مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۹/ شماره ۱/ بهار ۱۳۸۷/ص ۶۲-۴۹

کاربرد مدل‌های HEC-RAS و MIKE-11 در شبیه‌سازی جریان در کانال‌های آبیاری

محمدعلی شاهرخ‌نیا، محمود جوان و علیرضا کشاورزی*

* استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع‌طبیعی فارس، نشانی: زرقان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس، ص. پ. ۱۱۱-۷۳۴۱۵، تلفن: ۴۲۲۳۷۷۹(۰۷۱۲)؛ پیام‌نگار: shahrokhnia@farsagres.ir؛ و دانشیاران دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۶/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۹/۳

چکیده

با شبیه‌سازی جریان آب در کانال‌ها و شبکه‌های آبیاری می‌توان برخی از علل عملکرد ضعیف این سیستم‌ها را پیدا و راه حل مناسب را پیشنهاد کرد. مدل‌های ریاضی مناسب که اخیراً مورد توجه زیادی واقع شده است، می‌توانند ابزارهای مناسب جهت شبیه‌سازی جریان آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی باشند. در این تحقیق، دو مدل معروف HEC-RAS و MIKE-11 مقایسه و هیدرولیک جریان در یکی از کانال‌های درجه ۲ در شبکهٔ آبیاری و زهکشی درودزن فارس با این دو مدل بررسی شده است. سازه‌های کنترل‌کننده جریان آب در این شبکه عمدتاً از نوع روزنه‌های دریچه‌دار مستطیلی با بار ثابت و دریچه‌های قوسی هستند. در این تحقیق، از نرم‌افزار HEC-RAS که بیشتر برای بررسی هیدرولیک رودخانه کاربرد دارد، جهت شبیه‌سازی جریان ماندگار در شبکه مذکور استفاده و با مدل غیرماندگار MIKE-11 مقایسه شد. به دلیل محدودیت‌های موجود در مدل HEC-RAS، با استفاده از دو سری داده اندازه‌گیری‌شده آزمایشگاهی و میدانی، روابطی جدید برای تعیین دبی دریچه‌های قوسی آزاد به‌دست آمد و بر اساس آنها مدل تصحیح شد. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده دبی جریان، بازشدگی دریچه‌ها، و رقوم سطح آب در کانال اجرا و واسنجی و اعتبار آن تایید شد. برای مقایسهٔ مدل‌ها از چند پارامتر آماری استفاده شد. نتایج نشان داد که اولاً رابطهٔ جدید به دست آمده برای دریچه‌های قوسی رابطه‌ای است مناسب و ثانیاً، برای تجزیه و تحلیل هیدرولیک جریان در شبکه آبیاری درودزن و شبکه‌های مشابه با نرم‌افزار HEC-RAS، پس از تصحیح می‌تواند قابلیت بهتری نسبت به MIKE-11 داشته باشد. همچنین مشخص شد که فاصلهٔ محور دریچهٔ قوسی تا کف کانال عاملی مهم است که در روابط حاکم بر دریچه‌های قوسی باید به آن توجه شود.

واژه‌های کلیدی

دریچه قوسی، کانال آبیاری، هیدرولیک، HEC-RAS، MIKE-11

مقدمه

عملکرد بسیاری از شبکه‌های آبیاری در دنیا پایین‌تر از حد انتظار است که این موضوع بررسی همه جانبهٔ مسئله را طلب می‌کند. در شبکه‌های مدرن آبیاری و زهکشی از سازه‌های هیدرولیکی متعددی جهت تنظیم و توزیع آب استفاده می‌شود، از این رو نظارت وکنترل این سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد که درعین حال از نظر اجرایی مشکل و پرهزینه است. مدل‌های ریاضی می‌توانند ابزارهایی مناسب جهت بررسی این‌گونه سازه‌ها و افزایش عملکرد آنها باشند. داده‌های ورودی این مدل‌ها شامل مقاطع طولی و عرضی کانال در قسمت‌های مختلف، دبی ورودی به کانال (شرایط مرزی بالادست)، روابط دبی اشل در پایین‌دست کانال‌های فرعی (شرایط مرزی پایین‌دست)، ضریب زبری کانال، و مشخصات هندسی سازه‌های واقع بر

کانال مانند ابعاد و بازشدگی دریچه‌ها، سرریزها، و سازه‌های دیگر هستند. داده‌های خروجی این مدل‌ها مشتمل‌اند بر ارتفاع سطح آب، عمق آب، عدد فرود، سرعت جریان، و خصوصیات دیگر جریان در قسمت‌های مختلف کانال.

این مدل‌ها می‌توانند کاربرد های فراوانی در مدیریت کانال‌ها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی داشته باشند. برای نمونه می‌توان دبی جریان را در ابتدای کانال تغییر داد و تغییرات عمق آب و دبی قسمت‌های مختلف را بررسی کرد. می‌توان به‌ازای ضرایب زبری مختلف، تغییرات عمق آب در کانال و دبی کانال‌های فرعی را بررسی کرد. همچنین می‌توان بهترین بازشدگی دریچه‌ها را برای سناریوهای مختلف تحویل و توزیع آب به‌دست آورد. اخیرا این نرم‌افزارها کاربردهای فراوانی در اتوماسیون و کنترل از راه دورسازه‌های کنترل و تحویل آب پیدا کرده‌اند.

هر یک از این مدل‌ها بسته به هدف تهیه‌کننده مدل، فرضیات به کار رفته در نوشتن مدل، روابط ریاضی و هیدرولیکی مورد استفاده، و تکنیک‌های محاسبات عددی و برنامه‌نویسی، قابلیت‌های متفاوتی دارند و باید برای استفاده‌های مختلف بررسی شوند. تاکنون تعدادی از این مدل‌ها را مراجع مختلف معرفی و بررسی کرده‌اند. کانتراکتور و شرمنز (Contractor & Schuurmans, 1993) مدل‌های DUFLOW، CANAL، CARIMA، USM، و MODIS را بررسی کردند و USM را مناسب‌تر دانستند. زاجرز و مرکلی (Rogers & Merkly, 1993) نیز مدل USM را بررسی و نقاط قوت و ضعف مدل را بیان کردند. هالی و پاریش (Holly & Parish,1993) به بررسی مدل غیر ماندگار CARIMA پرداختند و نشان دادند مدل در شرایط جریان فوق بحرانی و بحرانی مناسب نیست. کلمنس و همکاران (Clemmens *et al.*, 1993) نیز به بررسی مدل DUFLOW پرداختند و آن را مدلی ساده و در عین حال مناسب دانستند. نوازبوتا و همکاران (Nawazbhutta *et al.*, 1996) مدل RAJBAH را بررسی و آن را مدلی مناسب برای تحلیل جریان در کانال معرفی کردند. میشرا و همکاران (Mishra *et al.*, 2001) به بررسی مدل MIKE-11 و کومار و همکاران (Kumar *et al.*, 2002) به بررسی مدل CANALMAN پرداختند و نتیجه گرفتند که این مدل‌ها مناسب‌اند.

