

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)



جلد ۲۵، شماره ۹۶، پاییز ۱۴۰۳



Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

پژوهشی

جلد ۲۵، شماره ۹۶، پاییز ۱۴۰۳

Vol. 25, No. 96, Autumn 2023

Print ISSN: 3060-6764 Online ISSN:3060-6772

فهرست مقالات

- ۱ بررسی اثر بخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی با استفاده از مدل AquaCrop
(مطالعه موردی: دشت هشتگرد)
امید رجا، سجاد ویسی، علی برزگر
- ۲۷ شبیه‌سازی عددی دبی آبگیر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از مدل ماشین یادگیری
ایمان کریمی سرمیدانی، محمد حیدرنژاد، اسلان اگردنژاد
- ۴۷ بررسی حجم آب آبیاری کاربردی و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلاس استان خراسان رضوی
محمد جلیبی، اردلان ذوالفقاران
- ۶۱ کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان هارمونیک
امل سواعدی، محمدرضا زایری، مهدی قمشی، مهدی دریائی
- ۸۳ ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب
مهرداد اسدی، محمدجواد منعم، جمال محمد ولی سامانی
- ۱۰۷ مکان‌یابی زمین‌های دیم مستعد آبیاری تکمیلی به منظور ارتقای بهره‌وری مصرف آب
حسن اوجاقلو، زهرا امیری آبدوچالی، سپیده ارومی

AERI

Contents

- Evaluation the Effectiveness of Management Strategies to Reduce Agricultural Water Use by Using the AquaCrop Model (Case Study: Hashtgerd plain) 1
Omid Raja, Sajjad Veysi, Ali Barzegar
- Quantitative Simulation of Diverged Flow Using Machine Learning Techniques and FLOW-3D Numerical Modeling 27
Iman Karimi Sarmeydani, Mohammad Heidarnejad, Aslan Egdernezhad
- Investigating the volume of applied irrigation water and water productivity in cherry Orchards of Razavi Khorasan province, Iran 47
Mohammad Joleini, Ardalan Zolfagharan
- Application of Artificial Intelligence in Predicting the Discharge Coefficient of Labyrinth Weirs with Harmonic Plans 61
Amal Savaedi, Mohammad Reza Zayeri, Mahdi Ghomeshi, Mahdi Daryaei
- Investigating the effect of Sluiceway width and the ratio of gate Opening to Gate Width on Sediment flushing in Diversion Dams 83
Mehrdad Asadi, Mohammad Javad Monem, Jamal Mohammad Vali Samani
- Locating Suitable Rainfed Land for Supplemental Irrigation to Improve Water Productivity 107
Hassan Ojaghrou, Zahra Amiri Abdochali, Sepide Oroumi

AERI

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

عَنْ مُحَمَّدٍ
عَلَيْهِ السَّلَامُ



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)

پژوهشی

جلد ۲۵، شماره ۹۶، پاییز ۱۴۰۳ شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

فهرست مقالات

پژوهشی

بررسی اثر بخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی با استفاده از مدل AquaCrop

(مطالعه موردی: دشت هشتگرد)

- ۱ امید رجا، سجاد ویسی، علی برزگر
- شبیه‌سازی عددی دبی آبگیر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از مدل ماشین یادگیری
- ۲۷ ایمان کریمی سرمیدانی، محمد حیدر نژاد، اصلان اکدر نژاد
- بررسی حجم آب آبیاری کاربردی و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلاس استان خراسان رضوی
- ۴۷ محمد جلیلی، اردلان ذوالفقاران
- کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان هارمونیک
- ۶۱ امل سواعدی، محمدرضا زابری، مهدی قمشی، مهدی دریائی
- ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب
- ۸۳ مهرداد اسدی، محمدجواد منعم، جمال محمدولی سامانی
- مکان‌یابی زمین‌های دیم مستعد آبیاری تکمیلی به‌منظور ارتقای بهره‌وری مصرف آب
- ۱۰۷ حسن اوجاقلو، زهرا امیری آبدوچالی، سپیده ارومی

مجله "تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی"

با درجه علمی - پژوهشی مطابق ابلاغ (مجوز) شماره ۳/۱۸/۸۱۶۷۱ مورخ ۱۳۹۴/۰۴/۳۱ وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.

نمایه شده در CABI، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)، ایران ژورنال، بانک اطلاعات نشریات کشور، پایگاه اطلاعات جهاد دانشگاهی و مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی (Agrisis)

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
مدیر مسئول: دکتر حسین دهقانی‌سانج

سر دبیر: دکتر نادر عباسی

دستیار سر دبیر: دکتر امید رجا

هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

محمدحسین امید	استاد، دانشگاه تهران
عاطفه پرورش‌ریزی	دانشیار، دانشگاه تهران
نادر حیدری	دانشیار، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
محمود شفاعی بجنستان	استاد، دانشگاه شهید چمران اهواز
فریبرز عباسی	استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
نادر عباسی	استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
صلاح کوچک‌زاده	استاد، دانشگاه تهران
محمدجواد منعم	استاد، دانشگاه تربیت مدرس
ابوالفضل ناصری	دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی
علیرضا کیانی	استاد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان

هیأت تحریریه بین‌المللی (به ترتیب حروف الفبا):

علی ترابی حقیقی	دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت هیدروسستم‌ها، دانشکده آب و انرژی و محیط زیست، دانشگاه Oulu فنلاند
محمدعلی شریفی	دانشیار مؤسسه علوم جغرافیایی و مشاهده زمین، دانشگاه Twente، هلند
راضیه فرمانی	دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه Exeter انگلستان

بررسی‌کنندگان این شماره:

- مهدی اسمعیلی ورکی	- حمیدرضا جانباغ	- نادر عباسی	- سیدمحمدرضا ناقدی‌فر
- ثمر بهروزی نیا	- نادر حیدری	- وحید کاظم علیلو	- ابوالفضل ناصری
- آرش تافته	- رسول دانشفراز	- مصطفی گودرزی	- پیمان ورجاوند
- علیرضا توکلی	- فریبرز عباسی	- یاسر مه‌ری	

ویراستار علمی و ادبی: محمدرضا داهی

ویراستار انگلیسی: محمدرضا داهی

مدیر داخلی: افشین یوسف گمرکچی

صفحه‌آرا: شبنم جباری

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تلفن: ۰۲۲۰۵۲۳۰، ۰۲۲۷۰۵۲۴۲ و ۰۲۲۷۰۸۳۵۹ (۰۲۶)، دورنگار: ۰۲۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)

پایگاه اطلاعاتی مؤسسه: www.aeri.ir

پایگاه اطلاعاتی مجله: <http://idser.areeo.ac.ir>

پیام‌نگار: aridsej@areeo.ac.ir

شرایط پذیرش و راهنمای تهیه مقاله برای مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

نشریه "تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی" مقاله‌های علمی- پژوهشی در زمینه‌های فنی و مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی را که به زبان فارسی نوشته شده و قبلاً منتشر نشده یا برای انتشار در نشریه یا نشریه‌ای دیگر ارسال نشده باشد، برای بررسی و داوری می‌پذیرد و در صورت تأیید به ترتیب تاریخ وصول چاپ می‌کند. همچنین مقاله‌های گردآوری یا تحلیلی که توسط پژوهشگران صاحب‌نظر و تنها به دعوت هیأت تحریریه در زمینه مسائل روز فنی و مهندسی تهیه شده است، پس از بررسی و تصویب به چاپ خواهد رسید.

مسئولیت هر مقاله از نظر علمی بر عهده نویسنده (یا نویسندگان) است. ترتیب نام نویسندگان بر عهده شخص مکاتبه‌کننده خواهد بود و مکاتبات با وی انجام خواهد شد. نشریه در رد یا قبول و حک و اصلاح مقالات آزاد است و مقاله‌های دریافتی مسترد نخواهند شد. نشریه در نشر مطالب به صورت الکترونیکی، اینترنتی یا اینترنتی مجاز است.

مقاله‌ها باید با عنوان کامل، بدون نام و مشخصات نگارنده (یا نگارندگان)، به انضمام برگ مشخصات مقاله، روی کاغذ سفید A4 حداکثر در ۱۵ صفحه با فاصله سطرها یک سانتی‌متر و حاشیه از بالا ۳/۸ سانتی‌متر و ۲/۵ سانتی‌متر از چپ و راست و پایین صفحه با قلم فارسی نازنین (B Nazanin)، اندازه ۱۳، به صورت تایپ رایانه‌ای در محیط ورد (Microsoft Word) تهیه و به همراه اصل فایل در فرمت ورد (Word) از طریق سامانه (<http://idser.areo.ac.ir>) ارسال شود. ارسال فرم تعهد نگارندگان و فرم تعارض منافع نیز الزامی است.

ترتیب و شرح قسمت‌های مختلف مقاله

مقاله‌های ارسالی شامل برگه مشخصات مقاله، عنوان، چکیده فارسی، واژه‌های کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، قدردانی، مراجع مورد استفاده، چکیده مبسوط و واژه‌های کلیدی به زبان انگلیسی و در صورت لزوم ضمائم است.

برگه مشخصات مقاله

این قسمت در یک صفحه جداگانه تهیه می‌شود و در برگه‌بند عنوان مقاله، نام و نام خانوادگی و مرتبه علمی نگارنده (یا نگارندگان)، آدرس کامل، شماره تلفن، شماره دورنگار، آدرس پست الکترونیکی، و منبعی خواهد بود که مقاله از آن استخراج شده است (پایان نامه دانشجویی، طرح تحقیقاتی و مانند آن). برگه مشخصات مقاله باید به دو زبان فارسی و انگلیسی ارائه شود.

عنوان

عنوان باید کوتاه (حداکثر ۲۵ کلمه)، رسا، جامع، و بیانگر محتوای مقاله باشد.

چکیده فارسی

چکیده فارسی (حداکثر در ۲۰۰) کلمه بیانگر فرضیه، هدف پژوهش، توصیف مختصر مواد و روش‌ها، نتایج اصلی به دست آمده و نتیجه‌گیری کلی از پژوهش است.

واژه‌های کلیدی

واژه‌های کلیدی شامل حداکثر پنج واژه مجزا یا مرکب خواهد بود و برای نشان دادن ماهیت و گرایش موضوع مقاله به هنگام طبقه‌بندی در سامانه‌های اطلاع‌رسانی است.

مقدمه

در این بخش باید موضوع مورد پژوهش معرفی و فرضیه مورد نظر تعریف شود. همچنین لازم است به اهم کارهای پژوهشی انجام شده قبلی در این مورد نیز اشاره و لزوم پژوهش مورد نظر تشریح و هدف مطالعه حاضر مشخص شود.

مواد و روش‌ها

این قسمت شامل شرح کامل مواد و روش‌های مورد استفاده در اجرای پژوهش است. در مورد روش‌های متداول و شناخته شده، ذکر منبع مربوط کافی است. ذکر مشخصات فنی و نام‌های دقیق علمی و تجاری مواد و دستگاه‌ها و همچنین معیارهای مورد استفاده ضرورت دارد.

نتایج و بحث

این بخش در برگیرنده نتایج حاصل از پژوهش به صورت متن (ها)، جدول (ها)، شکل (ها) و تصویر (ها) است. در این قسمت علل و روابط بین آنها در ایجاد نتایج حاصل، با استفاده از منابع علمی دیگر، مورد بحث قرار می‌گیرد. ضرورت دارد جدول‌ها و شکل‌ها با اندازه مناسب و کیفیت بالا تهیه شود، ارقام خوانا باشند، و تغییرات آشکار در منحنی‌ها با واحدهای سنجش سیستم بین‌المللی (SI) تهیه شود. عنوان جدول در بالا و عنوان نمودار یا شکل در زیر (به فارسی و انگلیسی) نوشته شود. عنوان جدول یا نمودار باید مختصر و گویای ارتباط عوامل مورد بحث در جدول یا نمودار باشد (لازم است تمامی توضیحات محورها و تمامی واحدها در نمودارها هم به فارسی و هم انگلیسی نوشته شوند و اعداد داخل جداول و نمودارها به انگلیسی نوشته شود). نتایج بررسی‌های آماری باید به یکی از روش‌های علمی در جدول (ها) منعکس شود مگر در مواردی که ذکر ارقام به صورت خام ضروری باشد. هر جا به جدول یا نموداری اشاره می‌شود آن جدول یا نمودار باید بلافاصله نشان داده شود مگر در موارد ضروری که حسب مورد در قسمت ضمایم ارائه خواهد شد. اعداد، مقیاس‌ها، واحدها در متن مقاله و در جدول و نمودار به فارسی نوشته شود. کارهای ترسیمی اصلی بوده یا به صورت رایانه‌ای و سازگار با ورد (Word) دارای کیفیت مناسب برای چاپ باشد. تکرار جدول‌ها، نمودارها، و غیره به هنگام بیان نتایج ضرورت ندارد.

نتیجه‌گیری

این قسمت شامل یک استنتاج نهایی، خلاصه پژوهش، و ذکر کاربرد (یا کاربردهای) احتمالی موضوع مورد تحقیق است. نگارندگان می‌توانند پیشنهادها را خود را برای انجام تحقیقات تکمیلی ارائه کنند.

قدردانی

در این بخش (در صورت نیاز)، از اشخاص حقیقی، حقوقی، سازمان‌ها، و نهادهای مؤثر در انجام پژوهش قدردانی می‌شود.

مراجع

- ۱- کلیه مراجعی که در متن مقاله بیان شده است باید در فهرست مراجع و بعد از متن آورده شوند. نگارندگان موظف‌اند مشخصات مراجع را چه در این بخش، چه در متن مقاله به درستی و مطابق با مشخصاتی بیاورند که در هر یک از منابع دیده می‌شود.
- ۲- در متن مقاله فقط به نام نگارنده (یا نگارندگان) و سال انتشار مرجع اشاره شود (به صورت شماره اشاره نشود).
مثال: (Razavi, 2003)، (Regier & Schubert, 2001)

۳- اگر مرجع بیشتر از دو نگارنده دارد نام نفر اول همراه با «*et al.*» ذکر شود اما در فهرست مراجع اسامی تمامی نگارندگان درج شود.

مثال: (Budiman *et al.*, 1999)

۴- مراجع به ترتیب حروف الفبای نام نگارندگان مرتب شود. در صورتی که نگارنده‌ای در یک سال چند مقاله دارد با اضافه کردن حروف a و b و ... تنظیم شوند.

۵- مراجع فارسی به زبان انگلیسی ترجمه شده و در انتها عبارت (in Persian) قید شود.

۶- از روش زیر برای مرتب کردن مراجع استفاده شود.

الف- تک نگارنده

Elsafi, S. H., 2014. Artificial neural networks (ANNs) for flood forecasting at Dongola Station in the River Nile, Sudan. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), pp.655-662.

ب- دو یا چند نگارنده

Kashefipour, S. M., Lin, B., & Falconer, R. A. (2006). Modelling the fate of faecal indicators in a coastal basin. *Water Research*, 40(7), pp.1413-1425.

پ- کتاب

Chanson, H., 2004. *Hydraulics of open channel flow*. Butterworth-Heinemann.

ت- فصلی از کتاب

Pfister, M., Schleiss, A. J., & Tullis, B. (2013). *Effect of driftwood on hydraulic head of piano key weirs*. In S. Erpicum., F. Laugier., M. Pfister., M. Piroton., G. M. Cicero., & A. J. Schleiss (Eds.) *Labyrinth and Piano Key weirs II* (pp 225-265). CRC Press, Leiden, Netherlands.

در صورتی که تعداد نگارندگان فصل یک نفر باشد از (Ed.) و در غیر این صورت از (Eds.) استفاده شود.

ث- مجموعه مقاله‌ها

Pagliara, S., & Carnacina, I. (2010). *Scour and dune morphology in presence of large wood debris accumulation at bridge pier*. In *International Conference on Fluvial Hydraulics*. Sep. 8-10. Braunschweig, Germany.

ج- دیسکت فشرده مجموعه مقاله‌ها (CD)

فقط کلمه CD قبل از Proceeding یا مجموعه مقاله‌ها آورده شود.

چنانچه مقاله‌ای در دست چاپ است، به جای کلمه ناشر، In press یا «در دست چاپ» به کار برده شود.

چ- پایان نامه، گزارش یا طرح تحقیقاتی

Stockstill, R.L. (1998). Innovative lock design, report 1, case study, New McAlpine Lock Filling and Emptying System, Ohio River, Kentucky. *Technical Rep. INP-CHL, 1*.

Salahinia, S. (2015). Experimental investigation of the subsurface flow under rainfall recharge and soil variability (M. Sc. Thesis), Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran. (in Persian)

ه- مرجع بدون نویسنده مشخص

Anon. 1998. ASAE Standard: ASAE S368.1. Compression tests of food materials of convex shape. ASAE. St. Joseph. MI 49085-9659. USA.

چکیده مبسوط به زبان انگلیسی

چکیده مبسوط انگلیسی شامل مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، قدردانی و کلمات کلیدی است که طبق فرمت نشریه (در بخش راهنمای نگارندگان) تهیه شده در انتهای مقاله آورده می‌شود.

واژه‌های کلیدی به زبان انگلیسی

این واژه‌ها معادل "واژه‌های کلیدی فارسی" به زبان انگلیسی ذکر شود.

تذکر

الف- برای پذیرش اولیه مقاله و بررسی آن، رعایت دقیق دستورالعمل بالا ضروری است (جزئیات فرمت تهیه مقاله در سایت نشریه و در بخش راهنمای نگارندگان موجود است).

ب- به منظور بهبود کیفیت مقاله و رفع اشکالات اساسی احتمالی توصیه می‌شود که نگارندگان محترم قبل از ارسال مقاله برای درج در این نشریه آن را به نظر دو نفر از همکاران مجرب خود برسانند.

تبصره

نشریه علمی پژوهشی تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی کتاب‌ها و مجلات جدید مهندسی کشاورزی به زبان فارسی را که یک نسخه از آن به دفتر نشریه برسد، پس از تصویب هیأت تحریریه معرفی می‌نماید.

بررسی اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی با استفاده از مدل AquaCrop (مطالعه موردی: دشت هشگرد)

امید رجا^{۱*}، سجاد ویسی^۲، علی برزگر^۳

^{۱*} محقق، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

^۲ دانشیار، کارشناس منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای البرز، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

چکیده

استفاده مناسب از منابع آب در بخش کشاورزی نیازمند آگاهی از راهکارهای مدیریتی بهینه و کارآمد آب است. مدیریت وضعیت کنونی دشت هشگرد در استان البرز حاصل عملکرد مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی طی دهه‌های گذشته است و احیا و تعادل بخشی آب زیرزمینی دشت در اولویت قرار دارد. بر اساس آمار درازمدت سطح آب زیرزمینی (۹۹-۱۳۷۰) میزان کسری مخزن در هر سال به طور متوسط برابر با ۱۶/۸۲ میلیون مترمکعب (۶/۲ درصد) است. در این مطالعه از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات غالب زراعی و مقدار آب مصرفی در منطقه هشگرد استفاده شد. راهکارهای عملی و کم‌هزینه نیز برای صرفه‌جویی در مصرف آب با حداقل هزینه مانند بهبود راندمان آبیاری براساس وضع موجود، تغییر تاریخ کاشت و الگوهای مختلف کم‌آبیاری بررسی شد. واسنجی مدل AquaCrop برای شرایط منطقه‌ای و بر اساس عملکرد محصولات زراعی نشان داد این مدل به خوبی توانسته است عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کم‌ترین خطای نسبی (RE) برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای دشت هشگرد در مرحله واسنجی مدل شبیه‌سازی کند. بررسی‌ها نشان داد با توجه به سطوح ارتقای راندمان در مناطق مختلف و برای کشت‌های مختلف به ترتیب منجر به صرفه‌جویی به میزان ۱۷/۷ میلیون مترمکعب (۵/۹ درصد) در مصرف آب تخصیصی خواهد شد که می‌تواند در شرائط کم‌آبی در تامین آب مورد نیاز راسطح بیشتری از اراضی بدون کاهش عملکرد فراهم کند. نتایج تحقیق نشان داد با انتخاب تاریخ کاشت بهینه (باتوجه به دامنه تاریخ کشت متداول در منطقه) برای محصولات غالب محدوده دشت هشگرد نیاز ناخالص آبیاری به میزان ۲/۴ میلیون مترمکعب در مصرف آب (۰/۸ درصد) کاهش می‌یابد. گزینه دیگر مدیریتی، کم‌آبیاری تحت الگوهای مدیریتی مختلف برای محصولات غالب زراعی، نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و نیز با افزایش دوره‌های آبیاری، صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان آب مورد نیاز قابل دستیابی است. با کم‌آبیاری می‌توان به میزان ۱۹/۳ میلیون مترمکعب (۶/۰ درصد) در دشت هشگرد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد در بسیاری از مواقع می‌توان بدون رفتن زیر بار هزینه‌های کلان برای تامین امکانات و تجهیزات مدرن، در شرایط مدیریتی برتر موجود در منطقه با اعمال سناریوهای مختلف از جمله بهبود راندمان، تغییر تاریخ کاشت و کم‌آبیاری در مصرف آب آبیاری مورد نیاز صرفه‌جویی قابل توجهی کرد. طبیعتاً سهم هر کشت در میزان صرفه‌جویی متناسب با متوسط آب مصرفی در هکتار و سطح اراضی تحت هر کشت است.

واژه‌های کلیدی: استان البرز، تاریخ کاشت بهینه، صرفه‌جویی آب، راندمان آبیاری، کم‌آبیاری

مقدمه

نیز نشان می‌دهد مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌توده محصولات زراعی و بررسی تأثیرات کمی آب بر عملکرد پذیرفته‌شده و ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه تحت گزاره‌های مختلف شناخته‌شده است (Khorsand *et al.*, 2024; Xie *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2022; Eskandaripour *et al.*, 2020; Amiri *et al.*, 2018; Ramezani *et al.*, 2018; Tavakoli *et al.*, 2015; Ghorbanian Kurdabadi *et al.*, 2013). نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد در مدل شبیه‌سازی AquaCrop امکان تعریف و تأثیر شرایط مختلف کم‌آبایی بر عملکرد محصولات مانند گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای، و چغندر قند وجود دارد و این مدل می‌تواند ابزاری کارآمد برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و افزایش بهره‌وری آب به کار رود (Farahani *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009; Andarzian *et al.*, 2011; Garcia-Vila *et al.*, 2009; Tavakoli *et al.*, 2015; Eskandaripour *et al.*, 2020). توکلی و همکاران (Tavakoli *et al.*, 2015) از داده‌های دو ساله جو دیم (۱۳۸۴-۱۳۸۶) در بالادست حوضه رودخانه کرخه در استان لرستان برای ارزیابی دقت مدل AquaCrop در برآورد عملکرد، رطوبت خاک و درصد پوشش تاج پوشش سبز استفاده کردند و نشان دادند این مدل ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی عملکرد جو در شرایط دیم و کم‌آبایی در منطقه مورد مطالعه است. نتایج مطالعات امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2016) برای ارزیابی توانایی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده گندم زمستانه تحت تنش آبی، تحقیقی را در ایستگاه تحقیقات کشاورزی فارس (زرقان) در سال‌های زراعی ۸۶-۱۳۸۵ و ۸۷-۱۳۸۶ حاکی از دقت قابل قبول مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌توده محصول است. رضانی اعتدالی و همکاران (Ramezani Etedali *et al.*, 2016) در تحقیقی توانایی دو نسخه ۳.۱ و ۵ مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبایی برای غلات مهم (گندم، جو و ذرت دانه‌ای) را در حوضه رودخانه

بررسی روندهای موثر در بخش آب، خاک، کشاورزی و نتایج پیش‌بینی‌های مربوط به هر یک از روندهای کلان جهانی ارائه شده، به ویژه تغییرات اقلیمی و رقابت بر سر منابع تولید، به روشنی نشان می‌دهد دشواری‌های پیش‌روی تولید در بخش کشاورزی و تامین امنیت غذایی جوامع در بسیار نقاط دنیا در حال ظهور و در ایران کاملاً محسوس و قابل تامل است. به گواه گزارش‌های علمی و پیش‌بینی‌ها، انتظار می‌رود این تغییرات تا سال ۲۰۵۰ برجسته‌تر و چالش‌برانگیزتر شوند (Esmaili Falak & Abbasi, 2024). براساس گزارش موسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI^۱)، ایران برای حفظ وضع فعلی خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید (UNESCO, 2010). از طرفی، جوامع بشری بیشتر به دلیل ناتوانی در دسترسی و حفاظت از منابع آب سالم و مطمئن در تأمین غذای خود دچار مشکل‌اند و از این رو با این شرایط نیاز به اعمال راهکارهایی مؤثر برای مدیریت بهینه و کارآمد آب به ویژه در بخش کشاورزی وجود دارد (Droogers *et al.*, 2010).

برآورد و ارزیابی دقیق نیاز آبی و آبیاری ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب است. عوامل آب و هوایی، ویژگی‌های گیاه، شرایط محیطی، مراحل فنولوژی گونه‌های گیاهی و دیگر عوامل مدیریتی در برآورد میزان نیاز آبی و آبیاری موثرند (Allen *et al.*, 1998; Parsinejad *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024). مدل AquaCrop آب مصرفی گیاه را بر اساس پایش رطوبت خاک در منطقه ریشه برآورد می‌کند و تحت سناریوهای مختلف می‌تواند عملکرد محصول، نیاز آبی گیاه و کارایی مصرف آب گیاه را در شرایط مختلف از جمله کم‌آبایی و تغییر تاریخ کاشت شبیه‌سازی کند (Salemi *et al.*, 2011; Raja & Parsinejad, 2023). به طور کلی، نتایج مطالعات محققان

¹ International Water Management Institute

آبیاری، تغییر تاریخ کاشت و الگوهای مختلف کم‌آبیاری. رویکرد این مطالعه، ارائه راهکارهایی نیست که مستلزم تغییر سیستم آبیاری و حتی تغییر الگوی کشت باشد یا به کاهش سطح زیر کشت در منطقه بینجامد. هرچند محققان نشان داده‌اند که یکی از دلایل پایین بودن بهره‌وری آب، کشت محصول در برخی از زمین‌ها با کلاس تناسب اراضی پایین است. این اراضی به دلیل داشتن محدودیت‌های زیاد (مثل بافت سبک، ناهمواری و شوری و غیره)، آب بیشتری برای آبیاری نیاز دارند. بنابراین، حذف این اراضی یکی از راه‌های موثر در جلوگیری از اتلاف آب در بخش کشاورزی است (Jafari & Abbasi, 2024). راهکارهای اتخاذ شده به گونه‌ای است که با حداقل هزینه امکان عملی کردن آن‌ها وجود دارد، بر معیشت کشاورزان تأثیر سوء ندارند و قابل اجرا هستند. سطوح الگوهای مدیریتی در اعمال و تعیین اثربخشی هر یک از راهکارهای فوق بر اساس شرایط واقعی موجود در منطقه بنا نهاده شد. به عبارت دیگر تابع هدف مطالعه صرفه‌جویی در مصرف آب یا هدف پیشگیری از برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی (پایداری آبخوان دشت هشتگرد) قرار داده شد. بررسی اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی در نظر گرفته شده در راستای بالابردن بهره‌وری و پایداری منابع آب براساس سناریوهای مختلف بهبود راندمان آبیاری با توجه به شرایط برتر موجود در منطقه و امکان‌سنجی صرفه‌جویی در مصرف آب از طریق راهکارهای تغییر تاریخ کاشت و کم‌آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop 6.0 است.

مواد و روش‌ها

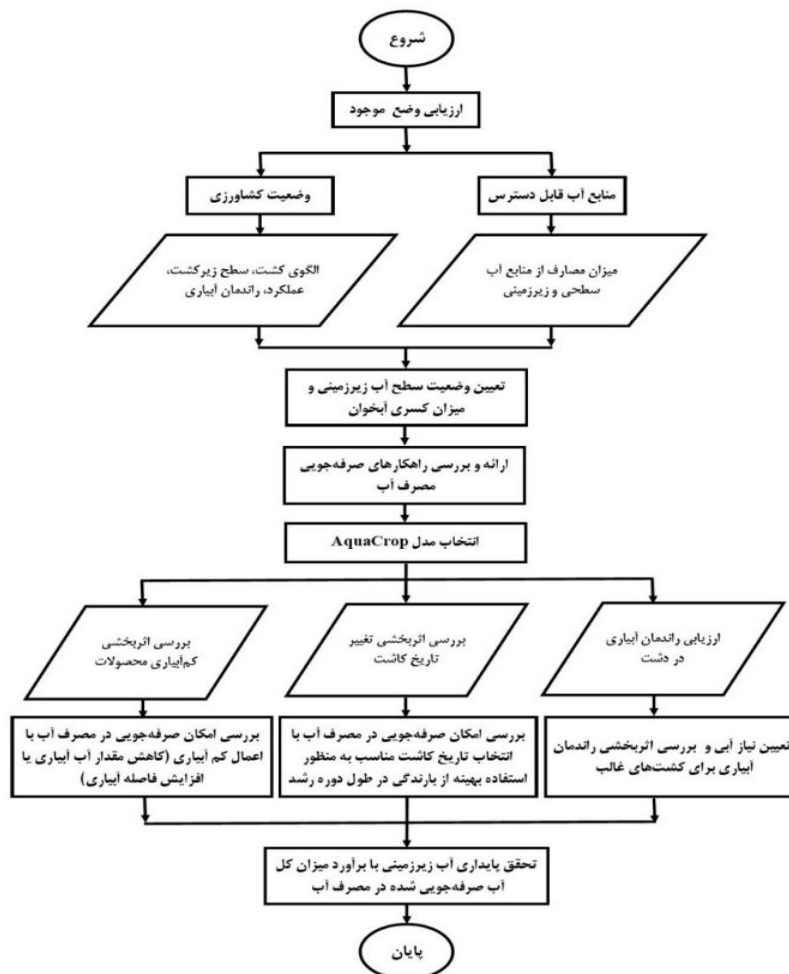
در این تحقیق در ابتدا وضع موجود منطقه هشتگرد شامل منابع آب در دسترس (منابع آب سطحی و زیرزمینی) و وضعیت کشاورزی (شامل الگوی کشت، سطح زیر کشت، عملکرد محصولات و راندمان آبیاری) بررسی شده است. بر اساس وضعیت تراز آب زیرزمینی، میزان کسری مخزن

شور بررسی کردند. نسخه ۳.۱ تنش شوری را در AquaCrop نظر نمی‌گیرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد نسخه ۵ مدل به دلیل در نظر گرفتن تنش شوری، دقت بیشتری دارد. بنابراین پیشنهاد شده است هنگامی که منابع آب و خاک شوری بالایی دارند یا گیاه حساسیت بالاتری به شوری دارد از نسخه ۵ مدل AquaCrop استفاده شود. رضانی و همکاران (Ramezani et al., 2019) توانایی مدل AquaCrop را در برآورد عملکرد در سطوح مختلف آبیاری ارزیابی کردند و نتایج آزمون‌های آماری نشان دادند که مدل AquaCrop دقت بالایی دارد. خورسند و همکاران (Khorsand et al., 2024) نیز نشان دادند مدل AquaCrop به خوبی توانسته است میزان عملکرد و زیست توده کلزا را در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری شبیه‌سازی کند. این پژوهشگران این مدل را ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست توده محصولات زراعی تخت سناریوهای مختلف مدیریتی معرفی کرده‌اند.

افزایش سطح زیر کشت، کاهش بارندگی‌ها، تغییر اقلیم و تداوم خشک‌سالی‌ها، برداشت بی‌رویه کشاورزان از منابع آب‌های سطحی و سفره‌های آب زیرزمینی از طریق حفرچاه‌های مجاز و غیرمجاز از جمله مواردی است که بخش آب در استان البرز، به طور مشخص دشت هشتگرد را با چالش جدی مواجه کرده است. به دلیل دسترسی آسان و سادگی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه، میزان برداشت از این منابع برای استفاده‌های مختلف از جمله کشاورزی افزایش فراوانی یافته و متأسفانه در سال‌های اخیر حتی در بعضی مناطق بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بیشتر از تغذیه بوده است که ادامه این روند خطر نابودی منابع آب زیرزمینی را در پی خواهد داشت (Niamnsi & Mbue, 2009; Raja et al., 2019).

هدف از این مطالعه، ارائه راهکارهای عملی و کم‌هزینه برای صرفه‌جویی در مصرف آب در دشت هشتگرد است، راهکارهای مختلف با حداقل هزینه مانند بهبود راندمان

برآورد شد. برای بررسی و درک بهتر تأثیر سناریوهای موردنظر از مدل واسنجی شده AquaCrop استفاده شد. با شبیه سازی سناریوهای مختلف شامل: تأثیر بهبود راندمان آبیاری بر کاهش تخصیص، تغییر تاریخ کاشت و نیز اعمال کم آبیاری برای محصولات غالب دشت هشتگرد با استفاده مدل AquaCrop، امکان سنجی صرفه جویی در مصرف آب با مقایسه بهره‌وری آب آبیاری بر اساس اطلاعات منطقه‌ای بررسی گردید. در نهایت، متناسب با انتخاب بهترین سناریوها، میزان آب قابل صرفه‌جویی برآورد شد تا متضمن پایداری آب زیرزمینی در درازمدت باشد. فلوجارت مراحل اجرای این مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است که در زیر به هر یک از مراحل پرداخته شده است.



شکل ۱- فلوجارت اجرای تحقیق

Figure 1- Flowchart of the study

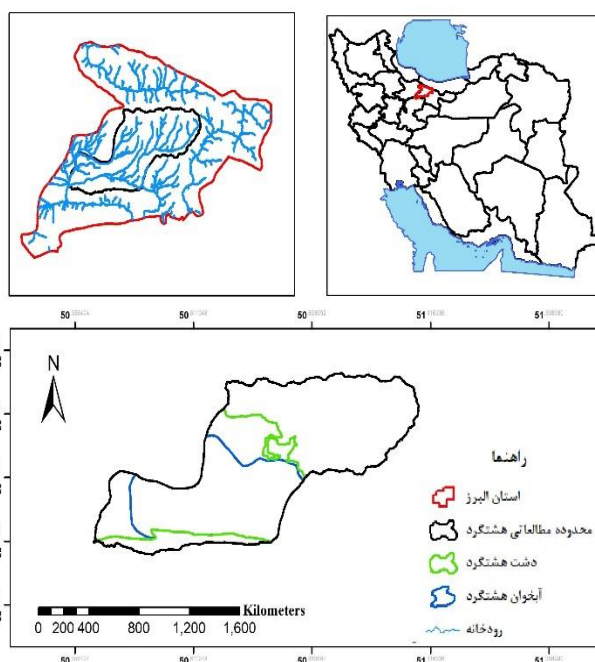
نشان داده شده است. مساحت محدوده مطالعاتی، دشت و آبخوان هشتگرد به ترتیب برابر با ۱۱۶۹/۶، ۵۹۲ و ۴۱۰/۷ کیلومترمربع است. مساحت ارتفاعات و دشت در این محدوده به ترتیب ۵۷۹ و ۵۹۲ کیلومترمربع و حداکثر و حداقل ارتفاع

موقعیت محدوده مطالعه

محدوده مطالعاتی هشتگرد در نیمه شمالی حوضه آبریز دریاچه نمک و در فاصله حدود ۶۵ کیلومتری غرب تهران واقع شده است. موقعیت دشت هشتگرد در شکل (۲)

است. با توجه به میزان بارندگی‌ها، رطوبت نسبی در زمستان به حداکثر و در تابستان به حداقل مقدار خود می‌رسد. مطالعات محققان نیز نشان داده است اقلیم این منطقه بر اساس داده‌های هواشناسی در دوره ۹۰-۱۳۶۰ در طبقه‌بندی آمبرزه خشک و سرد و در طبقه‌بندی دومارتن خشک است (Shirazi & Nateghi, 2020).

به ترتیب ۴۰۵۸ و ۱۱۳۳ متر بالاتر از است (Rasaei *et al.*, 2020). وضعیت اقلیمی منطقه بر اساس روش تجربی آمبرزه (Q) و دومارتن (I) با استفاده از آمار ایستگاه هواشناسی هشتگرد نشان می‌دهد که دشت هشتگرد در اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار می‌گیرد. علاوه بر نیمه‌خشک بودن، منطقه دارای زمستان‌های سرد طولانی و تابستان‌های نسبتاً گرم و خشک است که یکی از ویژگی‌های اقلیم خشک و سرد



شکل ۲- موقعیت دشت هشتگرد

Figure 2- Location of Hashtgerd plain

میلیون مترمکعب در سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ بوده است. بر اساس انهار آغشت ۱، آغشت ۲، کردان، جلنگدار به طور متوسط ۲۸/۸۵ میلیون مترمکعب در سال مذکور در سطح دشت یا آبخوان در بخش کشاورزی آب مصرف شده است. در سطح دشت و آبخوان هیچ‌گونه مصرفی از ایستگاه‌های پمپاژ و موتورپمپ گزارش نشده است. از طریق آب‌بندان‌ها به میزان ۰/۶۲ میلیون مترمکعب در سال در بخش کشاورزی مصرف شده است. به‌طورکلی، میزان مصرف از آب سطحی برای کشاورزی در سطح دشت یا آبخوان هشتگرد ۲۹/۴۷ میلیون مترمکعب در سال است.

