله پواسون یکی از مسایل پیچیده ریاضی است. از جمله نرم‌افزارهایی که برای حل معادله پواسون با استفاده از روش اجزا محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد، نرم‌افزار SEEP/W است. در این پژوهش از بین المان‌های موجود در نرم‌افزار SEEP/W از نوع Quads & Triangles استفاده شده‌است (شکل ۱). در کانال‌های خاکی شبیه‌سازی شده، با توجه به این که ابعاد کانال‌ها متفاوت انتخاب گردیده، لذا تعداد کل شبکه‌ها نیز از ۱۹۴۵۰ شبکه تا ۵۱۶۷۴ تغییر داشته، ولی در حالت کلی اندازه متوسط شبکه‌ها ۰/۲ متر انتخاب شده‌است.

۲-۳- شرایط مرزی

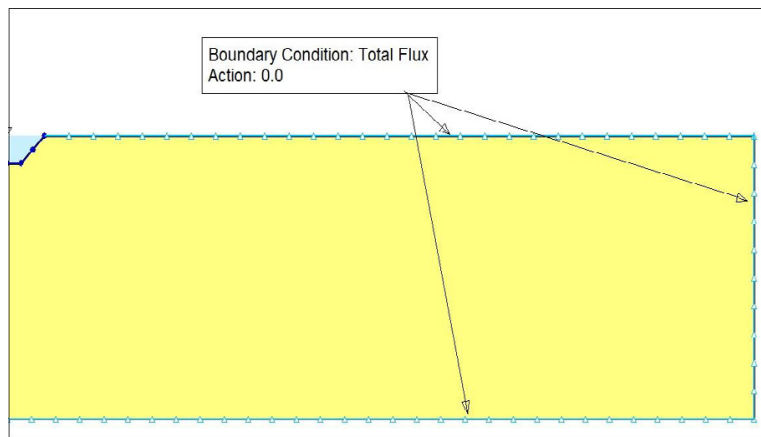
پس از تعریف شبکه‌بندی و مصالح بستر نفوذپذیر، شرایط مرزی در مدل تعریف شد. شرایط مرزی، شرایطی است که بر مرزهای ناحیه مورد مطالعه حاکم است. مرزهای هندسی یک سیستم جریان معمولاً دارای شرایط نامشخص هستند که به وسیله خطوط مستقیم، منحنی‌های نمایی، کمان‌های دایره‌ای و یا بیان ریاضی دیگری جایگزین می‌شوند. به طور کلی شرایط مرزی را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم نمود [۳۳]:

- مرز با پتانسیل معلوم
- مرز با جریان ورودی-خروجی معلوم یا با گرادینان هیدرولیکی معلوم



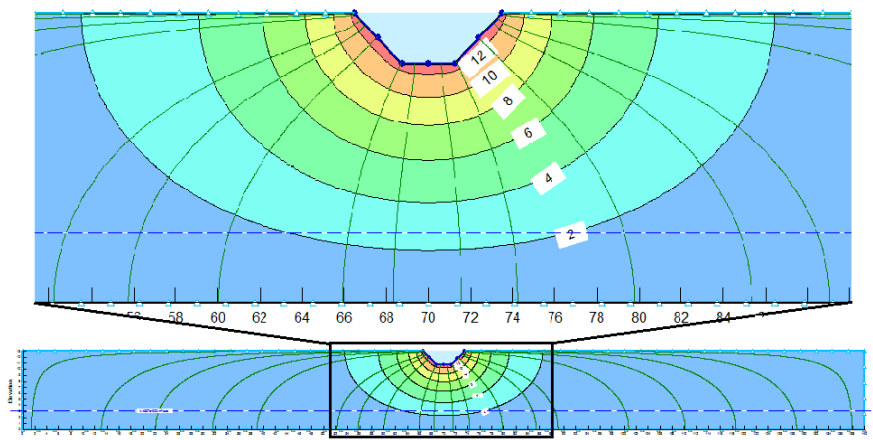
شکل ۲. شرط مرزی بارآبی ۱۳ متر برای مرزهای کف و دیواره‌های جانبی کانال خاکی دوزنقه‌ای

Fig. 2. Boundary condition for 13 m head of water for the bed and side walls of the trapezoidal earthen channel



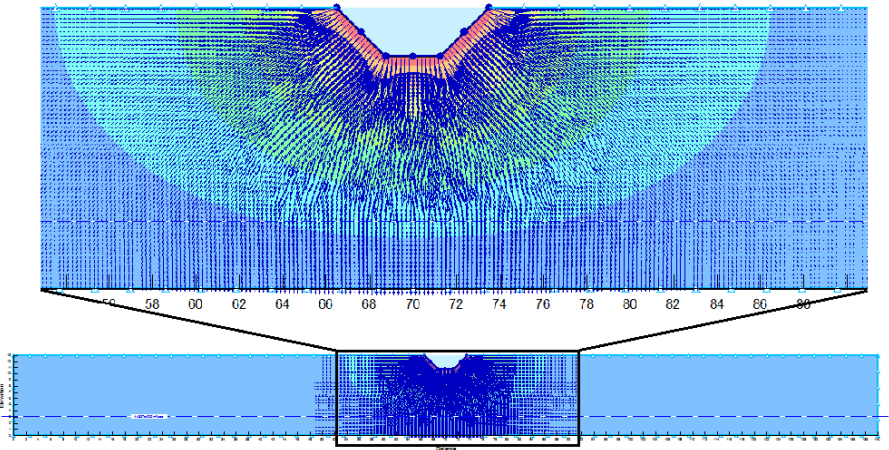
شکل ۳. شرایط مرزی غیرقابل نفوذ برای کف و دیواره مدل کانال خاکی دوزنقه‌ای (نصف کانال در سمت چپ دیده میشود)

Fig. 3. Impemeable boundary conditions for the bed and walls of the trapezoidal earth channel model (half of the channel is seen on the left)

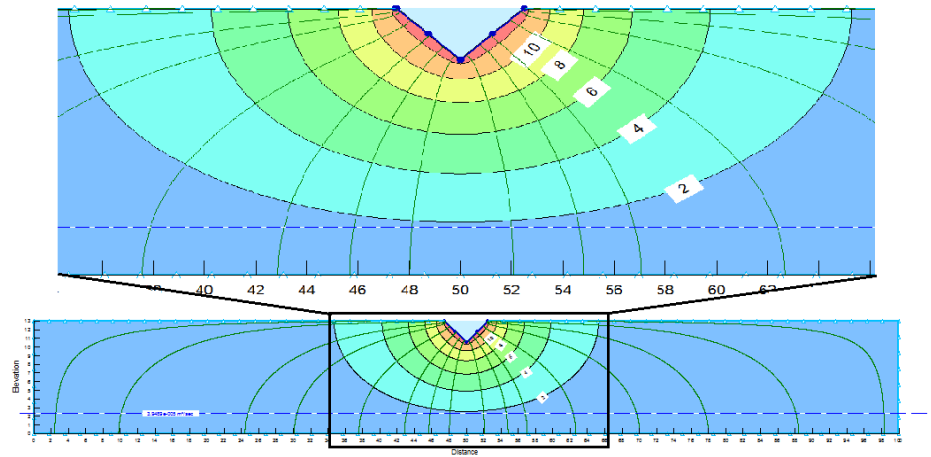


شکل ۴. نمایش خطوط جریان نشت و منحنی‌های هم‌پتانسیل در مدل کانال خاکی دوزنقه‌ای

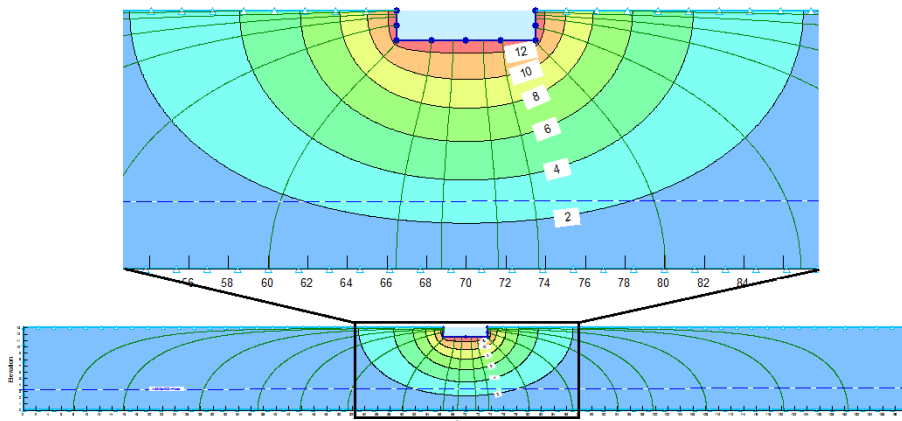
Fig. 4. The flow lines and the potential curves in the trapezoidal earthen channel model.