یکی از مدل‌هایی که در سطح وسیع در دنیا برای بررسی هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها از آن استفاده شده است، HEC-RAS است که مهندسان ارتش امریکا (Anon, 2001) تهیه کرده‌اند. در مورد امکان استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی جریان و مدیریت شبکه‌های آبیاری، اطلاعات کمی به‌دست آمده است. مقایسهٔ مدل HEC-RAS با مدل معروف و گران‌قیمت MIKE-11 موضوعی جالب توجه است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود.

شبکه آبیاری و زهکشی درودزن در استان فارس یکی از شبکه‌های مهم آبیاری و زهکشی کشور است که عملکرد پایینی دارد و منافع اقتصادی مورد نظر را تامین نمی‌کند (Javan *et al.*, 2002). وجود دریچه‌های قوسی[1] متعدد و سازه‌های کنترلی دیگر، مدیریت شبکه آبیاری و زهکشی درودزن فارس را با پیچیدگی‌های خاصی روبه‌رو کرده است. معرفی مدل مناسب جهت تحقیقات و مطالعات بعدی روی این شبکه می‌تواند به افزایش عملکرد شبکه و بهبود توزیع آب کمک کند. در تحقیق حاضر ابتدا رابطهٔ دبی عبوری از دریچه‌های قوسی تحت جریان آزاد در مدل HEC-RAS تصحیح و پس از آن دقت دو مدل HEC-RAS و MIKE-11 در تخمین رقوم سطح آب

1- Radial Gate

در شبکهٔ آبیاری درودزن فارس ارزیابی و مقایسه می‌شود. علاوه بر این، روابط جدید به دست آمده برای دریچه‌های قوسی می‌تواند برای کلیهٔ دریچه‌های قوسی مشابه در دیگر شبکه‌های آبیاری کشور و حتی دنیا کاربرد داشته باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل‌های مورد استفاده

دو مدل مورد استفاده در این تحقیق HEC-RAS و MIKE-11 هستند. مدل HEC-RAS را که مهندسان ارتش آمریکا تهیه کرده‌اند می‌تواند هیدرولیک جریان یک بعدی را در آبراهه‌های طبیعی یا مصنوعی و در کانال‌های انتقال آب بررسی کند. در این مدل، رقوم سطح آب با حل معادلهٔ انرژی با روش گام به گام استاندارد[1] محاسبه می‌شود. مدل معروف دیگر که بیشتر برای حل و بررسی مسائل مربوط به جریانات غیرماندگار در رودخانه‌ها، کانال‌ها، و مصب‌ها کاربرد دارد MIKE-11 است که مؤسسهٔ هیدرولیک دانمارک (Anon, 2000) تهیه و عرضه کرده است. این مدل، معادلات پیوستگی و مومنتوم سنت و نانت[2] را با استفاده از روش ۶ نقطه‌ای ابوت[3] و تفاضل محدود ضمنی[4] حل کند و تخمینی از رقوم سطح آب، دبی، و دیگر پارامترهای هیدرولیکی را در مقاطع مختلف در اختیار کاربر قرار می‌دهد. تاکنون از دو مدل HEC-RAS و MIKE-11 برای مقاصد مختلفی استفاده شده است که بیشتر این کاربردها در مورد مطالعات هیدرولیک و رسوب در رودخانه‌ها بوده است و در مورد استفاده از این دو مدل در مدیریت کانال‌های آبیاری مطالعات اندکی بوده است. با توجه به اینکه اصول هیدرولیکی حاکم بر این مدل‌ها مختص رودخانه‌ها نیست قاعدتاً باید بتوان در بررسی و ارزیابی کانال‌ها و شبکه‌های آبیاری نیز از آنها استفاده کرد.

روش مقایسه مدل‌ها

برای استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان و مدل‌سازی کانال یا رودخانه، ابتدا باید مدل مورد نظر را برای منطقهٔ مورد بررسی واسنجی[5] کرد و پس از آن اعتبار[6] مدل را به اثبات رسانید. در تحقیق حاضر، برای مقایسهٔ دو مدل HEC-RAS و MIKE-11 از روش ارائه‌شده توسط کمیتهٔ مدل‌سازی هیدرولیکی کانال‌های آبیاری انجمن مهندسان عمران آمریکا (Anon, 1993) استفاده شده است. روش واسنجی و بررسی اعتبار هر مدل به این صورت است که دوسری دادهٔ اندازه‌گیری‌شده شامل عمق آب و دبی در قسمت‌های مختلف کانال، بازشدگی دریچه‌ها، رقوم‌سازه‌ها، و دیگر خصوصیات هندسی بازه مورد نظر تهیه می‌شود. علاوه بر این باید مشخص کرد که شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست مدل چه خواهد بود. از سری اول داده‌ها به منظور واسنجی و از سری دوم داده‌ها به منظور بررسی اعتبار مدل استفاده می‌شود. برای واسنجی پس از ورود خصوصیات هندسی بازه مورد بررسی به مدل، با استفاده از اولین سری داده اندازه‌گیری‌شده مدل اجرا و نتایج به دست آمده (عمق آب تخمین‌زده‌شده در قسمت‌های مختلف کانال) با نتایج اندازه‌گیری‌شده مقایسه می‌شود. پس از این مرحله، یک یا دو پارامتر ورودی مدل را که ارتباط مستقیمی با عمق آب در کانال دارند آن قدر تغییر می‌دهند تا تفاوت بین رقوم اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده توسط مدل حداقل شود. معمولاً با توجه به اینکه تخمین دقیق ضریب زبری مانینگ و ضریب دبی

1- Standard Step Method
2- Saint Venant Equations
3- Six-Point Abbott Scheme
4- Implicit Finite Difference Method
5- Calibration
6- Validation