داده‌های مورد استفاده

منابع آب سطحی و زیرزمینی

میزان مصرف آب از منابع آب سطحی در سطح دشت و آبخوان هشتگرد بر اساس آماربرداری دور سوم از آبدی‌نهرها، آب‌بندان‌ها، ایستگاه‌های پمپاژ به‌دست آمد (جدول ۱). برآوردها نشان داد میزان کل مصرف آب از نهرها در محدوده مطالعاتی هشتگرد (ارتفاعات و دشت) ۴۹/۹۳ میلیون مترمکعب است. از این میزان، مصرف آب در بخش ارتفاعات محدوده مطالعاتی هشتگرد به میزان ۲۱/۰۸

جدول ۱- مصارف آب سطحی (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)
Table 1- Surface water consumption (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)

جمع مصارف Total	ایستگاه پمپاژ و موتور پمپ Pumping station and pump motor			آبندان Dike			انهار Streams			منطقه Region
	کشاورزی Agriculture	شرب Drinking	صنعت Industry	کشاورزی Agriculture	شرب Drinking	صنعت Industry	کشاورزی Agriculture	شرب Drinking	صنعت Industry	
۲۹/۴۷	۰	۰	۰	۰/۶۲	۰	۰	۲۸/۸۵	۰	۰	دشت هشتگرد Plain Hashtgerd
۲۹/۴۷	۰	۰	۰	۰/۶۲	۰	۰	۲۸/۸۵	۰	۰	آبخوان Aquifer

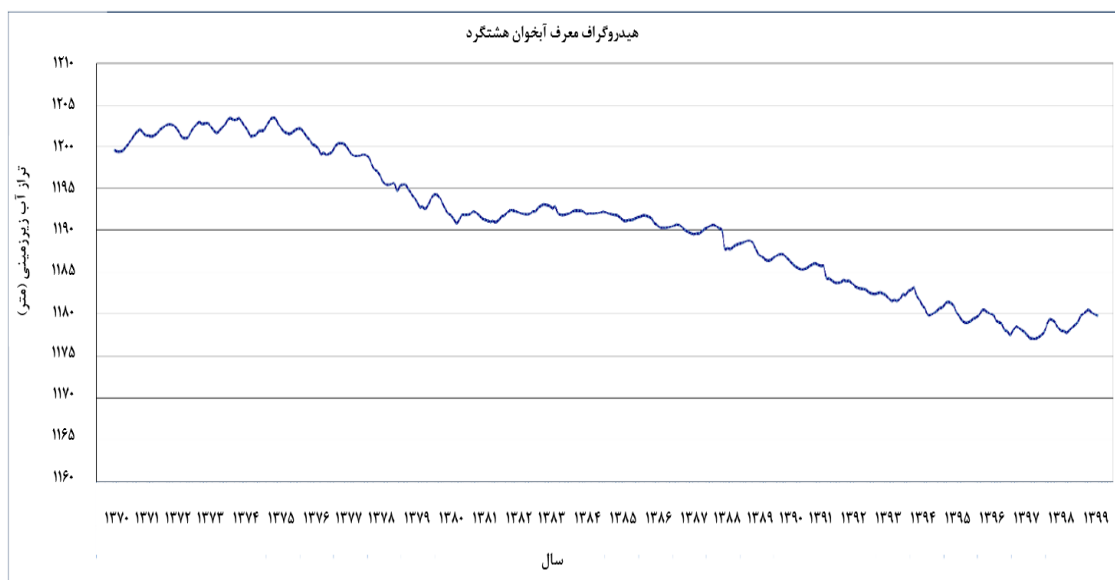
بر اساس رفتار سنجی و شبکه تیسن ۱۷ چاه پیزومتری در محدوده آبخوان دشت هشتگرد، ارقام هیدروگراف واحد آبخوان آبرفتی مربوط به دوره آماری ۲۹ سال (سال های آبی ۱۳۷۰-۷۱ تا ۹۹-۱۳۹۸) در شکل (۳) نشان داده شده است. تغییرات ذخیره در آبخوان آبرفتی عبارت است از مجموع ورودی منهای مجموع خروجی که می تواند مثبت یا منفی باشد. براساس بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت هشتگرد مجموع عوامل ورودی به آبخوان آبرفتی دشت سالانه ۲۶۰/۲۸ میلیون مترمکعب و مجموع عوامل خروجی آن سالانه ۲۷۷/۱۰ میلیون مترمکعب است. بررسی ها نشان داده است که طی دوره مذکور سطح آب ۱۹/۸۰ متر افت کرده که متوسط سالانه آن برابر با ۶۸ سانتی متر است (Taheri Tizro *et al.*, 2016; Consulting engineers for water and sustainable development, 2009). مجموع کل کسری مخزن ۴۸۷/۸۵ میلیون مترمکعب و میزان سالیانه متوسط کسری مخزن برابر با ۱۶/۸۲ میلیون مترمکعب است. بر اساس هیدروگراف واحد آبخوان آبرفتی هیدروگراف طی سال های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۵ دارای سیر صعودی و در سال های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۰ به شدت سیر نزولی داشته و سطح آب زیرزمینی افت کرده است. از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۶ هیدروگراف متعادل بوده است و مجدداً از سال ۱۳۸۶ شروع به افت می کند. یادآوری می شود در سال های آبی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ تراز سطح ایستابی به میزان ۰/۷۵ و ۱/۸۶ متر افزایش یافته است.

منابع آب زیرزمینی دشت هشتگرد شامل قنات، چشمه، چاه های عمیق و نیمه عمیق است. میزان برداشت از چاه های عمیق و نیمه عمیق، با توجه به تعداد، متوسط آبدهی و متوسط ساعات کارکرد آن ها بر اساس آماربرداری دور سوم (سال ۱۳۹۸) به تفکیک مصارف کشاورزی، شرب و صنعت محاسبه شد. میزان برداشت از چشمه ها، قنات های موجود با توجه به تعداد (دهنه)، متوسط آبدهی در سال مذکور تعیین گردید که نتایج محاسبات در جدول (۲) ارائه شده است. براساس میزان تخلیه سالانه و مصارف مختلف، به طور متوسط سالانه ۲۵۳/۱۳ و ۲۷۱/۶۰ میلیون مترمکعب آب به ترتیب برای آبخوان و دشت به منظور کشاورزی، شرب و صنعت مصرف شده است. براساس آماربرداری دور سوم، هفت چشمه در سطح دشت وجود دارد اما هیچ چشمه ای در سطح آبخوان هشتگرد گزارش نشده است. به طور متوسط سالانه به میزان ۰/۰۴۰، ۰/۲۴۰ و ۰/۰۹۵ میلیون مترمکعب به ترتیب در بخش های کشاورزی، شرب و صنعت از آب چشمه ها مصرف شده است. در سطح دشت و آبخوان به ترتیب ۲۲ و ۲ دهنه قنات گزارش شده است که در مجموع ۱/۰۷ و ۰/۶۵ میلیون مترمکعب در سال در بخش های کشاورزی و شرب در سطح دشت مصرف شده است. به طور کلی، میزان مصارف از آب زیرزمینی در دشت هشتگرد برای کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب برابر با ۴۵/۸۱، ۲۱۵/۴۷ و ۱۰/۳۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است (جدول ۲).

جدول ۲- مصارف آب زیرزمینی (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)

Table 2- Ground water consumption (MCM) (Alborz Regional Water Organization, 2020)

جمع Total	قنات Aqueduct			چشمه Spring			چاه Well			منطقه Region
	کشاورزی Agriculture	شرب Drinking	صنعت Industry	کشاورزی Agriculture	شرب Drinking	صنعت Industry	کشاورزی Agriculture	شرب Drinking	صنعت Industry	
۲۷۱/۶۰	۱/۰۷	۰/۶۵	۰	۰/۰۴	۰/۲۴۰	۰/۰۹۵	۲۱۴/۳۶	۴۴/۹۲	۱۰/۲۲	دشت Plain
۲۵۳/۱۳	۰	۰	۰	۰/۶۲	۰	۰	۲۰۶/۶۶	۳۷/۲۰	۹/۲۷	آبخوان Aquifer



شکل ۳- هیدروگراف واحد آبرفتی هشترگرد در دوره آماری ۷۱-۱۳۷۰ تا ۹۹-۱۳۹۸ (Alborz Regional Water Organization, 2020)

Figure 3- Hydrograph of the Hashtgerd alluvial aquifer during the statistical period of 1990-1991 to 2019-2020 (Alborz Regional Water Organization, 2020)

الگو و سطح زیر کشت محصولات غالب منطقه

مناطق و زمین‌های نزدیک به رودخانه کردان ظرفیت مطلوبی برای تولیدات باغی دارند، هرچه زمین‌ها از این رودخانه فاصله پیدا می‌کنند، باغ کمتر می‌شود. خلاصه وضعیت سطح زیر کشت، عملکرد، تاریخ کاشت و برداشت، تعداد و مقدار آبیاری محصولات زراعی و باغی غالب در دشت هشترگرد در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

زمین‌های کشاورزی آبی در محدوده دشت هشترگرد ۲۳۱۹۵ هکتار وسعت دارد. از این میزان ۱۰۰۱۳ هکتار به صورت زراعی آبی و ۱۳۱۸۲ هکتار به صورت باغ و مابقی به صورت دیم است؛ بنابراین، در کل حوضه قسمت اعظم اراضی نیاز به آبیاری دارد و سطح زیر کشت دیم اندک است.

جدول ۳- اطلاعات مربوط به محصولات غالب زراعی در سطح دشت هشتگرد (Agricultural Jihad, 2021)
Table 3- Data about the major crops in the Hashtgard Plain (Agricultural Jihad, 2021)

طول دوره رشد (روز) Length of growth period (days)	میزان آب مصرفی متوسط (مترمکعب در هکتار) Average water consumption (m ³ .ha ⁻¹)	تعداد دفعات آبیاری The number of times of Irrigation	تاریخ برداشت Harvesting date	تاریخ کاشت Planting date	عملکرد (تن در هکتار) Yield (tons.ha ⁻¹)	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	محصول Crop
۱۹۳	۶۰۰۰	۴-۵	۱۰ تیر	۱۰ آبان	۵	۲۶۹۱	گندم Wheat
۱۷۳	۵۰۰۰	۳-۴	۲۰ خرداد	۱۰ آبان	۴/۲	۱۰۰۰	جو Barley
۹۳	۱۰۰۰۰	۸-۱۲	۱۰ مهر	۱۰ تیر	۶۰	۲۰۶۵	ذرت Elofahay Forage maize
۱۹۳ (چین اول)	۱۶۰۰۰	۱۲-۱۶	۱۰ اردیبهشت	۱۰ شهریور	۱۶	۱۸۴۰	یونجه Alfalfa
-	-	-	-	-	-	۲۴۱۷	سایر Etc.
-	-	-	-	-	-	۱۰۰۱۳	جمع Total

جدول ۴- اطلاعات مربوط به محصولات غالب باغی در سطح دشت هشتگرد (Agricultural Jihad, 2021)
Table 4- Data about the major horticulture crops in the Hashtgard Plain (Agricultural Jihad, 2021)

طول دوره رشد (روز) Length of growth period (days)	میزان آب مصرفی متوسط (مترمکعب در هکتار) Average water consumption (m ³ .ha ⁻¹)	تعداد دفعات آبیاری The number of times of Irrigation	تاریخ برداشت Harvesting date	عملکرد (تن در هکتار) Yield (tons.ha ⁻¹)	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	محصول Crop
۱۲۴	۹۰۰۰	۸-۱۰	۱۰ مرداد	۳۵/۵	۲۸۵۰	هلو Peach
۱۳۴	۹۰۰۰	۸-۱۰	۲۰ مرداد	۲۳/۵	۲۱۵۶	شلیل Nectar
۱۱۹	۱۲۰۰۰	۸-۱۲	۱۰ مهر	۲۴	۱۴۶۶	سیب Apple
۱۶۰	۱۰۰۰۰	۸-۱۰	۱۵ شهریور	۲۲/۵	۱۳۷۶	آلو شابلون Plum stencil
-	-	-	-	-	۵۳۳۴	سایر Etc.
-	-	-	-	-	۱۳۱۸۲	جمع Total

الگوی کشت منطقه شامل گندم زمستانه، جو زمستانه، براساس گزارش های موجود و مصاحبه با کشاورزان و ذرت علوفه ای و یونجه و همچنین عمده محصولات باغی در کارشناسان مطلع محلی برآورد شده است. ارقام ذکر شده این منطقه هلو، آلوچه، شلیل و سیب است. تراکم اراضی کشاورزی در جنوب هشتگرد است. مقدار آب مصرفی حدود مقادیر متوسط آبیاری در سطح منطقه را نشان می دهند. مقدار و دفعات آبیاری انواع محصولات براساس نوع

خاک، میزان قابل استحصال و غیره تا حدودی متغیر است. این مقادیر ممکن است از یک سال آبی به سال دیگر نیز تفاوت داشته باشد. با این حال، تعداد و فاصله‌های آبیاری، به‌ویژه برای زراعت‌های اصلی منطقه، تغییرات زیادی ندارند و تقریباً مقادیر ذکر شده آب مصرفی محصولات قابل قبول است.

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop با حفظ قابلیت‌های نشریه^{۳۳}

(Doorenbos & Kassam, 1979) توازنی منطقی بین

سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند تا

به شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی پردازد

استخوان‌بندی فکری و اساس کار شبیه‌سازی فرآیندها

توسط استدوتو و همکاران (Steduto et al., 2009) و الگویتیم

مورد استفاده نرم‌افزار مدل و توصیف عملیات توسط رائس و

همکاران (Raes et al., 2009) ارائه شده است. در نشریه فائو

۳۳ به بررسی مقادیر تبخیر و تعرق نسبی و ضریب کاهش

عملکرد در گام زمانی بلندمدت پرداخته می‌شود، اما

AquaCrop از طریق سهم مولد تولید، یعنی تعرق، از

تبخیر و تعرق و میزان زیست‌توده تولیدی و به واسطه شاخص

برداشت، مقادیر شاخص بهره‌وری آب (تعرق) و عملکرد

محصول در یک گام زمانی روزانه برآورد می‌کند. از دیگر

ویژگی‌های مدل AquaCrop این است که به جای شاخص

سطح برگ از پوشش سبز روی زمین استفاده می‌کند. در آن

درجه روز رشد^۱ (GDD) اهمیت ویژه‌ای دارد و به جای ضریب

کاهش نسبی عملکرد به بررسی شاخص بهره‌وری می‌پردازد

(Ramezani Etedali et al., 2016). از ویژگی‌های بارز مدل

AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت تنش-

های کم‌آبی، شوری و حاصلخیزی در شرایط متفاوت بافت

خاک، سناریوهای مدیریتی مزرعه و شرایط آب و هوایی

مختلف می‌توان اشاره کرد (Abedinpour et al., 2012)؛

(Raes et al., 2012). ورودی‌های مدل شامل چهار دسته

واسنجی مدل AquaCrop

هر مدل شبیه‌سازی برای اینکه بتواند نتایج مفید و

واقعی‌تری بدهد باید با استفاده از اطلاعات و شرایط

منطقه‌ای واسنجی شود (Andarzian et al., 2011). مدل

AquaCrop بر اساس شرایط منطقه‌ای و عملکرد محصولات

زراعی برحسب وزن خشک (DY_p) برای محصولات زراعی

غالب منطقه هشتگرد واسنجی شد. لازم است گفته شود که

مدل AquaCrop عملکرد خشک محصولات را به‌عنوان

خروجی در نظر می‌گیرد (Raes et al., 2016)، ولی با توجه

به اینکه ذرت علوفه‌ای و یونجه بر اساس وزن تر و قابل فروش

گزارش می‌شوند از این رو برای تبدیل وزن تر ذرت علوفه‌ای

و یونجه به وزن خشک از نتایج تحقیقات متعددی استفاده

شد که روی اجزای عملکرد و ویژگی‌های این محصولات اجرا

شده است؛ به‌طور میانگین ۳۳ درصد از وزن تر زیست‌توده

بالای سطح زمین ذرت علوفه‌ای (Djaman, 2011) را وزن

خشک و به‌طور میانگین ۲۵ درصد از وزن تر یونجه را وزن

خشک تشکیل می‌دهد. بدین ترتیب برای واسنجی مدل،

وزن خشک کل زیست‌توده^۱ بالای سطح زمین برای ذرت

علوفه‌ای ۱۹/۸ تن در هکتار و وزن خشک کل زیست‌توده

بالای سطح زمین برای محصول یونجه ۴/۰ تن در هکتار در

نظر گرفته شد (پتانسیل عملکرد کل زیست‌توده بالای سطح

زمین ذرت علوفه‌ای و یونجه به ترتیب، ۶۰ و ۱۶ تن در هکتار

^۱ Growing Degree Day

محاسبه گردید). مقادیر Y_p مربوط به گندم و جو، با توجه به اینکه برحسب وزن دانه گزارش می‌شوند، به‌عنوان DY_p در واسنجی مدل استفاده شدند. از اطلاعات سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ برای واسنجی و از سال آبی ۱۳۹۸-۹۹ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد.

از تاریخ کاشت و برداشت متداول محصولات در بازه زمانی کاشت و برداشت مرسوم در منطقه برای واسنجی مدل استفاده شد. بر اساس مشاهدات میدانی، اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت، تاریخ برداشت، متوسط عملکرد، میزان آبیاری در منطقه هشتگرد برای محصولات غالب زراعی در جدول (۵) ارائه شده است. در این جدول مقادیر Y_p ، برای گندم و جو برحسب عملکرد دانه خشک، برای گیاه ذرت علوفه‌ای و یونجه برحسب وزن خشک زیست‌توده بالای سطح زمین است. لازم است اضافه شود مدل به‌منظور در نظر گرفتن افزایش دمای هوا و تأثیری که دمای هوا می‌تواند روی طول دوره رشد بگذارد و برای شبیه‌سازی بهتر و متناسب با تغییرات هوا در حالت درجه-روز-رشد^۱ (GDD) مطابق با آنچه در مقاله استودوتو و همکاران (Steduto et al., 2012) اشاره شده است، اجرا شد. طول دوره رشد^۲ (LCM) هر یک از گیاهان توسط مدل (بر اساس GDD) محاسبه و در

جدول (۵) ارائه شده است. پس از محاسبه مقادیر نیاز آبیاری برای هر یک از گیاهان، مقدار (I) به‌عنوان آبیاری کامل و فایل ورودی آبیاری در مدل AquaCrop به‌منظور واسنجی اولیه مدل استفاده شد. به‌طور خلاصه، پارامترهای گیاهی اشاره شده در بالا به‌منظور دستیابی به عملکرد خشک (DY_p) هر محصول با حداقل خطای نسبی (RE) واسنجی شدند.

$$RE = \left(\frac{DY_s - DY_p}{DY_p} \right) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، DY_s ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$) مقدار شبیه‌سازی شده عملکرد گیاهان توسط مدل است.

پارامترهای واسنجی شده مدل برای دستیابی به عملکرد خشک محصولات زراعی (DY_p) عبارت‌اند از: پارامترهای گیاهی مانند توسعه گیاه (پوشش تاج اولیه، ضریب کاهش تاج گیاه)، اجزای تولید محصول (شاخص برداشت مرجع و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای CO_2 و ET_0)، عوامل مؤثر بر تنش آبی (عامل شکل منحنی برای ضریب تنش آبی و رشد برگ، آستانه بالایی تخلیه رطوبت خاک، آستانه پایینی تخلیه رطوبت خاک برای رشد رویشی)، دمای پایه و دمای قطع رشد.

جدول ۵- اطلاعات مورد استفاده برای محصولات زراعی غالب در دشت هشتگرد در واسنجی مدل AquaCrop
Table 5- The data used for the major crops in Hashtgerd Plain in the calibration of the AquaCrop model

I (mm)	LCM (روز)	متوسط تاریخ برداشت Harvesting date	متوسط تاریخ کاشت Planting date	Dry DY_p ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$)	محصول Crop
۶۰۰	۱۹۳	۱۳۹۸/۰۴/۱۰	۱۳۹۷/۰۸/۱۰	۵	گندم زمستانه Winter wheat
۵۰۰	۱۷۴	۱۳۹۸/۰۳/۲۰	۱۳۹۷/۰۸/۱۰	۴/۲	جو زمستانه Winter barley
۱۰۰۰	۹۵	۱۳۹۸/۰۷/۱۰	۱۳۹۸/۰۴/۱۰	۱۹/۸	ذرت علوفه‌ای Forage maize
۱۶۰۰	۱۹۳	۱۳۹۸/۰۲/۱۰	۱۳۹۷/۰۶/۱۰	۴	یونجه Alfalfa

DY_p : عملکرد خشک گیاه، LCM: طول گندم زمستانه گیاه و I: عمق آبیاری کامل گیاه

² Length of Crop Maturity

¹ Growing Degree Day

سناریوهای مدیریتی ارزیابی شده توسط مدل

سناریوی بهبود راندمان آبیاری

برای ارزیابی شرایط مدیریتی موجود در محدوده مورد مطالعه، از اطلاعات میدانی کیفیت آب آبیاری (شوری)، نوع محصول، تاریخ کاشت و برداشت، مقدار عملکرد، زمان بندی و تعداد آبیاری، روش آبیاری و دبی جریان استفاده شد. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، میزان آب آبیاری برای محصولات غالب محدوده مورد مطالعه محاسبه شد. با استفاده از نرم افزار، نیاز خالص آبی گیاهان مختلف و نیاز خالص آبیاری با توجه به مقدار باران مؤثر در طول دوره رشد برآورد شد. بر این اساس، راندمان کاربرد موجود در نقاط مختلف مورد مطالعه از حاصل تقسیم نیاز خالص آبیاری به مقدار واقعی آب آبیاری محاسبه می‌شود. این محاسبات در محدوده دشت برای گندم، جو، ذرت و یونجه به عنوان محصولات زراعی و هلو، شلیل، سیب و آلو شابلون به عنوان محصولات باغی غالب منطقه دنبال شد. نتایج بدست آمده از راندمان کاربرد برای محصولات مختلف در مناطق مختلف مورد مطالعه در برگزیده مقادیر متفاوتی است که بیانگر شرایط مدیریتی موجود کشاورزان مختلف است. در این مطالعه، برای واقعی‌تر کردن هر چه دقیق‌تر سناریوی مورد نظر از مقادیر برتر راندمان کاربرد در شرایط موجود در منطقه استفاده شد بدون تغییر سیستم آبیاری و بدون نیاز به تجهیزات مازاد به‌عنوان مبنای سطح بهبود راندمان برای کشت‌های مختلف. میزان نیاز آبیاری در شرایط راندمان بهبود یافته برآورد می‌شود. با تفاضل میزان نیاز آبیاری واقعی کشاورزان محدوده و آب آبیاری در شرایط راندمان ارتقا یافته، میزان کاهش تخصیص برآورد می‌شود. بر این اساس میزان صرفه‌جویی در مقدار آب تخصیصی با توجه به سطح ارتقای راندمان آبیاری برای کشت‌ها و موقعیت‌های مختلف به‌طور مجزا محاسبه و تعیین می‌گردد. با استفاده از فرمول زیر راندمان کاربرد آب محاسبه شد (Liaghat *et al.*, 2015):

$$E_a = \frac{ET_c - P_e}{I} \quad (2)$$

که در آن: ET_c نیاز آبی گیاهان، P_e باران مؤثر، و I مقدار آب آبیاری است.

سناریوی تاریخ کاشت بهینه

با استفاده از نرم افزار AquaCrop 6.0 آب آبیاری مورد نیاز محصولات در تاریخ‌های کاشت مختلف، البته در بازه کاشت غالب منطقه، محاسبه شد. با توجه به اینکه به تعویق انداختن تاریخ‌های کاشت، متناسب با نیاز دمایی و GDD مربوط به هر گیاه، می‌تواند منجر به تغییر طول دوره کشت (LCM) برای گیاهان پاییزه و بهاره شود، در نتیجه مقدار نیاز آبیاری در طول فصل رشد متناسب با تغییر تاریخ کاشت تغییر خواهد کرد (Alizadeh, 2017). برای برآورد میزان صرفه‌جویی در میزان آب مصرفی ابتدا نیاز آبیاری محصولات غالب منطقه ($ET_c - P_e$) برای تاریخ‌های مختلف کاشت برآورد و پس از آن، تاریخ کاشت برتر برای هر محصول متناسب با حداقل نیاز آبیاری به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد. میزان صرفه‌جویی در مصرف آب برای هر محصول از مقایسه آب آبیاری مورد نیاز در شرایط موجود و تاریخ کاشت برتر به‌دست آمد. برای هر محصول، متناسب با سطح زیر کشت و انتخاب تاریخ کشت برتر آن، میزان کل آب صرفه‌جویی شده برآورد شد.

سناریوی کم آبیاری

با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، الگوهای مختلف مدیریت آبیاری (کم‌آبیاری) برای افزایش بهره‌وری آب و صرفه‌جویی در میزان آب تخصیصی در منطقه بررسی شد. بر این اساس، برای کشت‌های غالب در دشت هشتگرد سناریوهای مختلف کم‌آبیاری مانند کاهش عمق آب آبیاری و نیز افزایش دور آبیاری در سطوح مختلف با استفاده از مدل AquaCrop ارزیابی گردید. از آن جا که یکی از هدف‌های اصلی مطالعه کاهش برداشت از منابع آب برای به حداقل رساندن برداشت مازاد در راستای پایداری منابع آب قرار داده شد، میزان آب صرفه‌جویی شده متناسب با هر سناریو برآورد و گزینه برتر به‌عنوان گزینه ممکن و قابل اجرا انتخاب شد.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج اولیه حاصل از واسنجی مدل AquaCrop آورده شده است. پس از آن، نتایج اعمال سناریوها و میزان آب قابل صرفه جویی احتمالی ارائه می شود.

نتایج واسنجی مدل AquaCrop

پارامترهای گیاهی که پس از واسنجی مدل، در شبیه سازی رشد محصولات زراعی گندم، جو، ذرت علوفه ای و یونجه برای محدوده هشتگرد از آن ها استفاده شد در جدول های (۶) و (۷) نشان داده شده است. ویژگی های فنولوژیکی مراحل مختلف رشد گیاهان که با درجه-روز-رشد (GDD) مدل AquaCrop محاسبه شدند، در جدول (۶) نشان داده شده است. مطابق با آنچه در مقاله استودوتو و همکاران (Steduto et al., 2012) اشاره شده است، حالت درجه-روز-رشد (GDD) به منظور در نظر گرفتن دمای هوا بر روی طول دوره رشد و شبیه سازی بهتر مدل AquaCrop اجرا شد.

بر این اساس، از شاخص بهره وری آب (میزان عملکرد بر میزان نیاز خالص آب آبیاری) هر دو شاخص مقدار آب مصرفی و عملکرد متناظر تحت هر سناریو برای انتخاب گزینه برتر مبنا قرار داده شد. برای کشت های گندم، جو، ذرت و یونجه، ابتدا میزان نیاز خالص آب آبیاری تحت شرایط متعارف (IRR100%) برآورد شد. در عین حال با در نظر گرفتن عمق خالص آب آبیاری در IRR100% به عنوان مبنا، کاهش عمق آب آبیاری (IRR80%، IRR60% و IRR40%) و تاثیر هر سناریو بر میزان آب مصرفی در دوره متناسب با میزان عملکرد محصولات و در نهایت میزان بهره وری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. با توجه به اینکه قابلیت تعریف الگوهای مختلف برنامه ریزی آبیاری در مدل AquaCrop فراهم است، میزان آب مصرفی برای کشت های گندم، جو، ذرت علوفه ای و یونجه با دوره های آبیاری مختلف نیز برآورد می گردد. دور آبیاری متوسط مطابق با اطلاعات جمع آوری شده در منطقه به عنوان دور آبیاری شاهد در نظر گرفته شد و تاثیر تغییر دور آبیاری در بازه های مختلف بر میزان آب صرفه جویی شده و عملکرد محصول ارزیابی گردید.

جدول ۶- ویژگی های فنولوژیکی مراحل رشد گیاهان دشت هشتگرد که توسط حالت GDD مدل AquaCrop در مرحله واسنجی مدل محاسبه شد.

Table 6- Crop phenological development stages calculated by the GDD mode of the AquaCrop model (All units are in GDD)

یونجه Alfalfa	ذرت علوفه ای Forage maize	جو Barley	گندم Wheat	پارامتر Parameter
۵	۷	۱۵	۱۵	فاصله کاشت تا جوانه زنی (روز) Sowing to emergence (day)
۱۸	۵۷	۱۷۲	۱۸۶	فاصله کاشت تا حداکثر تاج (روز) Sowing to emergence (day)
۴۶	۸۷	۱۸۳	۱۹۶	فاصله کاشت تا شروع پیری (روز) Sowing to senescence (day)
۵۸	۹۸	۱۹۲	۲۰۴	فاصله کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیکی (روز) Sowing to maturity (day)
۱۰	۱۲	۱۳	۱۵	طول دوره گلدهی (روز) Flowering period length (days)
۱۴۰	۱۱۰	۱۰۰	۱۰۰	حداکثر عمق ریشه (سانتی متر) Maximum root depth (cm)
۹/۵	۰/۶۲	۲/۶۳	۲/۹۶	پوشش گیاهی اولیه (درصد) Primary vegetation cover (%)
۸۶	۹۰	۷۸	۸۳	حداکثر پوشش گیاهی (درصد) Maximum vegetation cover (%)

¹ Growing Degree Day

مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌توده محصولات زراعی و بررسی تأثیرات کمی آب بر عملکرد پذیرفته شده است و به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه تحت گزاره‌های مختلف شناخته می‌شود. برای مثال، علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2011) با ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبایی گندم در منطقه کرج نشان دادند برای دوره‌های آبیاری هفت روزه، مدل در برآورد مقدار عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب قابلیت خوبی داشته است. این محققان می‌گویند مدل AquaCrop نیاز به اطلاعات ورودی کمی دارد و از دقت کافی برخوردار است و از این رو آن به‌عنوان مدلی مفید در تخمین عملکرد گیاه در شرایط کشت دیم، آبیاری تکمیلی، کم‌آبایی و استراتژی‌های مدیریتی بهسازی کارایی مصرف آب در کشاورزی شناخته می‌شود. رجا و همکاران (Raja et al., 2019) اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی را در مرودشت - خرامه واقع در استان فارس یا استفاده از مدل AquaCrop بررسی کردند و نشان دادند مدل AquaCrop می‌تواند عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کم‌ترین میزان خطای نسبی (RE) ۰/۱۲، ۰/۴۶، ۰/۰۴، ۰/۱۴، ۰/۹۶- و ۰/۵۵ درصد به ترتیب برای گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای و چغندر قند برای شبکه‌ی مدرن درودزن و ۰/۷۶، ۰/۳۶ و ۰/۸۲- درصد به ترتیب برای گندم، جو و ذرت علوفه‌ای برای شبکه‌ی کربال در مرحله‌ی واسنجی مدل شبیه‌سازی کند.

در ادامه مطالعه، راهکارهای عملی و کم‌هزینه برای صرفه‌جویی مصرف آب با حداقل هزینه و آثار منفی بر معیشت کشاورز (کمترین کاهش عملکرد) مانند بهبود راندمان آبیاری، تغییر تاریخ کاشت، الگوهای مختلف کم‌آبایی بررسی شد. تابع هدف مطالعه صرفه‌جویی در مصرف آب یا هدف پیشگیری از برداشت مازاد از منابع آب زیرزمینی (پایداری آبخوان) قرار داده شده است.

پارامترهای مهم گیاهی به‌دست‌آمده در مرحله‌ی شبیه‌سازی و واسنجی مدل AquaCrop در مطالعه حاضر در جدول (۷) ارائه شده است. مدل AquaCrop برای شرایط منطقه‌ای و بر اساس عملکرد محصولات زراعی برحسب وزن خشک^۱ (DY_p) در منطقه هشتگرد واسنجی گردید. پارامترهای واسنجی شده مدل برای دستیابی به عملکرد خشک محصولات زراعی (DY_p)، عبارت‌اند از: توسعه گیاه (پوشش تاج اولیه، میزان ضریب کاهش تاج گیاه)، اجزای تولید محصول (شاخص برداشت مرجع و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای CO₂ و ETo)، عوامل مؤثر بر تنش آبی (عامل شکل منحنی برای ضریب تنش آبی و رشد برگ، آستانه بالایی تخلیه رطوبت خاک، آستانه پایینی تخلیه رطوبت خاک برای رشد رویشی)، دمای پایه و دمای قطع رشد. پارامترهای گیاهی پس از واسنجی مدل، در شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای محدوده هشتگرد به کار گرفته شد. ویژگی‌های فنولوژیکی مراحل مختلف رشد گیاهان که با حالت درجه - روز - رشد (GDD) AquaCrop محاسبه شدند که کلیه پارامترهای واسنجی با نتایج تحقیقات پیشین (Ghorbanian Kurdabadi et al., 2013; Tavakoli et al., 2015; Ramezani Etedali et al., 2016; Amiri et al., 2016; Karimi Organi et al., 2016) مطابقت دارد.

مدل AquaCrop توانست عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کم‌ترین میزان خطای نسبی (RE) ۰/۱۸، ۰/۵۸، ۰/۷۵- و ۰/۵۵- درصد به ترتیب برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای دشت هشتگرد در مرحله‌ی واسنجی (سال آبی ۹۸-۱۳۹۷) مدل شبیه‌سازی کند. میزان RE برای دوره اعتبارسنجی (سال آبی ۹۹-۱۳۹۸) به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۲۸-، ۰/۴۵ و ۰/۱۲ درصد به ترتیب برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه به دست آمد. مطالعات دیگر محققان (Khorsand et al., 2024; Lu et al., 2022; Xie et al., 2023; Eskandaripour et al., 2020; Amiri et al., 2018; Ramezani et al., 2018; Tavakoli et al., 2015; Ghorbanian Kurdabadi et al., 2013) نیز نشان می‌دهد

^۱ Dry Yield

جدول ۷- پارامترهای مهم گیاهی به کاررفته در مدل AquaCrop

Table 7- The crop parameters used in the AquaCrop model

توضیحات	یونجه	ذرت علوفه‌ای	جو	گندم	واحد	پارامتر
Remarks	Alfalfa	Forage maize	Barley	Wheat		Parameter
واستجی	۹/۵۰	۰/۶۲	۲/۶۳	۲/۹۶	%	پوشش تاج اولیه (CC ₀) Initial canopy cover (CC ₀)
Calibrated						
واستجی	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۷۸	۱/۳۲	% .GDD ⁻¹	ضریب کاهش پوشش گیاهی در پیری (CDC) Canopy decline (CDC)
Calibrated						
واستجی	۱/۳۸	۱/۰۸	۰/۹۱	۰/۴۷	% .GDD ⁻¹	ضریب افزایش پوشش گیاهی (CGC) Canopy increase (CGC)
Calibrated						
واستجی	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۱۲	۱/۰۵		ضریب تفرق گیاه KcTrx Kc Tr (crop transpiration)
Calibrated						
پیش فرض	۲۸	۳۱	۳۳	۱۵	g/m ²	ضریب بهره‌وری نرمال شده برای (ET ₀ و CO ₂) Normalized water productivity
Default						
پیش فرض	۵۰	۵۰	۶۰	۵۰	%	ضریب عملکرد تحت شرایط افزایش غلظت CO ₂ Performance under elevated [CO ₂] (Sink strength)
Default						
پیش فرض	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۳۰	-	آستانه بالا برای توسعه تاج گیاه Upper threshold for canopy expansion
Default						
پیش فرض	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۶۵	-	آستانه پایین برای توسعه تاج گیاه Lower threshold for canopy expansion
Default						
پیش فرض	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۶	۰/۵	-	آستانه بالای بسته شدن روزنه‌ها Upper threshold for stomatal closure
Default						
پیش فرض	۳/۵	۲/۹	۳	۵	-	عامل شکل برای توسعه تاج گیاه Shape factor of canopy expansion
Default						
پیش فرض	۵	۶	۳	۲	-	ضریب منحنی شکل برای تنش روزنه‌ها Stomatal stress coefficient curve shape
Default						
پیش فرض	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۵۵	۰/۷	-	ضریب منحنی شکل برای پیری تاج گیاه Canopy senescence stress coefficient (upper)
Default						
پیش فرض	۲/۱	۲/۵	۳	۲	-	ضریب منحنی شکل تنش پیری Coefficient curve shape
Default						
واستجی	۲۳	۱۹	۴۱	۵۳	%	شاخص برداشت (HI ₀) Reference Harvest Index (HI ₀)
Calibrated						
واستجی	۰	۸	۰	۰	سلسیوس	دمای پایه Base temperature
Calibrated						
واستجی	۳۰	۳۰	۱۶	۲۶	سلسیوس	دمای بالا Upper temperature
Calibrated						
واستجی	۱/۴۰	۱/۱	۱/۰	۱/۰	m	حداکثر عمق توسعه ریشه Maximum effective rooting depth
Calibrated						

نتایج سناریوها

سناریوی بهبود راندمان آبیاری

آبیاری و بدون تغییر سیستم، میزان آب صرفه‌جویی شده در آب آبیاری، با توجه به سطح اراضی زیر کشت، ۱/۴۵ میلیون مترمکعب خواهد بود. همین محاسبات برای محصول جو از ۵۳ به ۶۰ درصد، صرفه‌جویی به میزان ۰/۳۵ میلیون مترمکعب آب، در ذرت علوفه‌ای از ۵۷ به ۷۰ درصد به میزان ۲/۶۸ میلیون مترمکعب آب و در محصول یونجه با ارتقای راندمان از ۵۲ به ۶۵ به میزان ۳/۸۲ میلیون مترمکعب آب تخصیصی کاهش پیدا خواهد کرد. در مجموع، برای محصولات غالب در این محدوده که در برگیرنده ۷۶ درصد از زمین‌های زراعی زیر کشت است، با ارتقای راندمان به راندمان برتر، می‌توان در مجموع ۸/۳۰ میلیون مترمکعب در میزان آب آبیاری، در مقایسه با شرایط موجود در منطقه، صرفه‌جویی کرد (جدول ۸). سهم هر کشت در میزان صرفه‌جویی طبیعتاً متناسب با متوسط آب مصرفی در هکتار و سطح زمین‌های زیر هر کشت آن محصول است. در این میان، آب مصرفی برای ذرت علوفه‌ای و یونجه بیش از دیگر محصولات است.

بیش از ۷۵ درصد از زمین‌های زراعی آبی محدوده هشتگرد زیر کشت گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه قرار دارد. محاسبات نشان داد راندمان آبیاری برای گندم از ۴۳ تا ۶۰ درصد، جو از ۴۶ تا ۶۰ درصد، ذرت علوفه‌ای از ۴۷ تا ۷۰ درصد و یونجه از ۳۹ تا ۶۵ درصد متغیر است. محاسبات متوسط راندمان به صورت وزنی برای هر یک از محصولات برآورد شد. سطح راندمان ارتقا یافته به گونه‌ای انتخاب شد که چنین راندمانی با حداقل هزینه، حفظ شرایط ساختاری موجود، بدون تغییر سیستم‌های آبیاری و هزینه مضاعف توسط کشاورزان محدوده اغلب صورت می‌پذیرد. میزان کاهش تخصیص یا به عبارتی صرفه‌جویی در مصرف آب برای هر یک از محصولات غالب زراعی هشتگرد در جدول (۸) ارائه شده است. محاسبات نشان می‌دهد با ارتقای راندمان آبیاری از ۵۱ درصد موجود به ۶۰ درصد برای گندم بعنوان سطح برتر مدیریت در منطقه با توجه به شرایط موجود

جدول ۸- نتایج حاصل از بهبود راندمان برای محصولات زراعی غالب در کاهش میزان آب تخصیصی در محدوده دشت هشتگرد

Table 8- Estimated water savings from removing irrigation efficiency gaps for major crops within the Hashtgerd region

محصول Crop	متوسط آب مصرفی در هر هکتار (مترمکعب) Average water consumption per hectare (m ³)		سطح زیر کشت Cultivated area		کل آب تخصیص یافته (میلیون مترمکعب) Total allocated water (MCM)	میزان کاهش تخصیص (میلیون مترمکعب) Allocation reduction amount (MCM)	متوسط راندمان (درصد) Average E _a (%)	متوسط راندمان یافته (درصد) Target E _a (%)
	هکتار ha	درصد %						
گندم Wheat	۶۰۰۰	۲۶۹۱	۲۶/۸	۱۶/۱۴	۱/۴۵	۵۱	۶۰	
جو Barley	۵۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰/۰	۵/۰۰	۰/۳۵	۵۳	۶۰	
ذرت علوفه‌ای Forage maize	۱۰۰۰۰	۲۰۶۵	۲۰/۶	۲۰/۶۵	۲/۶۸	۵۷	۷۰	
یونجه Alfalfa	۱۶۰۰۰	۱۸۴۰	۱۸/۴	۲۹/۴۴	۳/۸۲	۵۲	۶۵	
مجموع Total	-	۷۵۹۶	۷۵/۸	۷۱/۲۳	۸/۳۰	-	-	

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد حدود ۶۰ درصد از زمین‌های آبی محدوده دشت هشتگرد به هلو، شلیل، سیب و آلو شابلون اختصاص دارد. محاسبات نیز نشان می‌دهد میزان راندمان آبیاری هلو از ۳۶ تا ۶۰ درصد، شلیل از ۳۴ تا ۶۰ درصد، سیب از ۳۰ تا ۵۵ درصد و آلو شابلون از ۳۳ تا ۵۵ درصد متغیر است. به طور مشابه متوسط آب مصرفی در هر هکتار برای هر یک از محصولات غالب باغی در مناطق مختلف محدوده متفاوت است و از این رو متوسط راندمان به طور وزنی محاسبه شد. میزان کاهش تخصیص یا به عبارتی صرفه‌جویی در مصرف آب برای هر یک از محصولات باغی غالب منطقه هشتگرد در جدول (۹) ارائه شده است.

