

بررسی و مقایسه مدل‌های تجربی برآورد نشت در کانال‌های آبیاری (مطالعه موردی دشت داراب)

محمد علی شاهرخ‌نیا^{۱*} و لادن جوکار^۲

چکیده

استفاده از معادلات تجربی برآورد نشت آب در کانال‌ها در مقایسه با روش‌های عملی، باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود. با توجه به تجربی بودن، ارزیابی و واسنجی این معادلات ضروری است. در این پژوهش، نشت آب در سه کانال آبیاری دشت داراب فارس، با استفاده از ۹ معادله تجربی برآورد و با روش مستقیم دبی ورودی - خروجی مقایسه شد. روابط تجربی برای کانال‌های مذکور، مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج اولیه نشان داد معادله موریتز و آفنگدن با داشتن خطای ۴۹٪ و ۱۴۴۵٪ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین تفاوت با روش دبی ورودی - خروجی و خطای بقیه معادلات حدود ۱۲۵٪ است. نتایج حاصل از واسنجی نشان داد که معادلات اینگهام، مولس ورث - ینی دومیا، دیویس ویلسون، موریتز و آفنگدن با داشتن خطای نسبی کمتر از ۱۰٪، مطابقت خوبی با روش دبی ورودی - خروجی دارند. پس از این معادلات، معادله گارگ، آبیاری مصر، میسرا و پنجاب هند، به ترتیب با داشتن خطای ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۰ درصد در رده‌های بعدی هستند. نتایج صحت‌سنجی نشان داد معادلات موریتز و میسرا به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مطابقت با روش مستقیم در شرایط مورد بررسی بودند.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری مستقیم، روش دبی ورودی خروجی، معادله اینگهام، معادله موریتز، معادله آفنگدن.

ارجاع: شاهرخ‌نیا م. ع. و جوکار ل. ۱۳۹۸. بررسی و مقایسه مدل‌های تجربی برآورد نشت در کانال‌های آبیاری (مطالعه موردی دشت داراب). مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۵۱-۶۲.

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز.

۲- مربی پژوهشی بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز.

* نویسنده مسئول: mashahrokh@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۶

مقدمه

با توجه به کمبود آب و ارزش بسیار آن در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، جلوگیری از تلفات آب در سیستم‌های انتقال و توزیع، همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اقدامات بوده است. در پاکستان حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد آب واردشده به کانال‌های آبیاری به‌صورت نشت تلف می‌شود (سارکی و همکاران، ۲۰۰۸). آگاهی از مقدار و علل ایجاد تلفات، می‌تواند در بهبود مدیریت منابع آب و توجیه پوشش انهار مفید باشد (آکوزو، ۲۰۱۲). با تقلیل تلفات آب در انهار فعلی، می‌توان از سرعت افت منابع آب زیرزمینی کاست یا اراضی کم‌آب دیگری را آبیاری کرد. روش‌های اندازه‌گیری نشت آب به دو دسته کلی اندازه‌گیری مستقیم و اندازه‌گیری غیرمستقیم قابل دسته‌بندی هستند. امروزه، دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری نشت از کانال‌ها روش‌های مستقیم است. برای اندازه‌گیری نشت آب از کانال‌ها به روش اندازه‌گیری مستقیم، به مقدار واقعی اتلاف آب در اثر نشت از کانال در شرایط کارکرد (وقتی کانال پر است)، مورد نیاز است. محاسبه مقدار واقعی نشت، بدون نیاز به استفاده از روابط تئوری و استنتاج از روی سایر عوامل، نظیر نفوذپذیری خاک و غیره، انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری ورودی و خروجی آب کانال (روش دبی ورودی- خروجی) و آزمایش حوضچه‌ای دو روش برای اندازه‌گیری مستقیم مقدار نشت از کانال هستند. روش‌های برآورد غیرمستقیم نشت آب، شامل معادلات تئوری و تجربی هستند که از دقت کمتری نسبت به روش مستقیم برخوردارند. در معادلات تجربی تعیین نشت، فرض می‌شود که مقدار نشت، تابعی از ظرفیت کانال و ضرایب تجربی مربوط به نوع بافت خاک و پوشش کانال است (مکلود، ۱۹۹۶). کشکولی (۱۳۶۶) میزان نشت آب در کانال‌های آبیاری خاکی خوزستان را اندازه‌گیری و گزارش کرد که میزان نشت آب در شاوور ۲/۴ و در اهواز ۳/۲ لیتر بر ثانیه در ۱۰۰ متر بوده است. پایدار (۱۳۷۰) نشت آب در کانال‌های آبیاری را با استفاده از یک مدل ریاضی که جریان را دو بُعدی و ماندگار فرض کرده، شبیه‌سازی و برآورد کرد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل و نشت برآوردشده از روش مستقیم نشان داد که تفاوت این دو روش کم بوده است. میزان نشت برای دو کانال مورد بررسی در روش حوضچه‌ای ۱/۱۷ و ۰/۴ و به وسیله مدل ۱/۲۱ و ۰/۴۹ مترمکعب بر مترمربع در روز

بوده است. سالمی و سپاس‌خواه (۱۳۸۵) میزان نشت آب در چند کانال رودشت اصفهان را با روش جریان ورودی- خروجی اندازه‌گیری کردند و معادلات تجربی نشت را برای آن منطقه واسنجی کردند. نتایج نشان داد که روش‌های تجربی تخمین نشت، میزان نشت را کمتر از واقعیت برآورد می‌کنند و بهترین روش را برای منطقه مورد مطالعه خود، روش اینگهام و موریتس معرفی کردند. بهراملو (۱۳۹۰)، میزان تلفات نشت در کانال‌های آبیاری با پوشش سنگی را با استفاده از روش دبی ورودی- خروجی مورد ارزیابی قرار داد و مقدار آن را حدود ۲۰٪ تلفات از کانال‌های با پوشش بتنی منطقه دانسته است. بهراملو (۱۳۹۱)، میزان تلفات نشت در کانال‌های آبیاری استان همدان را قبل و بعد از پوشش بتنی با استفاده از روش دبی ورودی- خروجی مورد ارزیابی قرار داد و مقدار نشت را برای قبل و بعد از پوشش، به ترتیب حدود ۱۶٪ و ۸٪ گزارش کرد که البته تفاوت این دو مقدار از نظر آماری معنی‌دار نبود. شاهرخ‌نیا و زارع (۱۳۹۳) تحقیقی در مورد نشت آب در کانال‌های شهرستان داراب انجام دادند. نتایج نشان داد که پوشش کردن کانال‌های آبیاری سنتی در شرایط مختلف بین ۸۵ تا ۹۷ درصد، نشت آب را کاهش داده است. در کانال‌های سنتی بین ۳ تا ۷ درصد از دبی کانال در هر کیلومتر از طول کانال، در اثر نشت به هدر می‌رود که با پوشش نمودن این کانال‌ها تلفات نشت به کمتر از ۰/۶ درصد رسیده است. حیدری‌زاده و سالمی (۱۳۹۳) به بررسی روابط اینگهام و ودرنیکو در کانال‌های خاکی اصفهان پرداختند و نشان دادند که معادله ودرنیکو بهتر از معادله اینگهام قادر به تخمین میزان نشت است. آذری‌فرد جهرمی و همکاران (۱۳۹۴) میزان نشت آب در کانال‌های آبیاری مرودشت فارس را اندازه‌گیری کردند و به مقایسه این روش با نشت شبیه‌سازی شده از معادلات تجربی و مدل‌های MSEEP و SEEP/W پرداختند. نتایج نشان داد که این دو مدل و معادله میسرًا تفاوت کمتری با روش حوضچه‌ای داشته‌اند.