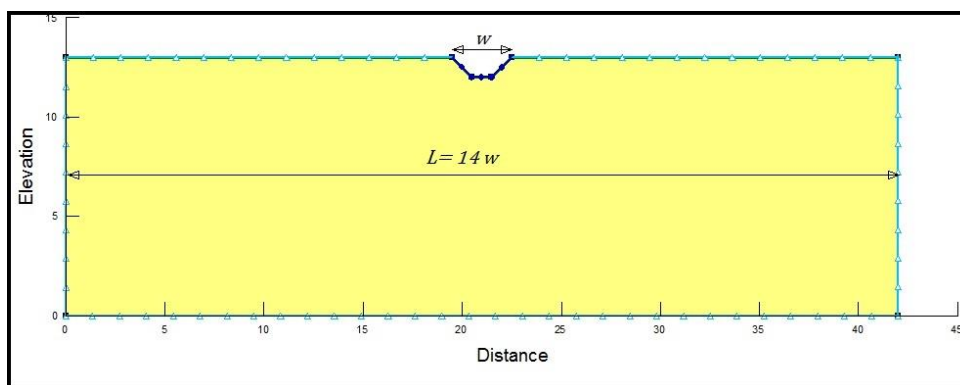
شکل ۵. نمایش بردارهای سرعت و منحنی‌های هم‌پتانسیل در مدل کانال خاکی ذوزنقه‌ای
Fig. 5. The velocity vectors and the potential curves in the trapezoidal earthen channel model.



شکل ۶. نمایش خطوط جریان نشت و منحنی‌های هم‌پتانسیل در مدل کانال خاکی مثلثی
Fig. 6. The flow lines and the potential curves in the triangular earthen channel model.



شکل ۷. نمایش خطوط جریان نشت و منحنی‌های هم‌پتانسیل در مدل کانال خاکی مستطیلی
Fig. 7. The flow lines and the potential curves in the rectangular earthen channel model.



شکل ۸. نمایش کانال ذوزنقه‌ای و فاصله جانبی توصیه شده در محیط SEEP/W

Fig. 8. Trapezoidal channel and recommended lateral distance for determining boundary condition.

$$Error = 100 \times \left(\frac{Q_n - Q_{20}}{Q_{20}} \right) \quad (13)$$

در معادله فوق متغیر Q_n دبی نشت مدل n ام و Q_{20} دبی نشت مدل ۲۰ ام (مدل با بیشترین عرض مرز) می‌باشد.

شکل ۹ تغییرات دبی نشت و خطا نسبت به ضریب $\frac{L}{W}$ در مقطع ذوزنقه‌ای را نشان می‌دهد. طبق محاسبات حالت $\frac{L}{W} = 14$ در مدل ۱۲ با خطای کمتر از ۱ درصد قابل پذیرش می‌باشد و لذا توصیه می‌گردد در مطالعات آبی فاصله مرزهای جانبی از هم دیگر در کانال‌های ذوزنقه‌ای ۱۴ برابر عرض سطح آب کانال در نظر گرفته شود. این مقدار برای کانال‌های مستطیلی ۱۵ برابر عرض سطح آب کانال به دست آمد.

۳-۲ - صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار

برای بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار SEEP/W، از اطلاعات برخی از کانال‌های خاکی شبکه آبیاری زاینده‌رود استفاده گردید (جدول ۲). شیب کانال‌های مورد مطالعه بسیار به هم نزدیک بوده است. برای محاسبه تلفات در طول کانال، از روش اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی استفاده شده است. برای این منظور فاصله مشخصی در طول کانال انتخاب و سپس سرعت جریان در ابتدا و انتهای فاصله فوق با مولینه در مقاطع مختلف اندازه‌گیری شده است و در نهایت با داشتن سطح مقطع جریان ورودی و خروجی، دبی آن‌ها به دست آمده است. متوسط مشخصات هیدرولیکی کانال‌های انتخابی برای خردادماه در جدول ۲ آورده شده است. مقدار هدایت هیدرولیکی ذکر شده در جدول ۲، براساس اطلاعات عمومی کانال‌های خاکی

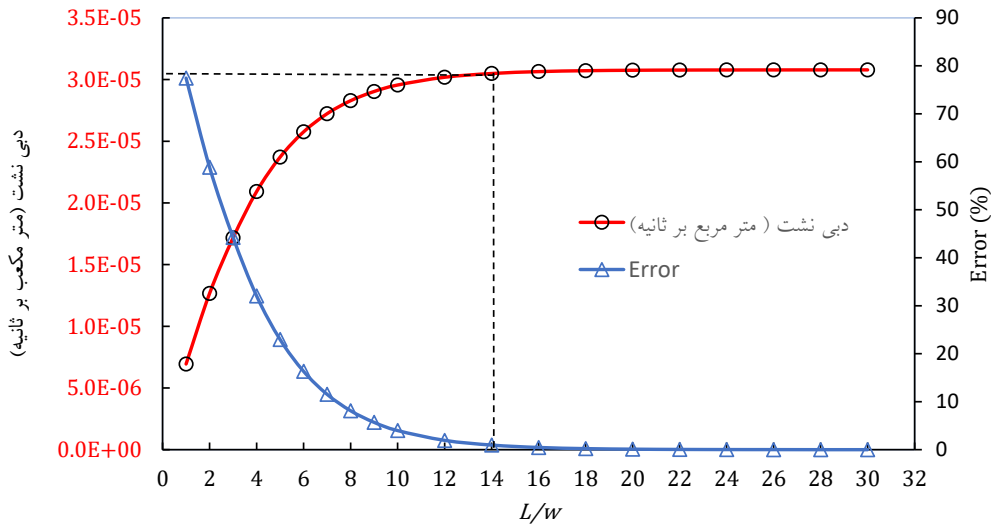
$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right]^{1/2} \quad (12)$$

در معادله‌های فوق متغیرهای P_i و O_i به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، \bar{P} و \bar{O} به ترتیب متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و n تعداد کل داده‌ها است. هر چه مقدار شاخص RMSE کمتر باشد و همچنین هر چه مقدار R^2 بیشتر باشد، دقت روش بالاتر خواهد بود.

۳ - نتایج و بحث

۳-۱ - بررسی اثر فاصله مرزهای جانبی

در مطالعات عددی نشت از کانال‌های آبیاری با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W یک فاصله جانبی از سمت راست و چپ برای بررسی نشت در نظر گرفته می‌شود. این موضوع برای دقیق‌تر شدن اندازه این فاصله در مطالعه‌های آینده و توصیه فاصله‌ای که در آن تبادل آبی به صفر کاهش یابد، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ۲۰ مدل کانال ذوزنقه‌ای و ۲۴ مدل کانال مستطیلی در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۸ کانال ذوزنقه‌ای با مشخصات هیدرولیکی عرض سطح آب ۳ متر، عرض کف کانال ۱ متر، عمق آب کانال ۱ متر و مساحت سطح مقطع ۲ متر مربع و شیب دیواره کانال ۱:۱ در نظر گرفته شده است. شیوه مطالعه بدین‌گونه است که فاصله مرز جانبی از وسط کانال به صورت ضریبی از عرض سطح آب کانال ($C \times W$) در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه خطا و پیدا کردن فاصله مناسب مرز جانبی برای حالتی که میزان خطا حداقل باشد رابطه ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۹. تغییرات دبی نشت و خطا نسبت به ضریب L/W در مقطع دوزنقه‌ای

Fig. 9. The seepage and error changes relative to the L/W in the trapezoidal section.

جدول ۲. اطلاعات آماری مربوط به کانال‌های موجود در شبکه آبیاری استان اصفهان [۱۵]

Table 2. The statistical information of the channels in the irrigation network of Isfahan province, Iran.