محاسبات نشان می‌دهد با ارتقای راندمان آبیاری از ۴۸ درصد موجود به ۶۰ درصد برای هلو به‌عنوان سطح برتر مدیریت در منطقه با توجه به شرایط موجود آبیاری و بدون تغییر سیستم برای هلو، میزان آب صرفه‌جویی شده آب آبیاری با توجه به سطح زیر کشت به میزان ۳/۰۸ میلیون مترمکعب خواهد بود. همین محاسبات برای شلیل از ۴۷ به ۶۰ درصد به میزان ۲/۵۲ میلیون مترمکعب آب تخصیصی کاهش خواهد یافت. با ارتقای راندمان ۴۲ به ۵۵ درصد برای سیب و نیز ۴۴ به ۵۵ درصد برای آلو شابلون به ترتیب به میزان ۲/۲۸ و ۱/۵۱ میلیون مترمکعب در آب تخصیصی صرفه‌جویی خواهد شد. در مجموع، برای محصولات غالب

باغی در این محدوده که در بر گیرنده ۶۰ درصد از باغ‌های منطقه است با ارتقای راندمان به راندمان برتر، حدود ۹/۴ میلیون مترمکعب میزان تخصیص آب آبیاری، در مقایسه با شرایط موجود، کاهش پیدا خواهد کرد (جدول ۹). نتایج تحقیقات نیکبخت و نجیب (Nikbakht & Najib, 2015) درخصوص افزایش راندمان آبیاری بر نوسان‌های سطح ایستابی نشان داده است که با بهبود راندمان، سطح آب زیرزمینی در کل سطح دشت عجب‌شیر افزایش خواهد یافت. بنابراین، کاهش تخصیص لازم در اثر بهبود راندمان آبیاری در شرایط کمبود آب قابل دسترس (قابل تخصیص) در سال‌های کم‌آب اهمیت دارد زیرا در شرایط محدودیت آب، امکان بهره‌برداری از حداکثر زمین‌های زیر کشت و با حفظ عملکرد موجود امکان‌پذیر است. نگرشی نوین در خصوص مدیریت و راندمان آبیاری بیانگر این واقعیت است که مقدار صرفه‌جویی در میزان آب آبیاری در اثر بهبود راندمان آبیاری لزوماً مترادف با افزایش منابع آب قابل تامین برای مصارف دیگر نخواهد بود. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که سهم عمده از تلفات آبیاری (چه در قالب رواناب یا نفوذ عمقی) قابل بازیافت است و می‌توان از آن بار دیگر استفاده کرد (Liaghat et al., 2015). اهمیت این بررسی تعیین راهکارهای ممکن در تامین میزان آب آبیاری در شرائط محدودیت آب فراهم می‌کند.

جدول ۹- نتایج حاصل از بهبود راندمان برای محصولات باغی غالب در کاهش میزان آب تخصیصی در محدوده دشت هشتگرد
Table 9- Estimated water savings from removing irrigation efficiency gaps for major horticultural crops within the Hashtgerd plain

مجموع Crop	متوسط آب مصرفی در هر هکتار (مترمکعب) Average water consumption per hectare (m ³)	سطح زیر کشت Cultivated area		کل آب تخصیص یافته (میلیون مترمکعب) Total allocated water (MCM)	میزان کاهش تخصیص (میلیون مترمکعب) Allocation reduction amount (MCM)	متوسط راندمان (درصد) Average E _a (%)	متوسط راندمان یافته (درصد) Target E _a (%)
		درصد	هکتار ha				
هلو Peach	۹۰۰۰	۲۱/۶	۲۸۵۰	۲۵/۶۵	۳/۰۸	۴۸	۶۰
شلیل Nectar	۹۰۰۰	۱۶/۴	۲۱۵۶	۱۹/۴۰	۲/۵۲	۴۷	۶۰
سیب Apple	۱۲۰۰۰	۱۱/۱	۱۴۶۶	۱۷/۶۰	۲/۲۸	۴۲	۵۵
آلو شابلون Plum stencil	۱۰۰۰۰	۱۰/۴	۱۳۷۶	۱۳/۷۶	۱/۵۱	۴۴	۵۵
مجموع Total		۵۹/۵	۷۸۴۸	۷۶/۴۰	۹/۴۰	-	-

سناریوی تغییر تاریخ کاشت

یکی از راهکارهای ممکن در کاهش آب آبیاری مورد نیاز، تغییر تاریخ کاشت محصولات مختلف است. تغییر تاریخ کاشت می‌تواند منجر به کوتاه‌تر شدن دوره رشد، افزایش سهم باران مؤثر و در نتیجه کاهش نیاز آب آبیاری در دوره رشد گیاه شود. تاریخ کاشت برتر متناسب با شرایط آب و هوایی و بارندگی منطقه و سال مورد نظر طبیعتاً می‌تواند متفاوت باشد. نتایج حاصل از این بررسی برای دشت هشتگرد در جدول (۱۰) ارائه شده است. اطلاعات جمع‌آوری شده در خصوص تاریخ کاشت محصولات مختلف مبنای دامنه تاریخ ممکن برای تعیین تاریخ کاشت برتر قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد با انتخاب تاریخ کاشت برتر برای گندم در دهه اول آبان، برای گندم و جو به ترتیب به میزان ۵/۸ درصد و ۷/۴ درصد، دهه دوم تیر برای ذرت علوفه‌ای به میزان ناچیز ۰/۹ درصد و دهه دوم شهریور برای یونجه به میزان ۳/۱ درصد و در مجموع حدود ۲/۴ میلیون مترمکعب (۳/۳۷ درصد) در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد (جدول ۱۰). علاوه بر بررسی نتایج سناریو تغییر تاریخ کاشت بر نیاز آبی و آبیاری محصولات، اثربخشی نتایج آن بر میزان عملکرد نیز مهم است. بررسی نتایج مدل در سناریو تغییر تاریخ کاشت نشان می‌دهد هیچ اثر منفی قابل توجهی در میزان عملکرد محصولات ندارد. بازه تعیین شده برای تغییر تاریخ کاشت در بازه عرف منطقه است و اثربخشی آن بر استفاده بهینه از سهم باران مؤثر و در نتیجه کاهش نیاز آبیاری محصولات خواهد بود.

نتایج تحقیق والیا و همکاران (Walia et al., 2014) نشان داده است که زمان مناسب کاشت برای یک محصول

در مناطق مختلف متغیر است و تاریخ کاشت عاملی مهم و تعیین کننده در تولید محصول و صرفه‌جویی در مصرف آب است. این بررسی نشان می‌دهد میزان صرفه‌جویی در میزان آب آبیاری مورد نیاز به‌طور مشخص برای کاشت گندم و جو قابل توجه است که دلیل آن وسعت بالای زمین‌های زیر کشت این دو محصول و استفاده از باران مؤثر در فصل زمستان و بهار در منطقه است. لازم است گفته شود، انتخاب تغییرات کاشت هر یک از محصولات به گونه‌ای انتخاب شد که اولاً با بازه تاریخ کاشت محصول منطقه تناسب داشته باشد، ثانیاً تاریخ کاشت محصولات در تناوب زراعی محصولات پاییزه و بهاره تداخل وجود نداشته باشد. شاید بتوان با کاشت زود هنگام گندم و جو، با بهره‌گیری از بارش‌های پاییز و نیز با به‌تعویق انداختن کاشت ذرت علوفه‌ای در میزان مصرف آب آبیاری صرفه‌جویی بیشتری کرد، اما چون این امر منجر به تداخل کاشت و برداشت این محصولات با هم خواهد شد. به همین دلیل سعی شده بررسی تغییرات میزان آب مصرفی و آبیاری محصولات در اثر تغییر تاریخ کاشت در بازه معقول و امکان‌پذیر در منطقه بررسی شود. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد با به‌تعویق انداختن تاریخ‌های کاشت، به دلیل نیاز دمایی و شرایط GDD مربوط به هر گیاه، LCM برای گیاهان پاییزه و بهاره به ترتیب کوتاه‌تر و طولانی‌تر می‌شود. دلیل تفاوت LCM نسبتاً زیاد گندم و جو ممکن است تفاوت در فیلوکرون^۱ (GDD مورد نیاز برای تشکیل برگ گیاه) این دو گیاه باشد که GDD مورد نیاز فیلوکرون برای گندم اغلب ۱۱۵-۱۰۰ درجه - روز (Frank and Baver, 1995) و برای جو اغلب ۶۵-۶۸ درجه - روز (McMaster, 1994) است.

^۱ Phyllochron

جدول ۱۰- میزان آب صرفه جویی شده در دوره رشد گیاهان برای تاریخ های کاشت مختلف در دشت هشتگرد

Table 10- Water saving for different planting dates in the Hashtgerd plain

میانگین راندمان (درصد) Target E _a (%)	آب صرفه جویی شده (میلیون مترمکعب) Water savings (MCM)	سطح زیر کشت Cultivated area		تاریخ بهینه کاشت Optimal planting date	تاریخ های کاشت Planting dates	محصول Crop
		درصد %	هکتار ha			
۶۰	۰/۹۴	۲۶/۸	۲۶۹۱	دهه اول آبان	دهه اول آبان - دهه دوم آذر	گندم Wheat
۶۰	۰/۳۷	۱۰/۰	۱۰۰۰	دهه اول آبان	دهه اول آبان - دهه دوم آذر	جو Barley
۷۰	۰/۱۸۵	۲۰/۶	۲۰۶۵	دهه دوم تیر	دهه اول - دهه سوم تیر	ذرت علوفه ای Forage maize
۶۵	۰/۹۲	۱۸/۴	۱۸۴۰	دهه دوم شهریور	دهه اول شهریور - دهه سوم شهریور	یونجه Alfalfa
-	۲/۴۰	۷۵/۸	۷۵۹۶	-	-	مجموع Total

سناریوی کم آبیاری

مطلوب و تقریباً با پذیرش کاهش عملکرد ۱۰ درصد به میزان ۰/۷۳ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه جویی می شود. بررسی ها نشان می دهد میزان عملکرد و بهره وری آب در کشت گندم در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۵/۰ تن در هکتار و ۱/۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از اعمال سناریو کم آبیاری به ترتیب برابر با ۴/۷۵ تن در هکتار (۵ درصد کاهش) و ۱/۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۵ درصد افزایش) به دست می آید (شکل ۴). دیگر محققان (Khorsand *et al.*, 2014; Rezaverdinejad *et al.*, 2014; Amiri *et al.*, 2016; Amiri *et al.*, 2018; Khorsand *et al.*, 2024) نیز دریافتند که مدل AquaCrop در پیش بینی عملکرد گندم و کلزا تحت تنش های مختلف آبیاری و شوری کارایی قابل قبول دارد و می توان از این مدل برای بررسی سناریوهای مختلف استفاده کرد.

نتایج بررسی سناریوی کاهش عمق آب آبیاری برای جو با مدل AquaCrop نشان داد در سناریوی کم آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با پذیرش ۱۲ درصد کاهش عملکرد به میزان ۰/۵۴ میلیون مترمکعب و نیز در کم آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۲۳/۸ درصد کاهش عملکرد به میزان ۱/۰۸ میلیون مترمکعب در مصرف

در تبیین بهتر نتایج حاصل از بررسی الگوهای مختلف صرفه جویی آب در اثر سناریوی کم آبیاری علاوه بر میزان صرفه جویی در آب مصرفی، عملکرد متناظر و در نتیجه بهره وری آب نیز بررسی شد. نتایج بررسی ها درباره گندم، جو، ذرت و یونجه در زیر ارائه شده است.

بررسی سناریوی کم آبیاری برای گندم در دشت هشتگرد با در نظر گرفتن مقدار عمق آب آبیاری در شرایط IRR100% به عنوان مبنا برای بررسی سناریوی کم آبیاری با کاهش عمق های مختلف آبیاری در نظر گرفته شد. با بررسی این سناریو، مدل AquaCrop نشان داد در کم آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با پذیرش ۸ درصد کاهش عملکرد به میزان ۱/۷۲ میلیون مترمکعب و نیز در کم آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۱۶ درصد کاهش عملکرد به میزان ۳/۴۵ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه جویی می شود. با توجه به اینکه فاصله آبیاری ۲۰ روزه (F20) در محدوده هشتگرد دور آبیاری غالب محدوده است، بررسی فواصل مختلف آبیاری نتایج نشان داد در سناریوی افزایش فاصله آبیاری، ۲۵ روزه (F25)، با حفظ بهره وری

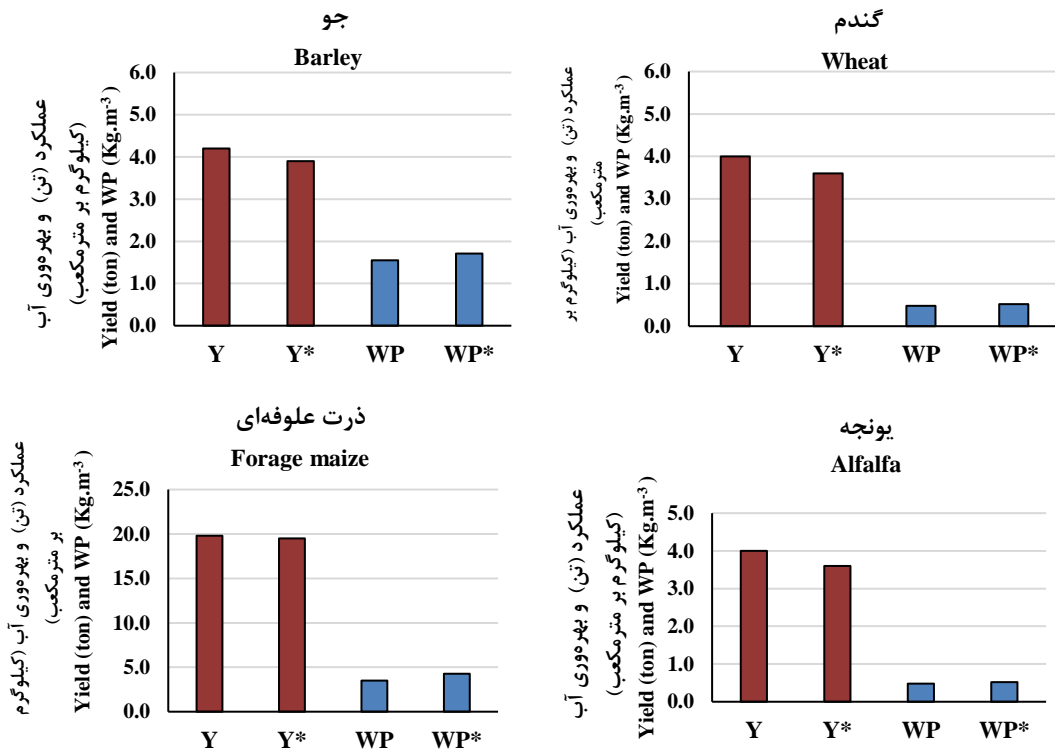
آب صرفه‌جویی می‌شود. نتایج بررسی فاصله‌های مختلف آبیاری نشان داد در فاصله آبیاری ۲۵ روزه (F25) با حفظ بهره‌وری مطلوب و تقریباً با پذیرش کاهش عملکرد ۵ درصد، به میزان ۲/۸۲ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. گزینه‌های مطلوب کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) و دور آبیاری ۲۵ روزه (F25) خواهد بود (جدول ۱۱). بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان عملکرد و بهره‌وری آب محصول جو در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۴/۲ تن در هکتار و ۱/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از اعمال سناریو کم‌آبیاری برابر با به ترتیب ۳/۹ تن در هکتار (۹ درصد کاهش) و ۱/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۰ درصد افزایش) است (شکل ۴). نتیجه مطالعات کریمی و همکاران (Karimi Organi et al., 2016) و رضانی و همکاران (Ramezani et al., 2018) نیز با بررسی عملکرد مدل AquaCrop برای جو نشان داد که این مدل قادر به برآورد و پیش‌بینی عملکرد مطلوب تحت سناریوهای مختلف آبیاری و تاریخ کاشت است. نتایج بررسی سناریوی کم‌آبیاری برای ذرت علوفه‌ای با مدل AquaCrop نشان داد در سناریوی کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با حفظ عملکرد، به میزان ۲/۳۵ میلیون مترمکعب و نیز کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۵/۵۶ درصد کاهش عملکرد، به میزان ۴/۷۱ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. فاصله آبیاری ۹ روزه (F9) در محدوده دشت هشتگرد، دور آبیاری غالب ذرت علوفه‌ای است. بررسی فواصل مختلف آبیاری نشان داد در سناریوی افزایش فاصله آبیاری ۱۲ روزه (F12) با حفظ بهره‌وری مطلوب و تقریباً با پذیرش کاهش عملکرد ۳/۵ درصد، به میزان ۰/۹ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. بنابراین، گزینه‌های کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) و دور آبیاری ۱۲ روزه (F12) خواهد بود (جدول ۱۱). میزان عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۱۹/۸ تن در هکتار و ۳/۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از

اعمال سناریو کم‌آبیاری برابر با به ترتیب ۱۹/۵ تن در هکتار (۲ درصد کاهش) و ۴/۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب (۲۲ درصد افزایش) خواهد بود (شکل ۴). نتایج مطالعات امیری و خورسند (Amiri & Khorsand, 2018) و قربانیان کردآبادی و همکاران (Ghorbanian Kurdabadi et al., 2013) با بررسی اثر کم‌آبیاری برای ذرت نشان داد که با مدیریت کم‌آبیاری می‌توان با حفظ عملکرد مطلوب و کاهش مصرف آب آبیاری، کارایی مصرف آب را افزایش داد که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

بررسی سناریوی کم‌آبیاری برای یونجه با مدل AquaCrop نشان داد کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) با پذیرش ۱۰ درصد کاهش عملکرد، به میزان ۳/۰۵ میلیون مترمکعب و در کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد (IRR60%) با پذیرش ۱۷/۵ درصد کاهش عملکرد به میزان ۶/۱ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. بررسی فاصله‌های مختلف آبیاری نشان داد در فاصله آبیاری ۱۵ روزه (F15) با حفظ بهره‌وری مطلوب و تقریباً با پذیرش کاهش عملکرد ۷/۵ درصد، به میزان ۰/۹ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد. در سناریوی افزایش دور آبیاری ۱۸ روزه (F18) صرفه‌جویی قابل توجهی به میزان ۱/۹۸ میلیون مترمکعب ایجاد خواهد شد اما چون کاهش عملکرد به میزان ۲۰ درصد اتفاق می‌افتد به لحاظ اقتصادی برای کشاورز مطلوب نخواهد بود. گزینه‌های مطلوب کم‌آبیاری در سطح ۸۰ درصد (IRR80%) و دور آبیاری ۱۵ روزه (F15) خواهد بود (جدول ۱۱).

میزان عملکرد و بهره‌وری آب محصول یونجه در شرایط موجود به ترتیب برابر با ۴/۰ تن در هکتار و ۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب و پس از اعمال سناریوی کم‌آبیاری به ترتیب برابر با ۳/۶ تن در هکتار (۱۰ درصد کاهش) و ۰/۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۴ درصد افزایش) است (شکل ۴). رضانی و همکاران (Ramezani et al., 2017) نیز برداشت‌های مختلف گیاه یونجه را در اردستان با استفاده از مدل AquaCrop

ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده AquaCrop مدل گیاهی قدرتمند و با ارزشی برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب یونجه است. به طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد با اتخاذ برترین سناریوهای کم‌آبیاری برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه در سطح ۷۵۹۶ هکتار (معادل ۷۵/۸ درصد از کل سطح زیر کشت محصولات زراعی) در دشت هشتگرد، صرفه‌جویی قابل توجهی به میزان ۱۰/۵ میلیون مترمکعب در سطح کل دشت اتفاق خواهد افتاد (جدول ۱۱).



شکل ۴- مقدار عملکرد و بهره‌وری آب برای محصول گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه در شرایط موجود (Y, WP) و بعد از اعمال سناریو کم‌آبیاری (Y*, WP*)

Figure 4- The amount of yield and water productivity for wheat, barley, forage maize and alfalfa crops under existing conditions (Y, WP) and after applying the deficit irrigation scenario (Y*, WP*)

جدول ۱۱- صرفه جویی در مصرف آب برای محصولات مختلف پس از اعمال سناریوها
Table 11- Water savings for different crops after applying the scenarios

صرفه‌جویی آب (میلیون مترمکعب) Water savings (MCM)	مساحت Area		سناریو برتر Optimal scenario	محصول Crop
	درصد %	هکتار ha		
۱/۷۲	۲۶/۸	۲۶۹۱	IRR80-IF25	گندم Wheat
۱/۰۸	۱۰/۰	۱۰۰۰	IRR80-IF25	جو Barley
۴/۷۱	۲۰/۶	۲۰۶۵	IRR60-IF12	ذرت علوفه‌ای Forage maize
۳/۱	۱۸/۴	۱۸۴۰	IRR80-IF20	یونجه Alfaalfa
۱۰/۵۳	۷۵/۸	۷۵۹۶	-	کل Total

نتیجه‌گیری

به سطوح ارتقا راندمان در مناطق مختلف و برای کشت‌های مختلف منجر به صرفه‌جویی به میزان ۱۷/۷ میلیون مترمکعب (۵/۹ درصد) صرفه‌جویی در مصرف آب تخصیصی خواهد شد که می‌توان در شرایط کم‌آبی امکان تامین آب مورد نیاز محصولات را بدون کاهش عملکرد فراهم کرد. در عین حال، از گزینه مدیریتی تغییر تاریخ کاشت بر میزان نیاز خالص آبیاری در محصولات مختلف با توجه به امکان کاهش نیاز خالص آبی گیاه به دلیل کاهش طول دوره رشد و امکان افزایش بهره‌وری از میزان بارش و نهایتاً تاثیر آن در میزان صرفه‌جویی آب مورد بررسی و نشان داده شد با انتخاب تاریخ کاشت بهینه (با توجه به دامنه تاریخ کشت متداول در منطقه) برای محصولات غالب محدوده دشت هشتگرد به کاهش نیاز ناخالص آبیاری به میزان ۲/۴ میلیون مترمکعب (۰/۸ درصد) می‌انجامد. گزینه دیگر مدیریتی، اعمال کم‌آبیاری تحت الگوهای مدیریتی مختلف برای محصولات غالب زراعی، نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و نیز با مدیریت دوره‌های آبیاری صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان آب مورد نیاز خواهد شد. با اعمال کم‌آبیاری می‌توان به میزان ۱۹/۳ میلیون مترمکعب (۶/۰ درصد) در دشت هشتگرد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در بسیاری از مواقع می‌توان بدون زیر بار رفتن هزینه‌های کلان برای تامین امکانات و تجهیزات مدرن، در شرایط مدیریتی برتر موجود در منطقه با اعمال سناریوهای مختلف از جمله بهبود راندمان، تغییر تاریخ کاشت و کم‌آبیاری در مصرف آب آبیاری مورد نیاز صرفه‌جویی قابل توجهی کرد. سهم هر کشت در میزان صرفه‌جویی طبیعتاً متناسب است با متوسط آب مصرفی در هکتار و سطح اراضی تحت هر کشت.

وضعیت کنونی دشت هشتگرد حاصل عملکرد مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی طی دهه‌های گذشته است و احیاء و تعادل بخشی آب زیرزمینی دشت در اولویت قرار دارد. در این مطالعه، وضعیت منابع و مصارف دشت هشتگرد در استان البرز برآورد شد. به طور کلی بر اساس آمار درازمدت سطح آب زیرزمینی (۹۹-۱۳۷۰) به‌طور متوسط سالانه حدود ۶۸ سانتی‌متر افت دارد و میزان سالانه متوسط کسری مخزن برابر با ۱۶/۸۲ میلیون مترمکعب است. الگوی کشت منطقه شامل گندم پاییزه، جو پاییزه، ذرت علوفه‌ای و یونجه و عمده محصولات باغی در این منطقه هلو، آلوچه، شلیل و سیب است. از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی و مقدار آب مصرفی در منطقه استفاده شد. واسنجی مدل AquaCrop برای شرایط منطقه‌ای و بر اساس عملکرد محصولات زراعی نشان داد این مدل به‌خوبی می‌تواند عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کم‌ترین میزان خطای نسبی (RE) برای گندم، جو، ذرت علوفه‌ای و یونجه برای دشت هشتگرد در مرحله واسنجی مدل شبیه‌سازی کند. راهکارهای عملی و کم‌هزینه برای صرفه‌جویی در مصرف آب با حداقل هزینه مانند تغییر تاریخ کاشت، الگوهای مختلف کم‌آبیاری نیز بررسی شدند.

یکی از گزینه‌های کاهش برداشت از منابع آب در مطالعه حاضر، با توجه به پایین بودن راندمان آبیاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ضعف‌های مدیریت آب کشاورزی، اثربخشی ارتقاء راندمان آبیاری به راندمان برتر موجود در منطقه به‌عنوان راهکار مدیریتی قابل دستیابی، بدون تغییر روش آبیاری در دشت هشتگرد است. بررسی‌ها نشان داد، با توجه

مراجع

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., & Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110: 55-66.

- Agricultural Jihad. (2021). Alborz province agricultural statistics in the hydrological year 2019-2020, 84 pp.
- Alborz Regional Water Organization. (2020). Investigating the state of water resources and annual consumption of Alborz province in the hydrological year 2019-2020. Iran Water Resources Management Company, Water Resources Basic Studies Office. 37 pp.
- Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani, Etedali, H., & Janbaz, H.R. (2011). Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 4(2), 273. (In persian)
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56: 97-156.
- Amiri, E., & Khorsand, A. (2018). Evaluation of Aquacrop model to predict maize total biomass and grain yield under different water regimes and fertilizer. *Plant Ecophysiology*, 10(33), 174-185. (In persian)
- Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2016). Evaluating AquaCrop Model Performance to Predict Grain Yield and Wheat Biomass, Under Water Stress. *Water and Soil Science*, 25(4/2), 217-229. (In persian)
- Amiri, E., Khorsand, A., Daneshian, J., & Yousefi, M. (2018). Predicting biomass and grain yield in canola under different water regimes and fertilizers using AquaCrop model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), 57-72. (In persian)
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama. A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agriculture Water Management*, 100 (1), 1-8.
- Consulting engineers for water and sustainable development. (2009). Studies on the updating of the balance of water resources, the study areas of the Salt Lake watershed, water balance report, sustainable water and development consulting engineers. *Appendix No. 5*, 79 pp. (In persian)
- Djaman, K. (2011). Crop evapotranspiration, crop coefficients, plant growth and yield parameters, and nutrient uptake dynamics of maize (*Zea mays* L.) under full and limited irrigation. The University of Nebraska-Lincoln.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and drainage paper*, 33, 257.
- Droogers, P., Immerzeel, W.W., & Lorite, I. J. (2010). Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. *Agriculture Water Management*, 97, 1351-1359.
- Eskandaripour, R., Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Zeinalzadeh, K., & Norjoo, A. (2020). Investigation of Polyethylene Mulch on Improvement of Tomato Water Use Efficiency using AquaCrop Model. *Journal of Plant Ecophysiology*, 11(39), 71-85. (In persian)
- Esmaili Falak, A., & Abbasi, F. (2024). Introduction and Analysis of Effective Megatrends in Water, Soil and Agriculture in the World and Iran Until 2050. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 24(93), 101-118. doi: 10.22092/idser.2024.365754.1581 (In persian)
- Farahani, H. J., Steduto, P., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronmi Journal*, 101, 469-476.
- Frank, A. & Bauer, A. (1995). Phyllochron difference in wheat, barley and forage grasses. *Crop Science*, 35: 19-23.
- Garcia-Vila, M., Fereres, E. Mateos, L., Orgaz, F., & Steduto, P. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronmi Journal* 101: 477- 487.
- Ghorbanian Kurdabadi, M., Liaghat, A.M, Vatankhah, E., & Noori, H. (2013). Simulation of yield and evapotranpiration of forage maize using AquaCrop model. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 4(1), 48-64. (In persian)
- Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A., & Hsiao, T.C. (2009). Calibration and testing of FAO AquaCrop model for maize in several locations. *Agronmi Journal*, 101: 488-498.
- Jafari, H., & Abbasi, F. (2024). Evaluation of wheat water irrigation management in Iran with the approach of reducing the area under cultivation and improving water productivity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. doi: 10.22059/ijswr.2024.380800.669778 (In persian)

- Karimi Organi, H., Rahimi Khoob, A. & Nazari Fard, M.H. (2016). Calibration and validation of Aquacrop model for berlay in Pakdasht region. *Iranain Water and Soil Research*, (3) 47, 539-549. (In persian)
- Khorsand, A., Dehghanisanij, H., Heris, A.M., Asgarzadeh, H., & Rezaverdinejad, V. (2024). Calibration and evaluation of the FAO AquaCrop model for canola (*Brassica napus*) under full and deficit irrigation in a semi-arid region. *Applied Water Science*, 14(3), 56.
- Khorsand, A., Verdinejad, V.R., & Shahidi, A. (2014). Performance evaluation of AquaCrop model to predict yield production of wheat, soil water and solute transport under water and salinity stresses. *Water and Irrigation Management*, 4(1), 89-104. (In persian)
- Li, W., Song, R., Awais, M., Ji, L., Li, S., Liu, M., ... & Qi, H. (2024). Global Sensitivity Analysis of Crop Parameters Based on AquaCrop Model. *Water Resources Management*, 38(6), 2039-2058.
- Liaghat, A. M., Mokari Ghahroodi, E., Noory, H., & Sotoudenia, A. (2015). Evaluation of Qazvin Plain Irrigation Systems Through an Assessment of Classical vs Neoclassical Irrigation Efficiencies. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(2), 343-351. doi: 10.22059/ijswr.2015.55938 (In persian)
- Lu, Y., Wei, C., McCabe, M. F., & Sheffield, J. (2022). Multi-variable assimilation into a modified AquaCrop model for improved maize simulation without management or crop phenology information. *Agricultural Water Management*, 266, 107576.
- McMaster, G.L., Wilhelm, W., & Morgan J. (1994). Simulating winter wheat shoot apex phenology. *The journal of agricultural science*. 119, 1-12.
- Niamnsi, Y.N., & Mbue, I.N. (2009). Estimation for ground water balance based on recharge and discharge: a tool for sustainable ground water management. *Zhonghu County Alluvial Plain Journal American Science*, 5 (2), 40-83.
- Nikbakht, J., & Najib, Z. (2015). Effect of irrigation efficiency increasing on groundwater level fluctuations (Cast study: Ajab-Shir Plain, East Azarbaijan). *Water and Irrigation Management*, 5(1), 115-127. (In persian)
- Parsinejad, M., Raja, O., & Chehrenegar, B. (2022). Practical analysis of remote sensing estimations of water use for major crops throughout the Urmia Lake basin. *Agricultural water management*, 260, 107232.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2016). Refrence Manual Aquacrop Version 5.0 Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Freres, E. (2012). Refrence Manual Aquacrop, FAO, *Land and Water Division*, Rome Italy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres. E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101, 438-447.
- Raja, O., & Parsinejad, M. (2023). Cost-effective strategies to improve crop water productivity—case study: Bakhtegan and Maharloo, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), 883-894.
- Raja, O., Parsinejad, M., & Sohrabi, T. (2019). Evaluation of managment strategies to reduce water use in Marvdasht-Kharameh study area, *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 8(4), 67-86. (In persian)
- Raja, O., Parsinejad, M., Sohrabi, T., & Ahmadaali, Kh. (2019). Status Investigation of the Marvdasht-Kharameh water resources using sustainability analysis indicators, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 897-909. (In persian)
- Ramezani Etedali, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., & Tavakkoli, A. (2016). AquaCrop Model Calibration and Evaluation in Irrigation Management for Main Grains. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(3), 389-397. (In persian)
- Ramezani, F., Kaviani, A., & Ramezani Etedali, H. (2017). Evaluation of AquaCrop Model for different Harvesting time of Alfalfa in Ardestan. *Water and Soil*, 31(3), 738-753. (In persian)

- Ramezani, M., Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2018). Simulating Barley Yield under Different Irrigation Levels by using AquaCrop Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(4), 161-172. (In persian)
- Rasaei, A. H., Sharafati, A., & Kardan Moghaddam, H. (2020). Analysis of Groundwater Uncertainty in Climate Change (Case study: Hashtgerd Plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(3), 815-827. (In persian)
- Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., & Shahidi, A. (2014). Evaluation and comparison of AquaCrop and FAO models for yield prediction of winter wheat under environmental stresses. *J. Biodivers. Environ. Sci*, 4(6), 438-449.
- Salemi, H.R., Mohd Soom, M.A., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A., & Yusoff, M.K. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610, 2204-2215.
- Schiermeier, Q. 2014. Water risk as world warms. *Nature*, 505, 10-11.
- Shirazi, M., & Nateghi, S. (2020). Determination of the Relationships Between the Meteorological and Hydrological Droughts in the Hashtgerd Plain. *Watershed Management Research*, 33(1), 72-87. (In persian)
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. FAO Roma.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101: 426– 437.
- Taheri Tizro, A., Nozari, H., & Alikhani, H. (2016). Spatio-Temporal Water Levels Forecasting by Time Series-Geostatistics as a Hybrid Model in Hashtgerd Plain-Alborz Province. *Journal of Water and Soil Science*, 20 (76), 99-113. (In persian)
- Tavakoli, A.R., Moghadam M.M. & Sepaskhah, A.R. (2015). Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural Water Management*, 161: 136-146.
- UNESCO. (2010). science report 2010, The Current Status of Science around the World, pp.542.
- Wali, U.S., Walia, S.S., Sidhu, A.S., & Nayyar, S. (2014). Productivity of direct seeded rice in relation to different dates of sowing and varieties in central Punjab. *Journal of Crop and Weed*, 10 (1): 126-129.
- Xie, Z., Kong, J., Tang, M., Luo, Z., Li, D., Liu, R., ... & Zhang, C. (2023). Modelling winter rapeseed (*Brassica napus* L.) growth and yield under different sowing dates and densities using AquaCrop model. *Agronomy*, 13(2), 367.
- Zhang, C., Kong, J., Tang, M., Lin, W., Ding, D., & Feng, H. (2023). Improving maize growth and development simulation by integrating temperature compensatory effect under plastic film mulching into the AquaCrop model. *The Crop Journal*, 11(5), 1559-1568.

Evaluation the Effectiveness of Management Strategies to Reduce Agricultural Water Use by Using the AquaCrop Model (Case Study: Hashtgerd plain)

***O. Raja, S. Veysi, A. Barzegar**

***Corresponding Author:** ¹ Researcher, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 13 October 2024, **Accepted:** 5 November 2024

Email: omid.raja@ut.ac.ir

<https://doi.org/10.22092/idser.2024.367320.1595>

Extend Abstract

Intouduction

Many factors have contributed to the drop in the water table of groundwater, including the increase in cultivated area, decrease in rainfall, climate change, and the continuation of drought in recent years, and withdrawing excessive amounts of surface water sources and groundwater from unauthorized wells, which has faced serious challenges in the water sector in Alborz province. The Hashtgerd plain is located in the Alborz province. The current situation of the Hashtgerd plain is the result of a series of human and natural factors over the past few decades, and the restoration and balance of the underground water of the plain is a priority. According to long-term statistics, the groundwater level has decreased by 19.8 m in 29 years (1990-2019) on average, there is a drop in the groundwater level of about 68 cm. per year. The total aquifer deficit is 487.85 million cubic meters, and the average annual amount of the aquifer deficit is 16.82 million cubic meters (6.2%). Given these conditions, it is essential to apply effective solutions for optimal and efficient water management.

Methodology

The purpose of this study was to provide practical and low-cost solutions to save water consumption in Hashtgerd Plain. There are different solutions with minimal cost, such as improving irrigation efficiency, changing the planting date, and different patterns of deficit irrigation. The approach of this study is to present and examine solutions that do not require changing the irrigation system or even changing the cultivation pattern and also not reducing the cultivated area in the region. It is the examination of the solutions that can be implemented at the lowest possible cost without adversely affecting the livelihood of farmers. The objective of the study was to reduce water consumption or prevent from excessive groundwater of Hashtgerd plain aquifer. The proposed solutions do not require new tools such as precision leveling machines and, so on. Each of the above strategies was evaluated based on the actual conditions in the region. The main objective was to evaluate and estimate the water requirements of the dominant crops in the Hashtgerd Plain, and to present different scenarios for improving irrigation efficiency according to the superior conditions in the region. The feasibility of saving water consumption through strategies to change the planting date and deficit irrigation was evaluated using the AquaCrop 6.0 model.

Results and discussion

In this study, the AquaCrop model was used to simulate the yield of crops and the amount of water use in the region. The calibration of the AquaCrop model for regional conditions has demonstrated that the AquaCrop model is capable of predicting crop yield with the lowest relative error (RE) for wheat, barley,

fodder corn, and alfalfa for the plains during the calibration phase of the simulation model. According to the levels of efficiency improvement in different regions and for different crops, it will lead to savings of 17.7 million cubic meters (5.9%) in the amount of allocated water consumption. This will can provide the possibility of supplying water to a larger area of land without reducing yield under water scarcity conditions. The outcomes of the scenario involving a change in planting date through AquaCrop model simulation demonstrated that this management pattern has the potential to reduce water consumption by 2.4 million cubic meters (0.8%) in the region. In addition, different levels of deficit irrigation can save 19.3 million cubic meters of water consumption.

Conclusions

The obtained results show that in many cases, it is possible to provide without modern facilities and huge costs, applying different scenarios such as improving efficiency, changing planting dates and deficit irrigation has achieved significant savings in the required irrigation water consumption. Naturally, the share of each crop in the amount of savings is proportional to the average water consumption per hectare and the area of land under each crop. In general, the AcuCrop model can be used as a practical tool for simulating crop yield and evaluating management scenarios.

Keywords: Alborz Province; Deficit Irrigation; Irrigation Efficiency; Optimal Planting Date; Water Saving

شبیه‌سازی عددی دبی آبگیر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از مدل ماشین یادگیری

ایمان کریمی سرمیدانی^۱، محمد حیدر نژاد^{۲*}، اصلا ن اگدر نژاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سواحل، بندر و سازه‌های دریایی، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^{۲*} دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^۳ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

چکیده

نقش آبشکن‌ها در حفاظت از دیواره رودخانه، آن‌ها را جزء موضوع‌های مهم مهندسی رودخانه قرار داده است. در این مطالعه، عملکرد دو مدل یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) با نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی میزان دبی انحرافی در مقیاس آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. برای مدل فیزیکی در یک فلوم آزمایشگاهی با دو نوع آبشکن T-شکل و L-شکل و با زاویه‌های ۹۰ و ۱۳۵ درجه برای انحراف دبی به کانال آبگیری شبیه‌سازی شد. سه متغیر مستقل شامل عدد فرود جریان، زاویه آبگیری و طول نسبی آبشکن‌ها برای مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شدند. از ۹۶ داده آزمایشگاهی، ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون مدل‌های یادگیری ماشین اختصاص یافت. سه شاخص RMSE، MAE و R² برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها به کار گرفته شدند. نتایج تحقیق نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) نسبت به ماشین بردار پشتیبان (SVM) عملکرد بهتری دارد به طوری که در مرحله آموزش و آزمون، مقدار ضرایب ارزیابی عملکرد برای هر دو آبشکن T-شکل و L-شکل دارای برتری بودند. در نرم‌افزار FLOW-3D، ضریب زبری مانینگ و نوع معادله شبیه‌ساز آشفتگی در فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شدند. مقایسه بین مقادیر ارزیابی عملکرد نشان دهنده برتری نسبی GEP نسبت به FLOW-3D است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی عملکرد، آبشکن، دبی انحرافی، قوس رودخانه، مدل داده-مبنا

مقدمه

محل دشوار خواهد بود. از آبشکن‌ها برای افزایش دبی ورودی به آبگیرها بهره می‌برند. آبشکن‌ها از مهم‌ترین سازه‌های حفاظتی رودخانه‌ها هستند. آبشکن‌ها سازه‌هایی از جنس سنگ، بتن، شن، صخره، خاک یا فلز هستند که در مقطع عرضی رودخانه با زاویه‌ای ساخته می‌شوند تا جریان آب را به سمت مرکز رودخانه هدایت کنند. احداث آبشکن در محل آبگیرها منجر به افزایش دبی برداشت شده از رودخانه می‌شود. در واقع، آبشکن‌ها سازه‌هایی نصب شده در نقطه ورودی سیستم برداشت آب هستند تا جریان آب ورودی را بهینه‌تر کنترل و افزایش دبی آبگیری را تسهیل کنند.