بکری و اواد (۱۹۹۷)، میزان نشت آب در کانال‌های آبیاری مصر را از روش دبی ورودی- خروجی اندازه‌گیری کردند و معادلاتی برای ربط میزان نشت به خصوصیات هیدرولیکی جریان ارائه کردند. اقبال و همکاران (۲۰۰۲) در جنوب آلبرتای کانادا، میزان نشت آب در کانال‌های آبیاری را از روش مستقیم تعیین و مشاهده کردند که در اثر نوسازی و

داشتند که انتخاب شکل مقطع مناسب (ذوزنقه‌ای در مقایسه با مستطیلی) برای کانال باعث کاهش میزان نشت می‌شود؛ همچنین، گزارش کردند که خطای صحت‌سنجی مدل‌های مختلف به‌ترتیب از مدل SEEP/W، موریتز، دیویس ویلسون، مولس ورث-ینی دومیا، تا مدل اینگهام افزایش می‌یابد.

جمع‌بندی تحقیقات گذشته در داخل کشور و خارج از آن، به این شکل است که روش‌های تجربی ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر و کم‌دقت‌تر از روش‌های مستقیم هستند. یک روش یا معادله خاص در یک منطقه ممکن است برآورد دقیقی از میزان نشت را ندهد؛ ولی همین روش یا معادله در منطقه دیگر از دقت بهتری برخوردار باشد. با توجه به تنوع روش‌های تجربی برآورد نشت و ضرورت کاربرد این روش‌ها در عمل، انجام تحقیقات بیشتر در شرایط یا مناطق مختلف کشور ضروری به نظر می‌رسد. مقایسه این روش‌ها با روش‌های اندازه‌گیری مستقیم می‌تواند روش‌های دقیق‌تر را معرفی کند. بنابراین، در این تحقیق به بررسی ۹ روش تجربی برآورد نشت در سه کانال آبیاری با بافت خاک متفاوت و در دشت داراب استان فارس که یکی از دشت‌های حاصلخیز کشاورزی کشور است، پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی سه کانال آبیاری در دشت شهرستان داراب انجام شد (شکل ۱). کانال‌های موردنظر در سه روستای حسن‌آباد، منصوریه و جنت‌شهر قرار دارند (شکل ۲). روستای حسن‌آباد و منصوریه در غرب شهر داراب واقع شده‌اند. منبع اصلی تأمین آب اراضی کشاورزی در منصوریه، چشمه گلابی و در حسن‌آباد، چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق است. روستای جنت‌شهر در شمال شرقی شهر داراب قرار دارد و اراضی آن از چشمه خرچنگ که در کوه‌های مشرف به روستا قرار دارد، آبیاری می‌شوند. طبق آزمون خاک انجام‌شده، بافت خاک سه منطقه حسن‌آباد، منصوریه و جنت‌شهر، به‌ترتیب Loam، Clay loam و Sandy loam بوده که دارای تنوع بافتی خوبی هستند. در سه روستای مورد مطالعه، بیشتر کانال‌های آبیاری، سنتی و بدون پوشش بوده که اخیراً در حال پوشش‌دار شدن با بتن هستند.

مردن کردن سیستم انتقال آب منطقه، میزان تلفات نشت از ۱۵٪ در سال ۱۹۹۱ به ۲/۵٪ در سال ۱۹۹۹ رسیده است. ارشد (۲۰۰۴) نشت آب در کانال‌های آبیاری پاکستان را با روش دبی ورودی- خروجی اندازه‌گیری و گزارش کرد که در کانال‌های سنتی حدود ۶۶٪ و در کانال‌های پوشش‌شده حدود ۴۴٪ اتلاف آب وجود دارد. آکوزو و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از روش جریان ورودی- خروجی، میزان نشت آب در کانال‌های اصلی آبیاری سیمانی در جنوب ترکیه را ۳٪ در هر کیلومتر از طول کانال گزارش کردند. میزان متوسط تلفات در کانال‌های درجه ۲ و ۳ منطقه به‌ترتیب حدود ۳٪ و ۶٪ در ۱۰۰ متر از طول کانال بود. کینزلی و همکاران (۲۰۱۰)، میزان نشت آب در کانال‌های ریوگراند آمریکا را با روش دبی ورودی- خروجی اندازه‌گیری کردند و نشت اندازه‌گیری شده را به‌صورت روابط لگاریتم نپری، به‌صورت توابعی از دبی، محیط خیس‌شده، عرض بالای آب و سطح مقطع جریان ارائه کردند. از این میان، روابطی که بر اساس دبی و عرض بالای آب بودند برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد شد. آکوزو (۲۰۱۲) به بررسی میزان نشت آب در کانال‌های بتنی آمریکا با استفاده از مدل‌های تجربی موریتز و دیویس ویلسون و روش مستقیم دبی ورودی خروجی پرداخت. نتایج نشان داد که ضمن تأکید بر اهمیت استفاده از مدل‌های تجربی نشت، ممکن است این مدل‌ها در همه نقاط قابل کاربرد نباشند و لازم است برای هر منطقه واسنجی شوند. یائو و همکاران (۲۰۱۲)، میزان نشت در کانالی با پوشش‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که کانال با پوشش رسی و بستر تحکیم‌یافته کمترین میزان نشت را دارد و پس از آن، کانال با بستر تحکیم‌یافته و کانال با پوشش بتنی قرار می‌گیرند. همچنین، علاوه بر نوع پوشش، میزان نفوذپذیری خاک بستر نیز تأثیر بسزایی در میزان نشت دارد. مارتین و گیتز (۲۰۱۴)، اندازه‌گیری نشت آب کانال با روش دبی ورودی- خروجی را روشی مناسب دانستند و بیان داشتند عواملی مانند تغییرات مکانی نشت، خطای فردی و خطای ادوات اندازه‌گیری می‌تواند باعث عدم اطمینان به نتایج و افزایش ضریب تغییرات شود. همچنین، جریان غیرماندگار در کانال می‌تواند باعث تغییرات در حجم آب موجود در کانال و تغییرات در میزان نشت شود. رضاپور طبری و مزک مری (۲۰۱۶) بیان