هدایت هیدرولیکی (cm/h)	خرداد ماه					
	تبخیر (m ³ /m ² /day)	نشت و تلفات (m ³ /m ² /day)	محیط تر شده P (m)	عرض سطح آب T (m)	سطح مقطع A (m ²)	شماره کانال
۰/۵۴	۰/۰۱۳	۰/۳۶۴	۱/۰۷۸	۰/۹۸	۰/۱۲۱	۱
۰/۵۴	۰/۰۱۳	۰/۳۵۴	۳/۰۵	۲/۹	۰/۷۰۷	۴
۰/۵۴	۰/۰۱۲	۰/۴۳۹	۲/۸۵۳	۲/۷	۰/۸۰۷	۶
۰/۹۵	۰/۰۱۲۹	۰/۵۹۲	۲/۹۱۵	۲/۶۶	۰/۸۸۸	۱۰
۰/۷۳	۰/۰۱۲۵	۰/۶۳۶	۲/۵۲۴	۲/۱	۰/۸۵۰	۱۱
۰/۶۷	۰/۰۱۰۸	۱/۰۴۲	۱/۲۴۴	۱/۱۷۵	۰/۱۶۶	۱۳
۱/۱۴	۰/۰۱۰۸	۱/۱۰۲	۱/۷۱	۱/۵۵	۰/۲۹۳	۱۶

در جدول ۴ پارامترهای آماری حاصل از روش‌های مختلف برآورد میزان نشت از کانال‌های خاکی شبکه آبیاری زاینده‌رود ارائه شده‌است. ملاحظه می‌شود که روش‌های تجربی دیویس و ویلسون، مولس ورث ینی دومیا، موریتز و اینگهام، دقت مناسبی در تخمین دبی نشتی نداشته ضمن این‌که روش موریتز عملکرد بهتری نسبت به بقیه روش‌ها داشته‌است. مقایسه بین مدل عددی SEEP/W و داده‌های اندازه‌گیری نشت در کانال‌های شبکه آبیاری زاینده‌رود، حاکی از دقت بسیار مناسب مدل عددی SEEP/W می‌باشد (سطر

مورد مطالعه از جمله، درصد شن، رس، سیلت و بافت خاک به دست آمده‌است. همچنین مقدار ضریب ثابت C استفاده شده در معادلات تجربی در جدول ۳ آورده شده‌است [۱۵]. همچنین در این مطالعه فقط کانال‌های خاکی مورد بررسی قرار گرفته‌است و هدایت هیدرولیکی پوشش کانال با هدایت هیدرولیکی خاک بستر یکی و برابر $0/000002$ متر بر ثانیه فرض شده‌است که این مقدار حدوداً برابر میانگین هدایت‌های هیدرولیکی ذکر شده در جدول ۲ (برابر $0/72$ سانتی‌متر بر ساعت) می‌باشد.

جدول ۳. مقدار ضریب ثابت C در معادلات تجربی [۱۵]

Table 3. The value of the constant coefficient C in the experimental equations.

معادله تجربی				شماره کانال
اینگهام	موریتز	مولس ورث ینی دومیا	دیویس و ویلسون	
۴/۶	۰/۴۵	۰/۰۰۱۸۴	۱۵	۱
۴/۶	۰/۴۵	۰/۰۰۱۸۴	۱۵	۴
۴/۶	۰/۴۵	۰/۰۰۱۸۴	۱۵	۶
۳/۳۵	۰/۵۱	۰/۰۰۲۵	۲۵	۱۰
۴/۳	۰/۴۷۲	۰/۰۰۲۲	۱۷/۵	۱۱
۴/۳	۰/۴۷۲	۰/۰۰۲۲	۱۷/۵	۱۳
۳/۳۵	۰/۶	۰/۰۰۲۸	۲۵	۱۶

جدول ۴. پارامترهای آماری حاصل از روش های مختلف برآورد میزان نشت از کانال های خاکی [۱۵]

Table 4. The statistical parameters obtained from different methods of estimating seepage from the earthen channels.

R ²	RMSE	روش
۰/۰۹۳	۴۸/۷۹۳	دیویس و ویلسون
۰/۰۶۷	۴۹/۶۳۱	مولس ورث ینی دومیا
۰/۳۷۳	۱۲/۳۵۶	موریتز
۰/۱۸۳	۲۳/۴۲۱	اینگهام
۰/۸۷۹	۶/۶۰۴	مدل SEEP/W

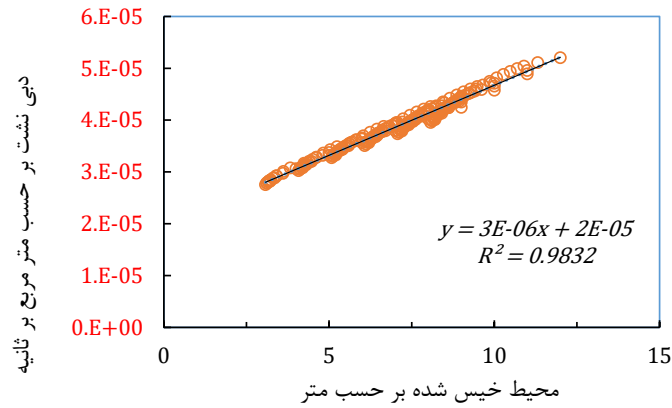
مشخصات هیدرولیکی مختلف ارائه شده است. مطابق این شکل، رابطه خطی با ضریب تبیین ۰/۹۸ بین محیط خیس شده کانال (بر حسب متر) با دبی نشت از کف و جداره (بر حسب متر مکعب بر ثانیه در واحد طول کانال) وجود دارد.

تحلیل همبستگی بین متغیرهای موجود و دبی نشت، اطلاعات مناسبی در مورد نحوه ارتباط داده ها را بازگو می کند. جدول ۵ نتایج حاصل از تحلیل همبستگی داده های مورد استفاده در این پژوهش، در نرم افزار SPSS را نشان می دهد. مطابق جدول، هر پارامتر با خودش رابطه کامل دارد و درایه های قطر اصلی ماتریس یک می باشد. همانطور که ملاحظه می شود، پارامتر Z کمترین میزان همبستگی را با دبی نشت دارد که این موضوع در نمودار شکل ۱۱ قابل مشاهده است. همچنین مطابق شکل رابطه خطی ضعیفی با ضریب تبیین ۰,۰۸ ما بین شیب جانبی و رابطه بی بعد دبی نشت وجود دارد. علامت

آخر جدول ۴). لازم به ذکر است که برای به دست آوردن اعداد ستون دوم و سوم (جدول ۴) از مشخصات بافت خاک کانال های شبکه آبیاری زاینده رود استفاده گردیده است. بدین ترتیب که با استفاده از جداول ارائه شده برای روابط تجربی، دبی نشتی به دست آمده است. در این جا برای اختصار، از آوردن جداول مربوط به هر رابطه تجربی اجتناب گردیده است.

۳-۳- بررسی اثر محیط خیس شده بر دبی نشت از کانال ها با مقاطع مختلف

با توجه به این که نشت آب از محیط خیس شده کانال به وقوع می پیوندد، لذا به نظر می رسد که باید رابطه ای بین دبی نشت و محیط خیس شده برقرار باشد. در شکل ۱۰ نتایج حاصل از شبیه سازی عددی تعداد ۲۴۶ کانال با مقاطع مختلف دوزنقه ای، مثلثی و مستطیلی و با



شکل ۱۰. تاثیر محیط خیس شده بر دبی نشت در مقاطع مختلف دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی

Fig. 10. The effect of the wetted perimeter on the seepage discharge in different trapezoidal, rectangular and triangular sections.

جدول ۵. ماتریس همبستگی بین پارامترهای بدون بعد مورد استفاده برای مقاطع مختلف

Table 5. The correlation matrix between the dimensionless parameters used for the different cross sections.

	q/ky	p/y	w/y	A/y ²	b/y	R/y	z
q _s /ky	۱						
p/y	۰/۹۵۸**	۱					
w/y	۰/۹۵۹**	۰/۹۹۸**	۱				
A/y ²	۰/۹۵۴**	۰/۹۹۸**	۰/۹۹۴**	۱			
b/y	۰/۹۳۶**	۰/۹۸۶**	۰/۹۷۴**	۰/۹۹۳**	۱		
R/y	۰/۸۱۳**	۰/۸۱۵**	۰/۸۰۵**	۰/۸۲۱**	۰/۸۲۶**	۱	
z	۰/۲۹۸**	۰/۲۶۰**	۰/۳۱۸**	۰/۲۱۱**	۰/۰۹۶	۰/۰۸۳	۱

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

رابطه ۱۴، معادله رگرسیون چند متغیره خطی برای دبی نشت بی‌بعد شده با ضریب تبیین ۰/۹۲۵، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۴/۹۷۸ برای مقاطع مختلف دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی کانال‌های آبیاری به‌دست آمد.

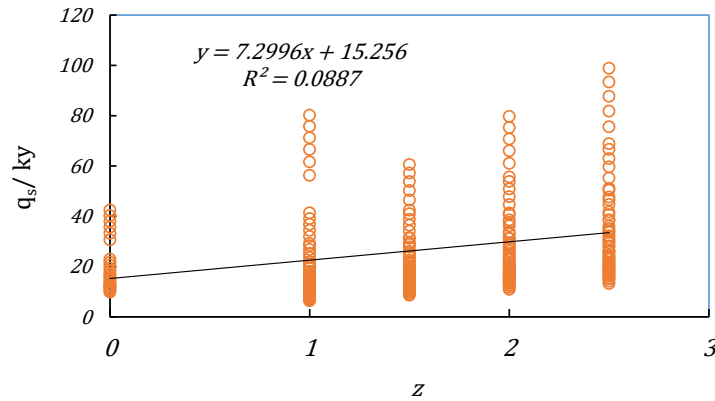
$$\frac{q_s}{Ky} = 3.5 \frac{P}{y} + 14.741 \frac{R}{y} - 1.127 \frac{b}{y} - 9.36 \quad (14)$$

در جدول ۶ ضرایب متغیرهای معادله رگرسیون رابطه ۱۴ به‌دست آمده از نرم‌افزار SPSS ارائه شده‌است. این جدول معیاری برای آنالیز حساسیت عوامل بی‌بعد می‌باشد.