یکی از قدیمی‌ترین و ارزان‌ترین روش‌ها برای استفاده از آب رودخانه‌ها در کاربردهای مختلف، ساخت آبگیرهای ثقیلی است. در گذشته، آبگیری از رودخانه‌ها به شکل سنتی و با استفاده از نیروی ثقل بود، اما اکنون این روش به سازه‌های هیدرولیکی پیشرفته با معیارهای مدرن تبدیل شده است. آبگیرها به عنوان سازه‌هایی طراحی می‌شوند تا آب را از رودخانه‌ها برداشت کنند. برداشت آب سطحی معمولاً به دو شیوه است: پمپاژ و ثقلی. روش ثقلی به دلیل جریان مداوم و نیاز نداشتن به انرژی پمپاژ، برتری دارد. انتخاب محل مناسب آبگیری برای موفقیت پروژه بسیار اهمیت دارد، زیرا پس از اجرای پروژه، اصلاح مشکلات ناشی از انتخاب نادرست

آبشکن T-شکل را از روش CFD به کمک FLOW-3D در مجرای صلب با قوس ۹۰ درجه بررسی کردند که نتیجه آن وجود گردابه پادساعتگرد در پایین دست آبشکن بود. اعزی و همکاران (Aezzi *et al.*, 2018) با استفاده از مدل عددی دو بعدی CCHE2D الگوی جریان و تغییرات بستر آبراهه در اطراف سازه آبشکن را شبیه سازی کردند و دریافتند مدل عددی با دقت مناسبی الگوی جریان را در اطراف آبشکن منفرد و سری آبشکن ها شبیه سازی می کند. بهنام طلب و همکاران (Behnamtalab *et al.*, 2019) آبشکن متخلخل را با استفاده از نرم افزار FLOW-3D شبیه سازی عددی کردند. در این پژوهش، تأثیر احداث تک آبشکن متخلخل بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در کانال باز با استفاده از مدل عددی به کمک کالیبراسیون مدل غیرخطی فورشه ایمر بررسی شد. برای شبیه سازی عددی از نرم افزار FLOW-3D و برای شبیه سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش تخلخل آبشکن موجب کاهش ارتفاع آب در بالادست آبشکن و افزایش ارتفاع در پایین دست آبشکن می شود. همچنین مشاهده گردید افزایش تخلخل از مقدار بیشینه سرعت می کاهد و طول اثر آن را کاهش و کمینه سرعت را افزایش خواهد داد. پژوهش آزمایشگاهی اسمعیلی و همکاران (Esmaeli *et al.*, 2020) روی تاثیر آبشکن بر مؤلفه طولی سرعت مؤید آن بود که وجود آبشکن های متوالی منجر به کاهش سرعت جریان در دیواره خارجی می شود. شاهی نژاد و همکاران (Shahinejad *et al.*, 2023) با استفاده از الگوریتم چند هدفه به طراحی بهینه ابعاد آبشکن T-شکل پرداختند. نتایج پژوهش این محققان نشان دهنده این مطلب بود که مدل ارائه شده، در مقایسه با طراحی دیگر پژوهشگران، خروجی بهینه تری را به دست می دهد. آچاریا و دوان (Acharya & Duan, 2011) الگوی جریان در آبشکن های تیغه ای متوالی را در مسیر مستقیم در دو حالت بستر ثابت و متحرک با دو مدل آزمایشگاهی و مدل عددی FLOW-3D بررسی کردند. طلعت و همکاران (Talaat *et al.*, 2009) برای معرفی آبشکن های غیرمستغرق به منظور کاهش فرسایش کناری رودخانه ها در ناگاممدی واقع در

علینقی زاده بهبهانی (Ali-Nagizadeh-Behbahani,) (2013) با استفاده از مدل فیزیکی، شرایط هیدرولیکی جریان را در آبگیرهای با زاویه انحراف ۹۰ و ۷۵ درجه بررسی کرد و نشان داد که اندازه زاویه انحراف تأثیر زیادی بر نسبت دبی انحرافی دارد. واقفی و قدسیان (Vaghefi & Ghodsian,) (2010) به صورت آزمایشگاهی الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر متحرک را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که با پیشروی به سمت پایین دست قوس، قدرت جریان ثانویه گردابه دوم افزایش می یابد و در انتهای قوس با غلبه بر جریان ثانویه اصلی، باعث تغییر جهت جریان از ساحل خارجی به سمت ساحل داخلی می شود. شاکر و کاشفی پور (Shaker & Kashefipour, 2014) با بررسی آزمایشگاهی توزیع سرعت و تنش برشی جریان در قوس ۹۰ درجه با وجود سری آبشکن ها و بدون آنها، نشان دادند که وجود سری آبشکن ها سبب یکنواختی سرعت بالادست و انتقال ناحیه پرسرعت از مجاورت دیواره خارجی به سمت میانه کانال تا دیواره داخلی می شود. معروفی نیا و همکاران (Maroofi-nia *et al.*, 2016) تأثیر صفحات مستغرق و آبشکن را در کنترل رسوب ورودی به آبگیر جانبی به کمک نرم افزار SSIIM2 شبیه سازی عددی کردند. به منظور هدایت جریان به سمت آبگیر و افزایش کارایی صفحات، از آبشکن در سمت مقابل آبگیر استفاده شد و اثر پارامترهای طول آبشکن و فاصله آن از مقابل آبگیر در زاویه ۹۰ درجه با جریان در کانال اصلی به ازای نسبت های مختلف دبی آبگیری بر حجم رسوبات وارد شده به آبگیر بررسی شد. حسینی اصلی چکوسری و همکاران (Hosseini-Asli *et al.*, 2015) با نرم افزار FLUENT به شبیه سازی سه بعدی میدان جریان در آبگیرهای جانبی شامل، سازه سد انحرافی، دیواره جداکننده، مجرای تخلیه رسوب، ارتفاع آستانه و آبگیر جانبی پرداختند. نتایج مدل عددی و فیزیکی از نظر ناحیه جداشدگی جریان، الگوی جریان، گردابه ها و جریان های ثانویه مقایسه شدند. مدلسازی عددی جریان با مدل آشفتگی K-e و برای زاویه آبگیری ۱۲۰ درجه و نسبت های آبگیری ۰/۵ و ۰/۶۵ صورت گرفت. واقفی و قدسیان (Vaghefi & Ghodsian, 2010) الگوی جریان در اطراف

کردند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد دیواره جداکننده بالادست تاثیر بسیار چشمگیری در آبگیری کانال دارد. عباسی چناری و همکاران (Chenari et al., 2024) موضوع افزایش راندمان آبگیر جانبی تحت تاثیر آبشکن در محل آبگیر همت در ایران را به کمک نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند و نشان دادند وجود آبشکن باعث افزایش تنش برشی در ورودی آبگیر می‌شود. اما به دلیل تاثیر مثبتی که روی افزایش سرعت جریان دارد باعث کاهش رسوب ورودی به کانال آبگیر می‌شود. مندل و همکاران (Mandal et al., 2024) نیز اثر صفحات مستغرق را روی رسوب ورودی و باز توزیع جریان در محل آبگیر بررسی کردند.

مرور پژوهش‌های پیشین مؤید تحقیقات آزمایشگاهی و عددی روی ویژگی‌های انواع مختلف آبشکن و تأثیرپذیری الگوی جریان از آنهاست. اما حال مطالعه‌ای در خصوص کاربرد و مقایسه همزمان مدل‌های عددی و داده‌مبنای در زمینه بررسی ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی روی میزان دبی انحرافی از کانال آبگیری با حضور دو نوع آبشکن T- شکل و L- شکل وجود ندارد. به همین دلیل، در این تحقیق عملکرد دو مدل یادگیری ماشین شامل SVM و GEP با مدل FLOW-3D، که مبتنی بر CFD است، در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

در مطالعه پدیده‌ها در آزمایشگاه، بررسی روابط میان متغیرهای مستقل با متغیر وابسته جایگاه ویژه‌ای دارد. در این میان، اعداد بدون بعد نقش کلیدی در تفسیر نتایج آزمایشگاهی و ایجاد روابط میان ورودی‌های مستقل و وابسته در فهم پدیده‌ای دارد که مطالعه شده است. در مدل‌سازی انحراف جریان آب رودخانه به یک آبگیر جانبی به کمک آبشکن، هدف اصلی تعیین مقدار دبی انحرافی تحت شرایط مختلف در کانال اصلی است. با در نظر گرفتن جریان پایدار و ثابت بودن ویژگی‌های سیال، معادله (۱) بین پارامترهای مؤثر بر دبی نسبی انحرافی در حالت تعادل برقرار است.

ساحل غربی رود نیل، دریافتند که عملکرد آبشکن با فاصله بین آبشکن‌ها رابطه معکوس دارد، اما در زاویه و فاصله ثابت با طول آبشکن رابطه مستقیم دارد. علاالدین و تسوجیموتو (Alauddin & Tsujimoto, 2011) طراحی بهینه آبشکن‌ها را با استفاده از مدل دو بعدی Nays-RIC اجرا کردند که پارامترهای کانال و جریان براساس یکی از رودخانه‌های بنگلادش تطبیق داده شد. در این تحقیق، چهار جهت و سه نوع ساختار آبشکن بررسی شد. عملکرد آبشکن‌ها از طریق سه شاخص کلیدی شامل فرسایش بستر کانال، رسوب در ناحیه آبشکن و آبستتگی در نزدیکی دماغه آبشکن ارزیابی شد. نتایج محاسبات نشان داد که عملکرد آبشکن اصلاح‌شده بهتر از آبشکن مستقیم است. کلیتا و همکاران (Kalita et al., 2014) یک مدل بهینه‌سازی به همراه مدل هیدرودینامیکی را برای دستیابی به ترکیبی اقتصادی از آبشکن‌ها ایجاد کردند که باعث حفظ سرعت جریان تعریف شده توسط کاربر در بخشی از رودخانه می‌شود. مدل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) و مدل شبیه‌سازی جریان با استفاده از روش پرتو و گرما برای حل معادلات دو بعدی هیدرودینامیک در جریان غیرپایدار توسعه یافت و نتایج منطقی برای تمامی سناریوهای آزمایشی به دست آمد. زارع و هنر (Zare & Honar, 2016) تاثیر آبشکن ساده را بر کاهش فرسایش کناری در قوس رودخانه در شرایط آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که بیشترین عمق آبستتگی در پای آبشکن‌ها مربوط به آبشکن عمودی است و در هر سه نوع آرایش عمودی، دافع و جاذب، آبشکن اول بیشترین عمق آبستتگی را دارد و آبشکن آخر کمترین عمق را واقفی و همکاران (Vaghefi et al., 2017) الگوی جریان حول یک آبشکن محافظ به صورت عددی در سه حالت دافع، قائم و جاذب در قوس ۹۰ درجه یک کانال بررسی و گزارش کردند که با افزایش زاویه آبشکن محافظ نسبت به حالت قائم، چه در حالت جاذب و چه در حالت دافع، سرعت بیشینه در محدوده آبشکن اصلی افزایش می‌یابد و این افزایش در حالت دافع بیشتر است. الزوبیدی و هیلو (Al-Zubaidy & Hilo, 2022) با استفاده از روش CFD، رفتار جریان را در محل ورودی آبگیر شبیه‌سازی

شدند. با توجه به محدودیت های فیزیکی و هیدرولیکی موحد در آزمایشگاه، طول کانال ورودی برابر با ۳ متر، طول کانال خروجی برابر با ۰/۵ متر، عرض کانال اصلی برابر با ۰/۵ متر، شعاع انحنا ۲ متر و عرض کانال آبگیر برابر با ۱۰ سانتی متر لحاظ شدند. برای هر آبشکن ۴۸ داده آزمایشگاهی اندازه گیری شده است. شکل (۱) پلان همراه با مدل فیزیکی مورد آزمایش را نشان می دهد. داده های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده اند. این داده ها شامل طول نسبی آبشکن ها ($\frac{L}{B}$)، عدد فرود جریان (Fr)، زاویه آبگیری (φ) و در نهایت میزان دبی انحرافی اندازه گیری شده است.

مروری بر نرم افزار FLOW-3D

نرم افزار FLOW-3D ابزاری است پیشرفته برای شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی که به ویژه در تحلیل و مدل سازی جریان های پیچیده سیال در مهندسی و علوم کاربردی استفاده می شود. این نرم افزار بر مبنای حل عددی معادله های ناور-استوکس (Navier-Stokes) توسعه یافته است و امکان تحلیل جریان های تراکم ناپذیر و تراکم پذیر، چندفازی و غیرنیوتنی را فراهم می کند. معادله های ناور-استوکس که قلب محاسبات در نرم افزار FLOW-3D هستند برای سیال تراکم ناپذیر به صورت زیر نوشته می شوند (Gupta et al., 2022):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (4)$$

$$Q_r = \frac{Q_d}{Q_m} = F_1(y, U, B, b, L, \rho, g, \mu, r, \varphi, \theta, \alpha) \quad (1)$$

در این معادله: y عمق جریان در کانال اصلی، U سرعت جریان در کانال اصلی، B عرض کانال اصلی، b عرض کانال انحرافی، L طول آبشکن، ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت سیال، g شتاب ثقل، r شعاع قوس کانال اصلی، φ زاویه آبگیری (زاویه انحراف)، θ محل آبگیری در قوس، α زاویه قرارگیری آبشکن هستند. برابر تئوری باکینگهام، برای دستیابی به پارامترهای بی بعد، سه متغیر U ، y و g به عنوان متغیرهای تکراری انتخاب شدند و در نهایت معادله (۱) شکل زیر بازنویسی شد:

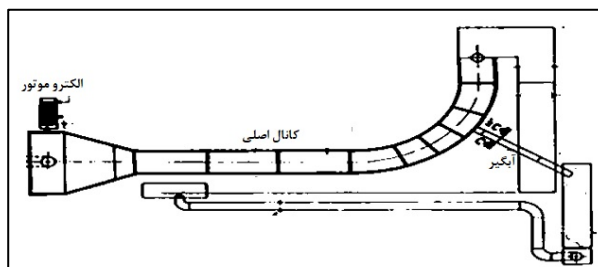
$$Q_r = F_2(Re, Fr, \frac{y}{B}, \frac{r}{B}, \frac{b}{B}, \frac{L}{B}, \varphi, \theta, \alpha) \quad (2)$$

در این پژوهش، با توجه به ثابت بودن پارامترهای B ، b ، α و θ ، از این پارامترها صرف نظر شد. متلاطم بودن جریان نیز باعث چشم پوشی کردن تاثیر عدد Re شد. به همین دلیل، فرم نهایی معادله (۲) به صورت زیر حاصل شد:

$$Q_r = F_2(Fr, \frac{L}{B}, \varphi) \quad (3)$$

داده های آزمایشگاهی

برابر معادله شماره (۳)، برای اجرای این تحقیق، اثر سه پارامتر بی بعد شامل طول نسبی آبشکن، زاویه کانال آبگیری و عدد فرود جریان بر میزان دبی انحرافی از کانال در محل قوس ۹۰ درجه مطالعه شده است. دو آبشکن T-شکل و L-شکل نیز در دیواره داخلی قوس در بالادست کانال آبشکن با طول های نسبی مختلف نصب شده اند. هدف بررسی تاثیر آبشکن های L-شکل و T-شکل بر آبگیرهاست، از این رو آبشکن ها با سه طول معادل ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد عرض فلوم (B) به ازای سه دبی ۲۵، ۴۰ و ۵۵ لیتر بر ثانیه آزمایش



شکل ۱- نمای کلی از پلان تجهیزات آزمایشگاهی

Figure 1- Overview of the laboratory equipment layout

جدول ۱- داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده برای آبشکن‌ها

Table 1- Overview of the laboratory equipment layout

نام آزمایشگاه Name of the experiment	نسبت طول آبشکن به عرض قلم Ratio of groove length to flame width	زاویه آبگیری groyne angle	عدد فرود (آبشکنی T-شکل) Fronde number (T-shaped groyne)	درصد انحراف دبی (آبشکنی T-شکل) Percentage of flow deviation (T-shaped)	نسبت طول آبشکن به عرض قلم Ratio of groove length to flame width	زاویه آبگیری groyne angle	عدد فرود (آبشکنی T-شکل) Fronde number (T-shaped groyne)	درصد انحراف دبی (آبشکنی T-شکل) Percentage of flow deviation (T-shaped)	نسبت طول آبشکن به عرض قلم Ratio of groove length to flame width	زاویه آبگیری groyne angle	عدد فرود (آبشکنی T-شکل) Fronde number (T-shaped groyne)	درصد انحراف دبی (آبشکنی T-شکل) Percentage of flow deviation (T-shaped)
۱	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۲	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۳	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۴	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۶	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۷	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۸	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۹	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۱۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۱۱	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۱۲	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۱۳	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۱۴	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۱۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰
۱۶	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱۱/۰	۱۱/۰

شبکه‌بندی ساده‌تر فراهم می‌کند. در این روش، موانع به صورت کسری از حجم و مساحت درون هر سلول شبکه نمایانده می‌شوند و این امر به کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت شبیه‌سازی می‌انجامد (Sedaghat-Shayegan & Roosta, 2024).

در مورد نرم‌افزار FLOW-3D، زمان اولین پارامتری است که باید وارد نرم‌افزار شود. در این پژوهش، مدت زمان تعیین شده برای حل مسئله ۱۰۰ ثانیه است. سیستم یکایی مورد استفاده نیز SI تعیین شد. در منوی Physics از نرم‌افزار FLOW-3D، با انتخاب گزینه Gravity (نیروی ثقل) مقدار

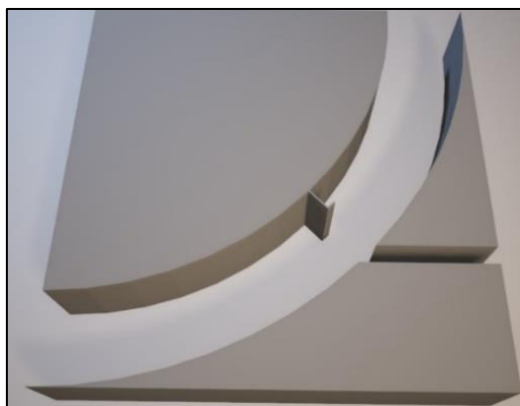
در این معادله: u سرعت سیال، t زمان، ρ چگالی سیال، p فشار سیال، U ویسکوزیته سینماتیکی، f نیروی حجمی مانند نیروی گرانش هستند. معادله پیوستگی برای جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر است (Yang et al., 2022):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

این معادله‌ها به صورت عددی با استفاده از روش‌های مختلفی مانند تفاضل محدود و روش حجم محدود در این نرم‌افزار حل می‌شوند. یکی از روش‌های کلیدی در این نرم‌افزار استفاده از روش FAVOR است. این روش، توانایی مدل‌سازی جریان‌های سیال را در اطراف موانع پیچیده با

۹/۸۱- برای متغیر g انتخاب شد. گام بعدی، تعیین مدل اغتشاش، نیروی ثقل و نوع جریان از نظر گرانشی است. از پنجره Material در قسمت Fluid Database با توجه به اینکه یکی از شرایط استاندارد سیال برای اجرای آزمایشها در شرایط معمولی رودخانه یا کانال، آب با دمای ۲۰ درجه

سانتی گراد است، این گزینه انتخاب شد که دارای لزجت 0.001 متر مربع بر ثانیه و چگالی 1000 کیلوگرم بر متر مکعب است. با استفاده از نرم افزار اتوکد، نمایی سه بعدی از فلوم همراه با آبگیر طراحی و به نرم افزار معرفی شد. نمایی از آبشکن L-شکل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمای سه بعدی از مدل در محیط اتوکد

Figure 2-Three-dimensional view of the model in AutoCAD

مدل SVM

مدل ماشین بردار پشتیبان از جمله روش های یادگیری از نوع با نظارت است که برای اجرای فرآیند آموزش نیاز به تعدادی داده ورودی دارد. مدل ماشین بردار پشتیبان به عنوان روشی جدید برای پیش بینی و شبیه سازی پارامترهای مختلف استفاده می شود. این مدل با تمرکز بر ریسک عملیاتی، مقدار جواب بهینه را به دست می آورد که این کار از طریق کمینه سازی خطا به کمک قیدهای موجود صورت می گیرد (Aminvash et al., 2024; Daneshfaraz, et al., 2021). معادله رگرسیون مدل SVM در معادله زیر ارائه شده است:

$$f(x) = \sum_{i=1}^D W_i \phi_i(x) + b \quad (6)$$

در این معادله: $\phi_i(x)$ بیانگر ویژگی ها، b نشان دهنده مقدار خطا و W_i بردارهای وزنی است که باید با استفاده از داده های معرفی شده به مدل تخمین زده شود. این مدل قابلیت نگاشت داده های ورودی به یک فضا با ابعاد بیشتر را فراهم می کند. به کمک فرایند بهینه سازی ارائه شده در

از مهمترین بخش های شبیه سازی، تعیین تعداد مش است. مش ها در جهت های مختلف محور مختصات بر اساس طول بلوک ها نیز متفاوت اند. تعداد مش های در نظر گرفته برای شبیه سازی در نرم افزار این امکان را برای کاربر به وجود می آورد که بعد از تعیین تعداد مش ها، صحت تناسب تعداد آنها را در سه راستای x ، y و z تعیین کند. اندازه شبکه در کانال برابر با 8 میلی متر، در موقعیت آبشکن ها برابر با 5 میلی متر، فاصله 15 سانتی متری بالادست و پایین دست آبگیر اندازه شبکه برابر با 4 میلی متر و در محل ورودی کانال آبگیر اندازه شبکه 2 میلی متر لحاظ شد. گام بعدی تعیین شرایط مرزی مسئله بود. مرز ورودی از نوع Volume Flow Rate، قسمت ورودی با گزینه دبی جریان، قسمت خروجی شرط مرزی خروجی Out flow و مرز پایین دست از نوع دیواره یا Wall انتخاب شدند که برای جداسازی سیال از مرز جامد استفاده می شوند. در این شرط مرزی سرعت های عمود و مماس روی مرز دیواره صفر در نظر گرفته شدند و جداره بالایی نیز از نوع Symmetry (قرینه) انتخاب شد.

شبیه‌سازی عددی دبی آبیگر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی ...

معادله زیر، مقدار پارامتر $w_i(x)$ براساس کمینه‌سازی خطا به دست می‌آید:

$$\min \frac{1}{2} \|W\|^2 + c \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^o) \quad (7)$$

قیود مورد استفاده برای کمینه‌سازی مقدار خطا به فرار زیر هستند:

$$\begin{cases} |-y_i - \langle W^T \phi(X_i) \rangle - b| \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i \geq 0, \quad \xi_i^o \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

در این معادله: پارامتر C نشان دهنده ثابت گنجایش، W نشان دهنده بردار ضرایب، W^T بیانگر ترانزپوز بردار ضرایب، ξ_i^o و ξ_i ضرایب کمبود، N الگوی آموزش مدل، و ϕ تابع کرنل است (Vapnik, 1995). توابع کرنل موجود در مدل SVM در جدول ۲ ارائه شده‌اند (Daneshfaraz et al., 2021; Fuladipannah & Majedi-Asl, 2022).

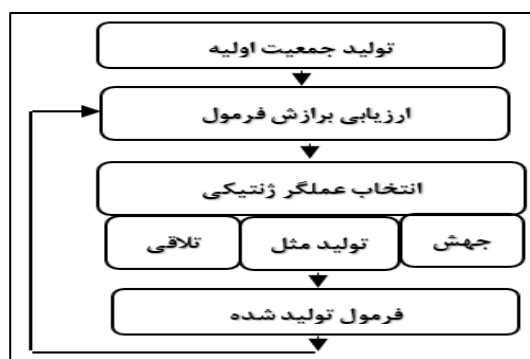
جدول ۲- انواع توابع کرنل

رابطه کرنل Kernel Equation	نام کرنل Kernel Name
$K(x_i, x_j) = (x_i, x_j)$	خطی Linear
$K(x_i, x_j) = [(x_i, x_j) + 1]^d$	چند جمله‌ای Polynomial
$K(x_i, x_j) = \exp[-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\sigma^2}]$	تابع پایه شعاعی Radial Basis Function
$K(x_i, x_j) = \tanh[-\alpha(x_i, x_j) + c]$	سیگموئید Sigmoid

از فرمول‌ها اولین‌گام در مدل GEP است که این کار به کمک ترکیب تصادفی مجموعه‌ای از توابع ریاضی همراه با متغیرهای مسئله و اعداد ثابت صورت می‌گیرد. سپس هر یک از افراد جمعیت به کمک شاخص‌های برازش موجود در مدل در گام دوم ارزیابی می‌شود. سومین گام در مدل GEP، تولید جمعیتی جدید از فرمول‌هاست. مرحله چهارم شامل تکرار گام سوم الگوریتم برای دستیابی به بیشینه مقدار تولید است.

مروری بر مدل GEP

تئوری داروین بر مبنای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و در قالب الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط فریرا (Ferreira, 2001) بنا نهاده شده است که در آن جمعیتی از افراد بر اساس شاخص برازندگی انتخاب می‌شوند و براساس یک یا چند عملگر، تغییرات ژنتیکی آنها انجام می‌شود. شکل ۳، الگوریتم مورد استفاده در مدل GEP را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است تولید جمعیت اولیه



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

Figure 3- Flowchart of the genetic programming algorithm

مقایسه کارکرد مدل ها

لیتر بر ثانیه با ارتفاع سطح آبیگری ۲۰ سانتی متر استفاده شد. هر آزمایش با داده های دبی ورودی، ارتفاع آب در خروجی، ارتفاع آب در آبیگر و یکی از مقادیر پارامترهای به دست آمده برای واسنجی دنبال شد. در هر آزمایش، مقدار دبی انحرافی آبیگر در نرم افزار محاسبه و با داده مشاهداتی مقایسه شد. این کار در هر آزمایش همراه با محاسبه میزان خطا بود. با توجه به نتایج به دست آمده، کمترین خطا در آزمایش ها به ازای $n=0/035$ و مدل آشفتگی طول اختلاط پراگندگی حاصل شد. پس از آن، مقادیر مختلف دبی انحرافی به ازای مقادیر مختلف شبیه سازی شد. در شکل (۴) و شکل (۵) به ترتیب شبیه سازی میدان سرعت در محدوده آبشکن و کانال آبیگری برای آبشکن های L-شکل و T-شکل به ازای دبی های ۴۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده اند. این شبیه سازی به ازای سه مقدار مختلف طول نسبی آبشکن ها بوده است. نتایج حاصل از شبیه سازی مقدار جریان انحرافی در هر یک از دو مدل مقطع T-شکل و L-شکل با استفاده از مدل FLOW-3D در جدول (۳) ارائه شده است. بیان گرافیکی از خروجی مدل FLOW-3D در شکل های (۶) و (۷) قابل مشاهده است. این دو نمودار در واقع نشان دهنده میزان انطباق پذیری داده های دبی انحرافی مشاهداتی و محاسباتی است. هر چه پراکنش داده ها حول خط با شیب ۱:۱ کمتر باشد نشان از دقت بسیار مناسب تر شبیه سازی خواهد بود. همان طور که مشاهده می شود دقت مدل در هر دو نوع آبشکن تقریباً با یکدیگر برابر است.

خروجی مدل های داده مبنا

آنالیز حساسیت

طبق معادله (۳)، سه پارامتر Fr ، $\frac{L}{B}$ و ϕ با استفاده از تئوری باکینگهام برای بررسی تاثیرگذاری روی میزان دبی انحرافی به کانال آبیگری استخراج شدند. به منظور تدقیق و تسریع در مدلسازی میزان دبی انحرافی با استفاده از مدل های یادگیری ماشین لازم است تحلیل حساسیت روی هر یک از سه پارامتر ورودی بشود تا بهینه ترین ترکیب ورودی برای مدل ها انتخاب شود. در این پژوهش، از تحلیل حساسیت به کمک روش گاما تست استفاده شده است.

مدل های استفاده شده در این پژوهش طی فرآیندهای آموزش و آزمون ارزیابی می شوند تا بهترین مقادیر برای پارامترهای تنظیمی آنها تعیین شود. برای اجرای این مرحله، نیاز به استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد است. در این پژوهش، سه شاخص (۱) ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، (۲) میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، و (۳) ضریب تعیین با استفاده از معادله های زیر به کار گرفته شده اند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

در این معادله ها: y_i و \hat{y}_i به ترتیب مقدار مشاهداتی و محاسباتی داده نام، n تعداد کل داده ها و \bar{y} مقدار میانگین داده های مشاهداتی است (Fuladipناه *et al.*, 2020).

بحث و نتایج

با استفاده از داده های آزمایشگاهی اندازه گیری شده، دبی انحرافی به کانال آبیگر در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از مدل FLOW-3D و دو مدل GEP و SVM شبیه سازی شده است. این بررسی با نصب دو آبشکن T-شکل و L-شکل در دیواره فلوم صورت پذیرفته است. همانطور که در جدول (۱) نیز مشخص است برای هر آبشکن ۴۸ داده آزمایشگاهی اندازه گیری شده است.

خروجی نرم افزار FLOW-3D

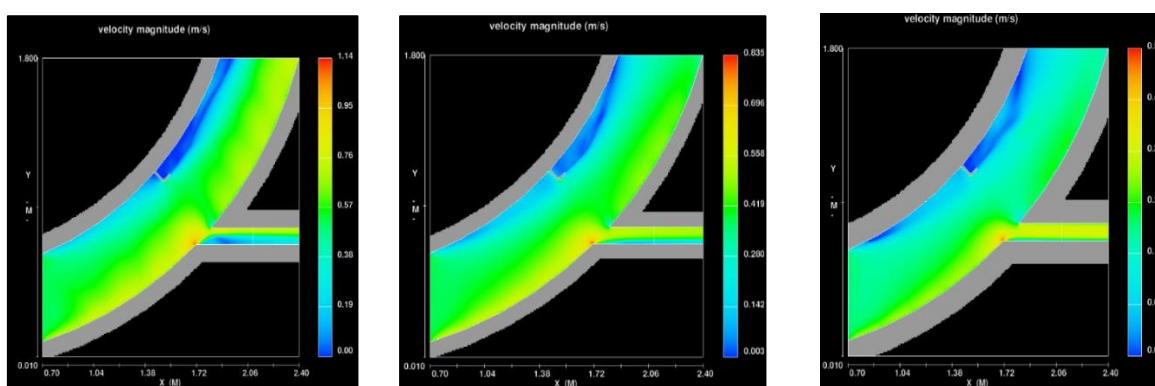
با توجه به نتایج آزمایش های حساسیت سنجی، دو پارامتر ضریب زبری مانینگ (n) و مدل های آشفتگی برای واسنجی مدل استفاده شدند. برای واسنجی مدل، آزمایش ها با استفاده از داده های اندازه گیری شده و در مقادیر مختلف n و مدل های آشفتگی اجرا شد. مقادیر ضریب زبری اعمال شده برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۴ در نظر گرفته شدند. برای واسنجی و صحت سنجی مدل از داده های مربوط به دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه با مقدار دبی انحرافی ۵/۵

شبیه‌سازی عددی دبی آبیگر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی ...

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل FLOW-3D

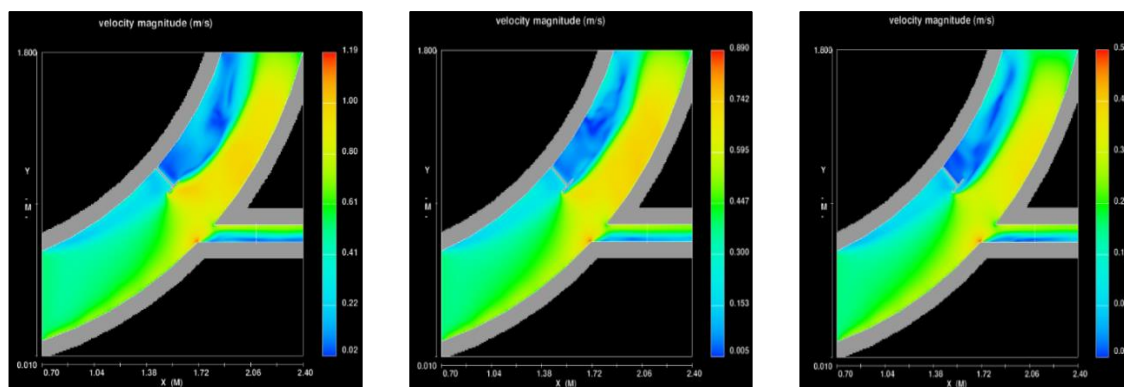
Table 3- Values of performance evaluation indices for the FLOW-3D model

شاخص‌های ارزیابی عملکرد Performance Evaluation Metrics			نوع آبشکن Type of groyne
R ²	MAE	RMSE	
۰/۹۶۰۷	۰/۹۳۶۳	۱/۲۰۷۰	مقطع T-شکل T-shaped Section
۰/۹۵۱۳	۱/۱۲۵۶	۱/۳۷۵۹	مقطع L-شکل L-shaped Section



شکل ۴- میدان سرعت آبشکن L-شکل با طول نسبی مختلف به ازای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه

Figure 4- Velocity field of the L-shaped groyne with different relative lengths at a flow rate of 40 liters per second



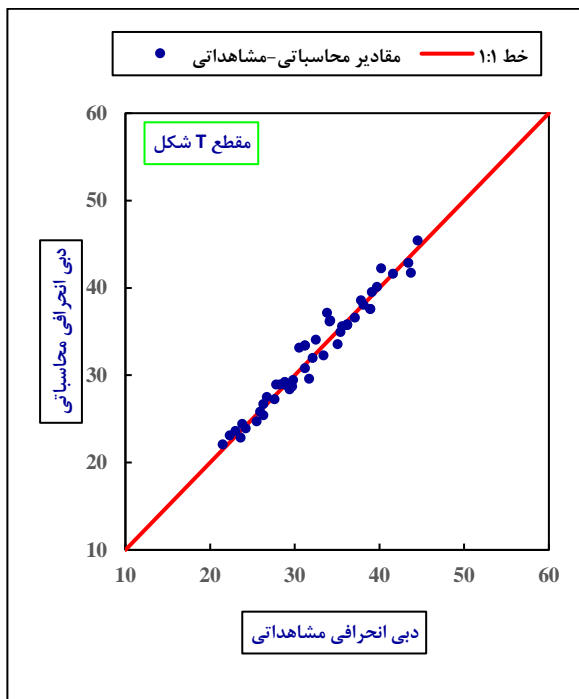
شکل ۵- میدان سرعت آبشکن T-شکل با طول نسبی مختلف به ازای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه

Figure 5- Velocity field of the T-shaped groyne with different relative lengths at a flow rate of 25 liters per second

خروجی از ورودی‌ها، به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن پدیده‌های مدلسازی‌شده، این خطا را از طریق رابطه‌ای بین مجموعه داده‌های ورودی و خروجی با تابع f نشان می‌دهد:

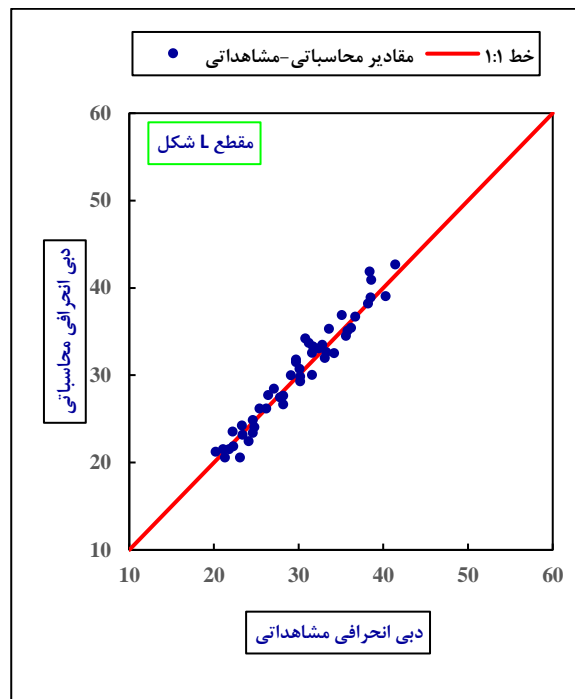
$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)+r \quad (12)$$

این روش را کنکار (Koncar, 1997) ابداع کرده و توسعه داده است. وقتی تعداد عوامل تأثیرگذار بر یک پدیده به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد، می‌توان از آزمون گاما برای تعیین اهمیت متغیرهای ورودی و به‌دست آوردن بهترین ترکیب ممکن از بین ترکیب‌های مختلف استفاده کرد. آزمون گاما با پذیرش مقدار معینی از خطا برای به‌دست آوردن



شکل ۷ - میزان انطباق پذیری خروجی مدل FLOW-3D با داده‌های مشاهداتی در آبشکن T-شکل

Figure 7- Degree of conformity of the FLOW-3D model output with observational data in the T-shaped groyne



شکل ۶ - میزان انطباق پذیری خروجی مدل FLOW-3D با داده‌های مشاهداتی در آبشکن L-شکل

Figure 6- Degree of conformity of the FLOW-3D model output with observational data in the L-shaped groyne

بین صفر تا یک را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه را استاندارد کرد. پارامتر V-Ratio به این شکل تعریف می‌شود:

$$V\text{-Ratio} = \frac{\Gamma}{\sigma^2(y)} \quad (14)$$

در آن معادله $\sigma^2(y)$ واریانس خروجی متغیر y است. هر چه مقدار V-Ratio به صفر نزدیک باشد نشان دهنده آن است که داده‌های ورودی نقش غالبی در پیش‌بینی متغیر y داشته‌اند. در این تست هر چه مقدار آماره Γ و V-Ratio به صفر نزدیک‌تر باشد به این معنا خواهد بود که ترکیب داده‌های ورودی مورد نظر بهینه خواهد بود. در جدول (۴) خلاصه نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از آزمون گاما تست ارائه شده است. طبق داده‌های این جدول، هر سه پارامتر بی‌بعد باید به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده میزان دبی انحرافی استفاده شوند.