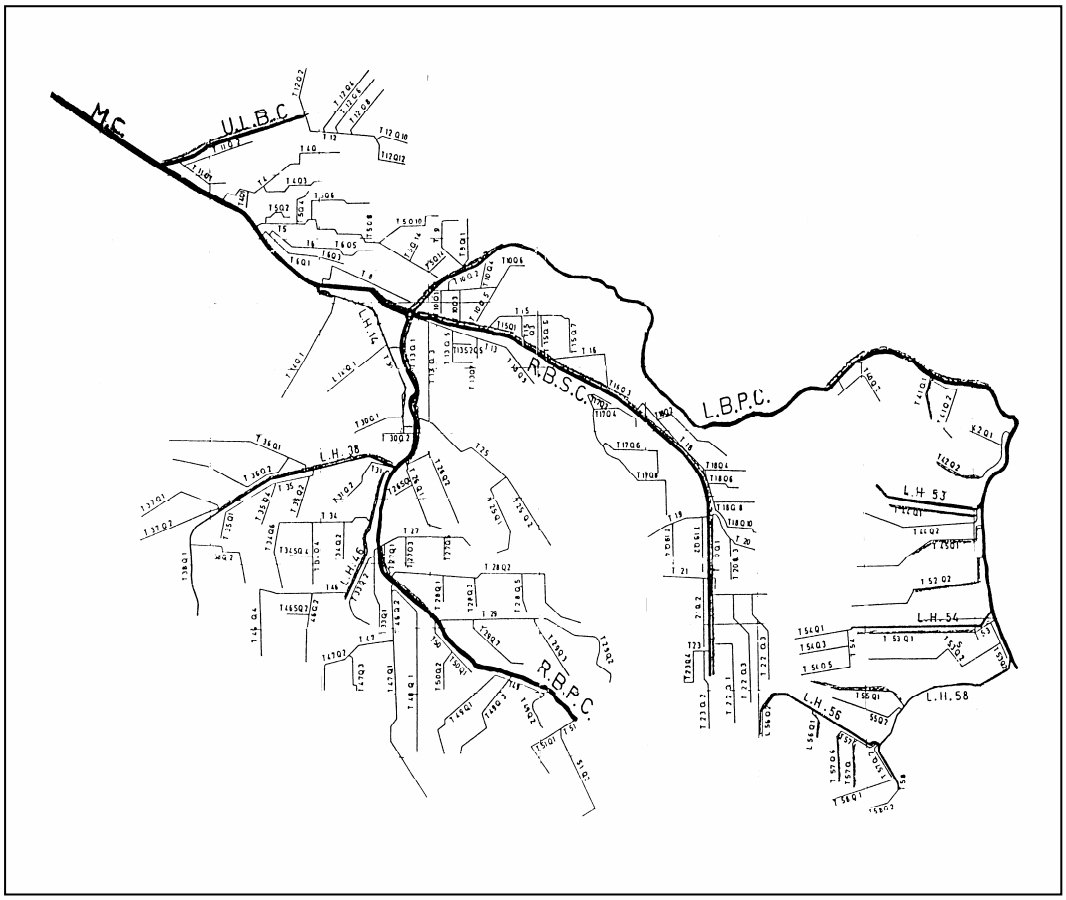
سازه‌ها وجود ندارد از این دو پارامتر استفاده می‌شود. پس از این کار می‌توان گفت که مدل مورد بررسی برای منطقهٔ مورد بررسی واسنجی شده است. آزمون مدل در این مرحله خاتمه نمی‌یابد و برای اطمینان از صحت استفاده‌های بعدی باید اعتبار آن را نیز بررسی کرد. برای این کار با ثابت نگه‌داشتن مقادیر پارامترهای مرحلهٔ واسنجی (ضریب زبری مانینگ و ضریب دبی سازه‌ها)، با استفاده از سری دوم داده‌های اندازه‌گیری، مدل اجرا و نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقایسه می‌شود. اگر در این مرحله تفاوت مقادیر اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده قابل اغماض بود می‌توان اعتبار مدل را برای شبیه‌سازی‌های دیگر در کانال مورد بررسی تایید کرد.

برای مقایسهٔ مدل‌های مختلف، جابرو و همکاران (Jabro *et al.*, 1998) شاخص‌هایی مانند متوسط خطای مطلق (MAE)[1]، خطای ماکزیمم (ME)[2]، خطای میانگین ریشه دوم (RMSE)[3]، راندمان یا کارایی مدل (EF)[4] و ضریب جرم باقیمانده (CRM)[5] را پیشنهاد کرده‌اند. به‌جز راندمان مدل که مقدار مطلوب آن اعداد نزدیک به ۱ است، مقدار مطلوب بقیه شاخص‌ها اعداد نزدیک به صفر است. در تحقیق حاضر از این شاخص‌ها به منظور مقایسهٔ دو مدل مورد بررسی استفاده شده است.

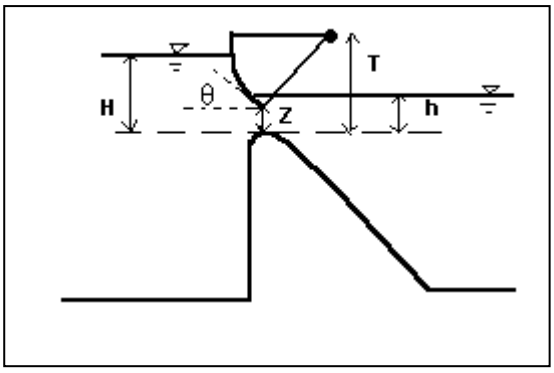
منطقهٔ مورد مطالعه

در تحقیق حاضر جهت بررسی و ارزیابی دو مدل HEC-RAS و MIKE-11، از قسمتی از شبکهٔ آبیاری دروزن فارس استفاده شده است. کانال مورد نظر، کانال درجه ۲ اردیبهشت (RBSC) است که ۲۲/۲۵ کیلومتر طول دارد و ۱۰ کانال درجه ۳ را تغذیه می‌کند. این کانال، ذوزنقه‌ای با پوشش سیمانی است و ۸ دریچهٔ قوسی واقع بر آن وظیفهٔ کنترل و تنظیم جریان آب را به عهده دارند. این دریچه‌ها عمق ثابت آب را برآبگیرهای واقع بر ابتدای کانال‌های درجه ۳ تامین و دبی پایین دست خود را تنظیم می کنند. آبگیرهای واقع بر ابتدای کانال‌های درجه ۳ از نوع روزنه‌های مستطیلی دریچه‌دار هستند. شکل‌های ۱ و ۲، نمای کلی شبکهٔ آبیاری درودزن، تصویر شماتیک یک دریچهٔ قوسی و عوامل موثر بر دبی عبوری از دریچه را نشان می‌دهند. شکل ۳ سازه‌های هیدرولیکی واقع بر کانال مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