خطای استاندارد (Std. Error) برای برآورد میزان نزدیکی میانگین نمونه به میانگین جمعیت استفاده می‌شود. به بیان دیگر خطای استاندارد (SE)، انحراف معیار یک توزیع نمونه‌برداری آماری است که برای تخمین انحراف معیار به‌دست آمده

(**) در جدول ۵ نشان‌دهنده این است که همبستگی معنی‌داری بین پارامترها وجود دارد و ۰/۹۹ درصد داده‌ها (Sig < 0.01) در این همبستگی صدق می‌کنند.

در تحقیق حاضر سطح معنی‌داری (Sig.) ۱٪ در نظر گرفته شده‌است (جدول ۵). مقدار Sig. به P-Value نیز معروف است. عبارت «از نظر آماری معنادار» معیاری است که به ما کمک می‌کند دریابیم آیا همبستگی بین دو عامل واقعاً قابل اعتماد است یا صرفاً به علت تصادف بوده‌است. زمانی یک رابطه از نظر آماری «معنادار» خوانده می‌شود که به احتمال کمتر از ۱٪ رابطه مورد نظر ناشی از تصادف بوده‌باشد. معنی این گفته این است که اگر پژوهش تکرار شود، به احتمال ۹۹٪ به همان نتیجه قبلی خواهد انجامید. وقتی نتیجه یک آزمایش همبستگی ۹۹٪ باشد، گفته می‌شود که نتیجه از نظر آماری شدیداً معنادار است.



شکل ۱۱. رابطه بین شیب جانبی و رابطه بی بعد $\frac{q_s}{ky}$ برای مقاطع ذوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی

Fig. 11. The relationship between the side slope (z) and the dimensionless seepage (q_s/ky) for the trapezium, triangular and rectangular sections.

جدول ۶. ضرایب متغیرهای رابطه ۱۴ به دست آمده از نرم افزار SPSS برای مقاطع مختلف

Table 6. The coefficients for the variables in Equation (14) obtained by SPSS software for the different channel sections.

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
1	(Constant)	-9.360	2.421		-3.866	.000
	p/y	3.500	.294	1.240	11.916	.000
	b/y	-1.127	.312	-.385	-3.610	.000
	R/y	14.741	3.806	.121	3.874	.000

a. Dependent Variable: q/ky

عامل بی بعد نقش اساسی در معادله برازش شده دارند. در مرحله دوم اهمیت، خطای استاندارد عامل R/y قرار دارد که به نسبت دو عامل ذکر شده در بالا اهمیت کمتری در معادله برازش شده دارد و این موضوع با ماتریس هم‌بستگی جدول ۵ مطابقت دارد. هم‌چنین این موضوع (Sig < 0.01) موید این است که ۰/۹۹ درصد از داده‌ها در این برازش صدق می‌کنند.

برای به دست آوردن رابطه رگرسیون چند متغیره غیر خطی (شکل های ۱۲ تا ۱۴) که نمودار پارامترهای بی بعد مختلف با دبی نشت بی بعد می‌باشد، رسم شده است. ملاحظه می‌گردد که رابطه بین $\frac{q_s}{ky}$ با $\frac{p}{y}$ و $\frac{b}{y}$ خطی ولی با $\frac{R}{y}$ به صورت نمایی است.

معادله رگرسیون چند متغیره غیر خطی برای دبی نشت بی بعد شده به صورت رابطه ۱۶، با ضریب تبیین ۰/۹۲۷ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۴/۹۰۸ برای مقاطع مختلف ذوزنقه‌ای،

از تعدادی نمونه کاربرد دارد و از رابطه ۱۵ محاسبه می‌گردد.

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

که در آن SE خطای استاندارد، s انحراف معیار نمونه و n تعداد کل نمونه (در تحقیق حاضر برابر ۲۴۶) می‌باشند.

مقدار t (ستون ماقبل آخر در جدول ۶ اندازه تفاوت را نسبت به تغییرپذیری به دست آمده از نمونه‌ها را می‌سنجد. به عبارت دیگر، t برابر با تفاوت محاسبه شده تقسیم بر خطای استاندارد (SE) است. هر چه مقدار t چه در جهت مثبت و چه در جهت منفی بزرگ‌تر باشد، احتمال بیشتری برای رد فرض صفر به وجود خواهد آمد (فرض صفر یعنی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد).

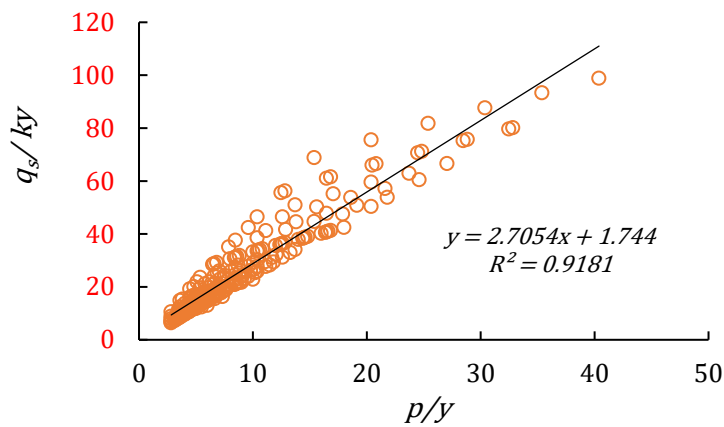
مطابق جدول ۶ ملاحظه می‌شود که خطای استاندارد (Std. Error) عوامل b/y و p/y کمترین مقدار را دارا بوده و لذا این دو

$$\frac{q_s}{Ky} = 7.419 \times \left(\frac{P}{y}\right)^{0.886} \times \left(\frac{R}{y}\right)^{0.95} - 2.318 \times \left(\frac{b}{y}\right) \quad (16)$$

طبق جدول ۷ ملاحظه می‌شود خطای استاندارد (Std. Error) عامل $\frac{P}{y}$ و $\frac{R}{y}$ از همه کمتر است و لذا این دو عامل بی‌بعد نقش اساسی در معادله برازش داده شده دارد.

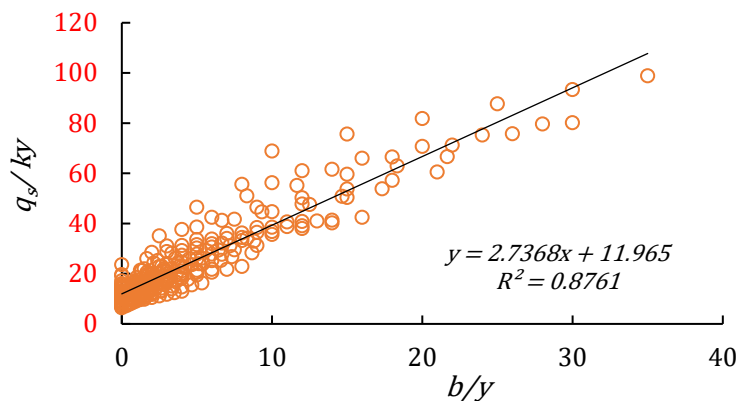
برای واسنجی و صحت‌سنجی روابط ۱۴ و ۱۶، ۷۰ درصد از اطلاعات بدون بعد به‌عنوان داده‌های واسنجی و ۳۰ درصد مابقی به‌عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته‌شد. جدول ۸ نتایج مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی

مستطیلی و مثلثی کانال‌های آبیاری به‌دست آمد. ضمناً دقت رابطه غیرخطی ۱۶ به مقدار جزئی از رابطه خطی ۱۴ بیشتر می‌باشد. لیکن با توجه به سهولت رابطه خطی در انجام محاسبات و یافتن دبی نشی از کانال‌ها، این تحقیق استفاده از رابطه خطی را پیشنهاد می‌نماید. لازم به‌ذکر است که رابطه ۱۶ در محدوده عوامل بی‌بعد $0 \leq z \leq 2.5$ ، $2.83 \leq \frac{P}{y} \leq 40.39$ ، $0 \leq \frac{b}{y} \leq 35$ ، $6.39 \leq \frac{q_s}{Ky} \leq 98.85$ اعتبار دارد. در جدول ۷ ضرایب متغیرهای رابطه ۱۶ به‌دست آمده از نرم‌افزار SPSS برای مقاطع ذوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی ارائه شده‌است.