$$q = 86.4 C \cdot R^{0.5} \quad \text{معادله مولس ورث- ینی دومیا} \quad (۲)$$

$$q = 0.01 S \cdot Q \cdot L \quad \text{معادله آفنگندن} \quad (۳)$$

$$S = A(Q^{-m}) \quad (۴)$$

$$q = 0.45 CPLH/G \quad \text{معادله دیویس ویلسون} \quad (۵)$$

$$G = (4 \times 10^6 + 3650 V^{0.5}) / (4 \times 10^6 + 3650) \quad (۶)$$

$$q = 0.0186 C (Q/V)^{0.5} \quad \text{معادله موریتز} \quad (۷)$$

$$q = C \cdot a \cdot H \quad \text{معادله پنجاب هند} \quad (۸)$$

$$S = CLPR^{0.5} \quad \text{معادله میسرا} \quad (۹)$$

$$S = 1.9 Q^{0.167} \quad \text{معادله گارگ} \quad (۱۰)$$

در این معادلات q ، میزان نشت در طول کانال؛ H ، عمق جریان آب در کانال؛ P ، محیط خیس‌شده؛ L ، طول کانال؛ R ، شعاع هیدرولیکی؛ S ، نشت آب از یک کیلومتر طول کانال؛ Q ، دبی جریان؛ C ، M ، A و V ، ضرایب ثابت؛ V ، سرعت جریان و a ، مساحت خیس‌شده کانال هستند. برای مقایسه روش‌های تجربی با روش دبی ورودی- خروجی، از مشخصه‌های آماری میانگین خطای مطلق (AME)، خطای میانگین مربعات (RMSE)، خطای میانگین نرمال‌شده (NRMSE)، ضریب تغییرات خطای میانگین مربعات نرمال‌شده (PRMSE) و آزمون مربع کای (CHISQ) و سطح معنی‌داری آزمون مربع کای (PR) استفاده شد (تیبسی، ۲۰۰۵). با استفاده از آزمون t ، مقایسه دو به دو بین روش‌های مختلف انجام شد و معنی‌دار بودن تفاوت روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد، روش‌های تجربی مورد بحث، با استفاده از نرم‌افزار میکروسافت اکسل برای نقاط موردنظر واسنجی گردید. برای واسنجی روابط موردنظر، از آزمون و خطا استفاده و ضریب ثابت روابط تجربی موردنظر تعدیل شد. به عبارت دیگر، با تغییر ضرایب معادلات، تفاوت میزان نشت برآوردشده با میزان نشت اندازه‌گیری شده حداقل شد. با برآورد مشخصه‌های آماری میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات، مقایسه بین ضرایب واسنجی‌شده انجام گرفت. در نهایت، با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده با شرایط متفاوت جریان و در همان محل‌های قبلی کانال‌های مورد بررسی، صحت‌سنجی انجام شد. در مرحله صحت‌سنجی با استفاده از ضرایب واسنجی‌شده معادلات، دوباره مقادیر نشت برآورد شد و پارامترهای آماری مورد بررسی، دوباره محاسبه و روش‌های معتبرتر معرفی شد.



شکل ۱- موقعیت محل انجام تحقیق در استان فارس



شکل ۲- موقعیت کانال‌های مورد بررسی در شهرستان داراب

در این تحقیق، برای بررسی روابط تجربی برآورد نشت آب در کانال‌های آبیاری سنتی و بدون پوشش شهرستان داراب، به ترتیب زیر عمل شد. در هر یک از سه کانال مورد بررسی، میزان نشت آب از روش مستقیم دبی ورودی- خروجی با استفاده از میکرومولینه واسنجی‌شده، در سه فاصله مکانی به طول ۲۰۰ متر اندازه‌گیری شد. میزان نشت با استفاده از روابط تجربی اینگهام، دیویس ویلسون، مولس ورث ینی دومیا، میسرا، آفنگندن، موریتز، اداره آبیاری مصر، گارگ، پنجاب هند- که در ادامه شرح داده شده‌اند- برآورد شد. روش مستقیم دبی ورودی خروجی، به عنوان روش مبنا در نظر گرفته شد و سایر روش‌های تجربی با این روش مقایسه شد. معادلات تجربی مطابق روشی که در ادامه شرح داده می‌شوند، واسنجی و صحت‌سنجی شدند. در این تحقیق از روابط تجربی مختلف برای برآورد نشت در کانال‌های موردنظر استفاده شد (بکری و اواد، ۱۹۹۷؛ ارشد، ۲۰۰۴؛ سالمی و سپاس‌خواه، ۱۳۸۵). به دلیل رعایت خلاصه‌نویسی، از ذکر جزئیات بیشتر در خصوص این معادلات و ذکر واحد هر پارامتر در هر معادله صرف‌نظر می‌گردد.

$$q = 0.55 \times 10^{-6} C \cdot P \cdot L \cdot H^{0.5} \quad \text{معادله اینگهام} \quad (۱)$$

نتایج و بحث

در جدول ۱، مقادیر نشت محاسبه شده به روش‌های مختلف ارائه شده‌اند. بررسی ظاهری مقادیر نشت، نشان می‌دهد که روش آفنگندن مقدار نشت را خیلی بیشتر از سایر روش‌ها برآورد کرده است؛ در حالی که کمترین مقادیر نشت مربوط به روش‌های اینگهام، مولس ورث-ینی دومیا و پنجاب هند است. در جدول ۲، نیز مشخصه‌های آماری مقایسه روش‌های تجربی با روش دبی ورودی- خروجی ارائه شده است. طبق جدول ۲، با توجه به کلیه آماره‌ها، روش موریتز کمترین تفاوت را با روش مینا، که در اینجا روش دبی ورودی- خروجی است، نشان می‌دهد. میزان خطای متوسط مطلق این روش حدود ۴۹٪ است. در بقیه روش‌ها میزان خطا یا تفاوت با روش مینا بسیار زیاد و در بیشتر موارد بیشتر از ۱۰۰٪ است (اعداد بزرگ‌تر از ۱). جدول ۳، نتایج آزمون آماری t را برای مقایسه روش‌های مختلف برآورد نشت نشان می‌دهد.