در این معادله: x_i داده ورودی، y خروجی و f نشان دهنده تابع همواری است که برای مدلسازی استفاده شده است، Γ متغیر تصادفی نشان دهنده میزان خطاست. در آزمون گامانتست، مقدار آماره گاما برابر با مقدار عرض از مبدأ خط برازش یافته‌ای به قرار معادله زیر است:

$$\gamma = A\delta + \Gamma \quad (13)$$

پارامتر Γ واریانس خروجی مدل و A شیب خط برازش یافته است که اطلاعاتی در خصوص پیچیدگی سیستم مورد بررسی ارائه می‌دهد (Remesan & Mathew, 2016). آزمون گاما روشی است ناپارامتری که بدون توجه به تکنیک‌های خاصی که برای ساخت مدل‌های پیچیده استفاده می‌شود، نتایج معتبری ارائه می‌دهد. بنابراین، با در نظر گرفتن مفهومی دیگر به نام V-Ratio که برآوردی ثابت از مقیاسی

جدول ۴- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مستقل ورودی

Table 4- Results of sensitivity analysis of independent input parameters

V-Ratio	Γ	ترکیب ورودی Input combination	ردیف Row
۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۲۵	φ و $\frac{L}{B}$, Fr	۱
۰/۳۰۷	۰/۲۵۹	φ و $\frac{L}{B}$	۲
۰/۲۳۴	۰/۱۴۵	φ و Fr	۳
۰/۱۹۶	۰/۱۱۱	$\frac{L}{B}$ و Fr	۴

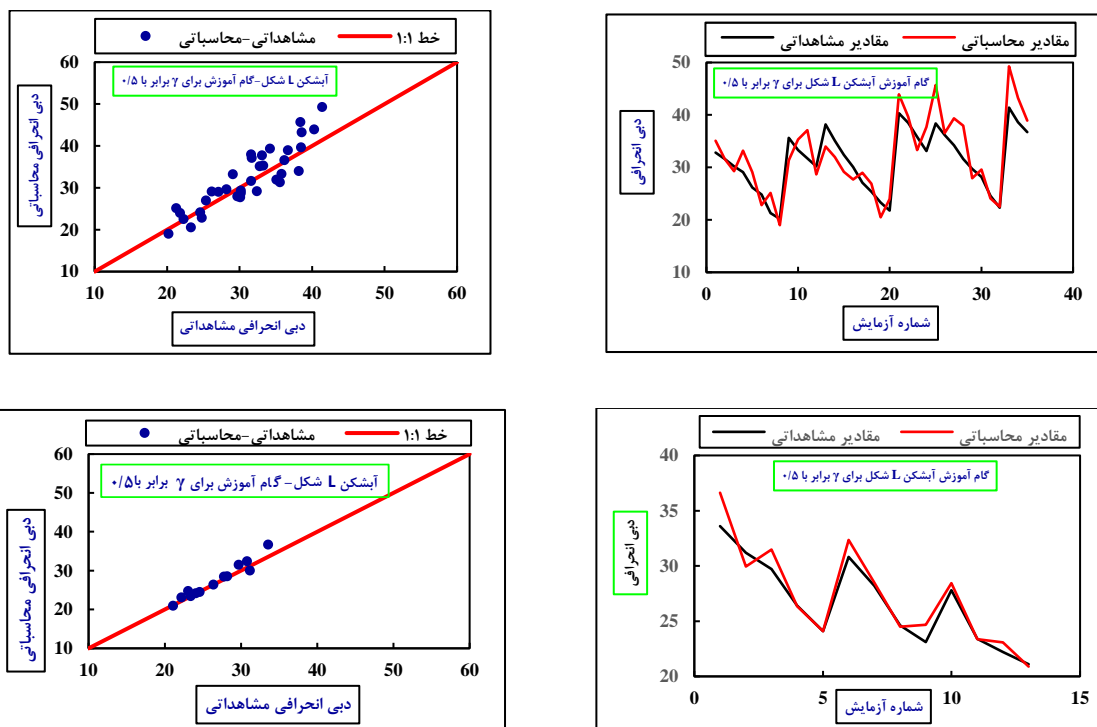
خروجی مدل SVM در مورد مدل SVM، خروجی مدل با استفاده از پارامترهای تنظیمی (C, ϵ, γ) و توابع کرنل مختلف با معیارهای ارزیابی عملکرد بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تابع RBF نسبت به دیگر توابع دقت بیشتری دارد. بنابراین، شبیه‌سازی‌های بهینه با مقادیر مختلف (C, ϵ, γ) برای یافتن بیشترین تطابق بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی از طریق روش آزمون و خطا ادامه یافت. مقدار C و ϵ به ترتیب در مقادیر ۴۰ و ۰/۱۵ منجر به بهینه‌ترین خروجی شدند. خلاصه‌ای از محاسبات بهینه‌سازی پارامتر γ برای دستیابی به دقیق‌ترین خروجی این مدل در جدول (۵) آمده است. مطابق این جدول، ضرایب ارزیابی عملکرد (RMSE, MAE, R^2) برای آبشکن L-شکل در گام آموزش است.

جدول ۵- ارزیابی عملکرد تابع کرنل RBF به ازای مقادیر مختلف γ

Table 5- Performance evaluation of the RBF kernel function for different γ values

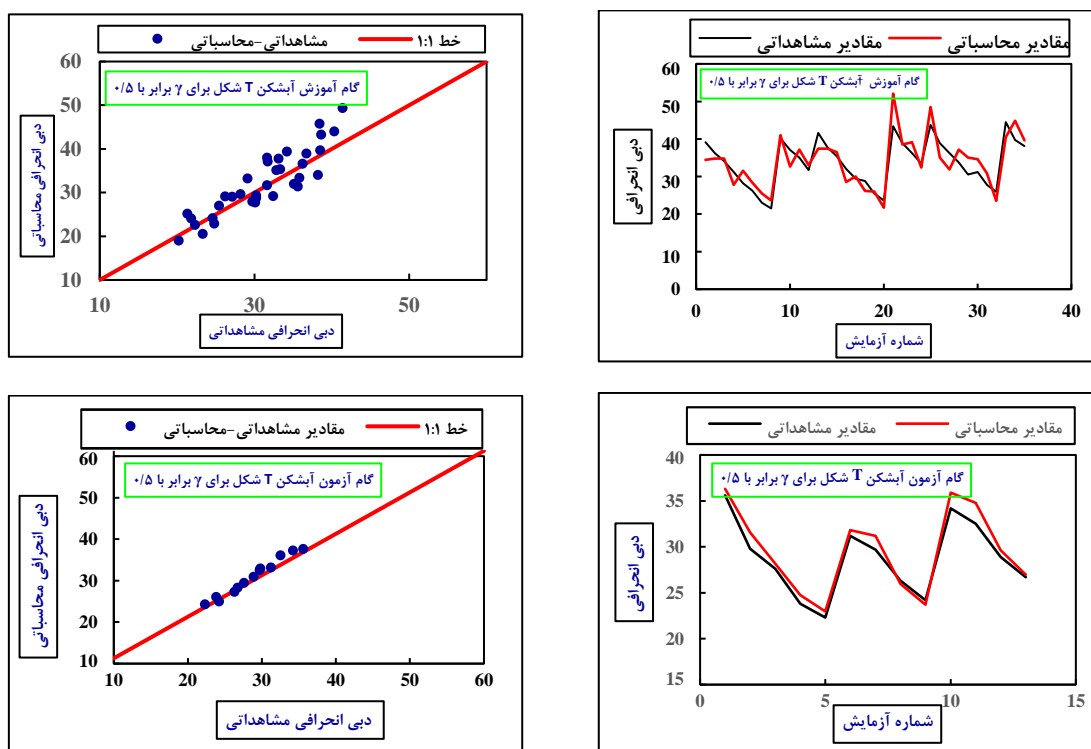
آبشکن L شکل L-shaped groyne						ردیف	
گام آزمون Testing step			گام آموزش Training step			مقدار γ Value of γ	ردیف Row
R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE		
۰/۶۱۶۶	۱/۵۱۷۲	۲/۳۱۹۶	۰/۳۶۴۲	۳/۰۳۶۹	۴/۷۰۶۵	۰/۱	۱
۰/۴۱۹۸	۲/۲۵۹۱	۳/۱۳۴۱	۰/۴۴۰۰	۲/۴۵۳۰	۳/۹۲۶۴	۰/۲	۲
۰/۶۴۱۹	۱/۷۶۹۹	۲/۶۱۱۵	۰/۵۶۱۳	۲/۵۲۹۷	۳/۷۲۷۶	۰/۳	۳
۰/۷۰۳۵	۱/۴۹۴۱	۲/۱۸۱۱	۰/۶۳۸۶	۲/۳۷۲۲	۳/۷۲۹۳	۰/۴	۴
۰/۹۴۶۹	۰/۵۶۷۷	۱/۰۰۱۳	۰/۸۰۲۳	۱/۶۹۰۰	۲/۶۵۳۹	۰/۵	۵

آبشکن T شکل T-shaped groyne						ردیف	
گام آزمون Testing step			گام آموزش Training step			مقدار γ Value of γ	ردیف Row
R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE		
۰/۶۲۵۰	۱/۶۷۶۸	۲/۵۸۴۱	۰/۶۱۸۵	۲/۹۴۲۹	۴/۴۳۰۸	۰/۱	۱
۰/۵۵۱۷	۲/۴۳۰۲	۳/۳۹۲۹	۰/۶۶۷	۳/۱۴۰۷	۴/۸۲۱۰	۰/۲	۲
۰/۵۹۵۶	۱/۹۶۰۰	۲/۹۲۸۸	۰/۵۶۵۳	۲/۷۴۱۷	۴/۰۳۹۷	۰/۳	۳
۰/۶۵۰۱	۱/۵۸۹۹	۲/۳۰۴۰	۰/۶۲۱۵	۲/۵۵۳۵	۳/۹۹۲۴	۰/۴	۴
۰/۹۷۷۶	۰/۶۳۰۵	۰/۹۲۲۷	۰/۷۶۴۹	۱/۶۲۰۵	۲/۵۰۸۷	۰/۵	۵



شکل ۸ - مقایسه کیفی داده های مشاهداتی و محاسباتی مدل SVM با تابع کرنل RBF در آبشکن L-شکل

Figure 8- Qualitative comparison of observational and computational data from the SVM model with RBF kernel function in the L-shaped groyne



شکل ۹ - مقایسه کیفی داده های مشاهداتی و محاسباتی مدل SVM با تابع کرنل RBF در آبشکن T-شکل

Figure 9- Qualitative comparison of observational and computational data from the SVM model with RBF kernel function in the T-shaped groyne

دومین مدل یادگیری ماشینی که در این پژوهش استفاده شد، مدل GEP بود. مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی این مدل در جدول (۶) ارائه شده است. برای دستیابی به بهینه‌ترین خروجی از مدل GEP، مقادیر مختلفی برای تعداد کروموزم، تعداد ژن و اندازه سر همراه با توابع اتصال مختلف مورد بررسی قرار گرفتند که در نهایت موارد ارائه شده در جدول (۶) منجر به انتخاب نهایی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل با ساختار سه ژن برای هر دو نوع آبشکن بهترین خروجی را ارائه داده است. شاخص‌های ارزیابی عملکرد (RMSE, MAE, R²) در مراحل آموزش و آزمون برای آبشکن L-شکل به ترتیب (۰/۹۳۲۵، ۰/۹۸۷۸، ۰/۲۵۳۶) و (۰/۹۸۳۶، ۰/۴۱۰۲، ۰/۶۳۲۵) محاسبه شده‌اند. این مقادیر در مراحل آموزش و آزمون برای آبشکن T-شکل به ترتیب (۰/۹۰۲۵، ۰/۲۵۳۴، ۰/۱۸۵۰۲) و (۰/۹۸۷۳، ۰/۳۳۳۷، ۰/۴۹۷۲) به دست آمده‌اند. ارزیابی کیفی خروجی مدل GEP برای آبشکن‌های L-شکل و T-شکل به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده است. در این شکل‌ها نیز مشخص است مدلسازی برای دبی‌هایی با مقادیر کم، دقت بیشتری دارد. البته روند بهبود دقت مدلسازی طی گام‌های آموزش تا آزمون برای هر دو آبشکن روشن است.

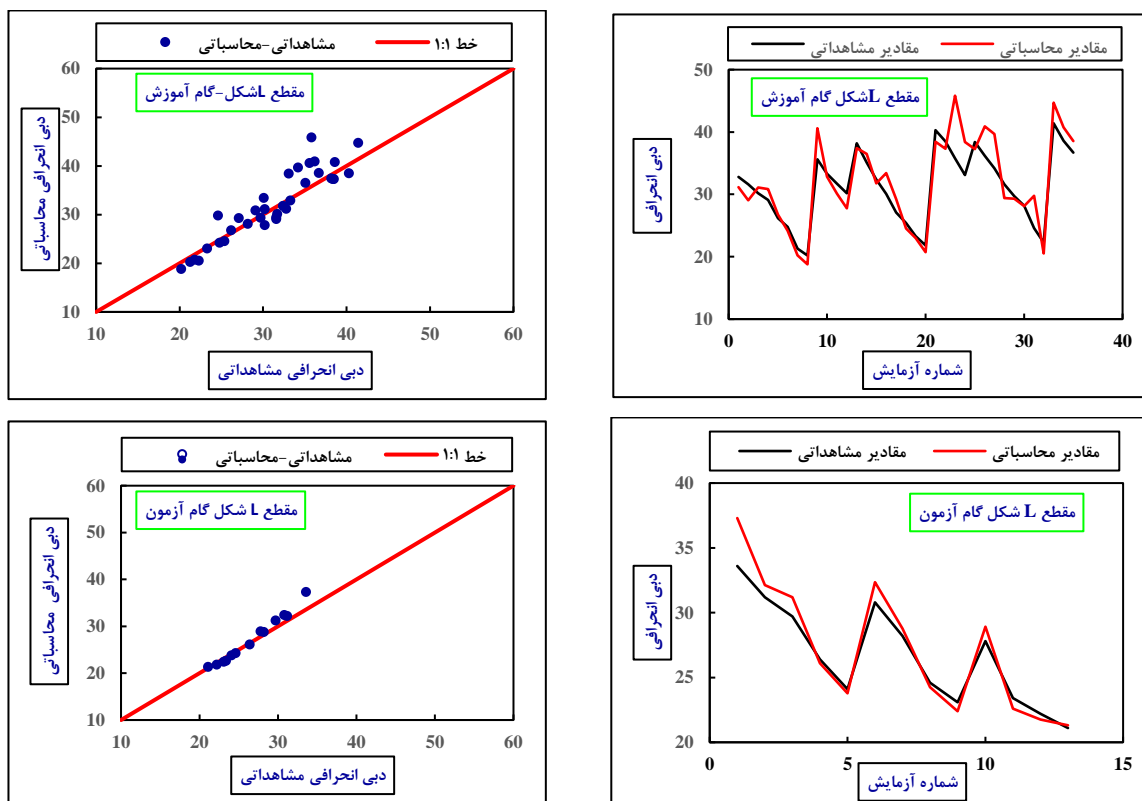
جدول ۶- مقادیر پارامترهای تنظیمی بهینه‌ترین مدل GEP برای آبشکن‌های مورد بررسی

Table 6- Values of parameters for the optimal GEP model for the examined groynes

مقدار Value		پارامتر Parameter
آبشکن T-شکل T-shaped groyne	آبشکن L-شکل L-shaped groyne	
RMSE	RMSE	تابع برازندگی Fitness function
+	+	تابع اتصال ژن‌ها Gene connection function
۵۵	۴۵	تعداد کروموزم Number of chromosomes
۳	۳	تعداد ژن Number of genes
۳۰	۳۰	اندازه رأس Size of vertex
۰/۱	۰/۱	میزان ترکیب Crossover rate
۰/۱	۰/۱	میزان جهش Mutation rate

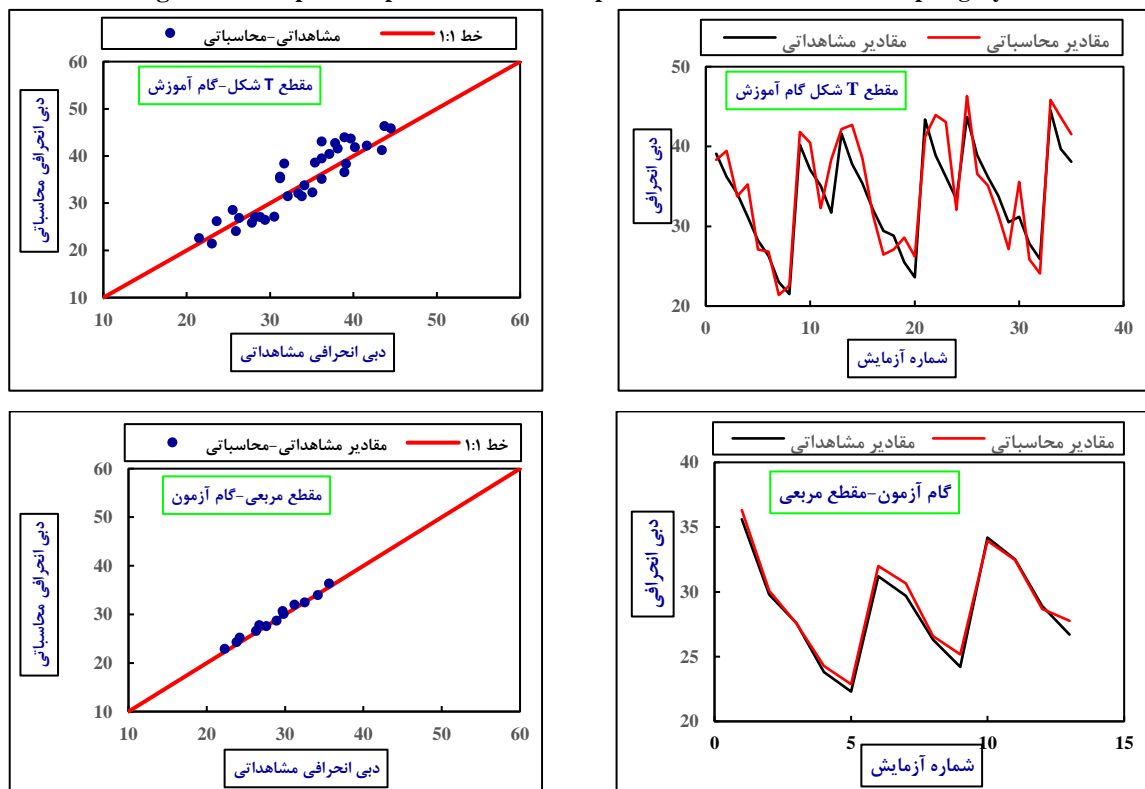
در قالب فاصله شعاعی از داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. هر چه این فاصله کمتر باشد، دقت مدلسازی بالاتر است. با توجه به شکل (۱۳)، روشن است دقت خروجی مدل GEP بیشتر است تا مدل SVM به همین دلیل، در ادامه برای تحلیل شرایط مختلف مقادیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی روی دبی انحرافی از مدل GEP استفاده شده است. حال با استفاده از نتایج به دست آمده در گام آزمون مدل GEP، مقایسه‌ای شده است بین نتایج مرحله صحت‌سنجی مدل GEP با خروجی مدل FLOW-3D در نمودار رسم شده در شکل (۱۴) که نشان می‌دهد مدل GEP دقت بیشتری نسبت به مدل FLOW-3D دارد.

حال با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های ارزیابی عملکرد، لازم است بهترین مدل از بین دو مدل SVM و GEP برای شبیه‌سازی دبی انحرافی انتخاب شود. نمودار ارائه شده در شکل (۱۲) مقایسه بین بهینه‌ترین خروجی مدل‌های SVM و GEP را نشان می‌دهد. در حالی که مقدار R² مربوط به مدل GEP در گام‌های آموزش و آزمون نسبت به مدل SVM مقادیر بیشتری دارد، ضرایب RMSE و MAE که بیانگر میزان انحراف بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی است مقادیر کمتری دارند. مقایسه گرافیکی دیگری با دیاگرام تیلور در شکل (۱۳) ارائه شده است. دیاگرام تیلور براساس ضریب همبستگی و میزان انحراف معیار داده‌های محاسباتی و مشاهداتی، موقعیت خروجی مدل مورد نظر را



شکل ۱۰- بیان گرافیکی از مدل بهینه GEP در آبشکن L-شکل

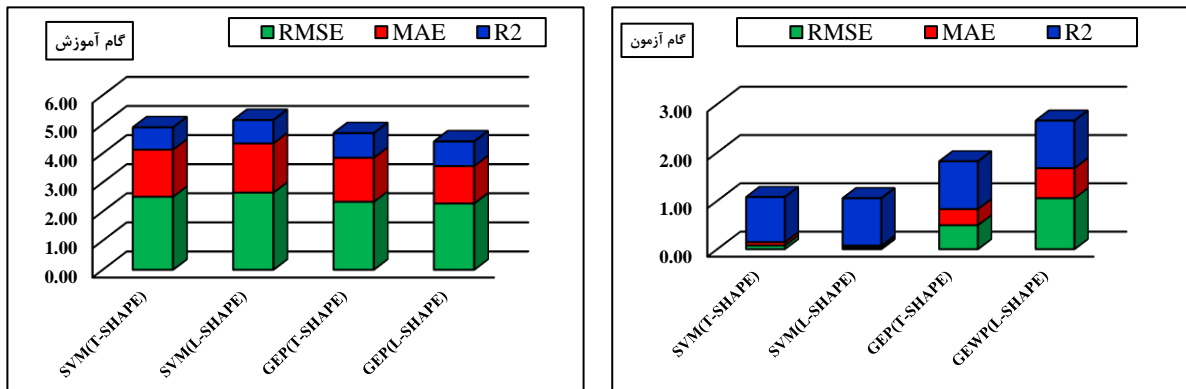
Figure 10- Graphical representation of the optimal GEP model in the L-shaped groyne.



شکل ۱۱- بیان گرافیکی از مدل بهینه GEP در آبشکن T-شکل

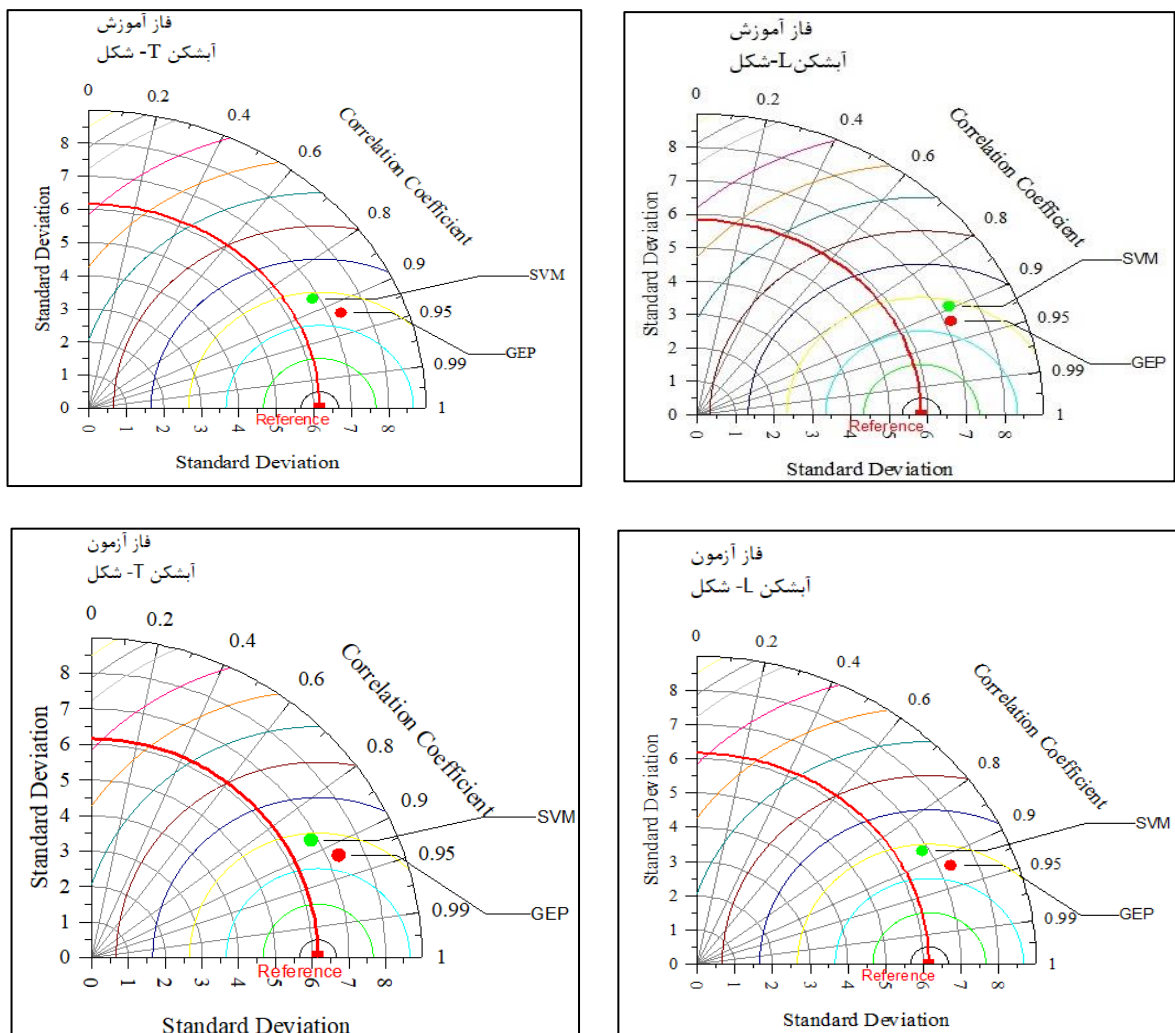
Figure 11- Graphical representation of the optimal GEP model in the T-shaped groyne

شبیه‌سازی عددی دبی آبیگر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی ...



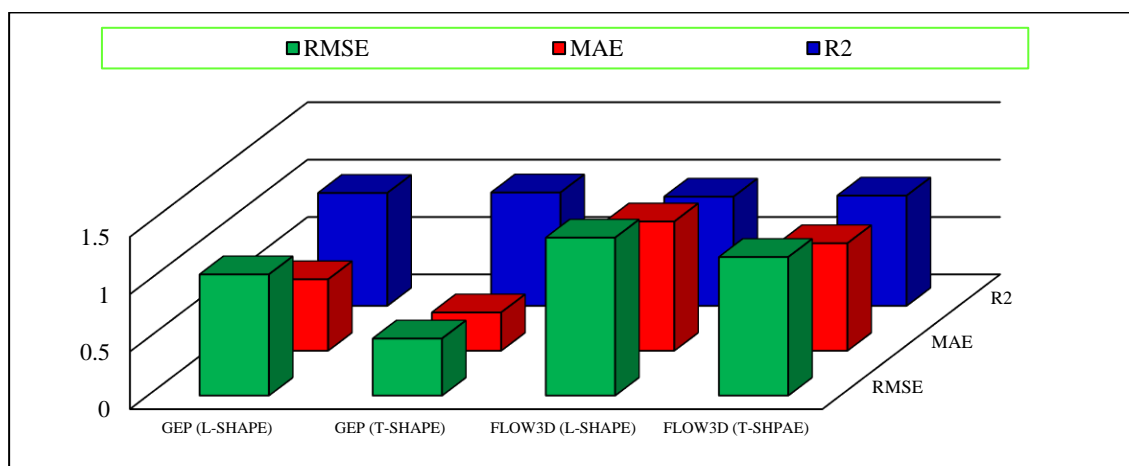
شکل ۱۲- مقایسه خروجی مدل‌های SVM و GEP در گام آموزش و آزمون

Figure 12- Comparison of the outputs of SVM and GEP models in the training and testing phases



شکل ۱۳- دیاگرام تیلور برای خروجی مدل‌های SVM و GEP

Figure 13- Taylor diagram for the outputs of the GEP and SVM models



شکل ۱۴- مقایسه خروجی GEP و FLOW-3D

Figure 14- Comparison of the outputs of FLOW-3D and GEP

استفاده شد. نتایج پژوهش موید آن است که هر سه مدل پتانسیل بسیار مناسبی برای شبیه‌سازی میزان دبی انحرافی به کانال آبیاری را دارند اما در مقام مقایسه، دقت خروجی مدل GEP نسبت به دو مدل دیگر بالاتر است. محاسبات نشان داد مقدار شاخص‌های محاسبه شده ارزیابی عملکرد (RMSE, MAE, R²) برای آبشکن L-شکل در گام آموزش برابر با (۰/۹۳۲۵، ۰/۴۱۰۲، ۰/۶۳۲۵) بودند. مقادیر (۰/۹۰۲۵، ۰/۴۹۷۲، ۰/۳۳۳۷، ۰/۹۸۷۳) و (۱/۸۵۰۲) به ترتیب برای گام‌های آموزش و آزمون آبشکن T-شکل به دست آمدند.

نتیجه‌گیری

چارچوب اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین GEP و SVM با نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی مقدار دبی انحرافی به کانال آبیاری است. بدین منظور از مدل فیزیکی کانال آبیاری نصب شده در فلووم همراه با دو نوع آبشکن L-شکل و T-شکل استفاده شده است. داده‌های گردآوری شده از مدل فیزیکی شامل عدد فرود، زاویه آبیاری از کانال اصلی و طول نسبی آبشکن به عنوان متغیرهای مستقل برای تعیین میزان دبی انحرافی به عنوان پارامتر وابسته استفاده شد. برای مقایسه میزان دقت خروجی این سه مدل از شاخص‌های RMSE, MAE و R²

مراجع

- Acharya, A., & Duan, J. G. (2011). Three dimensional simulation of flow field around series of spur dikes. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 2(7), 36-57.
- Aezzi, S., Khanjani, M. J., & Zounemat-Kermani, M. (2018). Two Dimensional Simulation of Flow pattern and Bed Changes in Straight and Meandering Channels under the Effect of Spur Dike. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(4), 970-981. (in Persian)
- Al-Zubaidy, R. A., & Hilo, A. N. (2022). Numerical investigation of flow behavior at the lateral intake using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Materials Today: Proceedings*, 56, 1914-1926.
- Alauddin, M., & Tsujimoto, T. (2011). Optimum Design of Groynes for Stabilization of Lowland Rivers. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 67(4), 145-150.
- Ali-Nagizadeh-Behbahani, H. (2013). *Investigating the hydraulic conditions of the flow in reservoirs with a deviation angle of 90 and 75 degrees using a physical model* Shahid Chamran University of Ahvaz]. Ahvaz. (in Persian)
- Aminvash, E., Kalateh, F., Daneshfaraz, R., & Abraham, J. (2024). Investigation of the Performance of Soft Computing Methods in the Hydraulic Evaluation of the Slot Fishway on the Inclined Drop. *Journal of Hydraulic Structures*, 10(1), 46-65.

- Behnamtalab, E., Cheshomi, A., & Khamchin-Moghaddam, F. (2019). Numerical simulation of porous spur dyke using Flow 3D software. *Journal of Hydraulics*, 14(1), 35-48. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2019.139136.1306>. (in Persian)
- Chenari, S. A., Nadian, H. A., Ahadiyan, J., Valipour, M., Oliveto, G., & Sajjadi, S. M. (2024). Enhancing Hydraulic Efficiency of Side Intakes Using Spur Dikes: A Case Study of Hemmat Water Intake, Iran. *Water and Soil Science*, 16(16), 2254.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Abraham, J & ,.Bagherzadeh, M. (2021). SVM performance for predicting the effect of horizontal screen diameters on the hydraulic parameters of a vertical drop. *Applied sciences*, 11(9), 4238.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Mirzaee, R., & Abraham, J. (2021). Predicting the energy dissipation of a rough sudden expansion rectangular stilling basins using the SVM algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 8(2), 98-106.
- Esmaeli, P., Bodaghpour, S., Rostami, M., & Mirzaee, M. (2020). Experimental study of Longitudinal Components of Velocity Around Simple Series Spur Dikes. *Irrigation and Water Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.120721>. (in Persian)
- Ferreira, C. (2001). Algorithm for solving gene expression programming: a new adaptive problem. *Complex Systems*, 13(2), 87-129.
- Fuladipannah, M., & Majedi-Asl, M. (2022). Soft Computing Application to Amplify Discharge Coefficient Prediction in Side Rectangular Weirs. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 213-233. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150692>. (in Persian)
- Fuladipannah, M., Majedi-Asl, M., & Haghgooyi, A. (2020). Application of intelligent algorithm to model head-discharge relationship for submerged labyrinth and linear weirs. *Journal of Hydraulics*, 15(2), 149-164. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.232388,1461>. (in Persian)
- Gupta, L.K., Pandey, M. & Anand Raj, P. (2024). Numerical simulation of local scour around the pier with and without airfoil collar (AFC) using FLOW-3D. *Environ Fluid Mech* 24, 631–649. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09932-2>.
- Hosseini-Asli, N., Parvaresh-Rizi, A., Rostami, M., & Fahoudi, J. (2015). 3D simulation of flow pattern in the vicinity of the inlet canal of lateral intake diversion dam. *Iranian Water Researches Journal*, 9(3), 89-98. (in Persian)
- Kalita, H. M., Sarma, A .K., & Bhattacharjya, R. K. (2014). Evaluation of Optimal River Training Work using GA Based Linked Simulation- Optimization Approach. *Water resources management*, 28(8), 2077-2092.
- Koncar, N. (1997). *Optimisation methodologies for direct inverse neurocontrol (Doctoral dissertation)*. University of London.
- Mandal, A., Gautam, H., & Ahmad, Z. (2024). Sediment control and flow redistribution with submerged vanes: a review. *Water Practice & Technology*, 19(5), 2197-2212.
- Maroofi-nia, E., Asna-Ashari, A., Hassan-Zadeh, Y., Khosh-tinat, S., & Amin-nejad, B. (2016). Investigation of the Effects of Submerged Vanes and Spur Dikes on Sediment Control at Lateral Intakes by SSIIM2 Software. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), 169-180. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12505>. (in Persian)
- Remesan, R., & Mathew, J. (2016). *Hydrological data driven modelling*. Springer International Pu.
- Sedaghat-Shayegan, D., & Roosta, M. R. (2024). Numerical Investigation of Block Form Effect in Amount of Dissipated Energy of Baffled Apron Spillway Drop by FLOW-3D. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54.1(114), 56-62. <https://doi.org/10.22034/jcee.2020.13438.1349>. (in Persian)
- Shahinejad, B., Yonesi, H. A., & Mirbeyksabzevari, M. (2023). Optimum Design of spur dikes dimension using multi-objective of harmony search algorithm, Case study: Zanjanrood River. *Hydrogeomorphology*, 10(34), 165-141. <https://doi.org/10.22034/hyd.2023.54639.1670>. (in Persian)
- Shaker, E., & Kashefipour, S. (2014). Experimental Investigation on Velocity and Shear Stress Distributions in a 90-Degree Bend With and Without Series of Groynes. *Water and Soil Science*, 24(3), 55-68. (in Persian)

- Talaat, A., Attia, K., Elsaed, G., & Ibraheem, M. (2009). Implementation of Spur Dike to Reduce Bank Erosion of Temporary Diversion Channels during Barrages Construction. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3190-3205.
- Vaghefi, M., & Ghodsian, M. (2010). Experimental study on flow field and scour pattern around t shaped spur dike in a 90 degree bend. *Civil engineering infrastructures journal (cej) (journal of faculty of engineering)*. *Sid*, 44(2), 265-276. <https://doi.org/https://sid.ir/paper/166592/en>. (in Persian)
- Vaghefi, M., Ghodsian, M., & Akbari, M. (2017). Experimental investigation on 3D flow around a single T-shaped spur dike in a bend. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(3), 462-470.
- Vapnik, V. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag.
- Yang, J., Shen, Z., Zhang, J., Teng, X., Zhang, W., & Dai, J. (2022). Experimental and numerical investigation of flow over a spillway bend with different combinations of permeable spur dikes. *Water Supply*, 22(2), 1557-1574.
- Zare, M., & Honar, T. (2016). The Effect of Groyne on Reduction of the Scour Depth around Bridge Piers in River Bends. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74), 167-192.

Original Research

Quantitative Simulation of Diverged Flow Using Machine Learning Techniques and FLOW-3D Numerical Modeling

I. Karimi Sarmeydani, M. Heidarnejad*, A. Egdernezhad

***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Received: 28 August 2024, **Accepted:** 29 October 2024

Email: mo_he3197@yahoo.com

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2024.366862.1591

Extend Abstract

Intouduction

Groynes at water intake locations significantly increase the flow diverted from rivers by optimizing incoming water control. Vaghefi and Ghodsian (2017) experimentally studied flow patterns around a T-shaped Groyne within a 90-degree arc using a moving bed. Shaker and Kashfipour (2013) compared flow velocity and shear stress distribution with and without Groynes. Behnam-Talab *et al.* (2018) simulated porous Groynes using FLOW-3D software. Shahinejad *et al.* (2022) applied a multi-objective algorithm to optimize T-shaped Groyne dimensions, achieving superior results, compared to previous designs. Zare and Honer (2016) investigated how simple Groynes reduce lateral erosion in river arches under laboratory conditions, emphasizing the influence of Groynes on erosion patterns. These studies collectively highlight the importance of Groyne design in enhancing water extraction and mitigating erosion.

The review of literatures confirms that both laboratory and numerical studies have been conducted to examine the characteristics of various types of Groynes and the impact of flow patterns on them. However, there is a lack of studies addressing the simultaneous application and comparison of numerical and data-driven models in the investigation of geometric and hydraulic characteristics, particularly concerning the effect on the amount of diverted discharge from a canal into intake featuring T-shaped and L-shaped Groynes. Consequently, this research aims to evaluate the performance of two MLMs, specifically SVM and GEP in comparison with the Computational Fluid Dynamics (CFD)-based FLOW-3D model, on a laboratory scale.

Materials and Methods

Groynes play a crucial role in river engineering by regulating river flow. This study assesses the efficacy of two machine learning algorithms—support vector machine (SVM) and gene expression programming (GEP)—in comparison with FLOW-3D software for simulating diverted flow in a laboratory setting. The experimental model was tested in a laboratory flume with T-shaped and L-shaped Groynes positioned at 90 and 135-degree angles to channel the discharge into the intake system. The machine learning models incorporated three independent variables: the flow Froude number, the angle of water intake, and the relative length of the Groynes. Out of 96 laboratory data points, 70% were allocated for model training and 30% for model testing. Model performance was assessed using the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and coefficient of determination (R^2) indices.

Results and Discussion

The results indicated that the GEP model surpassed the SVM model. For the L-shaped Groyne, the values for (R^2 , MAE, RMSE) during both the training and testing phases were (0.9325, 0.9878, 1.2536) and (0.9836, 0.4102, 0.6325), respectively. For the T-shaped Groyne, the corresponding values were (0.9025, 1.2534, 1.8502) during training and (0.9873, 0.3337, 0.4972) during testing. In the FLOW-3D model, after calibration and validation, a Manning's roughness coefficient of 0.035 and the Prandtl's mixing length model were chosen for turbulence simulation. The performance indices during the testing phase for the L-shaped and T-shaped Groynes were (0.9607, 0.9363, 1.2070) and (0.9513, 1.1256, 1.3759), respectively. The GEP model showed a relative advantage over the FLOW-3D model.

Conclusion

This study compares the performance of MLMs (SVM, GEP) with FLOW-3D in simulating diverted flow using T-shaped and L-shaped Groynes. Results from laboratory flume tests showed GEP outperformed SVM and FLOW-3D, particularly in simulating flow diversion, evaluated by RMSE, MAE, and R^2 performance indices.