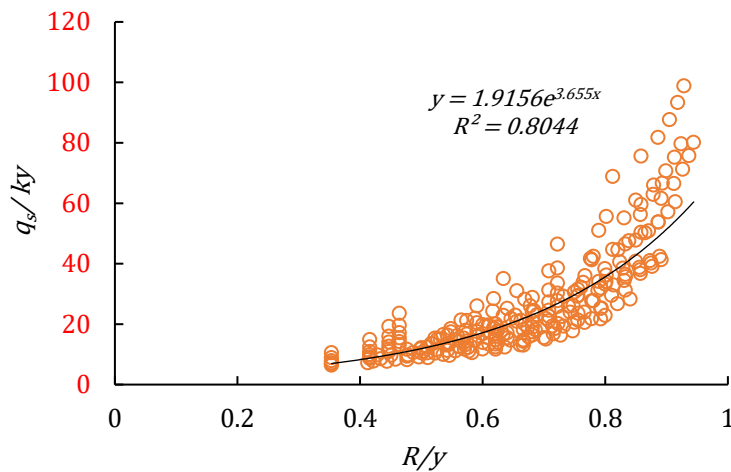
شکل ۱۲. رابطه بین $\frac{P}{y}$ و $\frac{q_s}{Ky}$ در مقاطع مختلف

Fig. 12. The relationship between q_s/Ky and P/y for different channel cross sections.



شکل ۱۳. رابطه بین $\frac{b}{y}$ و $\frac{q_s}{Ky}$ در مقاطع مختلف

Fig. 13. The relationship between q_s/Ky and b/y for different channel cross sections.



شکل ۱۴. رابطه بین $\frac{R}{y}$ و $\frac{q_s}{Ky}$ در مقاطع مختلف

Fig. 14. The relationship between q_s/ky and R/y for different channel cross sections.

جدول ۷. ضرایب متغیرهای رابطه (۱۶) به دست آمده از نرم افزار SPSS برای مقاطع دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی

Table 7. The coefficients for the variables in Equation (16) obtained by SPSS software for the different channel sections.

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
A	7.419	1.131	5.192	9.646
B	.886	.025	.836	.935
C	.950	.180	.596	1.304
D	-2.318	.632	-3.563	-1.073
$\frac{q_s}{Ky} = A \times \left(\frac{P}{y}\right)^B \times \left(\frac{R}{y}\right)^C - D \times \left(\frac{b}{y}\right)$				

نموده‌است. نقاط حول خط $y=x$ و نزدیک آن پراکنده هستند که حاکی از دقت مناسب مدل رگرسیونی است.

رابطه ۱۷ نشان‌دهنده رگرسیون غیرخطی برای بررسی تاثیر m بر روی دبی نشت با ضریب تبیین ۰/۹۲۸ به دست آورده شد.

$$\frac{q_s}{Ky} = -0.024 \times \left(\frac{P}{y}\right)^2 + 3.415 \times \left(\frac{P}{y}\right) + 0.995 \times z - 3.348 \quad (17)$$

شکل ۱۶ نیز رابطه بی‌بعد بین $\frac{P}{y}$ و $\frac{q_s}{Ky}$ به ازای Z های مختلف بر اساس رابطه ۱۷ در مقاطع مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش نسبت $\frac{P}{y}$ به ازای یک شیب بدنه ثابت، دبی نسبی نشت $\frac{q_s}{Ky}$ به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. هم‌چنین ملایم تر شدن شیب جداره، به صورت جزئی باعث افزایش دبی نشت می‌گردد. بدین معنا که مقدار $\frac{q_s}{Ky}$ را نزدیک به مقدار نظیر شبیه‌سازی عددی برآورد

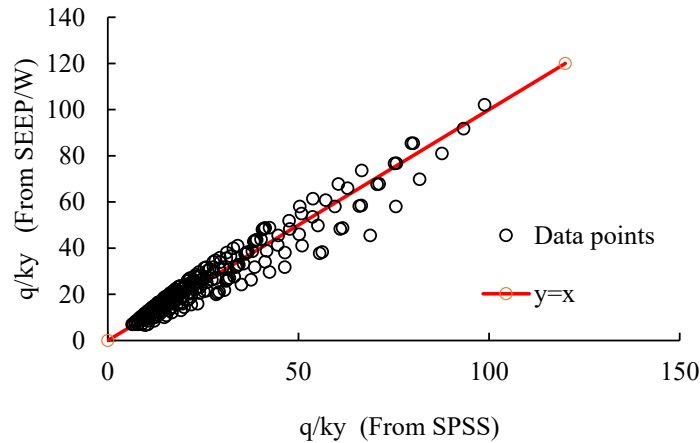
برای دبی نشت بی‌بعد شده را نشان می‌دهد. نتایج این جدول مشخص می‌کند که مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی، هر دو از عملکرد مطلوبی برخوردارند و تفاوت معنی داری بین مراحل واسنجی و صحت‌سنجی وجود ندارد. از بین دو معادله رگرسیون خطی و غیرخطی، با اینکه از نظر عملکرد با هم تفاوت چندانی ندارند ولی با توجه به راحتی کار با معادلات خطی، رابطه رگرسیون چند متغیره خطی ۱۴ به‌عنوان بهترین رابطه انتخاب می‌شود.

در شکل ۱۵ تغییرات $\frac{q_s}{Ky}$ محاسبه شده توسط SEEP/W نسبت به $\frac{q_s}{Ky}$ محاسبه شده توسط رابطه ۱۶ در SPSS ارائه گردیده‌است. ملاحظه می‌شود که رابطه رگرسیونی برازش داده‌شده به نحوی است که مقدار $\frac{q_s}{Ky}$ را نزدیک به مقدار نظیر شبیه‌سازی عددی برآورد

جدول ۸. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل رگرسیون خطی و غیرخطی

Table 8. The calibration and verification results of the linear and nonlinear regression model.

رگرسیون غیرخطی رابطه ۱۶		رگرسیون خطی رابطه ۱۴		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	
۴/۳۲	۰/۹۲۷	۴/۳۷	۰/۹۲۷	واسنجی
۶/۰۶	۰/۹۱۸	۶/۱۶	۰/۹۱۷	صحت‌سنجی



شکل ۱۵. تغییرات $\frac{q_s}{K_y}$ محاسبه شده توسط SEEP/W نسبت به $\frac{q_s}{K_y}$ محاسبه شده توسط رابطه ۱۶ در SPSS

Fig. 15. The comparison of q_s/K_y with two methods: SEEP/W versus Equation (16).

۱ Z می شود.

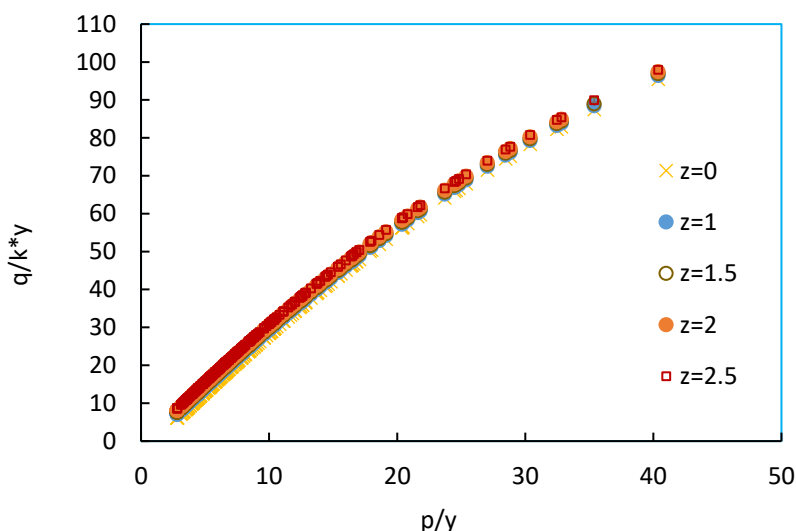
در جدول ۹ رگرسیون غیرخطی بی بعد $\frac{P}{y}$ نسبت به $\frac{q_s}{K_y}$ به ازای شیب‌های جانبی مختلف در مقاطع مختلف بر اساس رابطه ۱۷ ارائه شده است. مطابق این جدول، رابطه چند جمله‌ای درجه دو با دقت بالا از بین نقاط قابل عبوردهی است. لازم به ذکر است که روابط ارائه شده در جدول ۹ برای شیب‌های مختلف جداره کانال‌های دوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی می باشند. با توجه به جدول از نظر ضریب تبیین، کانال مستطیلی هماهنگی بیشتری با رابطه دارد (Z=0)، ولی شیب جانبی ۱/۵ کمترین خطای RMSE را دارد. همچنین با توجه به پارامتر آماری RMSE می توان نتیجه گرفت شیب جانبی متوسط مانند ۱، ۱/۵ و ۲ دقت بیشتری در محاسبات دارند.