نتایج مقایسه روش‌های مختلف برآورد نشت با استفاده از آزمون t نشان داد که در اغلب موارد، تفاوت میزان نشت برآورد شده بین روش‌های برآورد نشت در سطح ۵٪ معنی‌دار است؛ اما تفاوت روش موریتز با روش دبی ورودی- خروجی، روش اینگهام با روش مولس ورث-ینی دومیا و روش پنجاب هند، روش مولس ورث-ینی دومیا با روش پنجاب هند و روش گارگ با روش دیویس ویلسون در سطح ۵٪ معنی‌دار نیست. در جداول ۴ تا ۸، مقادیر ضریب اصلی و اصلاح‌شده و خطای نسبی برآورد نشت از هر معادله نشان داده شده است. جدول ۹، پارامترهای آماری ضرایب معادلات نشت اصلاح‌شده بر اساس روش دبی ورودی- خروجی نشان داده شده است. جداول ۴ و ۹ نشان می‌دهد که خطای برآورد نشت با استفاده از ضریب اصلی معادله اینگهام (قبل از واسنجی) در مقایسه با روش دبی ورودی- خروجی برای همه نقاط اندازه‌گیری بیش از ۹۰٪ و زیاد است؛ اما پس از واسنجی، خطای برآورد این معادله به حدود ۱/۴ تا ۱۱/۲ کاهش یافت. ضریب تغییرات ضرایب اصلاح‌شده برای سه کانال به ترتیب حدود ۸٪، ۶٪ و ۲۰٪ و برای کل نقاط اندازه‌گیری حدود ۱۵٪ است (جدول ۹). با توجه به کمبود ضرایب تغییرات بین سه نقطه یا سه تکرار در هر کانال، می‌توان از مقادیر میانگین ضرایب اصلاح‌شده در سه نقطه اندازه‌گیری که برای کانال‌های حسن‌آباد، منصوریه و جنت‌شهر به ترتیب

۸۱/۲۷، ۶۵/۴۰ و ۷۲/۸۷ هستند، برای برآورد نشت در کل کانال استفاده کرد. حتی به علت مقدار کم ضریب تغییرات، از میانگین ضرایب معادله اینگهام در کل ۹ نقطه اندازه‌گیری شده (۷۳/۱۸)، می‌توان به‌عنوان ضریب واسنجی‌شده برای کل سه کانال استفاده کرد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که خطای استفاده از ضرایب اصلی معادله مولس ورث-ینی دومیا بر اساس داده‌های روش دبی ورودی- خروجی بیش از ۹۰٪ بوده که زیاد است. پس از واسنجی، خطای این معادله به کمتر از ۱۰٪ رسید و قابل قبول است. ضریب تغییرات ضرایب اصلاح‌شده برای کانال حسن‌آباد حدود ۷٪ است و از میانگین ضرایب نشت (۰/۰۵۳۳) نیز می‌توان برای برآورد نشت استفاده کرد. ضرایب تغییرات ضرایب اصلاح‌شده در کانال منصوریه و جنت‌شهر به ترتیب حدود ۲۶ و ۲۲ درصد بوده که نسبتاً زیاد است. ضریب تغییرات کل ضرایب واسنجی‌شده حدود ۱۸٪ است و می‌توان با احتیاط از میانگین این ضرایب (۰/۰۴۹۱) برای کل منطقه استفاده کرد. جدول ۶ نشان می‌دهد که خطای برآورد نشت با استفاده از معادله اصلی دیویس ویلسون در مقایسه با روش دبی ورودی- خروجی زیاد است. جدول ۹ نشان می‌دهد که ضرایب تغییرات ضرایب اصلاح‌شده برای سه کانال مورد بررسی و مجموع نقاط به ترتیب حدود ۶، ۳۸، ۲۴ و ۲۳ درصد است؛ بنابراین، فقط از میانگین ضرایب اصلاح‌شده کانال حسن‌آباد (۲۸۹/۲) می‌توان در نقاط دیگر این کانال استفاده کرد. جدول ۵ نشان می‌دهد که خطای نسبی برآورد نشت از روش موریتز در مقایسه با روش دبی ورودی- خروجی زیاد و بیشتر از ۹۰٪ است که پس از واسنجی، در بیشتر حالات این خطا به کمتر از ۱۰٪ می‌رسد. جدول ۹ نشان می‌دهد که ضرایب تغییرات ضرایب نشت واسنجی‌شده نیز در هر کانال زیاد است؛ بنابراین، در این کانال نیز مقادیر واسنجی‌شده فقط برای همان نقاط اندازه‌گیری قابل استفاده‌اند و قابل تعمیم نیستند. تحقیقات سالمی و سپاس‌خواه (۱۳۸۵) نشان داد که معادله اینگهام و موریتس پس از اصلاح، از نظر تطابق با داده‌های اندازه‌گیری شده بیشترین ضریب تعیین را دارند و دقیق‌ترند؛ اما روش میسرا برای منطقه مورد مطالعه بیشتر قابل استفاده است.

جدول ۱- مقادیر نشت محاسبه شده به روش‌های مختلف (مترمکعب بر مترمربع در روز)

کانال	نقاط اندازه‌گیری	دبی خروجی - دبی ورودی	اینگهام	مولس ورت - ینی دومیا	دیویس ویلسون	میسرا	موریتز	پنجاب هند	آفنگندن	آبیاری مصر	گارگ
حسن آباد	۱	1/452	0/063	0/061	0/089	0/400	1/822	0/059	16/834	0/131	0/105
	۲	1/553	0/062	0/060	0/088	0/400	1/876	0/057	17/680	0/131	0/105
	۳	1/578	0/074	0/070	0/099	0/400	1/462	0/081	12/706	0/131	0/104
منصوریه	۱	1/695	0/048	0/054	0/080	0/400	1/667	0/058	14/615	0/131	0/104
	۲	1/315	0/047	0/071	0/079	0/400	1/856	0/056	12/914	0/131	0/104
	۳	1/139	0/046	0/047	0/077	0/400	1/193	0/052	12/462	0/131	0/104
جنت شهر	۱	0/907	0/081	0/060	0/128	0/400	2/720	0/068	18/437	0/118	0/085
	۲	1/312	0/084	0/063	0/130	0/400	2/402	0/071	21/639	0/126	0/096
	۳	1/211	0/081	0/061	0/128	0/400	1/322	0/068	14/994	0/126	0/096

جدول ۲- پارامترهای آماری مربوط به اختلاف روش‌های تجربی با روش دبی ورودی - خروجی

آماره	اینگهام	مولس ورت - ینی دومیا	دیویس ویلسون	میسرا	موریتز	پنجاب هند	آفنگندن	آبیاری مصر	گارگ
RMSE	1/308	1/311	1/275	0/979	0/748	1/309	14/760	1/244	1/271
NRMSE	1/659	1/663	1/617	1/242	0/949	1/660	18/719	1/578	1/612
PRMSE	96/8	97/0	94/4	72/5	55/4	96/9	1092/4	92/1	94/1
AME	1/286	1/291	1/252	0/951	0/494	1/288	14/458	1/223	1/251
CHISQ	256/01	257/67	158/82	21/57	2/01	248/45	119/07	107/49	143/15
PR	0/000	0/000	0/000	0/006	0/981	0/000	0/000	0/000	0/000

جدول ۳- مشخصه‌های آماری تفاوت روش‌های مختلف بر آورد نشت بر اساس داده‌های روش دبی ورودی - خروجی به کمک آزمون t