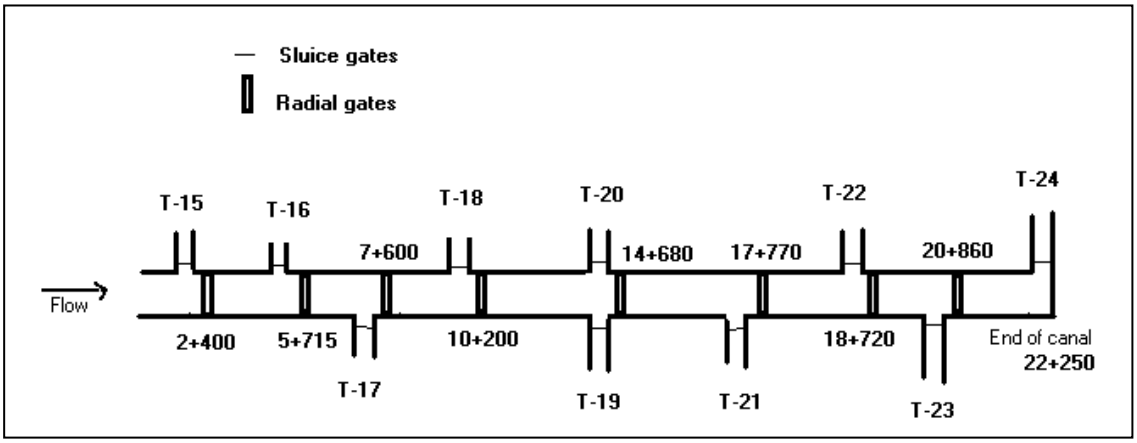
1- Mean Absolute Error
2- Maximum Error
3- Root Mean Square Error
4- Efficiency
5- Coefficient of Residual Mass



شکل ۱- کانال‌های آبیاری شبکهٔ درودزن



شکل ۲- دریچهٔ قوسی و پارامترهای مورد نیاز



شکل ۳- سازه‌های موجود بر کانال مورد مطالعه

روابط دریچه‌های قوسی در مدل HEC-RAS و MIKE-11

روابط مورد استفاده در دو مدل HEC-RAS و MIKE-11 جهت بررسی دریچه‌های کشویی تخت یکسان درحالی که روابط مورد استفاده جهت دریچه‌های قوسی متفاوت است. در مدل HEC-RAS از رابطهٔ زیر جهت تخمین دبی عبوری از دریچه‌های قوسی تحت جریان آزاد استفاده می‌شود:

$$Q = C\sqrt{2g}WT^{TE}Z^{ZE}H^{HE} \qquad (۱)$$

که در آن، Q= دبی جریان (بر حسب متر مکعب برثانیه)؛ C= ضریب دبی؛ W= عرض دریچه (بر حسب متر)؛ T= فاصلهٔ محور دریچه تا کف کانال (بر حسب متر)؛ H= بار آبی بالادست دریچه (بر حسب متر)؛ g= شتاب جاذبه (بر حسب متر بر مجذور ثانیه)؛ Z= مقدار بازشدگی دریچه (بر حسب متر)؛ TE= نمای پارامتر T (که مقدار توصیه‌شدهٔ آن ۰/۱۶ است)؛ ZE= نمای Z (که مقدار توصیه‌شدهٔ آن ۰/۷۲ است)؛ و HE= نمای پارامتر H است (که مقدار توصیه‌شدهٔ آن ۰/۶۲ است (Anon, 2001). رابطهٔ مورد استفاده جهت دریچه‌های قوسی مستغرق و همچنین دریچه‌های کشویی مستغرق و آزاد به‌صورت زیر است:

$$Q = CWZ\sqrt{2g(H-h)} \qquad (۲)$$

در این رابطه برای شرایط مستغرق، (H-h) تفاضل بار آبی بالادست و پایین دست دریچه است.

در مدل MIKE-11 از روابط زیرجهت تعیین دبی عبوری از دریچه‌های قوسی در شرایط آزاد و مستغرق استفاده می شود.

$$Q_{free} = \tau\frac{\delta}{\sqrt{1+Z\delta/H}}a\sqrt{2gH} \qquad (۳)$$

$$Q_{submerge} = \tau\frac{\delta}{\sqrt{1-(Z\delta/H)^2}}a\sqrt{2g(H-h)} \qquad (۴)$$

$$\delta = 1 - 0.75\left(\theta/90\right) + 0.36\left(\theta/90\right)^2 \qquad (۵)$$

در این روابط، τ= ضریب واسنجی دبی دریچهٔ قوسی در مدل؛ Z= بازشدگی دریچه؛ a= مساحت جریان عبوری از دریچه؛ δ= ضریب فشردگی جریان؛ و θ= زاویهٔ لبه دریچه با افق است.

رابطهٔ مورد استفاده در MIKE-11 جهت تعیین دبی دریچه‌های کشویی تخت تحت شرایط مستغرق و آزاد مشابه رابطهٔ ۲ است. در این دو مدل از ضریب دبی (C) و ضریب واسنجی دبی (τ) برای واسنجی مدل استفاده می‌شود.