$$\frac{q_s}{K_y} = -0.028 \times \left(\frac{b}{y}\right)^2 + 3.341 \times \left(\frac{b}{y}\right) + 5.313 \times z + 2.349 \quad (18)$$

در شکل ۱۷ نیز تغییرات $\frac{q_s}{K_y}$ محاسبه شده توسط SEEP/W نسبت به $\frac{q_s}{K_y}$ محاسبه شده توسط رابطه ۱۷ در SPSS ارائه گردیده است. مانند شکل ۱۵ ملاحظه می شود که رابطه رگرسیونی برازش شده به نحوی است که مقدار $\frac{q_s}{K_y}$ را نزدیک به مقدار نظیر شبیه‌سازی عددی برآورد نموده است. نقاط حول خط $y=x$ و نزدیک آن پراکنده هستند که حاکی از دقت مناسب مدل رگرسیونی است. شکل ۱۸ نیز رابطه بین $\frac{b}{y}$ و $\frac{q_s}{K_y}$ به ازای Z های مختلف در مقاطع دوزنقه‌ای، مثلثی و مستطیلی را بر اساس رابطه ۱۸ نشان می دهد. رابطه ۱۸ یک رابطه رگرسیونی غیرخطی با ضریب تبیین ۰/۹۲۹ می باشد.

مطابق شکل ۱۸ با افزایش نسبت $\frac{b}{y}$ به ازای یک شیب بدنه ثابت، دبی نسبی نشت $\frac{q_s}{K_y}$ به صورت غیرخطی افزایش می یابد. همچنین ملایم تر شدن شیب جداره، باعث افزایش دبی نشت می گردد. بدین معنا که مقدار $\frac{q_s}{K_y}$ به ازای $Z=0$ بیشتر از مقدار نظیر به ازای $Z=0$ می شود. این موضوع قبلاً نیز در شکل ۱۶ اثبات شده بود. همچنین این موضوع مطابق تحقیقات سوبرامانیا می باشد. طبق تحقیقات سوبرامانیا برای مقدار معین $\frac{b}{y}$ در حالتی که کف با پوشش می باشد

مطابق شکل ۱۸ با افزایش نسبت $\frac{b}{y}$ به ازای یک شیب بدنه ثابت، دبی نسبی نشت $\frac{q_s}{K_y}$ به صورت غیرخطی افزایش می یابد. همچنین ملایم تر شدن شیب جداره، باعث افزایش دبی نشت می گردد. بدین معنا که مقدار $\frac{q_s}{K_y}$ به ازای $Z=0$ بیشتر از مقدار نظیر به ازای $Z=0$ می شود. این موضوع قبلاً نیز در شکل ۱۶ اثبات شده بود. همچنین این موضوع مطابق تحقیقات سوبرامانیا می باشد. طبق تحقیقات سوبرامانیا برای مقدار معین $\frac{b}{y}$ در حالتی که کف با پوشش می باشد



شکل ۱۶. رابطه بین $\frac{P}{y}$ و $\frac{q_s}{Ky}$ به ازای z های مختلف در مقاطع مختلف

Fig. 16. The relationship between P/y and q_s/Ky for different z in the different channel sections.

جدول ۹. رابطه رگرسیونی غیرخطی بین $\frac{P}{y}$ و $\frac{q_s}{Ky}$ به ازای z های مختلف در مقاطع مختلف

Table 9. The non-linear regression relationship between P/y and q_s/Ky for different z values for different cross sections.

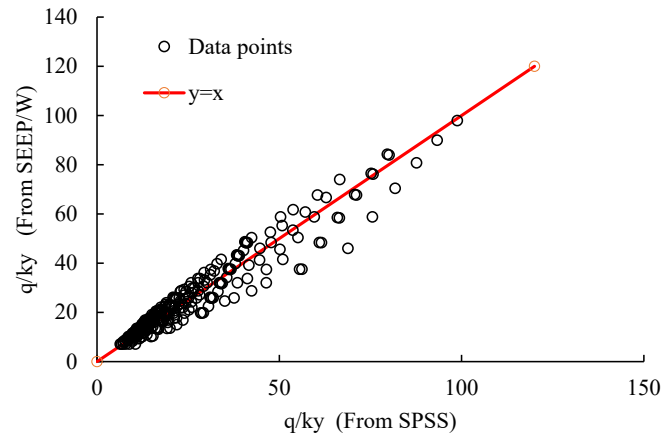
RMSE	R ²	رگرسیون غیر خطی	z	مقطع
۵/۱۹۸	۰/۹۲۶	$\frac{q_s}{Ky} = -0.024 \times \left(\frac{P}{y}\right)^2 + 3.415 \times \left(\frac{P}{y}\right) - 3.348$	۰	دورنقهای، مثلثی و مستطیلی
۴/۹۸۵	۰/۹۲۳	$\frac{q_s}{Ky} = -0.024 \times \left(\frac{P}{y}\right)^2 + 3.415 \times \left(\frac{P}{y}\right) - 2.353$	۱	
۴/۹۵	۰/۹۱۹	$\frac{q_s}{Ky} = -0.024 \times \left(\frac{P}{y}\right)^2 + 3.415 \times \left(\frac{P}{y}\right) - 1.8555$	۱/۵	
۴/۹۶۵	۰/۹۱۴	$\frac{q_s}{Ky} = -0.024 \times \left(\frac{P}{y}\right)^2 + 3.415 \times \left(\frac{P}{y}\right) - 1.358$	۲	
۵/۰۲۹	۰/۹۰۷	$\frac{q_s}{Ky} = -0.024 \times \left(\frac{P}{y}\right)^2 + 3.415 \times \left(\frac{P}{y}\right) - 0.8605$	۲/۵	

آب از کانال‌ها در کشورهای مختلف ارائه شده‌است. در این پژوهش نتایج حاصل از محاسبه دبی نشت به کمک برخی از این روابط با نتیجه حاصل از شبیه‌سازی مقطع دوزنقه ای بررسی شده‌است. علت انتخاب مقطع دوزنقه ای این می باشد که رابطه سوامی و همکاران (۲۰۰۰)، نیز دبی نشت را برای مقطع دوزنقه ارائه کرده‌است (آب زیرزمینی در عمق بی‌نهایت قرار دارد). جدول ۱۰ مقایسه پارامترهای آماری حاصل از روش‌های تجربی سوامی و همکاران (۲۰۰۰) و

ولی دیواره‌ها بدون پوشش‌اند، شیب جانبی در دبی نشت تاثیر فراوان دارد، به طوری که هر قدر زاویه β کانال کمتر (شیب جانبی بیشتر) باشد دبی نشت بیشتر است. زاویه β ، زاویه بین دیواره کناری کانال با امتداد کف کانال می‌باشد [۳۴].

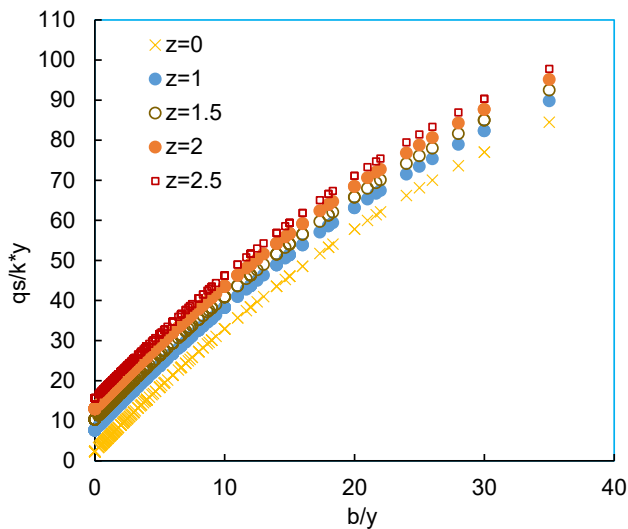
۳ - ۴ - مقایسه با نتایج سایر محققان

معادله‌ها و روش‌های تجربی بسیاری به‌منظور تخمین میزان نشت



شکل ۱۷. تغییرات $\frac{q_s}{K_y}$ محاسبه شده توسط SEEP/W نسبت به $\frac{q_s}{K_y}$ محاسبه شده توسط رابطه ۱۷ در SPSS

Fig. 17. The comparison between q_s/K_y with the two methods, SEEP/W versus regression Equation (17) in SPSS.



شکل ۱۸. رابطه بین $\frac{b}{y}$ و $\frac{q_s}{K_y}$ به ازای z های مختلف در مقاطع مختلف

Fig. 18. The relationship between b/y and q_s/K_y via z in different channel sections.