ردیف	روش	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندارد میانگین	فاصله اطمینان پائینی	فاصله اطمینان بالایی	مقدار t	سطح معنی داری
۱	دبی ورودی - خروجی - اینگهام	1/286	0/252	0/084	1/093	1/480	15/322	0/000
۲	دبی ورودی - خروجی - مولس ورت	1/291	0/245	0/082	1/102	1/479	15/790	0/000
۳	دبی ورودی - خروجی - دیویس ویلسون	1/252	0/258	0/086	1/053	1/450	14/525	0/000
۴	دبی ورودی - خروجی - میسرا	0/951	0/246	0/082	0/762	1/141	11/587	0/000
۵	دبی ورودی - خروجی - موریتز	-0/462	0/624	0/208	-0/942	0/018	-2/220	0/057 ^{ns}
۶	دبی ورودی - خروجی - پنجاب هند	1/288	0/246	0/082	1/099	1/477	15/679	0/000
۷	دبی ورودی - خروجی - آفنگندن	-14/46	3/15	1/05	-16/88	-12/04	-13/77	0/000
۸	دبی ورودی - خروجی - مصر	1/223	0/243	0/081	1/036	1/410	15/101	0/000
۹	دبی ورودی - خروجی - گارگ	1/251	0/241	0/080	1/066	1/436	15/560	0/000
۱۰	اینگهام - مولس ورت	0/004	0/015	0/005	-0/007	0/016	0/879	0/405 ^{ns}
۱۱	اینگهام - دیویس ویلسون	-0/035	0/009	0/003	-0/042	-0/027	-11/086	0/000
۱۲	اینگهام - میسرا	-0/335	0/016	0/005	-0/347	-0/323	-64/501	0/000
۱۳	اینگهام - موریتز	-1/748	0/486	0/162	-2/122	-1/374	-10/786	0/000
۱۴	اینگهام - پنجاب هند	0/002	0/010	0/003	-0/006	0/009	0/538	0/605 ^{ns}
۱۵	اینگهام - آفنگندن	-15/74	3/09	1/03	-18/12	-13/37	-15/30	0/000
۱۶	اینگهام - مصر	-0/063	0/019	0/006	-0/078	-0/049	-10/045	0/000
۱۷	اینگهام - گارگ	-0/035	0/021	0/007	-0/051	-0/019	-5/065	0/001
۱۸	مولس ورت - دیویس ویلسون	-0/039	0/022	0/007	-0/056	-0/022	-5/257	0/001
۱۹	مولس ورت - میسرا	-0/339	0/007	0/002	-0/345	-0/334	-138/5	0/000

ادامه جدول ۳- به کمک آزمون t

ردیف	روکش	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندارد میانگین	فاصله اطمینان پائینی	فاصله اطمینان بالایی	مقدار t	سطح معنی داری
۲۰	مولس ورث- موریتز	-1/753	0/491	0/164	-2/130	-1/375	-10/700	0/000
۲۱	مولس ورث- پنجاب هند	-0/003	0/008	0/003	-0/009	0/004	-0/953	0/369 ^{ns}
۲۲	مولس ورث- آنگندن	۵-15/7	۱۰۰/3	1/03	۳-18/1	-13/37	-15/25	0/000
۲۳	مولس ورث- مصر	-0/068	0/009	0/003	-0/074	-0/061	-23/519	0/000
۲۴	مولس ورث- گارگ	-0/040	0/010	0/003	-0/047	-0/032	-11/777	0/000
۲۵	دیویس ویلسون- میسرا	-0/300	0/023	0/008	-0/318	-0/283	-39/768	0/000
۲۶	دیویس ویلسون- موریتز	-1/714	0/482	0/161	-2/084	-1/343	-10/663	0/000
۲۷	دیویس ویلسون- پنجاب هند	0/036	0/018	0/006	0/023	0/050	6/124	0/000
۲۸	دیویس ویلسون- آنگندن	۱-15/7	3/08	1/03	-18/08	-13/34	-15/29	0/000
۲۹	دیویس ویلسون- مصر	-0/029	0/026	0/009	-0/049	-0/008	-3/256	0/012
۳۰	دیویس ویلسون- گارگ	-0/001	0/029	0/010	-0/023	0/021	-0/058	0/955 ^{ns}
۳۱	میسرا- موریتز	-1/413	0/493	0/164	-1/792	-1/034	-8/598	0/000
۳۲	میسرا- پنجاب هند	0/337	0/009	0/003	0/330	0/344	109/229	0/000
۳۳	میسرا- آنگندن	-15/41	3/10	1/03	-17/79	-13/03	-14/93	0/000
۳۴	میسرا- مصر	0/272	0/004	0/001	0/268	0/275	182/039	0/000
۳۵	میسرا- گارگ	0/300	0/007	0/002	0/294	0/305	132/192	0/000
۳۶	موریتز- پنجاب هند	1/750	0/491	0/164	1/372	2/128	10/684	0/000
۳۷	موریتز- آنگندن	-13/10	2/73	0/91	-16/09	-11/90	-15/39	0/000
۳۸	موریتز- مصر	1/685	0/496	0/165	1/303	2/066	10/186	0/000
۳۹	موریتز- گارگ	1/713	0/498	0/166	1/330	2/096	10/325	0/000
۴۰	پنجاب هند- آنگندن	-15/75	3/10	1/03	-18/13	-13/37	-15/26	0/000
۴۱	پنجاب هند- مصر	-0/065	0/012	0/004	-0/074	-0/056	-16/743	0/000
۴۲	پنجاب هند- گارگ	-0/037	0/013	0/004	-0/047	-0/027	-8/245	0/000
۴۳	آنگندن- مصر	15/681	3/100	1/033	13/298	18/063	15/176	0/000
۴۴	آنگندن- گارگ	15/709	3/101	1/034	13/325	18/092	15/198	0/000
۴۵	مصر- گارگ	0/028	0/002	0/001	0/026	0/030	35/602	0/000

جدول ۴- ضرایب اصلی و اصلاح شده معادله اینگهام و مولس ورث- بینی دومیا در کانال های مختلف

نام کانال	مکان اندازه گیری	ضریب اصلی	خطای نسبی معادله اصلی (%)	ضریب اصلاح شده	خطای نسبی معادله اصلاح شده (%)
حسن آباد	۱	۳/۵	۰/۰۰۲۲	۸۰/۹	۰/۰۵۲۶
	۲	۳/۵	۰/۰۰۲۲	۸۸/۱	۰/۰۵۷۰
	۳	۳/۵	۰/۰۰۲۲	۷۴/۸	۰/۰۴۹۸
منصوریه	۱	۲/۵	۰/۰۰۱۸	۶۲/۵	۰/۰۵۶۹
	۲	۲/۵	۰/۰۰۱۸	۶۹/۷	۰/۰۳۳۵
	۳	۲/۵	۰/۰۰۱۸	۶۴/۰	۰/۰۴۳۵
جنت شهر	۱	۴/۵	۰/۰۰۲۵	۶۰/۳	۰/۰۳۷۶
	۲	۴/۵	۰/۰۰۲۵	۸۹/۳	۰/۰۵۹۳
	۳	۴/۵	۰/۰۰۲۵	۶۹/۰	۰/۰۴۹۸