Keywords :Diverted Flow; Computational Fluid Dynamics; Data-Driven model; Performance Assessment

بررسی حجم آب آبیاری کاربردی و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلان استان خراسان رضوی

محمد جلینی*^۱، اردلان ذوالفقاران^۲

۱) به ترتیب دانشیار و استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

چکیده

هدف اصلی از اجرای این پروژه، اندازه‌گیری حجم آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلان تحت مدیریت باغداران در استان خراسان رضوی است. باغ‌های آزمایشی طوری انتخاب شدند که عوامل مختلف از جمله روش آبیاری، بافت خاک و کیفیت آب آبیاری کاربردی را پوشش دهند. در کل استان جمعاً ۴۳ باغ گیلان در دشت‌های مشهد- چنارن، طرهبه - شاندریز و نیشابور انتخاب شدند. باغ‌های منتخب در سال ۱۴۰۰ مورد پایش و ارزیابی زراعی و آبی قرار گرفتند. برداشت اطلاعات از باغ‌های منتخب با مراجعه حضوری به باغ‌ها، تکمیل پرسشنامه، نمونه‌برداری از خاک و منبع آبی باغ‌ها، ثبت برنامه آبیاری و اندازه‌گیری دبی منبع آب صورت گرفت. نیاز آبی گیلان در مناطق مختلف محاسبه و با حجم آب آبیاری کاربردی باغداران مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که دامنه تغییرات مقدار آب آبیاری کاربردی در باغ‌های گیلان استان بین ۶۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مترمکعب بر هکتار و متوسط حجم آب آبیاری کاربردی در باغ‌ها برابر ۷۷۹۹ مترمکعب بر هکتار است. دامنه تغییرات عملکرد گیلان نیز بین ۵۱۶۷ تا ۱۲۱۱۷ کیلوگرم بر هکتار متغیر است و متوسط عملکرد محصول برابر ۷۰۴۹ کیلوگرم بر هکتار به‌دست آمد. دامنه تغییرات بهره‌وری آب در باغ‌های گیلان بین ۰/۶۹۱ تا ۱/۵۶۸ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب و متوسط آن برابر با ۰/۹۰۷ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب محاسبه شد. میانگین بهره‌وری آب در دو روش آبیاری سطحی و قطره‌ای به ترتیب برابر ۰/۸۱۳ و ۰/۹۷۲ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به‌دست آمد که نشان می‌دهد با تغییر روش آبیاری از سطحی به قطره‌ای، بهره‌وری آب در باغ‌های گیلان استان حدود ۲۰ درصد قابل افزایش است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت آبیاری، روش‌های آبیاری، آبیاری سطحی، آبیاری قطره‌ای

مقدمه

منابع آب، مصرف بالای آب در بخش کشاورزی و تولید پایین محصول است (Parhizkari et al., 2015). به‌دست آوردن نیاز آبی گیاهان یکی از راه‌های مدیریت صحیح آبیاری است، زیرا در صورتی می‌توان تقویم آبیاری را برای افزایش بهره‌وری تدوین کرد که مقدار آب مورد نیاز گیاه دقیقاً برآورد شده باشد.

یوسفی و همکاران (Yosefi et al., 2018) با ارزیابی شاخص ردپای آب محصولات زراعی و باغی استان تهران نتیجه گرفتند در منطقه شمیرانات استان تهران سطح برداشت گیلان ۴۵۷۵ هکتار و میزان تولید سالانه ۶۳۰۰۰ تن و عملکرد گیلان در این منطقه ۱۳۷۷۰ کیلوگرم در

ایران خاستگاه بسیاری از محصولات باغی از جمله گیلان است. کشت و پرورش گیلان در بسیاری از نقاط ایران سابقه دارد و از دیرباز میوه گیلان مورد مصرف مردم کشورمان قرار می‌گرفته است. اهمیت گیلان نه تنها به عنوان محصول اواخر فصل بهار، بلکه به دلیل ارزش غذایی بالا و منبعی سرشار از عناصر معدنی مانند کلسیم، پتاسیم و منیزیم مورد توجه بوده است. کیفیت گیلان ایران در مقایسه با دیگر کشورهای تولیدکننده به دلیل شرایط اقلیمی مطلوب بسیار مناسب است (Ganji moghadam and Bozari, 2018). بزرگ‌ترین چالش کشور در مدیریت

هکتار است. تبخیر و تعرق گیلاس در منطقه شمیرانات ۷۴۲ میلی‌متر، نیاز آبیاری ۶۹۶ میلی متر و بارش مؤثر منطقه ۵۳ میلی متر محاسبه شده است. رد پای آب در استان برای گیلاس ۱۳۸ مترمکعب بر تن به دست آمد. نظری و یونسی (Nazari and Younesi, 2020) به تحلیل اثر برآورد سطح سایه انداز واقعی به روش سنجش از دور در تدقیق برآورد نیاز آبی باغ‌ها در فاز طراحی و بهره‌برداری آبیاری موضعی در استان قزوین پرداختند. در روش آبیاری موضعی، تعیین درست سطح سایه انداز درختان در برآورد نیاز آبی و مدیریت مصرف آب اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، برای تخمین سطح سایه‌انداز از پردازش تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده، سطح سایه انداز واقعی در باغ‌های گیلاس ۲۸/۳ درصد کمتر از مقادیر مرسوم در طراحی آبیاری موضعی بوده است. دمیرتاس و همکاران (Demirtas et al., 2007) با بررسی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق درختان گیلاس با سامانه آبیاری بارانی در منطقه غرب ترکیه گزارش دادند تبخیر و تعرق سالانه در حالت آبیاری کامل درختان گیلاس برای درختان سه ساله ۶۴۹ میلی‌متر و برای درختان چهار ساله ۷۱۷ میلی‌متر است. دهقانی سانچ و همکاران (Dehghanisanij et al., 2007) اثر استراتژی‌های مختلف کم‌آبیاری و سطوح مختلف کود کاربردی را بر رشد رویشی، محصول تولیدی و بهره‌وری آب درختان گیلاس تحت آبیاری قطره‌ای در منطقه کشت و صنعت مغان بررسی کردند و گزارش دادند مجموع آب آبیاری کاربردی مورد استفاده در آبیاری باغ‌های گیلاس تحت کشت مجموعه با سامانه آبیاری قطره‌ای ۷۴۶۶ مترمکعب در هکتار است، این عدد کمتر از نیاز آبی گیاه به میزان ۸۷۶۴ مترمکعب در هکتار گفته شده است. لیاو (Liao, 2019) در مطالعه‌ای سه ساله در یک باغ گیلاس شش ساله واقع در سایت تحقیقاتی در منطقه تانگجو، پکن، اثر اعمال شیوه سنتی آبیاری درختان گیلاس (آبیاری شیاری) و شش استراتژی آبیاری قطره‌ای (با پوشش مالچ و بدون آن) را بر بهره‌وری آب مطالعه کرد و نشان داد نیمرخ رطوبتی خاک در عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری دارای بالاترین تغییرپذیری است و نتیجه‌گیری شد که آب برداشتی درختان گیلاس ارتباط نزدیکی با میزان رطوبت خاک در این محدوده از نیمرخ خاک دارد. در مقایسه با شیوه آبیاری جویچه‌ای، استراتژی‌های آبیاری قطره‌ای مطالعاتی به‌طور معنی‌داری سبب کاهش حجم آب کاربردی، بدون کاهش در میزان محصول تولیدی شدند. بلانکو و همکاران (Blanco et al., 2019) طی مطالعه‌ای چهار ساله در یک باغ گیلاس تجاری (رقم پرایم جایننت با تراکم کشت ۶۶۷ درخت در هکتار و تحت آبیاری قطره‌ای در اسپانیا، متوسط آب کاربردی در تیمار شاهد (۱۱۰ درصد تبخیر-تعرق گیاه) و تیمار آبیاری مرسوم و دو تیمار کم‌آبیاری طی سال‌های مطالعاتی را به ترتیب، ۶۹۴۹، ۶۰۲۶، ۵۰۸۹ و ۴۲۴۹ مترمکعب بر هکتار گزارش دادند. مارتینز (Martínez, 2020) در مطالعات خود در یک باغ گیلاس ۱۵ ساله (رقم پرایم جایننت، تحت آبیاری قطره‌ای با یک خط لاترال به‌ازای هر ردیف و سه قطره‌چکان با دبی ۴ لیتر بر ساعت به‌ازای هر درخت) در منطقه خومییا، مورسیا، جنوب شرقی اسپانیا، حجم آب کاربردی در تیمارهای شاهد (۱۱۰ درصد تبخیر-تعرق گیاه)، آبیاری مرسوم (آبیاری بیشتر از نیاز آبی گیاه در قبل از برداشت و تنش آبی کنترل نشده پس از برداشت)، دو تیمار کم‌آبیاری را به ترتیب، ۷۰۸۲، ۶۴۴۶، ۴۵۵۵ و ۴۲۹۶ مترمکعب بر هکتار گزارش داد. رنکان و همکاران (Renkuan et al., 2019) در تحقیقی آبیاری شیاری سنتی محلی را با آبیاری قطره‌ای (با لایه مالچ و بدون آن) به مدت سه سال (۲۰۱۷-۲۰۱۵) در مزرعه گیلاس ۶ ساله مقایسه کردند. توزیع رطوبت پروفیل خاک، مصرف آب، عملکرد و کیفیت میوه اندازه‌گیری شد. نتایج

داد که بهره‌وری آب در روش آبیاری قطره‌ای بیشتر است تا در روش آبیاری سطحی. آبیاری قطره‌ای سبب افزایش تراکم طول ریشه و سطح ریشه در لایه سطحی خاک می‌شود. اطلاعات محدودی در مورد پاسخ گیلاس به استراتژی‌های کم آبی و تنش خشکی و همچنین در مورد کیفیت میوه گیلاس وجود دارد (Marsal *et al.*, 2010; Livellara *et al.*, 2011; Nieto *et al.*, 2017). در کل، درخت گیلاس به تنش آبی به خصوص قبل از برداشت حساس است. با این حال، در مورد اثر برنامه‌های کاربردی کمبود آب بر رشد رویشی و زایشی و پاسخ گیلاس در مناطق خشک و نیمه خشک اطلاعات زیادی وجود ندارد (Centritto, 2005).

با بررسی منابع مشخص شد که در زمینه مدیریت آب آبیاری کاربردی و کاربرد روش‌های مختلف آبیاری در باغ‌های گیلاس در کشور متاسفانه تحقیقات چندانی نشده است. در پروژه حاضر مقدار آب آبیاری کاربردی گیلاس در مناطقی که در رده‌بندی سطح زیرکشت مقام بالاتری را در سطح کشور دارند، اندازه‌گیری شد. برای تعیین آب کاربردی و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلاس، داده‌ها و اندازه‌گیری‌ها در منابع آبی مختلف، روش‌های مختلف آبیاری، شیوه‌های مختلف مدیریتی و غیره به‌کارگرفته شدند و تجزیه و تحلیل گردیدند.

مواد و روش‌ها

این پروژه به‌صورت میدانی و به‌منظور تعیین حجم آب آبیاری کاربردی گیلاس در باغ‌های تحت مدیریت باغداران طی یک فصل زراعی (۱۴۰۰) اجرا شد. در استان خراسان رضوی سه دشت مشهد-چناران، نیشابور و طرنبه - شاندیز انتخاب شدند که بیشترین سطح زیرکشت گیلاس را دارند. باغ‌های مورد مطالعه برای محصول گیلاس به گونه‌ای انتخاب شدند که بتوان میانگین حجم آب آبیاری کاربردی

تحقیق نشان داد که بیشترین تغییرات رطوبت در نیمرخ خاک در لایه صفر تا ۶۰ سانتی‌متری خاک است که نشان می‌دهد جذب آب درختان گیلاس ارتباط نزدیکی با میزان رطوبت خاک در این منطقه دارد. در مقایسه با آبیاری جویچه‌ای، استفاده از آبیاری قطره‌ای به طور قابل توجهی ($P < 0.05$) مصرف آب درختان گیلاس را بدون کاهش عملکرد کاهش داد و تیمار با استفاده از مالچ، عملکرد را افزایش داد.

کوچوک‌یوموک (Küçükyumuk, 2024) در تحقیقی در ترکیه طی چهار سال (۲۰۱۶-۲۰۱۹) تاثیر کم آبیاری تنظیم شده (RDI) قبل و بعد از برداشت گیلاس و نیز شاخص‌های عملکرد، رشد رویشی و کیفیت میوه را بررسی کرد. تیمارها عبارت بودند از شاهد (آبیاری پس از رسیدن رطوبت به ظرفیت زراعی)، ۲۵ درصد کم آبیاری پس از برداشت، ۵۰ درصد کم آبیاری پس از برداشت، آبیاری بدون کمبود ۳۰ روز پس از شکوفه‌دادن کامل و ۲۵ درصد کم آبیاری بعد از این مدت، آبیاری بدون کسری ۳۰ روز پس از شکوفه‌دادن کامل و ۵۰ درصد کسری آبیاری بعد از این دوره و آبیاری برابر با ۱۵۰ درصد تبخیر و تعرق گیاه. نتایج سال آخر نشان داد که در مقایسه با تیمار شاهد بین ۲۰/۲ تا ۴۵/۶ درصد مصرف آب کاهش یافته است. رشد تنه و ساقه برای همه تیمارها افزایش یافت. عملکرد میوه در تیمار ۲۵ درصد کم آبیاری پس از برداشت نسبت به تیمار شاهد ۲۱/۸ درصد افزایش یافت. این محقق سرانجام نتیجه گرفت که تیمار ۲۵ درصد کاهش آب آبیاری پس از برداشت سبب افزایش عملکرد و کیفیت میوه و کاهش مصرف آب شده‌است و قابل توصیه برای باغداران خواهد بود. پینگ فنگ و همکاران (Pingfeng *et al.*, 2019) در تحقیقی در چین طی دو سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به بررسی جذب آب و توزیع ریشه درختان گیلاس در دو روش آبیاری سطحی و قطره‌ای پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان

باغ‌های منتخب گیلان تعیین شد. با توجه به سطح زیرکشت گیلان، عمق آب آبیاری کاربردی نیز به دست آمد. بدین طریق برای هر نوبت آبیاری در باغ‌های منتخب، حجم و عمق آب آبیاری کاربردی برآورد گردید. در پایان فصل رشد، با جمع مقادیر نوبت‌های آبیاری، حجم و عمق کل آب آبیاری کاربردی گیلان در باغ‌های منتخب تعیین شد. عملکرد گیلان در هر باغ تعیین شد و با توجه به میزان آن و حجم آب آبیاری کاربردی، بهره‌وری آب به دست آمد.

از اطلاعات هواشناسی مناطق منتخب شامل متوسط روزانه دمای حداکثر و حداقل هوا، رطوبت نسبی حداکثر و حداقل هوا، سرعت باد (متر بر ثانیه) در ارتفاع ۲ متری، و تعداد ساعات آفتابی در شبانه روز در یک دوره آماری ۱۰ ساله (سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع استفاده گردید. تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از نرم افزار ETo-Calculator نیاز آبی خالص گیلان در مناطق به روش فائو پنمن مانیتث فائو برآورد شد (Raes, 2012). ارتفاع تبخیر-تعرق پتانسیل گیلان در مناطق منتخب با استفاده از رابطه (۱) برآورد گردید.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (1)$$

مقادیر ضریب گیاهی (K_c) برای هر مرحله رشد گیاه بر اساس نشریه فائو ۵۶ انتخاب (Allen et al., 1998) و براساس نشریه شماره ۲۹ فائو نیاز آب آبشویی در آبیاری سطحی و قطره‌ای از رابطه (۲) و (۳) برآورد گردید.

$$LR = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w} \quad (2)$$

$$LR = \frac{EC_w}{2MaxEC_e} \quad (3)$$

در این دو رابطه، EC_w هدایت الکتریکی آب آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر)، EC_e آستانه تحمل ۱۰ درصد کاهش محصول (۲/۰ دسی‌زیمنس بر متر)، و $MaxEC_e$ شوری با

محصول را با دقت قابل قبولی برآورد کرد. چهل و سه باغ در دشت‌ها با کمک کارشناسان معاونت تولیدات گیاهی، مدیریت هماهنگی ترویج و مدیریت آب و خاک سازمان جهاد کشاورزی استان شناسایی و انتخاب شد (آبیاری در ۱۷ باغ به روش سطحی و در ۲۶ باغ به روش قطره‌ای بوده است). در این پروژه میانگین حجم آب آبیاری کاربردی گیلان در دوره رشد گیاه در باغ‌های منتخب اندازه‌گیری گردید.

باغ‌های مورد بررسی طوری انتخاب شدند که تغییرات در عوامل مختلف از جمله روش آبیاری، بافت خاک، نوع مالکیت، کیفیت آب آبیاری و ... را پوشش دهند. باغ‌های منتخب در فصل رشد مورد پایش زراعی قرار گرفتند و مواردی مانند زمان شروع آبیاری، تاریخ برداشت و رقم گیلان یادداشت‌برداری شد. ارقام تولیدی گیلان در خراسان رضوی شامل پیش رس، دوم رس، سیاه مشهد، تک‌دانه مشهد و نیز گیلان زرد یا همان گیلان شیشه‌ای است. از این میان، گیلان رقم تک‌دانه مشهد رقم غالب و معروف کشور است و از نظر طعم، مزه، درشتی و رنگ عالی و منحصر به فرد است. برخی دیگر از مشخصات عمومی باغ‌ها مانند مساحت، موقعیت دقیق مکانی (با استفاده از GPS)، روش آبیاری، منبع آب آبیاری (سطحی، زیرزمینی)، زمان برداشت از منبع آبی و تغییرات دبی برداشتی در طول سال، نوع شبکه (مدرن / سنتی)، مشخصات بهره‌برداران در فرم‌های ثبت اطلاعات عمومی باغ‌های منتخب درج گردید.

حجم آب آبیاری کاربردی در باغ‌های منتخب از طریق مراجعه حضوری، تکمیل پرسشنامه، ثبت برنامه آبیاری و اندازه‌گیری دبی منبع آب با استفاده از فلوم دوزنقه‌ای (تیپ ۴ یا ۵) اندازه‌گیری شد. در باغ‌هایی که سامانه آبیاری از نوع قطره‌ای بود، دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها با روش حجمی اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری و تعیین دبی منبع آب در باغ‌های منتخب، بر اساس تعداد ساعت آبیاری، حجم آب آبیاری کاربردی در هر نوبت آبیاری در هر یک از

شوری آب نیز معکوس با ضریب تبیین ۰/۸۲ به دست آمد. با افزایش شوری آب آبیاری، بهره‌وری آب کاهش یافت. کمترین بهره‌وری آب (۰/۶۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب آب) در دامنه شوری آب ۲/۵ تا ۳/۰ و بیشترین بهره‌وری آب (۱/۳۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب آب) در دامنه شوری ۱/۰ تا ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. شیب کاهش بهره‌وری آب نسبت به شوری از شیب عملکرد بیشتر بود. با اینکه بین شاخص‌های مورد نظر و شوری آب رابطه با ضریب تبیین قابل قبول وجود دارد، ولی می‌توان گفت میزان آب آبیاری توسط باغداران بیشتر تحت تأثیر میزان آب در دسترس و حقایق آن‌ها بوده است. سطح زیرکشت گیلاس حداقل، حداکثر و میانگین به ترتیب برابر با ۰/۵، ۸/۰ و ۳/۸ هکتار در باغ‌های انتخابی بوده است. طول دوره رشد در باغ‌های انتخابی بین ۱۵۲ تا ۱۹۱ با میانگین ۱۷۷ روز بود. میانگین عمق آب در هر بار آبیاری نیز بین ۱۴/۳ تا ۱۱۳/۹ با میانگین ۴۵/۸ میلی‌متر بود. تعداد نوبت‌های آبیاری نیز بین ۷ تا ۵۰ با میانگین ۲۴ بار متغیر بود. نوع منبع آب در تمام باغ‌ها چاه عمیق بود. بافت خاک نیز از شنی تا لوم رسی متغیر بود.

با توجه به مساحت هر باغ در انتهای فصل، میزان برداشت گیلاس اندازه‌گیری و متوسط آن برای تجزیه و تحلیل عملکرد و محاسبه بهره‌وری آب استفاده شد.

نتایج و بحث

مقایسه عمق آب آبیاری کاربردی با نیاز آبیاری برآورد شده گیلاس

برای مقایسه عمق آب آبیاری کاربردی (که باغداران اعمال می‌کنند) با نیاز آبیاری در باغ‌های منتخب، ابتدا از تقسیم نیاز آبی گیلاس بر راندمان آبیاری در هر یک از باغ‌ها میزان نیاز آبیاری محاسبه شد.

عملکرد صفر (برابر ۵/۸ دسی‌زیمنس بر متر) است (Ayers, 1994). شاخص بهره‌وری آب از نسبت عملکرد گیلاس (کیلوگرم در هکتار) به حجم آب آبیاری کاربردی (مترمکعب در هکتار) به دست آمد. به عبارت دیگر، شاخص بهره‌وری آب در تولید گیلاس از رابطه (۴) به دست آمد:

$$WUE = \frac{CY}{CW} \quad (4)$$

در این رابطه، WUE بهره‌وری آب آبیاری کاربردی (کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی در سراسر فصل)، CY عملکرد گیلاس (کیلوگرم در هکتار در سال) و CW حجم آب آبیاری کاربردی (مترمکعب بر هکتار در سال) است.

مشخصات کلی باغ‌ها و پارامترهای اولیه اندازه‌گیری و محاسبه شده در دشت‌های مورد بررسی و کل باغ‌ها در جدول (۱) آورده شده است. حداقل، حداکثر و میانگین دبی در کل باغ‌های انتخابی به ترتیب برابر با ۰/۵، ۴۷/۲ و ۱۱/۴ لیتر در ثانیه بود. میزان شوری آب آبیاری حداقل ۰/۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و حداکثر ۱/۳۰ با میانگین ۰/۴۹ دسی‌زیمنس بر متر بود. با توجه به شوری آب آبیاری و شوری عصاره اشباع خاک، ضریب آشویی بین ۱/۰۱ تا ۱۱/۲۱ درصد متغیر و میانگین آن برابر با ۴/۵۴ درصد بود. شوری آب آبیاری باغ‌های منتخب گیلاس کمتر از ۳/۰ دسی‌زیمنس بر متر بوده است. با افزایش شوری آب، حجم آب آبیاری افزایش یافت، هر چند بیشترین حجم آب آبیاری (۱۲۳۰۲ مترمکعب در هکتار) در دامنه شوری ۱/۵ تا ۲/۰ دسی‌زیمنس بر متر مصرف شده است. رابطه بین عملکرد و شوری آب معکوس با ضریب تبیین ۰/۵۱ به دست آمد. با افزایش شوری آب آبیاری عملکرد کاهش یافت. کمترین عملکرد (۶۴۹۱ کیلوگرم در هکتار) در دامنه شوری آب ۲/۵ تا ۳/۰ و بیشترین عملکرد (۱۱۵۵۵ کیلوگرم در هکتار) در دامنه شوری ۱/۰ تا ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. رابطه بین بهره‌وری آب و

جدول ۱- محدوده تغییرات برخی داده های پایه در باغ های مورد مطالعه

Table 1. Range of changes in some basic data in the studied Orchards

تعداد نوبت آبیاری No. of Irrig	متوسط عمق آب آبیاری کاربردی Irrig. Depth (mm)	طول دوره رشد Crop growth period (days)	سطح باغ ها Orchards Area (ha)	درصد آبشویی Leaching percent (%)	شوری خاک Soil salinity(ds/m)	شوری آب Water salinity (ds/m)	دبی Discharge (L/s)	پارامتر Parameter	دشت Plain
۸	۱۶/۰	۱۵۲	۰/۷	۱/۷۲	۰/۳۰	۰/۲۰	۵/۷	حداقل	
۴۸	۹۵/۰	۱۹۱	۱۵/۰	۱۱/۲۱	۱/۹۵	۱/۳۰	۴۷/۲	حداکثر	مشهد- چناران Mashhad- Chenaran
۲۱	۴۹/۲	۱۷۲	۴/۴	۵/۳۱	۰/۸۶	۰/۵۷	۲۶/۵	میانگین	
۷	۱۵/۲	۱۷۰	۰/۵	۱/۰۱	۰/۲۳	۰/۱۰	۰/۵	حداقل	
۵۰	۱۱۲/۹	۱۸۵	۹/۰	۳/۶۳	۰/۶۰	۰/۳۵	۲۵/۰	حداکثر	طرقبه- شاندیز Torghabe- Shandiz
۲۲	۵۲/۸	۱۷۸	۳/۲	۲/۱۶	۰/۳۹	۰/۲۲	۷/۴	میانگین	
۱۲	۱۴/۳	۱۸۰	۰/۵	۱/۰۱	۰/۱۵	۰/۱۰	۲/۰	حداقل	
۴۵	۶۷/۹	۱۹۰	۸/۰	۹/۰۹	۱/۳۰	۰/۱۹	۲۳/۰	حداکثر	نیشابور Nyshabor
۳۳	۳۱/۷	۱۸۶	۳/۰	۴/۵۲	۰/۷۱	۰/۴۹	۱۲/۰	میانگین	
۷	۱۴/۳	۱۵۲	۰/۵	۱/۰۱	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۵	حداقل	
۵۰	۱۱۲/۹	۱۹۱	۸/۰	۱۱/۲۱	۱/۹۵	۱/۳۰	۴۷/۲	حداکثر	کل باغ های منتخب
۲۴	۴۵/۸	۱۷۷	۳/۸	۴/۵۴	۰/۷۳	۰/۴۹	۱۱/۴	میانگین	Total

میلی متر نتیجه شد. متوسط عمق آب آبیاری کاربردی داده شده نیز در مشهد- چناران، طرقبه- شاندیز و نیشابور به ترتیب برابر با ۷۷۶، ۷۵۹ و ۷۷۴ میلی متر و در کل باغ ها ۷۷۲ میلی متر به دست آمد. نتایج بررسی ها نشان داد که متوسط عمق آب آبیاری کاربردی توسط باغداران، در مقایسه با مقدار محاسبه شده با سند ملی، ۵ درصد بیشتر و در مقایسه با مقدار برآورد شده بر اساس داده های هواشناسی سال ۱۴۰۰ و مقدار برآورد شده بر اساس آمار هواشناسی ۱۰ ساله به ترتیب ۱۵ و ۱۳ درصد کمتر است. لازم است گفته شود برآورد نیاز آبی یکی از پارامترهای اصلی در طراحی سامانه های آبیاری محسوب می شود. اگر در طراحی از مقادیر میانگین تبخیر- تعرق برای دوره های چندساله و براساس داده های هواشناسی استفاده شود، احتمال وقوع آن ۵۰ درصد خواهد بود، در حالی که ممکن

با توجه به نظر کارشناسان و شیوه آبیاری در باغ های مورد مطالعه، پتانسیل راندمان آبیاری برای روش قطره ای ۹۰ درصد و برای روش آبیاری سطحی ۶۰ درصد در نظر گرفته شد (Abbasi et al., 2016). در جدول (۲)، دامنه تغییرات عمق آب آبیاری کاربردی باغ های گیلان در مناطق مختلف اجرا با مقادیر نیاز ناخالص آبیاری گیلان برآورد شده به سه روش سند ملی آب، داده های هواشناسی سال ۱۴۰۰ و داده های هواشناسی ۱۰ ساله منتهی به سال ۱۴۰۰ مقایسه شده است. مقدار برآورد شده نیاز ناخالص آبیاری به سه روش سند ملی آب، داده های هواشناسی سال ۱۴۰۰ و میانگین داده های هواشناسی ۱۰ ساله، در مشهد - چناران به ترتیب ۷۲۲، ۷۲۲ و ۷۷۱، در طرقبه - شاندیز ۷۲۲، ۸۶۲ و ۸۵۷، در نیشابور ۷۷۱، ۹۷۳ و ۸۹۲ و در کل باغ ها به ترتیب ۷۳۳، ۹۱۳ و ۸۸۷

بررسی حجم آب آبیاری کاربردی و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلاس استان خراسان رضوی

است گیاه با تنش آبی روبه‌رو شود. بنابراین، برای جلوگیری از وقوع چنین مشکلی توصیه شده است که میزان تبخیر - تعرق با احتمالات مختلف برآورد شود و براساس نوع گیاه و مدیریت زراعی، مقدار تبخیر و تعرق با احتمال وقوع مناسب انتخاب و در طراحی سامانه‌های آبیاری به کار برده شود. از طرفی، در اغلب طرح‌ها در برآورد سطح سایه‌انداز و نیاز آبی بیش برآورد صورت می‌گیرد. در واقعیت، بسته به عواملی مانند نوع باغ، سن درخت و شرایط رشد، سطح سایه‌انداز متغیر خواهد بود و با مقادیر تخمینی متفاوت است. برآورد غیردقیق نیاز آبی علاوه بر ایجاد خطا در برنامه‌ریزی آبیاری، به کاهش عملکرد محصول و برداشت بیشتر از منابع آبی منجر خواهد شد. بنابراین، ضروری است در هر سامانه در زمان بهره‌برداری، سطح سایه انداز به دقت اندازه‌گیری و برنامه آبیاری بر اساس برآورد به‌هنگام نیاز آبی تعدیل گردد. برخی تحقیقات نشان داده‌اند نرم‌افزارها و روابطی که میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه را محاسبه می‌کنند، مقادیر را بیشتر از واقعیت برآورد می‌کنند (Ragab, 2024).

جدول ۲- مقایسه میانگین عمق آب آبیاری کاربردی و آب آبیاری برآورد شده

Table 2. Comparison of the average depth of irrigation water and estimated irrigation water

نیاز آبی (میلی‌متر) بر اساس Water requirement (mm) based on			عمق آب آبیاری Irrig. Depth (mm)	دشت Plain
داده‌های هواشناسی ۱۰ ساله 10 years of meteorological data	داده‌های هواشناسی سال ۱۴۰۰ Meteorological data of 2018	سند ملی آب National water document		
۸۹۴±۳۵	۹۰۵±۳۵	۷۲۲±۰	۷۷۶±۷۲	مشهد- چناران Mashhad- Chenarn
۸۵۷±۲۶	۸۶۲±۳۲	۷۲۲±۰	۷۵۹±۱۰۰	طرقبه- شاندیز Torghabe- Shandiz
۸۹۲±۱۶	۹۷۳±۱۸	۷۷۱±۰	۷۷۴±۱۳۰	نیشابور Nyshabor
۸۸۷±۳۳	۹۱۳±۴۸	۷۳۳±۲۱	۷۷۲±۹۱	کل باغ‌های منتخب Total

کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب را در دو روش آبیاری سطحی و قطره‌ای و کل باغ‌ها نشان می‌دهد. دامنه تغییرات مقادیر آب آبیاری کاربردی در باغ‌های استان وسیع و بین ۶۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مترمکعب بر هکتار و با متوسط ۷۷۹۹ مترمکعب بر هکتار است. حداقل، حداکثر و میانگین حجم آب آبیاری کاربردی در روش آبیاری سطحی به ترتیب ۶۲۰۰، ۹۵۰۰ و ۸۰۲۹ مترمکعب در هکتار و در روش قطره‌ای به ترتیب ۶۴۲۶، ۱۰۰۰۰ و ۷۶۳۸ مترمکعب در هکتار است. این امر بیانگر آن است که با تغییر روش آبیاری از سطحی به قطره‌ای، میزان آب آبیاری کاربردی در

تغییرات حجم آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب گیلاس

تغییر روش آبیاری از سطحی و سنتی به سامانه‌های نوین آبیاری، به ویژه تجهیز باغ‌ها به روش‌های آبیاری میکرو، یکی از گام‌های مهم در سال‌های اخیر با هدف کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری آب بوده است. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر تغییر روش آبیاری، شاخص‌های حجم آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در انواع روش‌های مورد استفاده در باغ‌های گیلاس بررسی گردید. جدول (۳) اطلاعات حجم آب آبیاری

باغ‌های گیلان استان به‌طور متوسط فقط ۵ درصد کاهش می‌یابد (۸۰۲۹ در برابر ۷۶۳۸ مترمکعب در هکتار). متفاوت بودن حجم آب آبیاری کاربردی، علاوه بر تاثیر روش آبیاری مورد استفاده در باغ‌های منتخب می‌تواند به این دلیل باشد که در باغ‌های آزمایشی عوامل مختلف از جمله اقلیم منطقه، بافت خاک، نوع مالکیت و حقایق کشاورزی، شوری آب و خاک، تاریخ کاشت، رقم کاشت، تعداد دفعات آبیاری، تاریخ برداشت، طول دوره رشد و ... متغیر بوده است، ضمن اینکه مدیریت آبیاری کشاورزان در هر باغ با باغ دیگر تفاوت داشته است. هدف از اجرای این تحقیق نیز تعیین میزان آب آبیاری کاربردی تحت مدیریت کشاورزان بوده است.

جدول ۳- محدوده تغییرات حجم آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در باغ‌های مورد مطالعه بر اساس سامانه آبیاری
Table 3. Range of changes in irrigation water volume, yield and water productivity in the studied fields based on the irrigation system

بهره‌وری آب Water productivity (kg/m ³)	عملکرد Yield (kg/ha)	حجم آب آبیاری کاربردی Irrigation water (m ³ /ha)	پارامتر Parameter	سامانه آبیاری Irrigation system
۰/۶۹۱	۵۱۶۷	۶۲۰۰	حداقل Min	آبیاری سطحی Surface Irrigation
۱/۰۹۱	۸۵۱۷	۹۵۰۰	حداکثر Max	
۰/۸۱۳	۶۴۸۹	۸۰۲۹	میانگین Mean	
۰/۱۱۰	۸۹۰	۹۴۸	انحراف معیار Standard Division	
۰/۷۶۲	۵۳۳۳	۶۴۲۶	حداقل Min	آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation
۱/۵۶۸	۱۲۱۱۷	۱۰۰۰۰	حداکثر Max	
۰/۹۷۲	۷۴۳۹	۷۶۳۸	میانگین Mean	
۰/۱۶۲	۱۵۶۰	۸۱۸	انحراف معیار Standard Division	
۰/۶۹۱	۵۱۶۷	۶۲۰۰	حداقل Min	کل باغ‌های منتخب Total
۱/۵۶۸	۱۲۱۱۷	۱۰۰۰۰	حداکثر Max	
۰/۹۰۷	۷۰۴۹	۷۷۹۹	میانگین Mean	
۰/۱۶۲	۱۳۹۵	۸۸۳	انحراف معیار Standard Division	

دامنه عملکرد گیلان در باغ‌های استان وسیع و بین ۵۱۶۷ تا ۱۲۱۱۷ کیلوگرم بر هکتار متغیر بوده است. این دامنه وسیع مقادیر عملکرد محصول در استان، بیش از هر چیز دیگری بیانگر پتانسیل بالای منطقه برای افزایش عملکرد گیلان است. متوسط عملکرد محصول در باغ‌های استان برابر ۷۰۴۹ کیلوگرم بر هکتار با انحراف معیار ۱۳۹۵ کیلوگرم در هکتار است. حداقل و حداکثر و میانگین عملکرد در روش آبیاری سطحی به ترتیب ۵۱۶۷، ۸۵۱۷ و ۶۴۸۹ کیلوگرم در هکتار و در روش قطره‌ای به ترتیب ۵۳۳۳، ۱۲۱۱۷ و ۷۴۳۹ کیلوگرم در هکتار است. این امر نیز بیانگر آن است که با تغییر روش آبیاری از سطحی به قطره‌ای، میانگین عملکرد محصول در باغ‌های گیلان استان بیش از ۱۴ درصد افزایش می‌یابد (جدول ۳). جنسن (Jensen, 1993) می‌گوید مصرف آب در سامانه آبیاری قطره‌ای، در مقایسه با سامانه آبیاری ردیفی، به نصف کاهش و عملکرد حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. پس از تعیین حجم آب آبیاری کاربردی و میزان تولید گیلان، بهره‌وری آب برای هر باغ از تقسیم تولید بر حجم آب آبیاری کاربردی محاسبه شد. دامنه تغییرات بهره‌وری آب گیلان در باغ‌های استان بین ۰/۶۹۱ تا ۱/۵۶۸

بررسی حجم آب آبیاری کاربردی و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلان استان خراسان رضوی

آبیاری قطره‌ای و سطحی از آزمون تی- تست استفاده شد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود تفاوت میانگین حجم آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و سطحی به ترتیب ۳۹۱ مترمکعب در هکتار، ۹۵۱ کیلوگرم در هکتار و ۰/۱۵۹ کیلوگرم بر مترمکعب آب بوده است. از نظر آماری بین حجم آب آبیاری کاربردی در دو روش اثر معنی‌دار نیست ولی بین عملکرد و بهره‌وری آب تفاوت بین دو سامانه از نظر آماری معنی‌دار است. بنابراین، تغییر سامانه آبیاری از سطحی به قطره‌ای باعث کاهش اندک مصرف آب، افزایش میزان محصول و افزایش بهره‌وری آب شده است. دلیل اینکه با تغییر سامانه آبیاری از سطحی به قطره‌ای کاهش قابل توجهی در میزان آب کاربردی حاصل نشده است آن است که سامانه‌های قطره‌ای به درستی طراحی نشده‌اند و همه زمین‌های مورد نیاز برای طراحی و بهره‌برداری در نظر گرفته نشده است. ضمن اینکه بعد از طراحی و اجر باید آموزش لازم به کشاورزان و باغداران برای بهره‌برداری صحیح از سامانه مطابق با موارد پیش‌بینی شده در طراحی داده شود.

کیلوگرم بر مترمکعب است. متوسط بهره‌وری آب در باغ‌های استان برابر ۰/۹۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب است. این امر بیانگر آن است که با تغییر روش آبیاری از سطحی به قطره‌ای، بهره‌وری آب در باغ‌های گیلان استان حدود ۲۰ درصد افزایش نشان می‌دهد (جدول ۳). دلیل اصلی این تفاوت متغیر بودن حجم آب آبیاری کاربردی و عملکرد محصول در باغ‌های منتخب است. به عبارتی، همان عواملی که سبب تغییر در حجم آب آبیاری کاربردی و عملکرد در باغ‌های منتخب شده است، روی میزان بهره‌وری آب نیز اثر گذاشته است. به طور کلی، بهبود بهره‌وری آب در سطح باغ نیازمند هماهنگی بهتر استفاده از آب بر حسب نیاز محصولات در زمان و مقدار استفاده از آن است که سرانجام سبب بهبود عملکرد محصول و مقدار آب مصرف‌شده در سطح باغ می‌شود. با توجه به نوسان‌های بهره‌وری آب در شرایط گوناگون، نقش مدیریت آب در بهبود بهره‌وری آب و افزایش عملکرد انکارناپذیر است. تغییر روش آبیاری از سطحی به قطره‌ای موضوعی است که در بیشتر پژوهش‌ها تأیید شده است.