ضریب دبی جریان عبوری از یک دریچه، در مقادیر مختلف دبی و عمق آب و همچنین هندسه دریچه ممکن است متغیر باشد، اما دراین مدل‌ها و مدل‌های مشابه معمولاً به جهت سادگی کار ضرایب دبی را ثابت در نظر می گیرند که از معایب و محدودیت‌های این گونه مدل‌ها محسوب می‌شود. در مدل HEC-RAS برای ضریب دبی یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. درتحقیق حاضر پارامترهای معادلات مورد استفاده در این مدل به گونه‌ای تعریف شده که این مشکل بر طرف شود و دقت محاسبات افزایش یابد. مدل این قابلیت را دارد که مقدار ضرایب C، TE، HE، و ZE توسط استفاده‌کننده تعریف شود. از طرف دیگر، چون ضریب دبی دریچه‌های قوسی تابع عمق آب، فاصلهٔ محور دریچه تاکف کانال، مقدار بازشدگی دریچه، و عوامل دیگر است، بنابراین می‌توان در رابطهٔ ۱ ضریب دبی (C) را به‌صورت تابعی از Z, H, T به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$C = D.T^{\alpha} H^{\beta} Z^{\gamma} \qquad (۶)$$

که درآن، γ ، β، α، و D= اعداد ثابتی هستند. علت در نظر گرفتن این شکل به‌خصوص برای ضریب دبی این است که در ترکیب با رابطهٔ ۶ بتوان تغییرات ضریب دبی را لحاظ کرد. بنابراین با در نظر گرفتن رابطه ۶، رابطهٔ ۱ را می‌توان به‌صورت زیرنوشت:

$$Q = D\sqrt{2g}WT^{(TE+\alpha)}Z^{(ZE+\gamma)}H^{(HE+\beta)} \qquad (۷)$$

و در نتیجه:

$$Q = D\sqrt{2g}WT^{p}Z^{q}H^{u} \qquad (۸)$$

بنابراین، در مدل می‌توان به‌جای C، TE، ZE، و HE به‌ترتیب مقادیر D، p، q، و u را جایگزین کرد. مزیت رابطهٔ ۸ نسبت به رابطهٔ ۱ این است که لازم نیست مقدار ضریب دبی ثابت فرض شود بلکه به‌صورت تابعی از بقیهٔ پارامترها در نظر گرفته می‌شود. قدم بعدی تخمین ضرایب D، p، q، و u است که برای این کار می‌توان از رگرسیون چند متغیرهٔ غیرخطی استفاده کرد.

در تحقیق حاضر، برای شرایط جریان آزاد مجموعاً از ۱۹۵ داده اندازه‌گیری‌شده و میدانی که محققان به شرح زیر گزارش داده‌اند استفاده شد: ۱۴۰ سری دادهٔ اندازه‌گیری‌شده از یک دریچهٔ قوسی در آزمایشگاه از بویالسکی (Buyalski, 1983)، ۸ دادهٔ اندازه‌گیری‌شده میدانی از شاهرخ نیا و جوان (Shahrokhnia & Javan, 2003)، هفت دادهٔ اندازه‌گیری‌شده میدانی از وبی (Webby, 1999)، و ۴۰ دادهٔ میدانی که از صفری نژاد (Safarinejhad, 1991). به علاوه، ضرایب D، p، q، و u با توجه به رابطهٔ ۸ و در دوحالت استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ آزمایشگاهی و داده‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ میدانی تخمین زده شد.

برای دریچهٔ قوسی مستغرق نیز مقدار ضریب دبی با استفاده از ۱۴۰۰ سری داده‌های اندازه‌گیری‌شده آزمایشگاهی و ۲۵۲ دادهٔ میدانی از بویالسکی (Buyalski,

(1983)، (از دریچه‌های مختلف)، ۲ سری دادهٔ میدانی از شاهرخ نیا و جوان (Shahrokhnia & Javan, 2003)، و ۱۰ سری دادهٔ میدانی از صفری نژاد (Safarinejhad, 1991)، از طریق رگرسیون چند متغیره غیرخطی به‌دست آمد. با تعیین مقادیر u، q، p، D و گذاشتن آن مقادیر به جای HE، ZE، TE، و C نقص مدل HEC-RAS برطرف شد و می‌توان از مدل برای شبیه‌سازی‌های مورد نظر استفاده کرد.

جهت مقایسه دو مدل HEC-RAS, MIKE-11 در کانال آبیاری مورد مطالعه دو سری داده دبی، بازشدگی دریچه و رقوم سطح آب در دو فصل آبیاری مختلف اندازه‌گیری و براساس این داده‌ها دو مدل مورد بحث اجرا و واسنجی شدند. از دبی اندازه‌گیری‌شده در ابتدای کانال اصلی به‌عنوان شرایط مرزی بالادست و از روابط دبی اشل در پایین‌دست ۱۰ آبگیر موجود که از طریق اندازه‌گیری به‌دست آمد به‌عنوان شرایط مرزی پایین دست مدل‌ها استفاده شد. مدل‌ها با استفاده از داده‌های سری اول اجرا و واسنجی شدند. برای واسنجی مدل‌ها طبق توصیهٔ کمیته مدل‌سازی هیدرولیکی کانال‌های آبیاری در انجمن مهندسان عمران آمریکا (Anon, 1993) از تغییرات ضریب زبری مانینگ و ضرایب دبی استفاده شد تا تفاوت مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه‌شده رقوم سطح آب و دبی حداقل شود. پس از این مرحله، با ثابت فرض‌کردن ضریب زبری، مدل‌ها با استفاده از سری دوم داده‌های اندازه‌گیری‌شده مجدداً اجرا گردیدند تا مقادیر محاسبه و اندازه‌گیری‌شده رقوم سطح آب یا دبی مقایسه شدند. از پارامترهای آماری توصیه‌شده توسط جابرو و همکاران (Jabro *et al*., 1998) نیز برای مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده استفاده شد. بدین ترتیب می‌توان مشخص کرد که کدام مدل نتایج دقیق‌تر و بهتری را جهت ارزیابی کانال آبیاری مورد مطالعه به دست می‌دهد.

نتایج و بحث

تصحیح روابط دریچه‌های قوسی در مدل HEC-RAS

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی توصیف‌شده در قسمت قبل و از طریق رگرسیون چند متغیره غیرخطی، ضرائب ثابت در رابطهٔ ۸ تخمین زده شدند. مقادیر به‌دست آمده برای ضرایب D، p، q، و u در شرایط آزمایشگاهی به‌ترتیب برابر است با ۰/۵۱، ۰/۱۵، ۰/۸۱، و ۰/۶۱ و خطای متوسط تخمین و ضریب تعیین (R^2) رابطه به‌دست آمده به‌ترتیب برابر است با ۲/۷ و ۹۹ درصد. بنابراین، رابطهٔ حاکم بر دریچهٔ قوسی آزاد به‌صورت زیر خواهد بود:

داده‌های آزمایشگاهی $$Q = 0.51\sqrt{2g}WT^{0.15}Z^{0.81}H^{0.61} \quad (۹)$$

داده‌های میدانی $$Q = 0.51\sqrt{2g}WT^{0.04}Z^{0.81}H^{0.61} \quad (۱۰)$$

با استفاده از داده‌های میدانی، خطای متوسط تخمین و ضریب تعیین (R^2) به‌دست آمده به ترتیب برابر با ۶/۵ و ۹۹ درصد است. شکل‌های ۴ و ۵ انطباق خوب دبی در واحد عرض تخمین‌زده‌شده از روابط ۹ و ۱۰ و مقادیر اندازه‌گیری‌شده دبی در واحد عرض دریچه را با خط Y=X نشان می‌دهند.