جدول ۵- ضرایب اصلی و اصلاح‌شده معادله دیویس-ویلسون و موریتز در کانال‌های مختلف

نام کانال	مکان اندازه‌گیری	ضریب اصلی	خطای نسبی معادله اصلی (%)	ضریب اصلاح‌شده	خطای نسبی معادله اصلاح‌شده (%)
حسن‌آباد	۱	۱۷/۵	۰/۵۳۵	۲۸۶/۰	۰/۴۲۶
	۲	۱۷/۵	۰/۵۳۵	۳۰۹/۵	۰/۴۴۳
	۳	۱۷/۵	۰/۵۳۵	۲۷۹/۰	۰/۵۷۷
منصوریه	۱	۱۵	۰/۴۱۰	۳۱۸/۰	۰/۴۱۷
	۲	۱۵	۰/۴۱۰	۱۴۱/۹	۰/۲۳۳
	۳	۱۵	۰/۴۱۰	۲۵۰/۶	۰/۳۱۶
جنت‌شهر	۱	۲۵	۰/۶۶۰	۱۷۷/۶	۰/۳۴۶
	۲	۲۵	۰/۶۶۰	۲۹۳/۷	۰/۶۰۴
	۳	۲۵	۰/۶۶۰	۲۴۲/۹	۰/۲۲۰

می‌دهد که ضرایب تغییرات ضرایب نشت واسنجی‌شده نیز در هر کانال زیاد است؛ بنابراین، در این کانال نیز مقادیر واسنجی‌شده فقط برای همان نقاط اندازه‌گیری قابل استفاده‌اند و قابل تعمیم نیستند.

جدول ۶ نشان می‌دهد که خطای نسبی برآورد نشت از روش پنجاب هند در مقایسه با روش دبی ورودی-خروجی نیز زیاد است. این خطا پس از واسنجی معادله برای کانال‌های حسن‌آباد، منصوریه و جنت‌شهر به ترتیب به حدود ۸، ۲۴ و ۲۷ درصد رسیده است. جدول ۹ نشان

جدول ۶- ضرایب اصلی و اصلاح‌شده معادله پنجاب هند و میسرا در کانال‌های مختلف

نام کانال	مکان اندازه‌گیری	ضریب اصلی	خطای نسبی معادله اصلی (%)	ضریب اصلاح‌شده	خطای نسبی معادله اصلاح‌شده (%)
حسن‌آباد	۱	۱/۴۵	۱	۳۵/۹۴	۳/۶۳
	۲	۱/۴۵	۱	۳۹/۸۳	۳/۸۸
	۳	۱/۴۵	۱	۲۸/۲۵	۳/۹۴
منصوریه	۱	۱/۲۵	۱	۳۶/۲۵	۴/۲۴
	۲	۱/۲۵	۱	۱۵/۴۰	۱/۹۴
	۳	۱/۲۵	۱	۲۷/۲۳	۳/۲۹
جنت‌شهر	۱	۱/۶۵	۱	۲۲/۰۷	۲/۲۷
	۲	۱/۶۵	۱	۴۹/۲۴	۳/۲۸
	۳	۱/۶۵	۱	۳۰/۳۴	۲/۸۹

واسنجی برای هر سه کانال مورد بررسی حدود ۲۰٪ بوده است. طبق جدول ۷، استفاده از معادله آفنگدن خطای زیادی را در تخمین نشت کانال‌های موردنظر به دنبال دارد که البته پس از واسنجی خطای برآورد نشت برای سه کانال مورد بررسی به حدود ۱۳، ۹ و ۷ درصد می‌رسد. جدول ۹ نشان می‌دهد که پس از اصلاح ضرایب، ضریب

جدول ۶ نشان می‌دهد که خطای برآورد نشت توسط معادله میسرا در مقایسه با روش دبی ورودی-خروجی، در هر سه کانال زیاد است. پس از واسنجی، ضریب تغییرات به دست آمده برای کانال حسن‌آباد حدود ۴٪ بوده که قابل قبول است؛ بنابراین، میانگین ضریب ۳/۸۲ را می‌توان برای این کانال توصیه کرد. خطای این معادله پس از

و ۰/۶۳ را برای سه کانال مورد بررسی و مقدار ۰/۶۹ را برای هر سه کانال توصیه و استفاده کرد.

تغییرات ضرایب برای سه کانال به ترتیب حدود ۷، ۱۴ و ۶ درصد و برای کل اندازه گیری ها حدود ۱۱% بوده که قابل قبول است؛ بنابراین، می توان مقادیر متوسط ۰/۷۳، ۰/۷۲

جدول ۷- ضرایب اصلی و اصلاح شده معادله آفنگندن و اداره آبیاری مصر در کانال های مختلف

نام کانال	مکان اندازه گیری	ضریب اصلی	خطای نسبی معادله اصلی (%)	ضریب اصلاح شده	خطای نسبی معادله اصلاح شده (%)
حسن آباد	۱	۱/۹۰	۱	۰/۶۹۹	۱۱/۰
	۲	۱/۹۰	۱	۰/۷۰۶	۱۱/۸
	۳	۱/۹۰	۱	۰/۷۹۱	۱۲/۱
منصوریه	۱	۱/۹۰	۱	۰/۸۰۷	۱۲/۹
	۲	۱/۹۰	۱	۰/۶۰۸	۸/۷
	۳	۱/۹۰	۱	۰/۷۳۱	۱۰/۰
جنت شهر	۱	۱/۹۰	۱	۰/۶۷۱	۷/۷
	۲	۱/۹۰	۱	۰/۵۹۹	۹/۲
	۳	۱/۹۰	۱	۰/۶۳۴	۱۰/۳

جدول ۱۰، پارامترهای آماری مربوط به صحت سنجی معادلات تجربی نشت را نشان می دهد. نتایج نشان داد که خطای مطلق میانگین در روش های اینگهام، مولسورث-ینی دومیا، دیویس ویلسون، موریتز و آفنگندن کمتر از ۱۰ درصد و در دو روش میسرا و پنجاب هند حدود ۲۰ درصد و در روش های آبیاری مصر و گارگ بین ۱۶ تا ۱۹ درصد است. بررسی سایر خطاها نیز نشان داد که اعتبار روش یا مدل های مورد بررسی، به ترتیب اینگهام، مولسورث-ینی دومیا، موریتز، دیویس ویلسون، آفنگندن، گارگ، آبیاری مصر، میسرا و پنجاب هند است. مقایسه نتایج قبل از واسنجی و بعد از صحت سنجی نشان می دهد که روش میسرا قبل از واسنجی، خطای کمتری نسبت به سایر روش ها داشته است (به جز نسبت به روش موریتز)؛ اما در صحت سنجی جزء روش هایی قرار گرفته که از اعتبار کمتری برخوردار است. همچنین، روش موریتز قبل از واسنجی دارای کمترین خطا بوده و پس از صحت سنجی نیز خطای قابل قبولی (کمتر از ۱۰%) دارد.