به منظور بررسی آماری تفاوت بین پارامترهای آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در سامانه‌های

جدول ۴- تفاوت آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در سامانه آبیاری قطره‌ای و سطحی

Table 4. The difference of irrigation water, yield and water productivity in drip and surface irrigation system

سطح معنی‌داری Significance level	مقدار t Amount t	t بحرانی Critical t	میانگین تفاوت Mean difference	پارامتر Parameter
۰/۸۲۳ ^{ns}	۱/۳۷۵	۲/۰۲۱	۳۹۱	آب آبیاری Irrigation water
۰/۹۷۵*	۲/۴۱۳	۲/۰۲۱	۹۵۱	عملکرد Yield
۰/۹۹۸**	۳/۴۱۰	۲/۰۲۱	۰/۱۵۹	بهره‌وری آب WUE

گیلاس را در سطح استان خراسان رضوی داشتند. روش آبیاری باغ‌ها روش آبیاری سطحی و قطره‌ای بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد میانگین آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در کل باغ‌های گیلان مورد بررسی به ترتیب ۷۷۹۹ مترمکعب در هکتار، ۷۰۴۹ کیلوگرم در هکتار و

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، آب کاربردی توسط باغداران برای تولید گیلاس در یک فصل زراعی و بدون دخالت در مدیریت آبیاری باغدار، در سه دشت مشهد- چناران، طرهبه- شان‌دیز و نیشابور اندازه‌گیری شد که بیشترین سطح زیرکشت

در مقابل ۸۰۲۹ متر مکعب در هکتار)، عملکرد ۱۵ درصد بیشتر (۷۴۳۹ کیلوگرم در هکتار در مقابل ۶۴۸۹ کیلوگرم در هکتار) و بهره‌وری آب حدود ۲۰ درصد بیشتر (۰/۹۷۲ کیلوگرم به‌ازای هر متر مکعب آب در مقابل ۰/۸۱۳ کیلوگرم به‌ازای هر متر مکعب آب) است. به‌عبارتی، روش آبیاری قطره‌ای نقش نسبتاً موثری در بهبود شاخص‌های مدیریت مصرف آب در باغ‌های گیلان داشته است. مهم‌ترین موانع در فرآیند تولید محصولات کشاورزی اقلیم خشک و نیمه‌خشک و محدودیت منابع آبی است. دامنه تغییرات مقادیر عملکرد گیلان در باغ‌های استان وسیع و بین ۶۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار است. این دامنه وسیع مقادیر عملکرد محصول در استان بیش از هر چیز دیگری بیانگر پتانسیل بالای منطقه برای افزایش عملکرد گیلان است. متوسط عملکرد محصول در باغ‌های استان برابر ۷۰۴۹ کیلوگرم بر هکتار با انحراف معیار ۱۳۹۵ کیلوگرم در هکتار است. نوع سامانه آبیاری، مدیریت آبیاری، کمیت و کیفیت منابع آبی و عواملی مانند تامین نیاز آبی نقش بسیار مهمی در عملکرد گیلان دارند. با این همه، آب مهم‌ترین نهاده تولید نقشی اساسی در کاهش یا افزایش عملکرد داشته است. عوامل زراعی و اقلیمی و دیگر نهاده‌های مورد استفاده باغدار که در باغ‌های منتخب متفاوت بوده است، سبب اختلاف میزان عملکرد در باغ‌ها شده است. تفاوت عملکرد در باغ‌ها می‌تواند به دلیل اختلاف در مهارت کشاورزان در داشت و استفاده از نهاده‌های مرتبط به‌غیر از آب نیز باشد. توصیه می‌شود کشاورزان علاوه بر مدیریت بهینه کاربرد آب در باغ، در استفاده بهینه و مفید و به‌موقع از دیگر نهاده‌های مصرفی مانند تغذیه و مبارزه با آفات و بیماری‌ها نیز دقت لازم را داشته باشند زیرا این دو راهکار سبب افزایش عملکرد و در نتیجه افزایش بهره‌وری آب خواهد شد.

۰/۹۰۷ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب است. متوسط میزان آب آبیاری کاربردی، عملکرد و بهره‌وری آب در باغ‌های گیلان کشور بر اساس آخرین تحقیقات جلینی و همکاران (Joleini et al., 2022) به ترتیب ۸۱۱۵ مترمکعب در هکتار، ۹۷۰۴ کیلوگرم در هکتار و ۱/۳۳۰ کیلوگرم در مترمکعب گزارش شده است. با مقایسه این نتایج با نتایج کشوری، این نتیجه حاصل شد که میزان آب آبیاری کاربردی در باغ‌های استان خراسان رضوی حدود ۴ درصد، عملکرد حدود ۳۸ درصد و بهره‌وری آب حدود ۴۷ درصد از متوسط کشوری کمتر است. طبق آمار سازمان چهاد کشاورزی استان خراسان رضوی، در سال اجرای پروژه عملکرد گیلان با توجه به تغییرات اقلیمی شامل نوسان‌های آب و دما و سرمازدگی و تگرگ، تامین نشدن آب مورد نیاز، به دلیل کاهش آبدی فئات‌ها و رودخانه‌ها در باغ‌های مناطق کوهپایه‌ای و نیز تنش‌های دمایی سال جاری از متوسط ۱۲ تن در سال پیش به ۷/۶ تن در هکتار کاهش یافته است. از طرفی، یکی از مشکلات عمده در رقم تک دانه مشهد خود ناسازگاری است یعنی درختان این رقم گیلان قادر به گرده‌افشانی و تلقیح با یکدیگر نیستند. به همین دلیل برای تشکیل میوه کافی و تجاری باید از ارقام گرده زای مناسب و سازگار استفاده شود. که متأسفانه اکثر باغ‌های گیلان به دلیل کم‌آگاهی یا رعایت نکردن این موضوع توسط باغداران، دچار کاهش عملکرد می‌شوند. تاکنون ارقام شبستر، سیاه مشهد، مجتهدی به‌عنوان گرده‌زای مناسب و سازگار معرفی و پیشنهاد شده است که اکیدا توصیه می‌شود باغداران برای افزایش عملکرد باغ‌های گیلان از این ارقام استفاده کنند. از دیگر موارد پیشنهادی، اجرای طرح سرشاخه کاری در باغ‌های قدیمی و کم بازده و استفاده از ارقام جدید وارداتی پرمحصول با بازارپسندی مناسب، احداث باغ‌های مدرن متراکم و اصلاح و نوسازی و هرس کردن باغ‌های قدیمی است. میزان آب آبیاری کاربردی در سامانه آبیاری قطره‌ای، در مقایسه با روش آبیاری سطحی، ۵ درصد کمتر (۷۶۳۸ مترمکعب در هکتار

مراجع

- Abbasi, F., Sohrab, F. & Abbasi, N. (2016). Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Research*, 17 (67), 113-128. (In Persian).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrig. Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1994). Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 29. FAO, Rome, Italy.
- Blanco, V., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P.J., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., (2019). Vegetative and reproductive response of 'Prime Giant'sweet cherry trees to regulated deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 249: 478-489.
- Centritto, M. (2005). Photosynthetic limitations and carbon partitioning in cherry in response to water deficit and elevated [CO₂]. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 106, 233–242.
- Dehghanisani, H., Naseri, A., Anyoji, H., Eneji, A.E. (2007). Effects of deficit irrigation and fertilizer use on vegetative growth of drip irrigated cherry trees. *Journal of plant nutrition*, 30(3): 411-425.
- Demirtas, C. Buyncangaz, H. Yazgon, S. Condogan, N. B. (2007). Evaluation of Evapotranspiration Estimation Methods for Sweet Cherry Trees (*Prunus avium*) in Sub-humid Climate. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10(3): 462-469
- Ganji moghadam, E. & Bouzari, N. (2018). The hand book of sweet cherry. Agricultural Education and Extension Publication, 279 p. (In Persian).
- Jensen M. (1993) Water management and conservation: Is Yuma ready for drip. Arizona published, 1(2): 55-62.
- Joleini, M., Zolfagharan, A. Seperi Sadeghiyan, S. Gomrogchi, A. Nakhjavani, M. Kiya, E Parchami Araghi, F. Khosravi, H. Goodarzi, M. Norjo, Salemi, H.M & Naser, A. (2023). Determination of Cherry Applied Water in Iran. Research Report, No 62264, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj. Iran. (In Persian).
- Küçükymuk, C. (2024). Responses of sweet cherry trees to regulated deficit irrigation applied before and after harvesting. *The Journal of Agricultural Science*. 162: 91–104. <https://doi.org/10.1017/S0021859624000248>
- Liao, R. (2019). Micro-irrigation strategies to improve water-use efficiency of cherry trees in Northern China. *Agricultural Water Management*, 221: 388-396.
- Livellara, N., Saavedra, F. & Salgado, E. (2011). Plant based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees. *Agricultural Water Management* 98, 684–690.
- Marsal J., López, G. del Campo, J. Mata, M. Arbones, A. & Girona J. (2010). Postharvest regulated deficit irrigation in Summit sweet cherry: fruit yield and quality in the following season. *Irrigation Science* 28, 181–189.
- Martínez-Hernández, G.B. (2020). Effects of UV-C on bioactive compounds and quality changes during shelf life of sweet cherry grown under conventional or regulated deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 269:109398.
- Nazari, B & Younesi, M. (2020). Analysis of the Effect of Actual Shaded Area Estimation Using Remote Sensing in Evaluation of Water Requirement Estimation of Orchards in the Design and Operation Phase of Local Irrigation (case study: Qazvin Province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13 (6), 1601-1611. (In Persian).
- Nieto, E., Prieto, M.H. Fortes, R. Gonzalez, V. & Campillo, C. (2017). Response of a long-lived cherry cultivar to contrasting irrigation strategies in the Jerte Valley, Extremadura, Spain. *Acta Horticulturae* 1161, 197–204.
- Parhizkari, A., Mozaffari, M.M, Shokatfadaee, M. & Mahmoodi, A. (2015). Deficit irrigation simultaneously with reduced available water the solution to Conservation of water resources in Qazvin plain. *Journal of water and soil resources conservation*, 5 (1), 67-80. (In Persian).

- Pingfeng, L., Huang, T. Jiahang, W. Xiaoqing, C. & Peiling, Y. (2019). Evaluation of Water Uptake and Root Distribution of Cherry Trees under Different Irrigation Methods. *Journal of Water*, 465 (11). 1-18.
- Raes, D. (2012). Reference manual-ETO calculator, version 3.2. Food and Agriculture Organization of the United Nations Land and Water Division. Rome, Italy.
- Ragab, R. (2024). Misconceptions and misunderstandings in agricultural water management: Time for revisiting, reflection and rethinking. *Journal Irrigation and drainage*, 2024: 1–23.
- Renkuan, L., Wenyong, W., Yaqi, H. Di, X. Qiannan, H. & Shiyu, W. (2019). Micro-irrigation strategies to improve water-use efficiency of cherry trees in Northern China. *Agricultural Water Management*, V (221): 388- 396.
- Yousefi., H. Mohammadi, A. Noorollahi, Y. & Sadatinejad, S.J. (2018). Water footprint evaluation of Tehran's crops and garden crops. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24 (6), 67-85. (In Persian).

Investigating the volume of applied irrigation water and water productivity in cherry Orchards of Razavi Khorasan province, Iran

M. Joleini* , A. Zolfagharan

***Corresponding Author:** Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran.

Received: 9 November 2024, **Accepted:** 25 December 2024

Email: mjolaini_re@yahoo.com

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2024.367627.1598

Extended Abstract

Introduction

Razavi Khorasan province is one of Khorasan provinces in northeastern of Iran, the center of this province is Mashhad. The area of this province is 118854 square kilometers. Due to having high evaporation potential and low rainfall, mostly associated with inappropriate distribution, this region is among the dry and semi-arid regions of our country, so that water is considered the most important factor limiting the development of agriculture. Nowadays, limitations in water resources has made it necessary to create ways to increase water productivity. This is a proof of the importance of careful planning and finding the use of different irrigation methods to increase water productivity in agricultural activities. Reviewing the sources indicated that the volume of water used in the cherry orchards varied in different regions and with different irrigation systems. This research aims to measure the volume of applied water, the yield, and the productivity of cherry under the management of farmers in three plains: Mashhad - Chenaran, Torghabe - Shandiz, and Nyshabor, and to compare the volume of applied water with the volume of water requirement of cherry mentioned in the national document and calculated by Penman- Monteith method using meteorological data.

Methodology

This project was carried out in the field in order to determine the optimum water requirement of cherry in the orchards under the management of farmers during one cropping season (2021). Three plains: Mashhad - Chenaran, Torghabe – Shandiz, and Nyshabor were selected in Razavi Khorasan province, these plains have the largest area under cherry cultivation in the province. Based on the data required to implement the project, a questionnaire containing necessary information and logical conclusion was prepared. The required data of the selected farms in each plain were either measured or gained through interviews with the farmer or were calculated and completed according to the data obtained. The measurements were carried out in type of water source, irrigation network, irrigation method, and water source discharge. The field and area under cultivation of cherry, variety, planting arrangement, planting date, soil texture, electrical conductivity of irrigation water and soil saturation extract, date of first irrigation, irrigation cycle, different irrigation methods, etc. The volume of applied water were compared with the net irrigation water requirement estimated by the Penman- Monteith method using the last 10 years meteorological data (2011 to 2021) and also with the national water document values. Crop yield was recorded at the end of the growing season and water productivity was calculated as the ratio of yield to total water (irrigation applied water and effective rainfall).

Results and Discussion

In Razavi Khorasan province, underground water sources are facing with deficit. Therefore, efforts towards better use water and reducing exploitation of underground water resources are inevitable. In this project, the water given by the farmers for cherry production during one cropping season was measured in three plains of Mashhad - Chenaran, Torghabe – Shandiz, and Nyshabor, without interfering farmer's irrigation schedule; these plains had the largest area under cherry cultivation in Razavi Khorasan province. The method of irrigation of the fields was surface and drip irrigation. The results showed that the volume of applied water in Mashhad - Chenaran, Torghabe - Shandiz and Nyshabor plains were 7760, 7590 and 7740 m³/ha, respectively. The average amount of applied water, the amount of cherry yield and the water productivity in those plains were 7799 m³/ha, 7049 kg/ha and 0.907 kg/m³, respectively. Also, the average volume of irrigation water, yield, and productivity of water in the surface irrigation method were 8029 m³/ha, 6489 kg/ha, and 0.8013 kg/m³ respectively; for drip irrigation method the figures were 7638 m³/ha, 8439 kg/ha, and 0.972 kg/m³ respectively.

Conclusions

The results showed that the average volume of water, yield and water productivity in three plains were 7799 m³/ha, 7049 kg/ha, and 0.907 kg/m³ of water, respectively. The difference between the volume of applied water, performance and water efficiency in two methods of surface and drip irrigation was significant. Under the drip irrigation system, comparing to surface irrigation method, the volume of applied water was 5% less (7638 cubic meters per hectare versus 8029 cubic meters per hectare), the yield was 14% higher (8439 kg/ha versus 6489 kg/ha) and the water productivity was about 20% higher (0.972 kg/cubic meter of water versus 0.813 kg/cubic meter of water).

Keywords: Irrigation management, Irrigation methods, Surface irrigation, Drip irrigation.



کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان هارمونیک

امل سواعدی^۱، محمدرضا زایری^{۲*}، مهدی قمشی^۳، مهدی دریائی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروانفورماتیک، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
^{۲*} به ترتیب استادیار، استاد و دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

چکیده

با رشد جمعیت، تقاضا برای ذخیره‌سازی آب در مخازن افزایش یافته است و نیاز به جایگزینی یا افزایش ظرفیت دبی بسیاری از سرریزها از طریق بهینه‌سازی هندسی و طرح افقی آنها به وجود آمده است. یکی از راهکارهای کاربردی برای افزایش راندمان سرریزها، اصلاح هندسه پلان و افزایش طول سرریز در عرضی ثابت است. این امر باعث افزایش ضریب دبی (Ca) سرریز می‌شود. در این مطالعه، با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی دو منبع مختلف، در مجموع از ۲۳۳ سری داده شامل مؤلفه‌های هندسی و هیدرولیکی استفاده شد. سه مدل یادگیری ماشین، شامل رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و مدل ناپارامتریک جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون اسپیرالین تطبیقی چندگانه (MARS)، با پنج سناریوی ورودی مختلف برای پیش‌بینی دقیق ضریب دبی سرریز کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره هارمونیک توسعه داده شد. نتایج تحقیق نشان داد که متغیرهای ورودی شامل، نسبت شعاع به ارتفاع سرریز (R/P)، نسبت عرض سرریز به ارتفاع سرریز (B/P)، تعداد سیکل (N) و نسبت هد هیدرولیکی به ارتفاع سرریز (Ht/P)، در مدل MARS با مقادیر $RMSE = 0/008$ و $R^2 = 0/94$ و مدل SVR با مقادیر $RMSE = 0/009$ و $R^2 = 0/93$ ، نتایج بهتری را در تخمین (Ca) ارائه می‌کنند. مشاهده گردید در مقادیر (Ht/P) پایین‌تر از $0/05$ ، میزان ضریب دبی عبوری سرریز با $N = 4$ سیکل نیم‌دایره (N=4)، بیشتر از سایز سرریزها بوده است. همچنین، با استفاده از دو روش مختلف آنالیز حساسیت مشاهده گردید پارامتر عمق نسبی (Ht/P) مؤثرترین مؤلفه در پیش‌بینی ضریب دبی بوده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت SHAP، یادگیری ماشین، ضریب دبی، سرریزهای کنگره‌ای

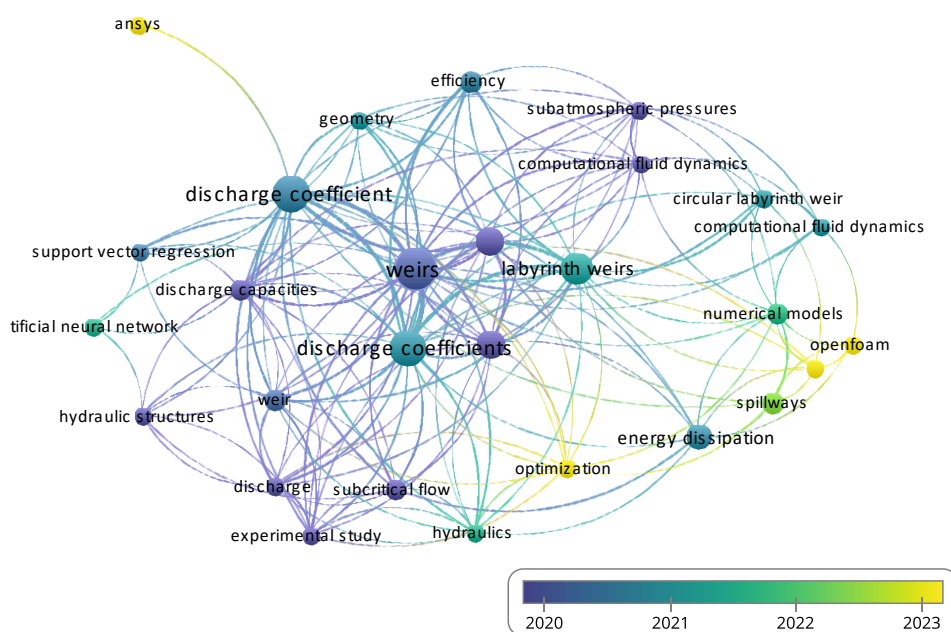
مقدمه

راه‌حل‌های ممکن برای کاهش این مشکل، استفاده از سرریز غیرخطی یا همان کنگره‌ای^۱ است. این نوع سرریزها نه تنها ظرفیت دبی جریان را افزایش می‌دهند، بلکه می‌توانند از افزایش عمق ناشی از سیلاب نیز جلوگیری کنند. این سرریزها همچنین به عنوان سازه‌های مؤثر در افت انرژی و هوادهی جریان و سازه‌های استهلاک انرژی نیز به کار می‌روند (Ghaderi *et al.*, 2024; Hussein & Jalil, 2024; Ikinciogullari, 2024)

سدها که به عنوان موانعی در مسیر رودخانه قرار می‌گیرند، از اجزای اصلی مانند بدنه، سرریز و زهکش ساخته می‌شوند. یکی از عواملی که به شکست سدها کمک می‌کند، ظرفیت ناکافی به‌منظور تخلیه سیلاب از مخزن سد است. انتخاب نوع سرریز معمولاً مسئله‌ای بهینه‌سازی است که هدف آن حداکثرکردن ظرفیت تخلیه دبی از سرریز با کمترین هزینه ساخت است. طول و شکل تاج سرریز دو عامل اصلی هستند که ظرفیت دبی آن را تعیین می‌کنند. یکی از

^۱ Labyrinth weirs

انواع مختلفی از سرریزهای کنگره ای وجود دارد، شامل: سرریزهای با طرح افقی مثلثی، دوزنقه ای، دایره ای و چندضلعی. مزیت اصلی این نوع سرریزها افزایش طول مؤثر مسیر جریان روی عرض ثابت نسبت به سرریزهای خطی (مستطیلی) است. محققان به طور مستمر در حال بررسی و شناسایی طرح بهینه برای سرریزها هستند تا ضمن حفظ عملکرد بالا، هزینه های ساخت را نیز کاهش دهند. برای بررسی دقیق تر، در شکل (۱) واژگان کلیدی پرکاربرد توسط محققان پیشین، در حوزه مطالعاتی ضریب دبی جریان در سرریزها، در پایگاه استنادی اسکوپوس بررسی گردید. همانگونه که مشاهده می شود پیوند روش های بهینه سازی و دینامیک سیالات محاسباتی با سازه های سرریز کنگره ای نشان دهنده تلاش برای بهبود طراحی و عملکرد این نوع از سازه ها در پنج سال اخیر است.



شکل ۱- واژگان کلیدی در تحقیقات گزارش شده در مدل سازی هیدرولیکی سرریزهای کنگره ای
 Fig. 1- Key words in reported research on hydraulic modeling of Labyrinth weirs

در شناسایی روابط غیرخطی پیچیده بین پارامترهای هندسی و جریان مؤثر هستند. سیمسک و همکاران (Simsek et al., 2023) از شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش بینی ضریب دبی (C_d) در سرریزهای دوزنقه ای استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که عدد فرود تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد مدل ها در تخمین مقادیر C_d دارد و روش ANN در تعیین C_d نسبت به سایر روش ها عملکرد بهتری داشته است. بیلهان و همکاران (Bilhan et al., 2018) داده های آزمایشگاهی حاصل از مطالعه سرریز نیم دایره ای را با شبیه سازی های

تاکنون مطالعات جامعی به منظور بررسی تأثیر عوامل هیدرولیکی و هندسی بر ضریب دبی و سرعت جریان در این سازه ها صورت گرفته است (Borisova & Belikov, 2023; Suleimany et al., 2022; Zare et al., 2023) و برقی می گویند سرریز پروانه (Borghei & Parvaneh, 2011) جانبی مایل ۲/۳۳ برابر کارآمدتر از سرریز جانبی معمولی است. کیسی و همکاران (Kisi et al., 2012) کارایی شبکه های عصبی پایه شعاعی (RBNN) و شبکه های عصبی رگرسیون عمومی (GRNN) را برای برآورد دبی عبوری از سرریز مثلثی جانبی ارزیابی کردند و نشان دادند این مدل ها

عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مقایسه کردند. مدل‌های عددی آن‌ها به دقتی تا ۹۶ درصد، در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، دست یافتند که نشان‌دهنده کارایی مدل‌سازی عددی در پیش‌بینی دبی سرریز است. این محققان همچنین مشاهده کردند که عملکرد ضریب دبی، در مقایسه با به نسبت هد کل به ارتفاع سرریز (H_T/P)، برای سرریزهای نیم‌دایره‌ای مشابه سرریزهای دوزنقه‌ای با زوایای دیواره جانبی بیشتر از ۳۵ درجه است. سنگ سفیدی و همکاران (Sangsefidi *et al.*, 2018) در آزمایشگاه روی سرریز کنگره‌ای دایره‌ای شکل دنداندار مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت دبی این نوع از سرریزها، در مقایسه با سرریز خطی، $4/5$ برابر افزایش یافته است. دووتا و همکاران (Dutta *et al.*, 2020) عملکرد پیش‌بینی دبی در شکل‌های سرریز (سرریز و نیم‌دایره‌ای) را با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVR)، و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) ارزیابی کردند و بر اساس شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین (R^2)، میانگین درصد خطا (APE) و ضریب کارایی (CE)، نتیجه گرفتند که مدل SVR عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد که نشان‌دهنده توانایی برتر آن در درک روابط پیچیده بین پارامترهای دبی جریان دبی برای این هندسه‌های سرریز است. شفیع‌ی و همکاران (Shafiei *et al.*, 2020b) ضریب دبی تاج سرریزها را با استفاده از یک روش مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) تخمین زدند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که با وجود محدودیت‌هایی مانند نبود معادله‌ای قطعی، مدل ORELM عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی ضریب دبی داشته است. شفیع‌ی و همکاران (Shafiei *et al.*, 2020a) از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) به همراه الگوریتم کرم شب تاب (FFA) برای تخمین ضریب دبی تاج سرریزهای مثلثی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که مدل ANFIS-FFA، نسبت به مدل استاندارد ANFIS، در پیش‌بینی ضریب دبی تاج

سرریزهای مثلثی عملکرد بهتری داشته است. بنکداری و همکاران (Bonakdari *et al.*, 2020) از تکنیک برنامه‌نویسی بیانی ژن (GEP) برای تخمین ضریب دبی تاج سرریزهای مثلثی استفاده کردند و نشان دادند تکنیک GEP در پیش‌بینی ضریب دبی تاج سرریزهای مثلثی نتایج رضایت‌بخشی ارائه کرده است. امامی و همکاران (Emami *et al.*, 2021) یک الگوریتم بهبود یافته تکامل تفاضلی خودتطبیقی (ISADE) را همراه با رگرسیون بردار پشتیبان (SVR_ISADE) برای تخمین ضریب دبی تاج سرریزهای W شکل توسعه دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که روش SVR_ISADE در پیش‌بینی ضریب دبی تاج سرریزهای W شکل عملکرد برتری دارد به طوری که مقدار R^2 برابر $0/982$ ، MAPE برابر $0/612$ ، RMSE برابر $0/006$ و δ برابر $0/843$ بوده است. صفر رضوی‌زاده و همکاران (Safarrazavi Zadeh *et al.*, 2021) مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای بررسی ضریب دبی جریان تحت تأثیر نسبت هد هیدرولیکی بالادست (H_T/P)، نسبت طول سرریز (L/P)، نسبت شعاع قوس (R/P) و تعداد سیکل‌های سرریز (N) برای سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای و سینوسی کردند. نتایج مطالعات این پژوهشگران نشان داد که برای نسبت‌های ($H_T/P < 0/35$)، سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای و سینوسی روندی افزایشی در ضریب دبی داشته‌اند که سپس کاهش می‌یابد. این محققان همچنین دریافتند که دبی جریان عبوری از سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای و سینوسی ۳۳ درصد بیشتر از دبی جریان عبوری از سرریزهای خطی است. سلیمانی و همکاران (Suleimany *et al.*, 2022) از رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و رگرسیون قدرتی برای توسعه معادله‌ای تجربی برای دبی سرریز نیم‌دایره‌ای استفاده کردند. مدل‌های این محققان به ضریب تعیین (R^2) بالایی به مقادیر $0/8498$ و $0/8584$ رسیدند که نشان‌دهنده تطابق خوب با داده‌های تجربی است. حقیبن و همکاران (Haghibin *et al.*, 2022) یک رویکرد مبتنی بر داده برای تخمین ضریب دبی

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

ضریب دبی (C_d) سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای را می‌توان با استفاده از معادله ۱ تعیین کرد. در این مغداله، Q نشان‌دهنده دبی، C_d ضریب دبی، L طول سرریز، g شتاب ناشی از گرانش، و H_t هد کل هیدرولیکی است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_t}^{1.5} \quad (1)$$

مطابق شکل (۲)، مؤلفه‌های مؤثر بر ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای را می‌توان به شرح زیر در نظر گرفت:

$$Cd = F_1(N, R, L, B, H_T, P, g, \rho, \mu, \delta) \quad (2)$$

که در آن، (N) تعداد سیکل کنگره ای، (R) شعاع سیکل‌های نیم‌دایره، (B) عرض کانال، (P) ارتفاع سرریز، (ρ) چگالی سیال، (μ) ویسکوزیته دینامیکی، و (δ) کشش سطحی است. به دلیل غیرقابل تراکم بودن جریان در سرریزها، اثر تغییرات جرم مخصوص (ρ) قابل صرف نظر است. اثر گرانشی و کشش سطحی نیز اگر جریان به صورت آشفته باشد و ارتفاع جریان روی سرریز بر اساس توصیه رو و شاکلا (Rao & Shukla, 1971)، بیشتر از سه سانتی‌متر باشد، می‌تواند نادیده گرفته شود. بنابراین، با استفاده از تحلیل ابعادی، معادله ۲ می‌تواند به شکل زیر بازنویسی شود:

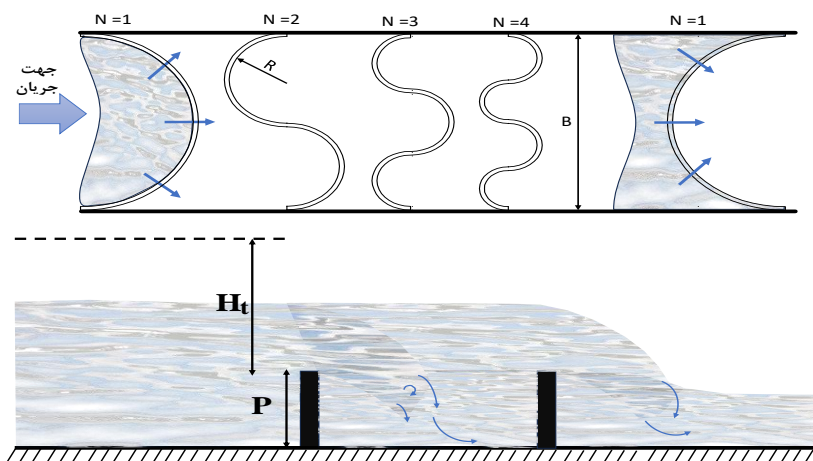
$$Cd = F_2\left(N, \frac{R}{P}, \frac{L}{P}, \frac{B}{P}, \frac{H_T}{P}\right) \quad (3)$$

در این مطالعه، به منظور توسعه مدل‌های محاسبات نرم از مجموعه نتایج آزمایشگاهی ارهام نامازی و مظفری (Arham Namazi & Mozaffari, 2023) و یلدیز و همکاران (Yıldız et al., 2024) استفاده شده است.

در سرریزهای پله‌ای پیشنهاد دادند. مدل بهینه‌سازی شده آن‌ها شاخص عملکرد را به میزان ۸۶/۱۳ درصد بهبود بخشید که نشان‌دهنده پتانسیل روش‌های مبتنی بر داده برای افزایش دقت پیش‌بینی دبی است. لی و همکاران (Li et al., 2024) از ماشین‌های بردار پشتیبان (SVR) به همراه سه الگوریتم بهینه‌سازی برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی ضریب دبی (C_d) در سرریزهای جانبی نیم‌دایره‌ای (SCSWs) استفاده و نتیجه‌گیری کردند که روش‌های SVR و الگوریتم ژنتیک (GASVR) دقت بالایی در پیش‌بینی و توانایی تعمیم دارند. میانگین خطا و حداکثر خطا به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۴۷ درصد بود که نسبت به مدل تجربی متداول به ترتیب ۷۲/۹۵ و ۸۶/۶۰ درصد کاهش یافته است.

با توجه به پارامترهای فیزیکی پیچیده سازه سرریز کنگره‌ای با طرح هارمونیک، به منظور پیش‌بینی ضریب دبی، انتخاب مدل‌های هوش مصنوعی دارای دقت و پایداری بالا ضروری است. تحقیقات نشان می‌دهد تاکنون مدل پیش‌بینی دقیق برای ضریب دبی (C_d) این نوع سازه توسعه نیافته است. از این رو، این تحقیق مدل پیش‌بینی ضریب دبی (C_d) برای سرریز با طرح هارمونیک را با روش‌های مختلف شامل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR) و مدل ناپارامتریک جنگل تصادفی (RF) ارائه می‌دهد و افزون بر آن روشی جدید با استفاده از رگرسیون اسپلاین تطبیقی چندگانه (MARS) برای محاسبه دقیق ضریب دبی این سازه معرفی می‌کند. با جمع‌آوری مجموعه نمونه داده‌های دو مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهای بدون بعد ورودی به مدل بر ضریب دبی مورد تحلیل قرار گرفت. مدل‌های توسعه یافته در این مطالعه، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون صورت گرفته است.

کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان هارمونیک



شکل ۲- پارامترهای موثر بر ضریب دبی سرریز کنگره‌ای طرح هارمونیک (الف) نمای بالا (ب) نمای جانبی سرریز

Fig. 2-Importance Parameters on the discharge coefficient of the harmonic plan weirs (a) top view (b) side view

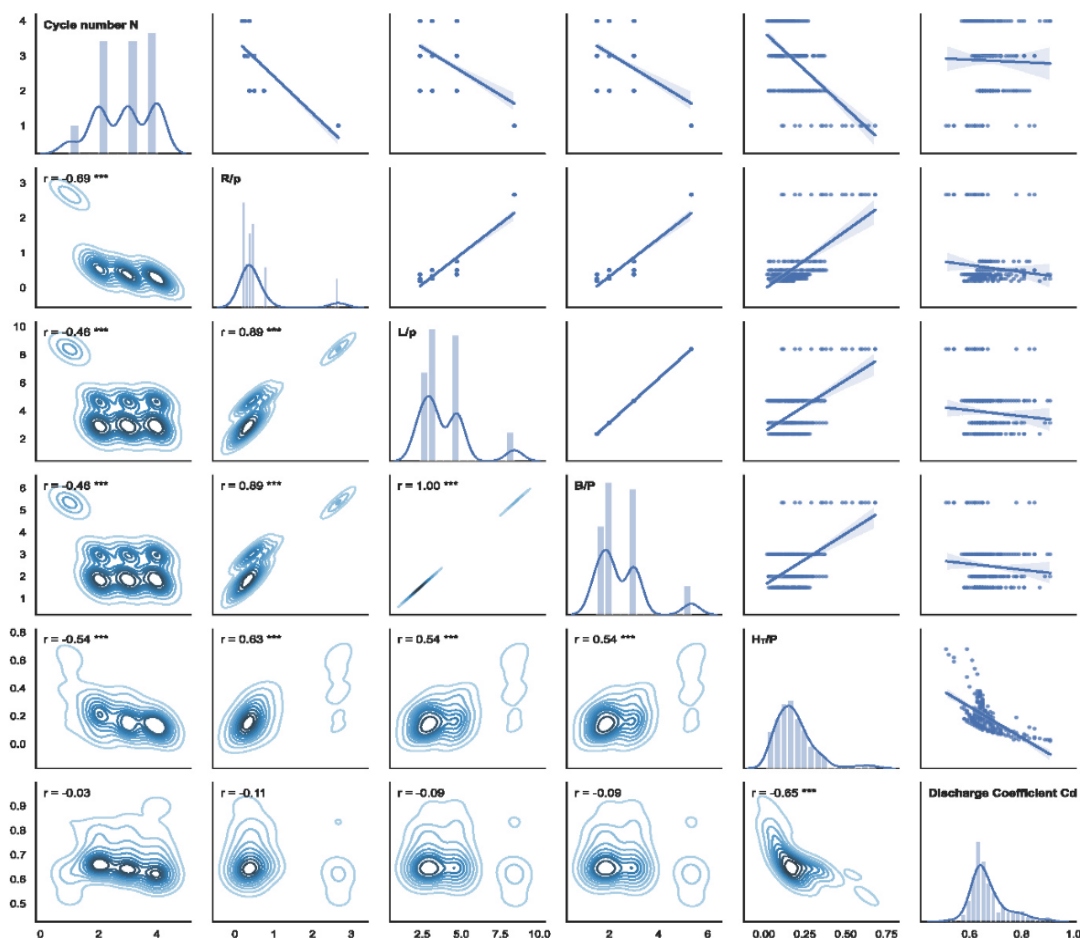
نرم جمع‌آوری گردید. از این تعداد، نتایج ۱۷۵ نمونه (۷۵ درصد) برای آموزش و ۵۸ نمونه (۲۵ درصد) برای آزمایش مدل‌های توسعه‌یافته در نظر گرفته شده است. در جدول (۱)، شاخص‌های آماری این دو بخش آورده شده است. شکل ۳ توزیع هیستوگرام و ضریب همبستگی بین متغیرهای مورد استفاده در پیش‌بینی C_d را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار ضریب همبستگی بین متغیر C_d با متغیر عمق نسبی با مقدار ۰/۶۵- نشان‌دهنده معادله معکوس بین این دو متغیر است. به‌طورکلی، بین متغیرهای ورودی و ضریب دبی C_d همبستگی خطی ضعیفی وجود دارد، بنابراین پیش‌بینی دقیق بر اساس روش‌های کلاسیک رگرسیون دشوار است.

به منظور ارزیابی دقت معادلات پیشنهادی، مدل‌های محاسبات نرم در برآورد ضریب دبی از سرریزهای کنگره‌ای دایره‌ای که به‌صورت هارمونیک در کانال روباز قرار داده شده‌اند، در مطالعات بلدیز و همکاران (Yildiz *et al.*, 2024) برای سه ارتفاع مختلف سرریز ($P=20$ سانتی‌متر، $P=30$ سانتی‌متر و $P=40$ سانتی‌متر) و سه تعداد مختلف سیکل ($N=2$ ، $N=3$ و $N=4$)، به تعداد ۲۱۵ آزمایش و در مطالعات ارهام نمازی و مظفری و Mozaffari (Arham Namazi & Mozaffari, 2023) برای ارتفاع ثابت سرریز $P=15$ سانتی‌متر که به‌صورت تک سیکل ($N=1$) به تعداد ۱۸ آزمایش اجرا شده است که در مجموع ۲۳۳ آزمایش برای مدل‌سازی مبتنی بر محاسبات

جدول ۱- آماره‌های توصیفی داده‌های تخصیص داده‌شده در مرحله آموزش و اعتبارسنجی مدل‌های محاسبات نرم

Table 1- Statistical characteristics of data assigned to Training and Test soft computing models

H/P	B/P	L/p	R/p	N	C_d	شاخص	مرحله
۰/۰۲۰	۱/۵۰۰	۲/۳۵۶	۰/۱۸۷	۱/۰۰۰	۰/۵۱۰	کمینه	آموزش
۰/۶۸۰	۵/۳۳۳	۸/۴۰۰	۲/۶۶۷	۴/۰۰۰	۰/۹۱۰	بیشینه	
۰/۱۸۷	۲/۴۱۴	۳/۷۹۴	۰/۵۴۶	۲/۹۰۳	۰/۶۷۲	میانگین	
۰/۱۲۰	۰/۹۸۳	۱/۵۴۸	۰/۵۹۶	۰/۹۵۱	۰/۰۷۱	انحراف معیار	اعتبارسنجی
۰/۰۳۰	۱/۵۰۰	۲/۳۵۶	۰/۱۸۷	۱/۰۰۰	۰/۵۴۰	کمینه	
۰/۶۲۰	۵/۳۳۳	۸/۴۰۰	۲/۶۶۷	۴/۰۰۰	۰/۸۹۰	بیشینه	
۰/۱۹۲	۲/۶۵۵	۴/۱۷۳	۰/۶۶۵	۲/۷۵۹	۰/۶۷۲	میانگین	
۰/۱۱۳	۱/۰۹۸	۱/۷۳۱	۰/۷۰۸	۰/۹۷۹	۰/۰۶۹	انحراف معیار	



شکل ۳- نمودار هیستوگرام و ماتریس همبستگی بین همه متغیرهای ورودی و ضریب دبی

Fig. 3- Correlation matrix diagram of input and output variables

مدل ماشین بردار پشتیبان

بنابراین، هدف اصلی یافتن فرم تابع f است که بتواند به درستی موارد جدیدی را پیش‌بینی کند که SVR تاکنون ندیده است. در روش ϵ -SVR، از توابع هسته‌ای (کرنل) برای جداسازی صفحات و بهینه‌سازی فاصله‌ها میان داده‌های مشاهده‌شده و تخمینی استفاده می‌شود. اما در مدل V-SVR از برنامه‌ریزی غیرخطی برای کاهش خطای پیش‌بینی بهره گرفته می‌شود (Behdarvandi et al., 2024). در این مطالعه، به دلیل کاربرد وسیع مدل ϵ -SVR در مسائل رگرسیونی، از آن استفاده شده است. تابع خطا برای این مدل به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^I (\xi_i^- + \xi_i^+) \quad (5)$$

ماشین بردار پشتیبان (SVM) سیستمی کارآمد برای یادگیری است که بر مبنای نظریه بهینه‌سازی مقید طراحی شده و از اصل کمینه‌سازی خطای ساختاری پیروی می‌کند تا به یک پاسخ بهینه کلی دست یابد. در مدل رگرسیون SVR، لازم است وابستگی متغیر هدف (y) به مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل (x) برآورد شود. فرض می‌شود که مانند دیگر مدل‌های رگرسیون، رابطه میان متغیر هدف و متغیرهای مستقل از طریق یک تابع مشخص f و یک مقدار اضافی نویز، مطابق معادله ۴ تعریف می‌شود.

$$y = f(x) + \text{noise} \quad (4)$$

SVR تلاش می‌کند مرزی را پیدا کند که حاشیه بین کلاس‌ها را بیشینه کند.

$$y = f(x) = \text{sign} \left[\sum_{i=1}^N y_i a_i K(x, x_i) + b \right] \quad (9)$$

پارامتر (K) تابع کرنل است که ضرب‌های داخلی ایجاد کرده است و امکان ساخت ماشین‌هایی با سطوح غیرخطی مختلف را در فضای داده‌ها فراهم می‌کند. برای مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان، از کرنل‌های گوناگونی مانند خطی، درجه دوم، گوسی و چندجمله‌ای استفاده می‌شود. معمولاً توابع کرنل گوسی شعاعی (RBF) یا خطی در پیش‌بینی عملکرد بهتری دارند (Zayeri, 2023). معادله تابع کرنل RBF به صورت معادله ۱۰ ارائه می‌شود.

$$K(x, x_i) = \exp \left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (10)$$

مدل جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی (RF) با سرعت بالا طبقه‌بندی را برای بسیاری از مجموعه‌داده‌ها اجرا می‌کند. برخلاف مدل‌های دیگر، مانند رگرسیون چندمتغیره، این مدل از صدها یا هزاران درخت استفاده می‌کند تا از اطلاعات موجود در داده‌ها به طور گسترده‌تری بهره‌برداری و بهترین استنباط را از متغیرهای ورودی فراهم کند. این روش، یکی از مدل‌های ناپارامتری رایج است که از تکنیک بگینگ^۵ استفاده می‌کند، ترکیبی از چندین درخت تصمیم که برای ساخت آن، نمونه‌های بوت‌استرپ^۶ متعدد از داده‌ها انتخاب می‌شوند و در هر درخت، تعدادی از متغیرهای ورودی به طور تصادفی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، برخی از داده‌ها ممکن است چندین بار در فرآیند آموزش به کار روند، درحالی‌که برخی دیگر که در مدل‌سازی مؤثر نیستند، هرگز استفاده نمی‌شوند.