مشاهده می‌شود که در دو معادلهٔ به‌دست آمده کلیهٔ ضرایب مساوی‌اند به‌جز نمای ارتفاع محور دریچه از کف کانال (TE). این تفاوت نشان می‌دهد که روابط حاکم بر دریچه‌های قوسی در شرایط آزاد، بسته به ارتفاع محور دریچه (T) متفاوت خواهد بود. در این تحقیق، فاصلهٔ محور دریچه‌ها تا کف کانال در داده‌های آزمایشگاهی بین ۰/۴۰۹ تا ۰/۵۱۱ و در داده‌های میدانی بیشتر از ۰/۹ متر

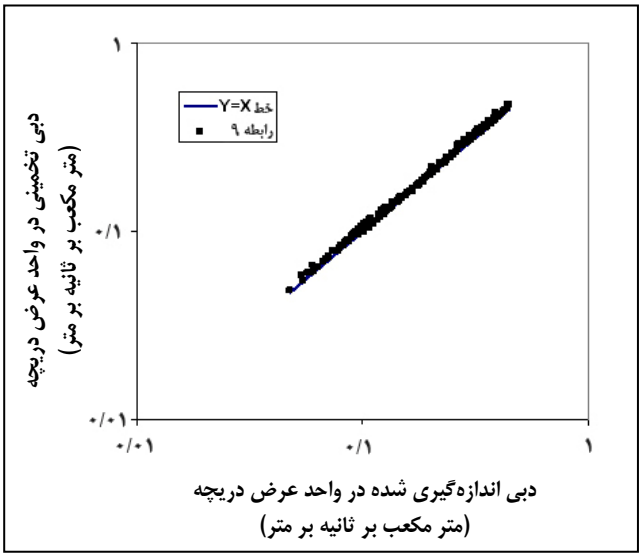
بوده است.

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده آزمایشگاهی و میدانی دریچهٔ قوسی در حالت مستغرق و رگرسیون چند متغیره غیر خطی، روابط زیر به‌دست می‌آید:

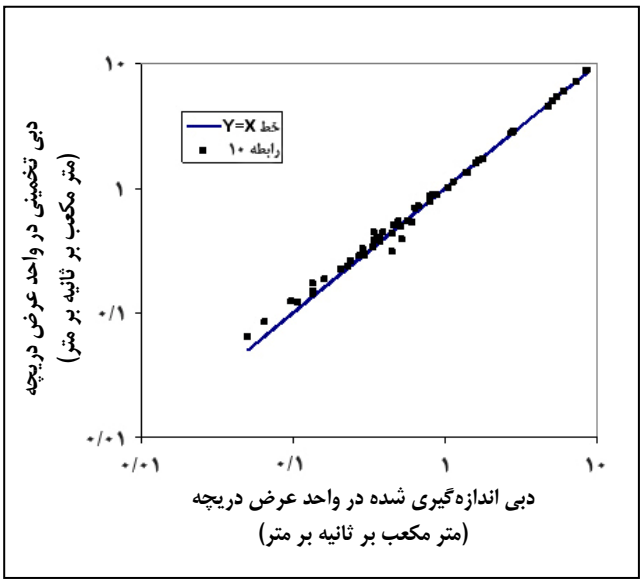
(۱۱) داده‌های آزمایشگاهی $Q = 0.89WZ\sqrt{2g(H-h)}$

(۱۲) داده‌های میدانی $Q = 0.79WZ\sqrt{2g(H-h)}$

در این دو رابطه، خطای متوسط تخمین به‌ترتیب ۴/۳ و ۴/۵ درصد و ضریب تعیین (R^2) به‌ترتیب ۹۹ و ۹۶ درصد است.



شکل ٤- مقایسه دبی‌های اندازه‌گیری‌شده و تخمینی از رابطهٔ ۹



شکل ٥- مقایسه دبی‌های اندازه‌گیری‌شده و تخمینی از رابطهٔ ۱۰

آزمون مدل‌ها

اجرای مکرر مدل HEC-RAS با ضرایب زبری مانینگ و ضریب دبی‌های مختلف نشان داد که به‌ازای ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲۵ و ضریب دبی آبگیرها به مقدار C=۰/۸۰ کمترین تفاوت در رقوم سطح آب محاسبه‌شده توسط مدل و اندازه‌گیری‌شده مشاهده می‌گردد. مدل MIKE-11 نیز با همین مقادیر ضریب زبری مانینگ و ضریب دبی و با فاکتورهای کالیبراسیون دبی برابر ۰/۹۵ تا ۰/۶۰ واسنجی شد. گام زمانی و مکانی مورد استفاده در مدل MIKE-11 که باعث پایداری این مدل غیرماندگار می‌شود نیز به‌ترتیب برابر با ۴۰ ثانیه و ۱۰۰ متر بوده است. با اجرای مجدد این دو مدل با استفاده از سری دوم داده‌های اندازه‌گیری‌شده تفاوت بین مقادیر محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱، تفاوت رقوم سطح آب اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده توسط دو مدل را در دو شرایط اجرای مدل‌ها نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که حداکثر مقدار خطای بین عمق محاسبه‌شده توسط مدل HEC-RAS و عمق آب اندازه‌گیری در واسنجی مدل (سری اول داده‌های اندازه‌گیری‌شده) حداکثر ۲ و برای بررسی اعتبار مدل (سری دوم داده‌های اندازه‌گیری‌شده) ۴ سانتی‌متر است. همچنین مشاهده می‌گردد که تفاوت رقوم تخمینی و مشاهده‌ای در MIKE-11 نسبت به مدل HEC-RAS بیشتر است (حداکثر ۱۰ سانتی‌متر).