کشور ترکیه و در حوضه آبریز گدیز^۱ قرار دارد. مشخصات هندسی و هیدرولیکی این کانال ها در جدول ۱۱ ارائه شده است. دبی نشت اندازه گیری شده به روش حوضچه ای از این ۵ کانال در ستون آخر جدول ۱۱ آورده شده است. هم چنین در جدول ۱۲ دبی نشتی محاسبه شده بر اساس ۳ روش معادله خطی ۱۴ حاصل این تحقیق، روش سوامی و همکاران (۲۰۰۰) و روش موسکات (۱۹۸۲) به همراه درصد خطای نسبی آنها ارائه گردیده است.

موسکات [۳۵] را با رابطه رگرسیون خطی به دست آمده (رابطه ۱۴)، نشان می دهد. مطابق جدول مشاهده می شود که ضریب تبیین رابطه رگرسیون خطی به دست آمده در این پژوهش برابر ۰/۹۲۵ بوده و هم چنین از RMSE کمتری (۴/۹۷۸) برخوردار می باشد که نشان از دقت بالای این رابطه را دارد.

مقایسه دیگر بر اساس اطلاعات موجود از ۵ کانال در مطالعات آکوزو (۲۰۱۱) انجام شده است [۳۶]. موقعیت این کانال ها در غرب

جدول ۱۰. پارامترهای آماری حاصل از روش‌های مختلف بر آورد میزان نشت در مقطع دوزنقه ای

Table 10. The statistical parameters obtained from different methods of estimating the seepage in the trapezoidal cross sections.

RMSE	R ²	رابطه	
۴/۹۷۸	۰/۹۲۵	$\frac{q_s}{Ky} = 3.5 \frac{P}{y} + 14.741 \frac{R}{y} - 1.127 \frac{b}{y} - 9.36$	رابطه ۱۴
$0 \leq z \leq 2.5 \quad 6.39 \leq \frac{q_s}{Ky} \leq 98.85 \quad , 0 \leq \frac{b}{y} \leq 35 \quad , 2.83 \leq \frac{P}{y} \leq 40.39$			محدوده اعتبار
۱۸/۷	۰/۹۷۵	$\frac{q_s}{Ky} = \left[\left\{ (4\pi - \pi^2)^{1.3} + (2z)^{1.3} \right\}^{\frac{(0.77+0.462z)}{(1.3+0.6z)}} + \left(\frac{b}{y} \right)^{\frac{(1+0.6z)}{(1.3+0.6z)}} \right]^{\frac{(1.3+0.6z)}{(1+0.6z)}}$	سوامی و همکاران (۲۰۰۰)
$0.5 \leq z \leq 5 \quad 0.5 \leq \frac{b}{y} \leq 10 \quad ,$			محدوده اعتبار
۱۶/۲	۰/۸۹۸	$\frac{q_s}{Ky} = (1.071 \times (\frac{w}{y}) + 1.786) \times (\frac{z}{1.5})$	موسکات (۱۹۸۲)
$\frac{H}{y} = \infty$ (سطح آب زیر زمینی عمیق)			محدوده اعتبار

جدول ۱۱. مشخصات هندسی و هیدرولیکی ۵ کانال در مطالعات آکوزو [۳۶]

Table 11. The geometric and hydraulic properties of 5 channels in Akkuzu's study.

Q _s (m ³ /s/m)	K (m/s)	W (m)	R (m)	A (m ²)	P (m)	Z	y (m)	b (m)
۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۰۲	۱۱/۹۲	۱/۳۴	۱۷/۵۴	۱۳/۱	۱/۵	۱/۹۵	۶/۰۷
۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۰۴	۱۰/۸۸	۱/۱۱	۱۳/۰۷	۱۱/۸	۱/۵	۱/۵۲	۶/۳۲
۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۰۷	۵/۲۱	۰/۶۸	۳/۹۹	۵/۹	۱/۵	۱/۱۴	۱/۷۹
۰/۰۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۰۰۴	۴/۵۹	۰/۶	۳/۰۹	۵/۲	۱/۵	۱	۱/۵۹
۰/۰۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۱۲	۵/۳۴	۰/۷۱	۴/۳۴	۶/۱	۱/۵	۱/۲۶	۱/۵۶

دقت بیشتر رابطه ۱۴ (حاصل تحقیق حاضر) را نشان می دهد. به نظر می رسد که یکی از عوامل موثر در دقت زیادتر رابطه ۱۴ پیشنهادی در تحقیق حاضر حضور پارامتر محیط خیس شده کانال باشد که در دو رابطه دیگر دیده نمی شود.

به هر حال برای داوری بهتر در خصوص تطابق روابط رگرسیونی با واقعیت، نیاز به داده های اندازه گیری بیشتری احساس می شود تا صحت روابط ریاضی برای مناطق مختلف با خاک های متفاوت مورد ارزیابی بیشتر قرار گیرد. در این تحقیق، نویسندگان فقط به دو اندازه گیری صحرائی مربوط به مطالعات آکوزو [۳۶] در کشور ترکیه و رستمیان و عابدی کویابی [۱۵] مربوط به شبکه آبیاری زاینده رود

هدایت هیدرولیکی خاک زیر کانال برای ۵ مقطع از کانال های اصلی کشور ترکیه در ستون دوم از جدول ۱۰ ارائه شده است. بافت خاک از متوسط تا متوسط- سنگین متغیر بوده است. ضمناً هدایت هیدرولیکی برای دو رابطه سوامی (۲۰۰۰) و همکاران و موسکات (۱۹۸۲) و رابطه پیشنهادی ۱۴، یکسان فرض شده است.

در جدول ۱۲ منظور از خطای نسبی عبارت است از تفاوت دو مقدار نشت حاصل از فرمول و اندازه گیری شده تقسیم بر مقدار نشت اندازه گیری می باشد. حداکثر خطای حاصل در برآورد دبی نشتی از کانال با کاربرد رابطه ۱۴ تحقیق حاضر ۱۲/۵ درصد، روش سوامی و همکاران ۶۲/۶ درصد و روش موسکات ۶۴/۹ درصد است. این موضوع

جدول ۱۲. دبی ناشی محاسبه شده و خطای آن بر اساس ۳ روش معادله خطی حاصل این تحقیق، روش سوامی و همکاران (۲۰۰۰) و روش موسکات (۱۹۸۲)

Table 12. The seepage rate calculated and error based on 3 methods: the linear equation obtained from this study, the method of Swamee et al. (2000), and Muskat (1982).

موسکات (۱۹۸۲)		سوامی و همکاران (۲۰۰۰)		معادله ۱۴ این تحقیق	
درصد خطا	Qs (m ³ /s/m)	درصد خطا	Qs (m ³ /s/m)	درصد خطا	Qs (m ³ /s/m)
۶۴/۹۱	۰/۰۰۰۰۳۲	۶۲/۶۴	۰/۰۰۰۰۳۵	۱۲/۵۴	۰/۰۰۰۰۰۸
۶۱/۳۸	۰/۰۰۰۰۵۷	۵۸/۸۹	۰/۰۰۰۰۶۱	۲/۴۷	۰/۰۰۰۰۱۵
۶۲/۱۹	۰/۰۰۰۰۰۵۳	۶۰/۱۴	۰/۰۰۰۰۰۵۶	۱۰/۹۸	۰/۰۰۰۰۱۳
۵۷/۸۸	۰/۰۰۰۰۲۷	۵۵/۵۹	۰/۰۰۰۰۲۸	۰/۶۹	۰/۰۰۰۰۶۳
۵۶/۲۷	۰/۰۰۰۰۹۶	۵۴/۱۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۴۴	۰/۰۰۰۰۲۲

تبیین (R^2) برابر ۰/۹۲۵ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۴/۹۷۸ برای مقاطع مختلف دوزنقه ای، مستطیلی و مثلثی کانال های آبیاری به دست آمد.

۵- هدایت هیدرولیکی خاک در تخمین مقدار نشت از کانال، نقش تعیین کننده ای ایفا می کند.

۶- پیشنهاد می شود تا در مطالعات آتی، اثر عمق آب زیرزمینی و نیز غیر ایزوتروپی (ناهم روندی) خاک بر دبی ناشی از کانال بررسی گردد. در حالت اخیر $k_x \neq k_y$ بوده و بر مقدار نشت اثر خواهد داشت.

مراجع

- [1] C.A. Martin, T.K. Gates, Uncertainty of canal seepage losses estimated using flowing water balance with acoustic Doppler devices, *Journal of Hydrology*, 517 (2014) 746-761.
- [2] K. Akhavan Giglou, Evaluation of Hydraulic Performance of Water Structures in relation to Moghan Irrigation Network Management, Shiraz University, Faculty of Agriculture, 1998 (in Persian).
- [3] Q. Zhang, J. Chai, Z. Xu, Y. Qin, Investigation of Irrigation Canal Seepage Losses through Use of Four Different Methods in Hetao Irrigation District, China, *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(3) (2017) 05016035.
- [4] M. Noori Mohammadiyeh, T. Sohrabi, H. Rahimi, Evaluation of experimental methods for determination

اصفهان دسترسی داشتند.