جدول ۷ نشان می دهد که خطای برآورد نشت توسط معادله اداره آبیاری مصر در مقایسه با روش دبی ورودی-خروجی، در هر سه کانال زیاد است که پس از واسنجی به حدود ۱۸% می رسد. پس از واسنجی، ضریب تغییرات به دست آمده برای کانال حسن آباد حدود ۵% بوده که قابل قبول است؛ بنابراین، میانگین ضریب ۱۱/۶۳ را می توان برای این کانال توصیه کرد (جدول ۹). ضریب تغییرات به دست آمده برای ضرایب مربوط به کانال جنت شهر و مجموع هر سه کانال به ترتیب حدود ۱۴ و ۱۶ درصد است که تقریباً قابل قبول است و می توان مقادیر ضرایب ۹/۰۷ و ۱۰/۴۱ را با پذیرفتن مقداری خطا توصیه کرد. جدول ۸ نیز نشان می دهد که خطای تخمین نشت به وسیله معادله گارگ زیاد است و پس از واسنجی از میانگین ضریب ۱۴/۶۳ با ضریب تغییرات حدود ۵% می توان برای کانال حسن آباد استفاده کرد. از میانگین ضریب ۱۲/۳ نیز در کانال جنت شهر با ضریب تغییرات ۱۲% می توان با احتیاط استفاده کرد (جدول ۹). میانگین خطای برآورد نشت پس از واسنجی این معادله حدود ۱۶% است.

جدول ۸- ضرایب اصلی و اصلاح شده معادله گارگ پنجاب در کانال‌های مختلف

نام کانال	مکان اندازه‌گیری	ضریب اصلی (فرضی)	خطای نسبی معادله اصلی (%)	ضریب اصلاح شده	خطای نسبی معادله اصلاح شده (%)
حسن‌آباد	۱	۱	۹۳	۱۳/۹	۱۳/۷
	۲	۱	۹۳	۱۴/۸	۱۹/۳
	۳	۱	۹۳	۱۵/۲	۱۸/۷
منصوریه	۱	۱	۹۴	۱۶/۳	۱۹/۷
	۲	۱	۸۷	۷/۴	۱۹/۷
	۳	۱	۹۲	۱۲/۶	۱۳/۲
جنت‌شهر	۱	۱	۹۱	۱۰/۷	۱۷/۷
	۲	۱	۹۳	۱۳/۶	۱۴/۳
	۳	۱	۹۲	۱۲/۶	۱۲/۸

جدول ۹- پارامترهای آماری ضرایب معادلات نشت اصلاح شده بر اساس روش دبی ورودی - خروجی

کانال	پارامتر آماری	گارگ	مصر	آفنگندن	پنجاب هند	موریتز	میسرا	دیویس ویلسون	مولس ورث	اینگهام
حسن‌آباد	میانگین	۱۴/۶۳	۱۱/۶۳	۰/۷۳	۳۴/۶۷	۰/۴۸	۳/۸۲	۲۸۹/۱۷	۰/۰۵۳۳	۸۱/۲۷
	انحراف معیار	۰/۶۷	۰/۵۷	۰/۰۵	۵/۸۹	۰/۰۸	۰/۱۶	۱۷/۶۱	۰/۰۰۳۵	۶/۶۶
	ضریب تغییرات	۴/۵۵	۴/۸۹	۷/۰۰	۱۷/۰۰	۱۷/۱۶	۴/۳۱	۶/۰۹	۶/۵۸	۸/۱۹
منصوریه	میانگین	۱۲/۱۰	۱۰/۵۳	۰/۷۲	۲۶/۲۹	۰/۳۲	۳/۱۶	۲۳۶/۸۳	۰/۰۴۵۰	۶۵/۴۰
	انحراف معیار	۴/۴۷	۲/۱۵	۰/۱۰	۱۰/۴۶	۰/۰۹	۱/۱۶	۸۸/۸۵	۰/۰۱۱۵	۳/۸۰
	ضریب تغییرات	۳۶/۹۵	۲۰/۴۱	۱۴/۰۴	۳۹/۷۷	۲۸/۶۲	۳۶/۶۱	۳۷/۵۲	۲۵/۶۳	۵/۸۱
جنت‌شهر	میانگین	۱۲/۳۰	۹/۰۷	۰/۶۳	۳۳/۸۸	۰/۳۹	۲/۸۱	۲۳۸/۰۷	۰/۰۴۹۰	۷۲/۸۷
	انحراف معیار	۱/۴۷	۱/۳۱	۰/۰۴	۱۳/۹۳	۰/۲۰	۰/۵۱	۵۸/۲۰	۰/۰۱۰۵	۱۴/۸۸
	ضریب تغییرات	۱۱/۹۸	۱۴/۳۹	۵/۶۷	۴۱/۱۰	۵۰/۱۹	۱۸/۱۰	۲۴/۴۵	۲۱/۵۰	۲۰/۴۲
همه نقاط	میانگین	۱۳/۰۱	۱۰/۴۱	۰/۶۹	۳۱/۶۲	۰/۴۰	۳/۲۶	۲۵۴/۶۹	۰/۰۴۹۱	۷۳/۱۸
	انحراف معیار	۲/۶۷	۱/۷۰	۰/۰۷	۱۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۷۷	۵۹/۷۲	۰/۰۰۸۸	۱۰/۸۳
	ضریب تغییرات	۲۰/۵۳	۱۶/۳۷	۱۰/۷۲	۳۱/۷۲	۳۳/۹۴	۲۳/۷۶	۲۳/۴۵	۱۷/۸۸	۱۴/۸۰

جدول ۱۰- پارامترهای آماری مربوط به صحت‌سنجی روش‌های تجربی برآورد نشت

آماره	اینگهام	مولس ورث - ینی دومیا	دیویس ویلسون	میسرا	موریتز	پنجاب هند	آفنگندن	آبیاری مصر	گارگ
RMSE	۰/۱۲۰	۰/۱۶۴	۰/۱۷۹	۰/۳۴۰	۰/۱۸۱	۰/۳۸۹	۰/۲۰۳	۰/۳۲۳	۰/۲۸۷
NRMSE	۰/۱۳۸	۰/۱۶۲	۰/۱۵۶	۰/۲۹۵	۰/۱۵۷	۰/۳۳۸	۰/۱۷۶	۰/۳۲۱	۰/۲۴۹
PRMSE	۷/۳۲	۹/۶۵	۱۰/۹۹	۲۰/۸۳	۱۱/۱۸	۲۳/۸۴	۱۲/۱۸	۱۹/۲۴	۱۷/۵۷
AME	۰/۰۶۹	۰/۰۸۱	۰/۰۹۷	۰/۲۰۰	۰/۰۹۲	۰/۱۹۶	۰/۰۹۹	۰/۱۸۵	۰/۱۶۵
CHISQ	۰/۰۷۷	۰/۱۵۱	۰/۱۹۰	۰/۷۵۷	۰/۱۸۷	۰/۶۳۰	۰/۲۲۵	۰/۶۵۸	۰/۵۱۰
PR	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، میزان نشت آب در سه کانال آبیاری واقع در دشت داراب فارس، با ۹ روش تجربی برآورد و با داده‌های اندازه‌گیری شده مستقیم مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با توجه به پارامترهای آماری مختلف

و آزمون مربع کای، به‌طور کلی معادلات تجربی و اسنجی‌نشده برآورد نشت، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، تطابق خوبی با روش مبنا که روش دبی ورودی - خروجی بود، نداشته‌اند. از میان این معادلات، معادله موریتز بیشترین تطابق را با روش مبنا داشته است.