جدول ۱- تفاوت رقوم سطح آب تخمینی و مشاهده‌ای در مدل‌های مورد بررسی (سانتی‌متر)

	فاصله از ابتدای کانال (متر)	۲۳۷۷	۵۶۹۳	۷۵۷۸	۱۰۱۷۸	۱۴۶۶۲	۱۷۷۵۲	۱۸۷۰۴	۲۰۸۴۴	۲۲۲۵۰
مدل HEC-RAS	سری اول داده‌ها	-۱	۰	۱	۲	-۲	-۱	-۱	-۱	۱
	سری دوم داده‌ها	-۲	-۲	۱	-۲	-۳	۰	-۲	-۴	۲
مدل MIKE-11	سری اول داده‌ها	۰	۹	-۵	۲	۴	۳	-۲	۲	-۵
	سری دوم داده‌ها	۱۰	-۳	-۲	-۲	۱	۵	۱۰	۲	۷

جدول‌های ۳ و ۲ مقادیر تخمینی دبی در سازه‌های موجود در کانال را نشان می‌دهد که مدل MIKE-11 محاسبه کرده است. چون مدل HEC-RAS یک مدل ماندگار است در میزان دبی‌های ورودی با گذشت زمان تغییری ایجاد نمی‌شود. از طرف دیگر، لازم است در این مدل دبی هر کانال به تفکیک داده شود بنابراین دبی محاسبه‌شده توسط مدل برابر همان دبی اندازه‌گیری‌شده خواهد بود. جدول ۲ نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل تفاوت مشاهده‌شده بین مقادیر دبی تخمینی از مدل MIKE-11 و مشاهده‌ای دریچه‌های قوسی به‌ترتیب ۵۰ و ۱ لیتر بر ثانیه (۶ و صفر درصد) است. مطابق جدول ۳ و با در نظر گرفتن سری دوم داده‌های اندازه‌گیری‌شده حداکثر تفاوت دبی تخمینی و مشاهده‌ای آبگیرها مربوط به آبگیر T-16 به میزان ۲۳ لیتر در ثانیه و برابر با ۲۵ درصد دبی اولیه است. کمترین میزان تفاوت در دبی تخمینی و مشاهده‌ای مربوط به آبگیر T-24 با ۴ لیتر در ثانیه (یا ۲ درصد مقدار دبی اولیه) است.

جدول ۲- تفاوت دبی تخمینی و مشاهده‌ای دریچه‌های قوسی توسط مدل MIKE-11 (لیتر بر ثانیه)

محل دریچه‌های قوسی	۲+۴۰۰	۵+۷۱۵	۷+۶۰۰	۱۰+۲۰۰	۱۴+۶۸۰	۱۷+۷۷۰	۱۸+۷۲۰	۲۰+۸۶۰
سری اول داده‌ها	۳(٪۰)	۲۲(٪۱)	۲۳(٪۱)	۱۴(٪۱)	۳۷(٪۳)	۲۸(٪۵)	۱۱(٪۴)	۸(٪۷)
سری دوم داده‌ها	-۲۰(٪۱)	-۴۳(٪۲)	-۳۰(٪۱)	-۱۰(٪۰)	-۲۳(٪۲)	-۵۰(٪۶)	-۱(٪۰)	۴(٪۲)

جدول ۳- تفاوت دبی تخمینی و مشاهده‌ای آبگیرها توسط مدل MIKE-11 (لیتر بر ثانیه)

آبگیرها	T-۱۵	T-۱۶	T-۱۷	T-۱۸	T-۱۹	T-۲۰	T-۲۱	T-۲۲	T-۲۳	T-۲۴
سری اول داده‌ها	-۳(٪۱)	-۱۷(٪۹)	-۴(٪۳)	۹(٪۲)	-۲۰(٪۶)	-۲(٪۰)	۹(٪۲)	۱۷(٪۵)	۳(٪۲)	۸(٪۷)
سری دوم داده‌ها	۲۰(٪۳)	۲۳(٪۲۵)	-۱۳(٪۷)	-۲۰(٪۴)	۲۳(٪۷)	-۱۰(٪۲)	۱۲(٪۳)	-۳۵(٪۷)	-۵(٪۳)	۴(٪۲)

جدول ۴ مقادیر فاکتور واسنجی را در دریچه‌های قوسی واقع برکانال نشان می‌دهد. هرچه این اعداد به عدد یک نزدیک‌تر باشند دقت محاسبهٔ دبی عبوری از دریچه بیشتر است. بنابراین بیشترین و کمترین دقت در تخمین دبی دریچه‌های قوسی به‌ترتیب مربوط به دریچهٔ قوسی واقع در ایستگاه ۱۴+۶۸۰ و ایستگاه ۵+۷۱۵ است و به طور کلی بیشتر ضرایب به دست آمده اختلاف زیادی با عدد یک دارند.

جدول ۵ مقادیر پارامترهای آماری استفاده‌شده جهت مقایسهٔ دو مدل را نشان می‌دهد. مقایسهٔ پارامترهای مربوط به رقوم سطح آب در هر دو سری داده مورد استفاده نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای ME، RMSE، CRM و MAE در مدل HEC-RAS کمتر از MIKE-11 و پارامتر EF برای مدل HEC-RAS بیشتر از مدل MIKE-11 است. بنابراین، در مقایسهٔ با مدل MIKE-11، دقت مدل HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان در کانال مورد مطالعه بیشتر بوده است.

جدول ٤- فاکتور واسنجی دریچه‌های قوسی در مدل MIKE-11

محل دریچه‌های قوسی	۲+۴۰۰	۵+۷۱۵	۷+۶۰۰	۱۰+۲۰۰	۱۴+۶۸۰	۱۷+۷۷۰	۱۸+۷۲۰	۲۰+۸۶۰
فاکتور واسنجی	۱/۳۱	۱/۶۰	۱/۱۵	۱/۵۵	۱/۰۲	۰/۹۵	۱/۵۰	۱/۳۰

جدول ۵- پارامتر های آماری محاسبه‌شده جهت مقایسه مدل‌ها

مدل	عامل تخمین زده شده	سری داده	MAE	CRM	EF	RMSE	ME
HEC-RAS	رقوم سطح آب	سری اول	۰/۸۹۴	-۰/۰۰۲	۰/۹۹۸	۱/۰۰۳	۰/۰۲۰
		سری دوم	۱/۵۸۹	-۰/۰۱۱	۰/۹۹۷	۱/۷۹۶	۰/۰۴۰
MIKE-11	رقوم سطح آب	سری اول	۲/۸۶۰	-۰/۰۰۷	۰/۹۷۳	۳/۴۷۵	۰/۰۹۰
		سری دوم	۳/۷۰۷	-۰/۰۲۵	۰/۹۸۱	۴/۵۵۶	۰/۱۰۰
	دبی	سری اول	۱/۴۸۹	-۰/۰۰۹	۰/۹۹۹	۱/۸۳۹	۰/۰۳۷
		سری دوم	۲/۰۵۱	۰/۰۱۰	۰/۹۹۹	۲/۴۹۳	۰/۰۵۰