۴ - نتیجه گیری

در این تحقیق از نرم افزار SEEP/W برای تعیین دبی ناشی از کانال های خاکی استفاده گردید. نرم افزار مذکور بر اساس روش حل عددی عناصر محدود کار می کند. هم چنین برای صحت سنجی شبیه سازی عددی، از داده های صحرایی استفاده شد. تعداد ۲۴۶ مدل عددی برای مقاطع دوزنقه ای، مستطیلی و مثلثی ساخته شد. برای لحاظ نمودن جنس یا بافت خاک در کانال های خاکی از مشخصه هدایت هیدرولیکی خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که:

۱- برای شبیه سازی عددی، عرض محدوده ای معادل ۱۵ برابر عرض سطح آب در کانال برای عدم تاثیر مرزهای کناری بر دبی نشت نیاز خواهد بود.

۲- مقایسه دبی ناشی با روابط تجربی نشان داد که روابط تجربی خطای زیادی در برآورد نشت نشان می دهند، هر چند رابطه موریتز با RMSE کوچکتر (۱۲/۳۵۶) و ضریب تبیین بزرگتر (۰/۳۷۳) بهتر از بقیه بود.

۳- شبیه سازی عددی نشان داد که رابطه خطی قوی با ضریب تبیین ۰/۹۸ بین محیط خیس شده کانال (برحسب متر) با دبی نشت از کف و جداره (برحسب متر مکعب بر ثانیه در واحد طول کانال) وجود دارد.

۴- رابطه رگرسیون چند متغیره خطی تطابق مناسبی را برای تخمین دبی نشت ارائه نمود. به طوری که در معادله خطی ضریب

- EM equipment to verify the presence of seepage losses in irrigation canals, *Procedia Environmental Sciences*, 19 (2013) 836-845.
- [15] R. Rustamian, C. Abedi Kupayi, Evaluation of SEEP / W Software Model for Estimating Water Leakage from Soil Channels (Case Study: Zayandeh Rood Irrigation Network), *Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 15(58) (2012) 13-21 (in Persian).
- [16] T. Sohrabi, A. Javadpour Brojeni, Conveyance and Distribution Efficiency of Gazvin Irrigation Network, *Agricultural Research*, 5(2) (2005) 68-79 (in Persian).
- [17] F. Salmasi, E. Rashtbarzadeh, Assessment of geo-synthetic materials application in reducing seepage in Moghan irrigation network, *Iranian Journal of Water & Environment Engineering*, 1(2) (2013) 27-34 (in Persian).
- [18] A. Malekpour, H. Rahimi, H. Ahmadi, Investigating the effect of groundwater level and juice layer thickness on reverse leakage flow to canal, in: *National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management*, Shahid Chamran Ahwaz University, Faculty of Water Engineering, 2006 (in Persian).
- [19] P.K. Swamee, G.C. Mishra, B.R. Chahar, Design of Minimum Seepage Loss Canal Sections, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(1) (2000) 28-32.
- [20] P.K. Swamee, G.C. Mishra, B.R. Chahar, Optimal Design of Transmission Canal, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(4) (2002) 234-243.
- [21] Z. Paydar, Mathematical model of leakage losses from irrigation canals, *Water magazine*, 10 (1991) 15-22 (in Persian).
- [22] M. Heidarizadeh, H.R. Salemi, Investigating the application of Ingham empirical equation and the theory of hydrodynamics in estimating water leakage from canals in Rudasht area of Isfahan, *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(4) (2014) 703-712 (in Persian).
- of leakage in earth canals (case study: Ghazvin plain), *Iranian Journal of Water Research*, 4(7) (2010) 125-128 (in Persian).
- [5] P. Swamee, D. Kashyap, Design of minimum seepage-loss nonpolygonal canal sections, 127 (2001).
- [6] A.R. Kacimov, Discussion of 'design of minimum seepage-loss nonpolygonal canal sections' by Prabhata K. Swamee and Deepak Kashyap, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1) (2003) 68-69.
- [7] H. Salemi, A. Sepaskhah, Modification of experimental equations of water leakage from canals in Rudasht area of Isfahan, *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 10(1) (2006) 29-42 (in Persian).
- [8] M. Heydarizade, The comparison of the results of the application of the theory equation with the experimental leakage from canals of Rudasht area of Isfahan, *First Comprehensive Conference on Zayandeh Rood Watershed Management*, Esfahan, (2008) (in Persian).
- [9] R. Bahramlu, Evaluation of leakage losses in irrigated irrigation channels in cold regions and its effect on water resources reserves (Case study in Hamadan province), *Iranian Journal of Water Research*, 5(9) (2011) 141-150 (in Persian).
- [10] R. Bahramlu, Effectiveness of concrete linings of irrigation canals in control of seepage losses in Hamadan convenience, *IWRJ*, 6(11) (2012) 75-83 (in Persian).
- [11] M. Mohammad Rezapour Tabari, M. Mazak Mari, A simulation-optimization approach for reducing seepage rate in water conveyance canals, *Iran-Water Resources Research*, 11(3) (2014) 17-30 (in Persian).
- [12] B.R. Chahar, Analysis of seepage from polygon channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4) (2007) 451-460.
- [13] K.D. Kinzli, M. Martinez, R. Oad, A. Prior, D. Gensler, Using an ADCP to determine canal seepage loss in an irrigation district, *Agricultural Water Management*, 97(6) (2010) 801-810.
- [14] D. Pognant, D. Canone, M. Previati, S. Ferraris, Using

- [29] A. Ahmed, S. McLoughlin, H. Johnston, 3D Analysis of seepage under hydraulic structures with intermediate filters, *Journal of Hydraulic Engineering, Technical Note*, 141(1) (2014) 06014019, 1- 6.
- [30] E. Akkuzu, Usefulness of empirical equations in assessing canal losses through seepage in concrete-lined canal, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(5) (2012) 455-460.
- [31] A. Jain, L. Reddi, Finite-depth seepage below flat aprons with equal end cutoffs, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12) (2011) 1659-1667.
- [32] D.B. Kraatz, V.I.K. Mahajan, *Small Hydraulic Structures. Irrigation and Drainage*, FAO.Rome., 1975.
- [33] R. Attarnejad, *Limitations in groundwater*, Islamic Azad University of Kerman Publications, 2007 (in Persian).
- [34] M. Bayrami, *Water Conveyance Structures*, Isfahan University of Technology, 2009 (in Persian).
- [35] M. Fotouhi, S.M. Hosseini, Sensitivity analysis of flood routing parameters and transmission losses in rivers of arid regions, *Journal of Watershed Management Sciences and Engineering*, 1(1) (2007) 12-23 (in Persian).
- [36] E. Akkuzu, The usefulness of empirical equations in assessing canal losses through seepage in concrete-lined canal, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138 (5) (2012) 414-423.
- [23] E. Wachyan, K.R. Rushton, Water losses from irrigation canals, *Journal of Hydrology*, 92(3) (1987) 275-288.
- [24] R. Ghobadian, M. Khalaj, S. Golzari, Determining the Optimized Location of Barbakan to Reduce Uplift Pressure and Prevent Damage to Canal Concrete Lining Using Numerical Methods, 9th International Civil Engineering College, Isfahan University of Technology, (2012) (in Persian)
- [25] A. Shirafros, Z. Narimani, Calculation of leakage losses from soil canals MSEEP software, National Conference on Water Sciences Soil, Plant and agricultural mechanization, Dezful, Islamic Azad University Dezful Branch, (2010) (in Persian)
- [26] E. Aghvami, A. Abbaspour, M.A. Ghorbani, F. Salmasi, Estimation of Channel Seepage Using Seep/w and Evolutionary Polynomial Regression (EPR) Modelling (Case Study: Qzvin and Isfahan Channels), *Journal of civil Engineering and Urbanism*, 3(4) (2013) 211-215.
- [27] M. Shamsai, A.E. Mahmoudi, Three-dimensional drainage analysis in water transfer channels, *Proceedings of the 5th Hydraulic Conference of Iran*, Kerman Shahid Bahonar University, (2005) (in Persian).
- [28] M. Mansurikiya, B. Mishani, M. Avalipoor, Problems with whip and filter design and implementation, 6th International Conference on Civil Engineering, Isfahan University of Technology, (2004) (in Persian).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Salmasi, R. Hosseinzadehasi, H. Arvanaghi, Numerical Investigation of Seepage from Earth Canals and Comparison with Field Measurements, Amirkabir J. Civil Eng., 51(5) (2019) 843-864.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14027.5538](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14027.5538)