۳. بهراملو ر. ۱۳۹۰. ارزیابی تلفات نشت در کانال‌های آبیاری با پوشش سنگی در مناطق سردسیر و تأثیر آن بر ذخایر منابع آب (مطالعه موردی در استان همدان). مجله پژوهش آب ایران. ۵(۹): ۱۴۱-۱۵۰.
۴. پایدار ز. ۱۳۷۰. مدل ریاضی تلفات نشت از کانال‌های آبیاری، مجله آب. ۱۰: ۱۵-۲۲.
۵. حیدری زاده م. و سالمی ح. ر. ۱۳۹۳. بررسی کاربرد معادله تجربی اینگهام و معادله تئوری ودرنیکو در برآورد نشت آب از کانال‌های منطقه رودش اصفهان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸(۴): ۷۰۳-۷۱۲.
۶. سالمی ح. ر. و سپاسخواه ع. ر. ۱۳۸۵. اصلاح معادلات تجربی نشت آب از کانال در منطقه رودش اصفهان، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۰(۱): ۲۹-۴۲.
۷. شاهرخ نیا م. ع. و زارع ا. ۱۳۹۳. بررسی فنی و اقتصادی پوشش کانال‌های آبیاری شهرستان داراب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۸): ۴۲-۵۰.
۸. کشکولی ح. ع. ۱۳۶۶. یک بررسی مختصر میزان و علل تلفات آب در تعدادی از کانال‌های خاکی خوزستان. مجله علوم کشاورزی. ۱۸: ۱-۱۳.

9. Akkuzu E. 2012. Usefulness of Empirical Equations in Assessing Canal Losses through Seepage in Concrete-Lined Canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(5): 445-460.
10. Akkuzu E. Unal H. B. and Karatas B. S. 2007. Determination of water conveyance loss in the Menemen open channel irrigation network. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 31: 11-22.
11. Arshad M. 2004. Contribution of irrigation conveyance system components to the recharge potential in Rechna Doab under lined and unlined options. Ph. D. thesis, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan.
12. Bakry M. F. and Awad A. A. 1997. Practical estimation of seepage losses along earthen canals in Egypt. *Water Resources Management*. 11: 197-206.
13. Iqbal Z. MacLean R. T. Taylor B. D. Hecker F. J. and Bennet D. R. 2002. Seepage losses from irrigation canals in southern Alberta. *Canadian Biosystems Engineering*. 44: 1.21-1.27.

مقایسه معادلات مختلف با آزمون t نیز نشان داد که تفاوت معادله موریتز با روش دبی ورودی- خروجی در سطح ۵٪ معنی‌دار نیست. همچنین، معادلات اینگهام، مولس ورث-ینی دومیا و پنجاب هند تفاوت معنی‌داری با هم ندارند. معادله گارگ با معادله دیویس ویلسون تفاوت معنی‌داری نداشته است. پس از انجام واسنجی و صحت‌سنجی معادلات در شرایط اجرای این تحقیق، نتایج نشان داد که معادله های واسنجی شده اینگهام، مولس ورث-ینی دومیا، دیویس ویلسون، موریتز و آفنگندن با داشتن خطای نسبی کمتر از ۱۰٪ تطابق خوبی با روش دبی ورودی- خروجی پیدا کرده‌اند. پس از این معادله ها، معادله گارگ، آبیاری مصر، میسرا و پنجاب هند، به ترتیب با داشتن خطاهایی حدود ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۰ درصد در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. بررسی ضرایب تغییرات معادلات اصلاح‌شده نشان می‌دهد که ضرایب معادلات آفنگندن و اینگهام، ضریب تغییرات کمی داشته است و می‌توان از مقدار میانگین مقادیر ضرایب واسنجی شده برای سه کانال استفاده کرد. همچنین، مقادیر میانگین ضرایب اصلاح‌شده معادلات مولس ورث-ینی دومیا، آبیاری مصر و گارگ نیز با داشتن خطای بیشتر، با احتیاط قابل تعمیم‌اند. به طور کلی، از میان روش‌های مورد بررسی، به ترتیب روش موریتز و روش میسرا دارای بیشترین و کمترین اعتبار بوده‌اند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از همکاری مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان فارس در انجام این تحقیق تشکر می‌کنند.

منابع

۱. آذری فرد جهرمی ح. شاهرخ نیا م. ع. و سنایی جهرمی س. ۱۳۹۴. برآورد میزان نشت آب در کانال‌های آبیاری پوشش شده شهرستان مرودشت با استفاده از مدل‌های SEEP/W و MSEP. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۹): ۹۴۸-۹۵۹.
۲. بهراملو ر. ۱۳۹۱. تأثیر پوشش بتنی بر کنترل تلفات نشت آب از کانال‌های آبیاری در استان همدان. مجله پژوهش آب ایران. ۶(۱۱): ۷۵-۸۳.

14. Kinzli K. D. Martinez M. Oad R. Prior A. and Gensler D. 2010. Using an ADCP to determine canal seepage loss in an irrigation district. *Agricultural water management*. 91: 801-810.
15. 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.
16. Mcleod A. J. 1996. Review of Murray Region Seepage Investigations, Catchment Processes and Modelling Branch, Department of Land and water Conservation, Paramatta. 168 p.
17. Rezapour Tabari M. M. and Mazak Mari M. 2016. The Integrated Approach of Simulation and Optimization in Determining the Optimum Dimensions of Canal for Seepage Control. *Water Resources Management*. 30: 1271-1292.
18. Sarki A. Memon S. Q. and Leghari M. 2008. Comparison of different methods for computing seepage losses in an earthen watercourse, *Agricultura Tropica et Subtropica*. 41(4): 197-205.
19. Tsay R. S. 2005. Analysis of financial time series, John Wiley & Sons. 448 p.
20. Yao L. Feng S. Mao X. Huo Z. Kang S. and Barry D. A. 2012. Coupled effects of canal lining and multi-layered soil structure on canal seepage and soil water dynamics. *Journal of Hydrology*. 430-431: 91-102.