نتیجه‌گیری

تخمین دقیق ضریب دبی جریان در دریچه‌ها کار ساده‌ای نیست، از این رو در این تحقیق جهت تخمین دبی جریان عبوری از دریچه‌های قوسی تحت جریان آزاد دو رابطه به دست آمد که مستقل از ضریب دبی جریان هستند. این روابط در مدل HEC-RAS قابل استفاده‌اند و دقت تخمین دبی را افزایش می‌دهد. در این روابط ضریب دبی جریان به‌صورت تابعی از عوامل هیدرولیکی دیگر مانند بازشدگی دریچه، عمق آب بالادست، و فاصلهٔ محور دریچه تا کف کانال بیان شده است تا نیاز به تخمین مستقیم آن نباشد. کاربرد این روابط در مدل HEC-RAS و مقایسهٔ آن با مدل MIKE-11 نشان داد که دقت مدل ماندگار HEC-RAS در مقایسه با مدل غیر ماندگار MIKE-11 جهت شبیه‌سازی جریان در کانال آبیاری مورد مطالعه بیشتر است. همچنین، مشاهده شد که پارامتر فاصلهٔ محور دریچه قوسی تا کف کانال با اهمیت است که در تعیین معادلات حاکم بر دبی دریچه‌های قوسی باید به آن توجه شود.

قدردانی

مؤلفان این مقاله از همکاری‌های دانشگاه شیراز، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان آب منطقه‌ای فارس، و شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی استان فارس در به ثمر رسیدن این تحقیق تشکر می‌کنند.

مراجع

Anon. 1993. Unsteady- flow modeling of irrigation canals. J. Irrig. Drain. Eng. 119(4): 615-630.

Burt, C. M. and Styles, S. W. 1999. Modern water control and management practices in irrigation: Impact on performance. Proceedings of 5th International ITIS Network Meeting. Aurangabab. Maharashtra. India.

Buyalski, C. P. 1983. Discharge algorithms for canal radial gates. USBR. Denver. Colorado.

Clemmens, A. J., Holly, F. M. and Schuurmans, W. 1993. Description and evaluation of program: DUFLOW, J. Irrig. Drain. Eng. 119(4): 724-734.

Contractor, D. N. and Schuurmans, W. 1993. Informed use and potential pitfalls of canal models. J. Irrig. Drain. Eng. 119(4): 663-672.

Anon. 2000. MIKE-11 reference and user manuals. Danish Hydraulic Institute. Copenhagen. Denmark.

Holly, F. M. and Parish, J. B. 1993. Description and evaluation of program CARIMA. J. Irrig. Drain. Eng. 119(4): 703-713.

Jabro, J. D., Toth, J. D. and Fox, R. H. 1998. Evaluation and comparison of five simulation models for estimating water drainage fluxes under corn. J. Environ. Qual. 27, 1376-1381.

Javan, M., Sanaee-Jahromi, S. and Fiuzat, A. A. 2002. Quantifying management of irrigation and drainage systems. J. Irrig. Drain. Eng. 128(1): 19-25.

Kumar, P., Mishra, A. Raghuwanshi, N. S. and Singh, R. 2002. Application of unsteady flow hydraulic-model to a large and complex irrigation system. Agric. Water Manag. 54, 49-66.

Mishra, A., Anand, A. Singh, R. and Raghuwanshi, N. S. 2001. Hydraulic modeling of Kansabati main canal for performance assessment. J. Irrig. Drain. Eng. 127(1): 27-34.

Nawazbhutta, M., Shahid, B. A. and van Der Velde, E. J. 1996. Using a hydraulic model to prioritize secondary canal maintenance inputs: Results from Punjab, Pakistan. Irrig. Drain. Sys. 10, 377-392.

Rogers, D. C. and Merkley, G. P. 1993. Description and evaluation of program USM. J. Irrig. Drain. Eng. 119(4): 693-702.

Safarinezhad, D. 1991. Discharge algorithms for canal radial gates. M. Sc. Thesis. Shiraz University. Shiraz. Iran. (in Farsi)

Shahrokhnia, M. A. and M. Javan. 2003. Dimensionless rating curve of submerged and free flow radial gates. J. School Eng. Ferdowsi University of Mashhad. 15(2): 283-291. (in Farsi)

Anon. 2001. HEC-RAS: User's and hydraulic reference manuals. U. S. Army Corps of Engineers.

Webby, M. G. 1999. Discussion of irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates, by J. S. Montes. J. Hydraul. Eng. 125(2): 210-212.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.9/No.1/Spring 2008/P: 49-62*

Application of HEC-RAS and MIKE-11 Models for Flow Simulation in Irrigation Canals

M. A. Shahrokhnia*, M. Javan and A. R. Keshavarzi

* Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research Center, P. O. Box: 73415-111, Zargaran, Iran. E-mail: shahrokhnia@farsagres.ir

Hydraulic simulation of water flow in irrigation canals may reveal management shortcomings and help managers find solutions to them. Hydraulic simulation models can be appropriate tools for understanding hydraulic behavior of irrigation systems. In the present study, the steady state HEC-RAS model was tested and compared with the MIKE 11 unsteady state model. A secondary irrigation canal in the Doroodzan irrigation system in southwest Iran was selected to test the models. The control structures in the system were radial gates and sluiced orifices. New discharge algorithms were obtained for the free flow radial gates using previously published measured laboratory and field data and applied to the HEC-RAS model. The two models were calibrated and validated using two sets of observed discharges, gate openings and water levels. Statistical indicators were used to compare the models. Results showed that the new algorithms can be useful and the HEC-RAS model, with fewer estimation errors, appropriate for the study of steady state flow in irrigation canals. Results showed that pinion height in radial gates is an important factor for developing discharge algorithms.

Key Words: HEC-RAS, Hydraulic, Irrigation Canal, MIKE-11, Radial Gate