لازم است تابع خطای مذکور با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیر به حداقل برسد:

$$y_i - ((\omega, x_i) + b) \leq \varepsilon + \xi_i, \xi_i \geq 0 \quad (6)$$

$$((\omega, x_i) + b) - b \leq \varepsilon + \xi_i^*, \xi_i^* \geq 0 \quad (7)$$

در این معادلات، C یک مقدار از پیش تعیین شده است، بردار ضرایب، ξ_i^- و ξ_i^+ متغیرهایی هستند که قیود بالا و پایین خروجی سیستم را مشخص می‌کنند. اگر داده‌ها به صورت خطی از هم قابل جداسازی باشند، ξ_i^- و ξ_i^+ سطح بهینه‌ای را تعیین می‌کنند که داده‌ها را بدون خطا و با بیشترین فاصله از صفحه و نزدیک‌ترین نقاط آموزشی (بردارهای پشتیبان) تفکیک می‌کند. مطابق شکل (۴)، اگر نقاط آموزشی به صورت y_i و بردار ورودی x_i تعریف شوند، در حالت قابل جداسازی خطی، معادله ۴ به صورت زیر قابل بیان است.

$$y = f(x) = \text{sign} \left[\sum_{i=1}^N y_i a_i (x_i, x) + b \right] \quad (8)$$

در اینجا، y خروجی معادله است. بردار x نشان‌دهنده داده ورودی است و بردارهای x_i بردارهای پشتیبان هستند. تابع علامت^۱ اگر مقدار داخل عبارت آن مثبت باشد، مقدار خروجی +۱ در غیر این صورت -۱ خواهد بود. y_i برچسب^۲ نمونه آموزشی i است که مقدار آن +۱ یا -۱ است. a_i ضرایب لاگرانژ^۳ مربوط به نمونه‌های آموزشی است که در فرایند بهینه‌سازی به دست می‌آیند. این ضرایب نشان می‌دهند کدام نمونه‌ها به عنوان بردارهای پشتیبان^۴ عمل می‌کنند. b، بایاس یا مقدار ثابت است که در تعیین موقعیت مرز تصمیم نقش دارد. در این صورت، معادله ۸ به معادله ۹ تبدیل می‌شود. در این معادله، نمونه‌هایی که ضرایب a_i آن‌ها بزرگ‌تر از صفر هستند، به عنوان بردارهای پشتیبان شناخته می‌شوند و فقط این نمونه‌ها در تعیین مرز تصمیم مؤثرند.

⁴ Support vectors

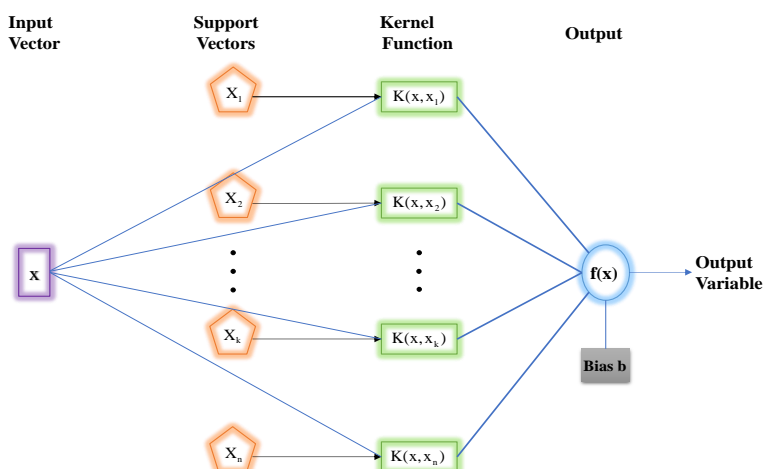
⁵ Bagging

⁶ Bootstrap

¹ Sign

² Label

³ Lagrange multipliers



شکل ۴- ساختار مفهومی مدل ماشین بردار پشتیبان

Fig. 4- illustrates the concept of a Support Vector Machine (SVR)

پایان یک ناحیه داده و آغاز ناحیه دیگر را مشخص می کنند. این امر به توابع پایه (منحنی های قطعه ای رسم شده) امکان می دهد تا مدل ها را انعطاف پذیرتر کنند و به تابع خطی اجازه دهند که انحناها، آستانه ها و تغییرات دیگری را بپذیرد. ترکیب خطی توابع پایه^۱ (BFs) و تعاملات آن ها می تواند به شکل گیری مدل MARS کمک کند که به صورت $f(X)$ در معادله ۱۱ نشان داده می شود (Zhang, 2020).

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m \lambda_m(x) \quad (11)$$

که در آن، λ_m یک تابع پایه است یا یک اسپلاین منفرد یا حاصل ضرب دو یا چند اسپلاین. در این پژوهش، برای ساده سازی هدفها فرض کردیم که حداکثر از توابع مرتبه دوم استفاده شود، هرچند اگر داده ها اجازه دهند، استفاده از مرتبه های بالاتر نیز ممکن است. روش کمترین مربعات برای برآورد β که ثابت است به کار می رود و توابع پایه (BFs) چند جمله ای های هموار (اسپلاین ها) با توابع قطعه ای خطی / مکعبی هستند. فرم یک تابع خطی قطعه ای مطابق معادله ۱۲ به صورت $\max(0, x - t)$ است. این تابع به منظور سادگی به کار می رود و یک گره در مقدار t دارد. $\max(\cdot)$ به این

در این فرآیند نمونه گیری، تقریباً یک سوم داده ها به عنوان داده های خارج از نمونه گیری در نظر گرفته می شود که برای تعیین متغیرهای مهم و برآورد بدون اریب خطا به کار می روند. پس از آن برای هر نمونه بوت استرپ، یک درخت تصمیم گسترش داده می شود و در هر مرحله تقسیم، از بین تمام M متغیر مستقل، m متغیر به طور تصادفی برای تقسیم انتخاب می شود. برای حالت رگرسیونی، نسبت M_m برابر با یک سوم است، در حالی که برای حالت طبقه بندی، مقدار m به عنوان $m = \sqrt{M}$ پیشنهاد شده است (Siasar & Honar, 2019).

رگرسیون اسپلاین تطبیقی چندگانه

MARS روشی است غیرپارامتریک و غیرخطی برای توسعه روابط بین مجموعه های مختلف متغیرهای ورودی و وابسته در یک فضای داده با ابعاد n که بدون نیاز به فرضیات خاصی درباره روابط عملکردی پایه ای متغیرهای ورودی و خروجی، بر اساس یک استراتژی تقسیم و غلبه عمل می کند که در آن داده های آموزشی به قطعات جداگانه با شیب های متفاوت تقسیم می شوند. گره ها، یا نقاط انتهایی قطعات،

¹ Basic Functions

قابل قبول به دست آید. از آنجا که انتخاب تابع پایه و موقعیت گره متغیر هر دو مبتنی بر داده و خاص مسئله هستند، MARS به عنوان یک فرآیند تطبیقی در نظر گرفته می‌شود.

معناست که مقدار آن صفر است، مگر اینکه بخش مثبت استفاده شود.

$$\max(0, x - t) = \begin{cases} x - t & x \geq t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

تحلیل حساسیت

برای نشان دادن تأثیر هر متغیر ورودی بر متغیر هدف، در معادله ۳ می‌توان با جابه‌جایی هر متغیر ورودی با میزان ثابت و ثابت نگه‌داشتن متغیرهای ورودی دیگر، مطابق با معادله ۱۴، از روش دامنه کسینوسی بهره برد (Momeni et al., 2014).

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N I_{ik} O_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N I_{ik}^2 \cdot \sum_{j=1}^M O_{jk}^2}} \quad (14)$$

که در آن I_i و O_j به ترتیب متغیرهای ورودی و خروجی و N تعداد کل مجموعه داده‌هاست. مقدار R_{ij} بین دو مقدار صفر و یک محاسبه می‌شود که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده رابطه قوی‌تر بین پارامترهای ورودی و هدف را نشان می‌دهد.

علاوه بر روش بالا، در تحقیق حاضر از روش آنالیز حساسیت SHAP^۱ استفاده گردید. مقادیر SHAP تکنیک مستقل از مدل‌سازی به منظور تفسیر پیش‌بینی‌های به دست آمده از مدل‌های یادگیری ماشین است (Lundberg, 2017). مقادیر SHAP از نظریه بازی و توضیحات محلی استفاده می‌کنند تا توزیع سهم هر ورودی را در پیش‌بینی نهایی به دست آورد (Parsa et al., 2020). به منظور حصول اطمینان از اینکه سهم هر ویژگی به‌طور عادلانه توزیع می‌شود، مقادیر SHAP از طریق معادله ۱۵ به دست می‌آید:

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!} \downarrow [v_x(S \cup i) - v_x(S)] \quad (15)$$

که در آن ϕ_i نشان‌دهنده سهم ورودی i است. N مجموع همه ورودی‌های موجود در مدل است. n تعداد کل ورودی‌ها است. S زیرمجموعه‌ای از ورودی‌ها به جز ویژگی i است.

برای تولید توابع پایه (BFs)، روش MARS به صورت گام‌به‌گام میان تمام تعاملات متغیرها و تمامی موقعیت‌های ممکن گره‌های تک‌متغیره جستجو می‌کند که توسط یک الگوریتم رگرسیون تطبیقی انتخاب می‌شوند. برای ساخت مدل MARS از تکنیکی استفاده می‌شود که دارای یک فاز پیشرو برای افزودن توابع به منظور یافتن گره‌های بهبود عملکرد است، تا زمانی که بیشترین تعداد از پیش تعیین‌شده از عبارات شناسایی شوند و مدلی با بیش‌برازش عمدی ایجاد شود، و همچنین یک فاز پسرو که با استفاده از روش GCV (اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته) ناکارآمدترین عبارات را حذف می‌کند تا از بیش‌برازش جلوگیری شود؛ این روش، یک آزمون برازش است که توابع پایه اضافی را جریمه می‌کند و احتمال بیش‌برازش را کاهش می‌دهد. معادله GCV برای یک مجموعه داده آموزشی با N مشاهده به صورت زیر است (Hastie et al., 2009):

$$GCV = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i)]^2}{\left[1 - \frac{M + d \times (M - 1)/2}{N}\right]^2} \quad (13)$$

که در آن M تعداد توابع پایه (BFs)، N تعداد مشاهدات، $f(x_i)$ مقادیر تخمینی مدل MARS و d پارامتر جریمه (هزینه بهینه‌سازی هر تابع پایه برای هموارسازی فرآیند) را نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر d به معنی تعداد کمتر گره‌ها و در نتیجه، تخمین‌های با نوسان کمتر است. فریدمن (Friedman 1991) مقدار بهینه $2 \leq d \leq 4$ و ترجیحاً ۳ را پیشنهاد کرده است، در این پژوهش مقدار $d = 3$ در نظر گرفته شده است. معادله ۱۳ زمانی به حداقل می‌رسد که در هر گام یک تابع پایه حذف شود تا مدلی با برازش خوب و

^۱ SHapley Additive exPlanations

سطح آب بالادست و نیز افزایش هد نسبی به دلیل تداخل جریان عبوری از سرریز و غیر عمود بودن حرکت راستای جریان، بر تمام سطح تاج سرریزهای کنگره‌ای، منجر به کاهش ضریب دبی شده است. به نحوی که سرریز نیم‌دایره تک سیکل در مقدار عدد نسبت هد به عمق سرریز ۰/۱۱، نسبت به سرریز با تعداد دو سیکل (N=2)، ۱۳ درصد، نسبت به سرریز با سه سیکل (N=3)، ۱۸ درصد و نسبت به سرریز با چهار سیکل (N=4)، ۲۲ درصد ضریب دبی بالاتری داشته است. می‌توان مشاهده کرد عملکرد سرریزها با افزایش سیکل‌های هارمونیک تغییر کرده است. با توجه به اثر تغییرات تعداد سیکل (N) در رابطه بین ضریب دبی و عمق نسبی، معادله‌های رگرسیون که در جدول (۲) بیان شده، برای هر سرریز با سیکل مشخص با میزان اثرگذاری شاخص ضریب تبیین محاسبه شده است.

به منظور تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره، در معادله ۱۸ رگرسیون غیرخطی به ازای تمامی مقادیر سیکل‌ها به شکل زیر پیشنهاد می‌شود:

$$Cd = \frac{1}{2N^{0.143}} - 0.126 \log\left(\frac{H_t}{P}\right) \quad (18)$$

معادله ۱۸ می‌تواند مقدار ضریب دبی را با شاخص $RMSE=0.03$ و $R^2=0.81$ هم در بخش آموزش و هم در بخش اعتبارسنجی پیش‌بینی کند.

نتایج آنالیز حساسیت داده‌ها

در شکل (۶)، نتایج معادله ۱۴ نشان می‌دهد که متغیرهای هد آب نسبی و تعداد سیکل‌های نیم‌دایره و شعاع نسبی سرریز بیشترین تأثیر و پارامتر $\frac{B}{P}$ کمترین تأثیر را در برآورد مقدار C_d داشته است.

$v_x(S)$ پیش‌بینی مورد انتظار با توجه به زیرمجموعه ورودی‌های S است و عبارت $[v_x(S \cup i) - v_x(S)]$ نشان‌دهنده اختلاف ناشی از اضافه کردن ورودی i است.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی مدل‌های مورداستفاده در این تحقیق از شاخص‌های آماری ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب در معادله‌های ۱۶ و ۱۷ استفاده گردید:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (16)$$

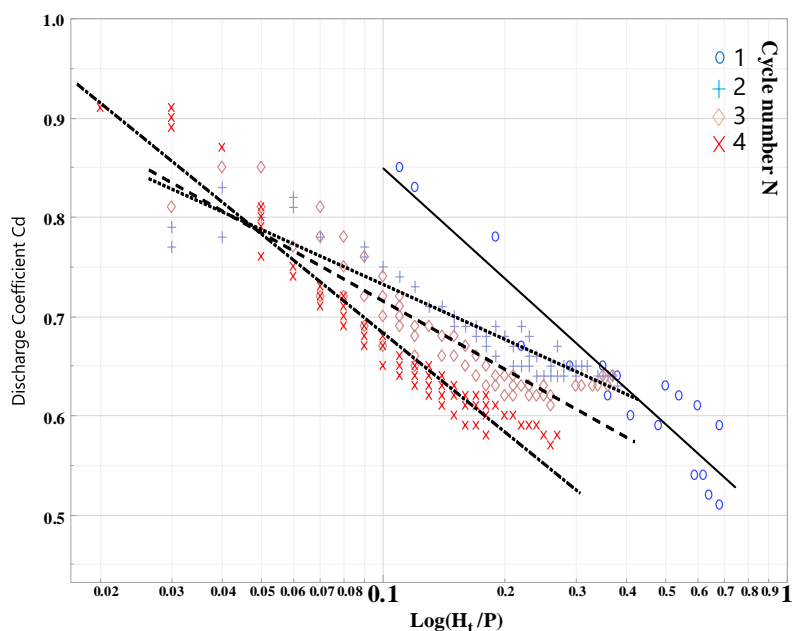
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (17)$$

در معادله‌های بالا، O_i مقادیر ضریب دبی مشاهداتی (واقعی)، P_i مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده، \bar{O}_i میانگین مقادیر ضریب دبی مشاهداتی، \bar{P} میانگین مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده و N تعداد مشاهدات است. لازم استگفته شود مقادیر R^2 نزدیک یک و مقادیر $RMSE$ نزدیک به صفر، نشان‌دهنده دقت بیشتر و عملکرد بهتر مدل هستند.

نتایج و بحث

به منظور ارزیابی نتایج مدل‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده، پارامتر بدون بعد ضریب دبی نسبت به عمق نسبی به ازای تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عملکرد سرریزهای کنگره‌ای هارمونیک با افزایش تعداد سیکل بهبود پیدا کرده است به گونه‌ای که در مقادیر هد نسبی پایین‌تر از ۰/۰۵، میزان ضریب دبی عبوری سرریز با ۴ سیکل نیم‌دایره (N=4)، بیشتر از سائز سرریزها بوده است. این روند به ازای افزایش

کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان هارمونیک



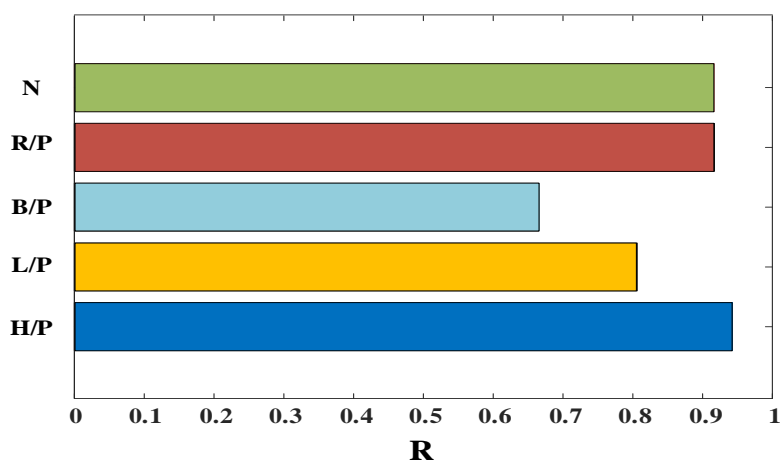
شکل ۵- تغییرات ضریب دبی به نسبت عمق به ارتفاع سرریز

Fig. 5- Relation to the depth to the height of the weirs with discharge coefficient

جدول ۲- معادله‌های رگرسیون غیرخطی برای هر سرریز با سیکل مشخص

Table 2- Nonlinear regression equations for each Weirs with specified cycle

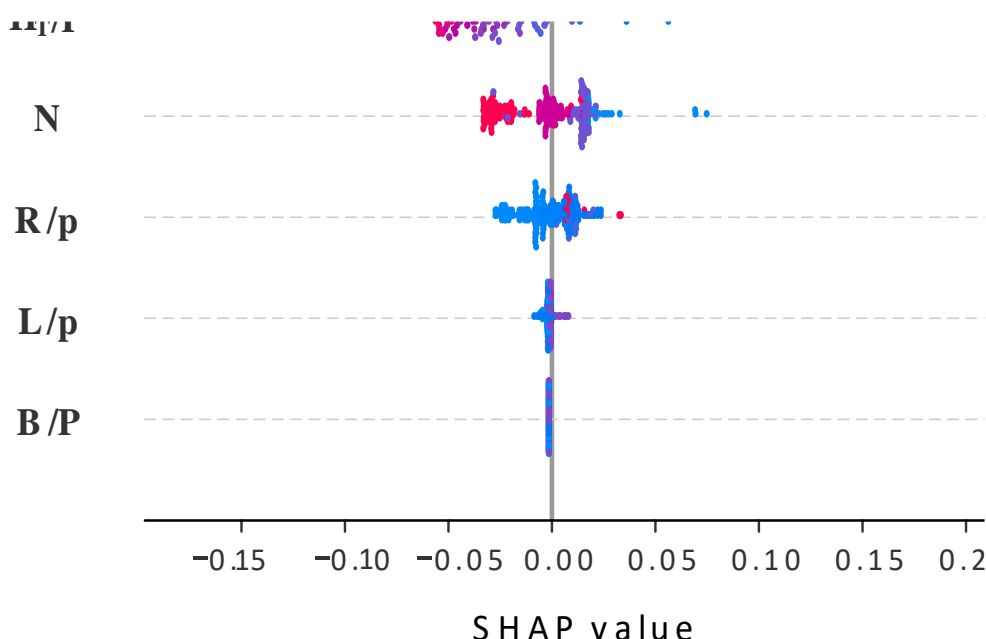
R^2	رگرسیون	تعداد سیکل
۰/۸۹	$Cd = 0.4802 - 0.369 \log\left(\frac{H_t}{P}\right)$	N=1
۰/۹	$Cd = 0.5482 - 0.1838 \log\left(\frac{H_t}{P}\right)$	N=2
۰/۸۳	$Cd = 0.4872 - 0.228 \log\left(\frac{H_t}{P}\right)$	N=3
۰/۹۴	$Cd = 0.352 - 0.331 \log\left(\frac{H_t}{P}\right)$	N=4



شکل ۶- میزان تأثیر مولفه‌های مختلف ورودی به مدل در پیش‌بینی ضریب دبی

Fig. 6 - The impact of different input components to model in predicting Cd

نمودار شکل (۷) مقدار مولفه SHAP را برای هر ورودی به مدل نشان می‌دهد. هر نقطه رنگی روی نمودار نمایانگر مقدار خاص از یک ورودی در مجموعه داده است، در حالی که محور y و محور x به ترتیب نمایانگر ورودی‌ها به مدل و مقادیر SHAP هستند که میزان تأثیر آن را نشان می‌دهند. طیف رنگی اختصاص داده شده به هر نقطه داده، مقادیر متغیر ویژگی‌ها را منعکس می‌کند. به طور دقیق‌تر، آبی نشان‌دهنده مقادیر کمتر و قرمز نشان‌دهنده مقادیر بالاتر است. مشابه تحلیل روش دامنه کسینوسی، مقادیر SHAP نشان می‌دهند که متغیر هد آب نسبی بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای هارمونیک دارد. علاوه بر این، مقدار SHAP برای تعداد سیکل‌های سرریز به عنوان دومین ویژگی مهم شناسایی شد.



شکل ۷- نتایج خروجی مدل آنالیز حساسیت SHAP
 Fig. 7- Results of a feature importance in SHAP analysis

بر اساس شکل (۷)، مقادیر هد نسبی بیشتر مقدار SHAP منفی داشتند که نشان‌دهنده تأثیر منفی بر پیش‌بینی‌های نهایی ضریب دبی است. از سوی دیگر، مقادیر SHAP برای طول و عرض نسبی سرریز تقریباً صفر بودند که نشان می‌دهد این ویژگی‌ها تأثیر قابل توجهی بر پیش‌بینی‌های ضریب دبی نداشتند. علاوه بر این، مقادیر SHAP برای شعاع نسبی سرریز اندکی مثبت بود که نشان‌دهنده تأثیر مثبت است.

برای بهبود دقت پیش‌بینی، پنج ترکیب مختلف ورودی بر اساس اهمیت هر پارامتر ورودی به دست آمده از آنالیز بخش پیشین طراحی شد تا با اجرای مدل‌های یادگیری ماشین، مؤثرترین ترکیب شناسایی شود. با توجه به تأثیر بالای عمق نسبی بر میزان ضریب دبی، به‌منظور تعریف سناریوهای ترکیب ورودی‌های مختلف این مؤلفه در تمامی معادله‌ها دیده شده است. در جدول (۳)، ترکیب‌های خاص ورودی برای پیش‌بینی ضریب دبی نشان داده شده است.

جدول ۳- سناریوهای مختلف ورودی به منظور مدل‌سازی ضریب دبی

Table 3- Different input scenarios to model the discharge coefficient

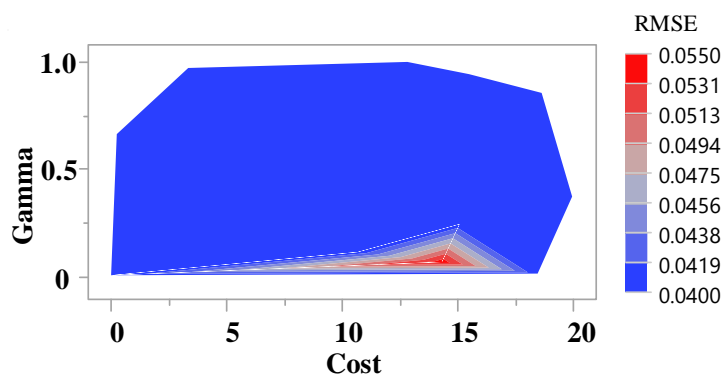
مدل	رگرسیون
Model 1	$Cd = f\left(\frac{H_t}{P}\right)$
Model 2	$Cd = f\left(\frac{H_t}{P}, N\right)$
Model3	$Cd = f\left(\frac{H_T}{P}, \frac{R}{P}, N\right)$
Model4	$Cd = f\left(\frac{H_T}{P}, \frac{R}{P}, \frac{L}{P}, N\right)$
Model5	$Cd = f\left(\frac{H_T}{P}, \frac{R}{P}, \frac{B}{P}, \frac{L}{P}, N\right)$

عملکرد مدل SVR برای تخمین دبی جریان بررسی شد. (Cost) ۰/۹۵۸، مشابه آنچه در شکل (۸) نیز آورده شده به‌منظور توسعه مدل SVR توابع کرنل مختلفی که در است نسبت به سایر مدل‌های دیگر دقت بهتری دارد و می‌تواند به عنوان مدل بهینه شده ماشین بردار پشتیبان استفاده بیان شده داده در جدول (۴) نشان می‌دهد که تابع شعاعی با پارامترهای ضریب پنالتی (Gamma) ۰/۰۱۴ و پارامتر خطا

جدول ۴- بررسی توابع مختلف به عنوان کرنل در مدل SVR

Table 4- Examination of different functions as kernel in SVR model

مدل	تابع کرنل	Cost	Gamma	Training RMSE	Test	
					RMSE	R ²
1	Linear	۰/۶۵۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۳	.	۹/۹۵۶
2	Linear	۰/۶۵۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۳	.	۹/۰۰۹
3	Linear	۰/۶۵۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۳	.	۹/۶۴۲
4	Linear	۰/۶۵۱	۰/۰۴۰	۰/۰۴۳	.	۰/۳۱۵
5	Radial Basis Function	۰/۹۵۵	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۰/۹۴۰	۱۵/۴۹۷
6	Radial Basis Function	۰/۹۵۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۰/۹۹۷	۱۲/۸۲۶
7	Radial Basis Function	۰/۹۵۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۶۹۹	۹/۲۲۷
8	Radial Basis Function	۰/۹۵۷	۰/۰۱۴	۰/۰۱۲	۰/۸۰۶	۱۱/۷۱۶
9	Radial Basis Function	۰/۹۵۸	۰/۰۱۴	۰/۰۱۲	۰/۶۷۳	۱۷/۶۶۹

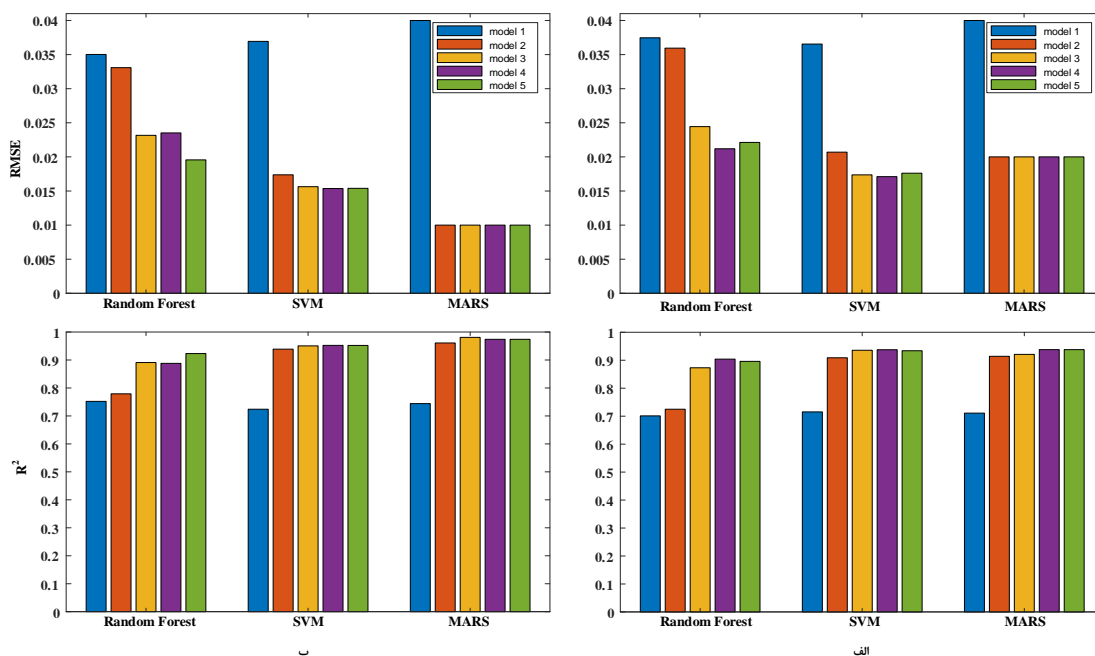


شکل ۸- تغییرات پارامترهای Cost و Gamma مدل SVR در دقت تخمین میزان ضریب دبی

Fig. 8- Cost and Gamma variations in the SVR Model to Estimation of Discharge Coefficient

پیش‌بینی‌شده توسط ترکیب ورودی چهار تحلیل شده است. همچنین عملکرد پیش‌بینی مدل‌های یادگیری ماشین برای سرریزهای هارمونیک مختلف به صورت نمودار پراکنندگی در شکل (۱۰) برای تمامی سناریوهای ترکیب ورودی آورده شده است. مشاهده می‌شود که مدل‌های SVR و MARS نسبت به مدل جنگل تصادفی RF عملکرد پیش‌بینی خوبی را در هر دو مجموعه داده آموزشی و آزمایشی نشان می‌دهند.

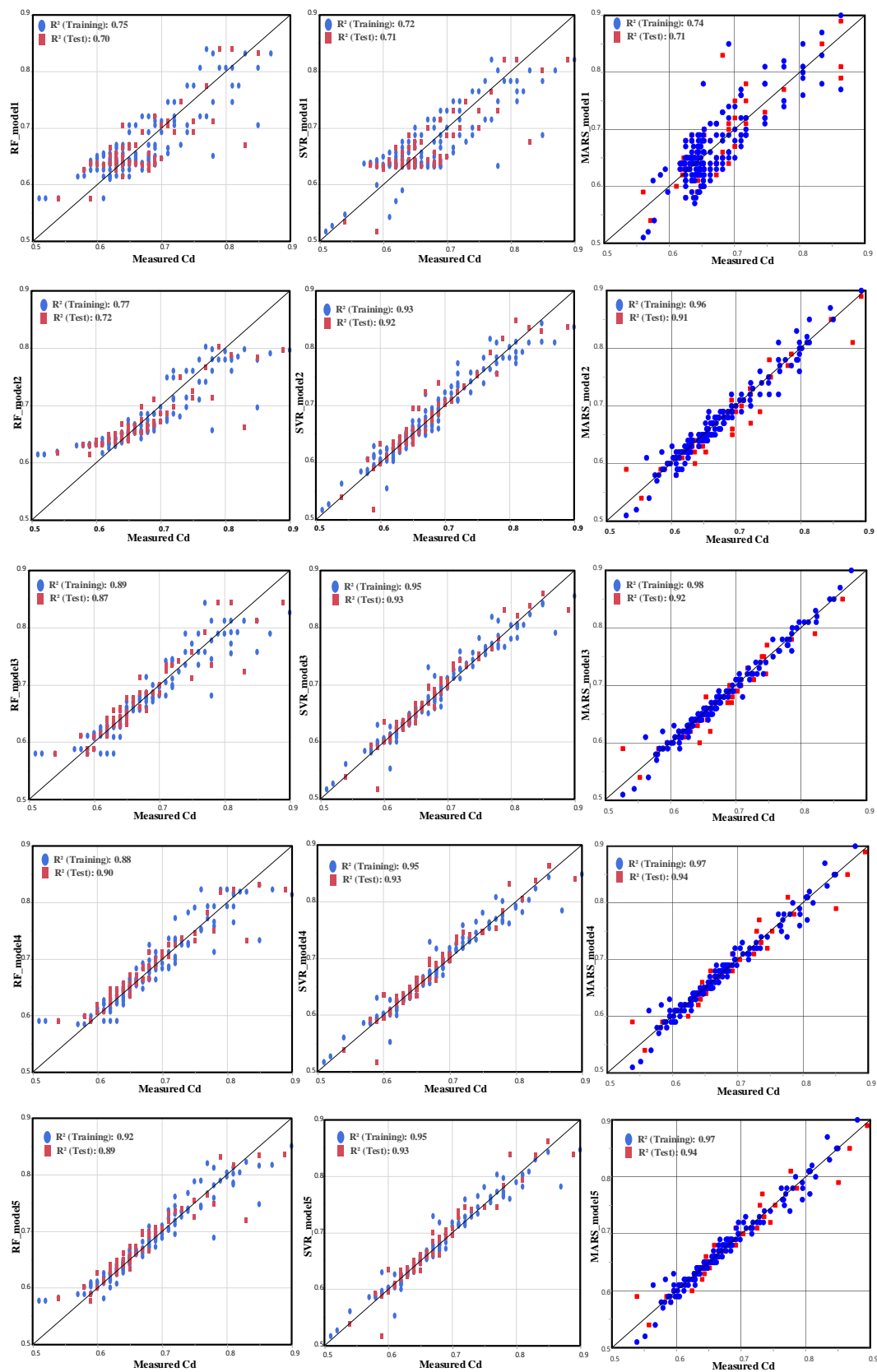
عملکرد ترکیب‌های ورودی جدول (۳) با استفاده از دو شاخص RMSE و R^2 که در شکل (۹) نشان داده شده، ارزیابی شده است. نتایج بر مبنای داده‌های بخش اعتبار سنجی (شکل ۹ الف) نشان می‌دهد که ترکیب ورودی مدل شماره چهار در بین مدل‌های SVR و MARS بهترین عملکرد کلی را دارد و پس از آن ترکیب‌های ورودی ۵، ۳، ۲ و ۱ قرار می‌گیرند. بنابراین، عملکرد مدل‌های مختلف یادگیری ماشین در بخش‌های بعدی بر اساس نتایج



شکل ۹- تأثیر ورودی‌های مختلف در پیش‌بینی ضریب دبی با استفاده از مدل‌های توسعه یافته در بخش الف) اعتبار سنجی و ب) در بخش آموزش

Fig. 9- The impact of different inputs in predicting the discharge coefficient using the models developed in the A) Testing section and B) in the Training section

کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان هارمونیک



شکل ۱۰- نمودار پراکندگی ضرایب دبی اندازه‌گیری شده نسبت به مدل‌های MARS، SVR و RF

Fig. 10- Scatter plot of the measured discharge coefficients compared to MARS, SVR and RF models

در فرآیند توسعه مدل MARS، در مرحله اول ۲۱ تابع پایه در نظر گرفته شد و در مرحله دوم (مرحله هرس کردن)، یک تابع پایه حذف گردید. در نهایت، یک مد MARS بهینه با ۲۰ تابع پایه حاصل شد. فرم کلی مدل MARS به دست آمده در معادله ۱۹ ارائه شده است و فرم توسعه یافته آن در جدول (۵) آمده است. استفاده از معادلات حاصل از توسعه مدل MARS برای هدف های عملی آسان است و می توان ضریب دبی به دست آمده از این معادله را از طریق محاسبات دستی انجام داد.

$$C_d = 0.6928 + \sum_{M=1}^{20} \beta_M h_M(x) \quad (19)$$

برای پیش بینی ضریب دبی، بهترین عملکرد مدل درخت تصمیم در الگوریتم جنگل تصادفی با شاخص های $R^2 = 0.902$, $RMSE = 0.02$ بر مبنای ترکیب ورودی شماره چهارم در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

جدول ۵- ضرایب تابع پایه نشان داده شده در معادله ۱۹ به منظور پیش بینی ضریب دبی

Table 5- The coefficients of the base function shown in equation (19) to predict the discharge coefficient

تابع پایه	معادله	(β_M)
$h_1(x)$	$BF1 = \max(0, H_T/P - 0.13)$	-0.7531
$h_1(x)$	$BF2 = \max(0, 0.13 - H_T/P)$	0.8274
$h_1(x)$	$BF3 = \max(0, N - 3) * \max(0, H_T/P - 0.08)$	0.9347
$h_1(x)$	$BF4 = \max(0, N - 3) * \max(0, 0.08 - H_T/P)$	1.7096
$h_1(x)$	$BF5 = \max(0, R/P - 0.5)$	-0.0172
$h_1(x)$	$BF6 = BF2 * \max(0, N - 2)$	1.2601
$h_1(x)$	$BF7 = BF2 * \max(0, 2 - N)$	-10.7415
$h_1(x)$	$BF8 = BF1 * \max(0, N - 3)$	-2.0767
$h_1(x)$	$BF9 = BF1 * \max(0, 3 - N)$	0.5215
$h_1(x)$	$BF10 = \max(0, 0.22 - H_T/P)$	2.1012
$h_1(x)$	$BF11 = BF10 * \max(0, 0.75 - R/P)$	-3.1755
$h_1(x)$	$BF12 = \max(0, N - 3) * \max(0, B/P - 2)$	0.0206
$h_1(x)$	$BF13 = BF10 * \max(0, R/P - 0.5)$	-22114.5081
$h_1(x)$	$BF14 = BF10 * \max(0, 0.5 - R/P)$	-6.6756
$h_1(x)$	$BF15 = BF10 * \max(0, R/P - 0.5)$	22117.8837
$h_1(x)$	$BF16 = BF10 * \max(0, B/P - 2)$	-1.4013
$h_1(x)$	$BF17 = BF10 * \max(0, 2 - B/P)$	0.9593
$h_1(x)$	$BF18 = \max(0, 3 - N) * \max(0, 0.45 - R/P)$	-0.2331
$h_1(x)$	$BF19 = \max(0, H_T/P - 0.22) * \max(0, N - 2)$	0.8107
$h_1(x)$	$BF20 = \max(0, H_T/P - 0.22) * \max(0, 2 - N)$	-0.5991

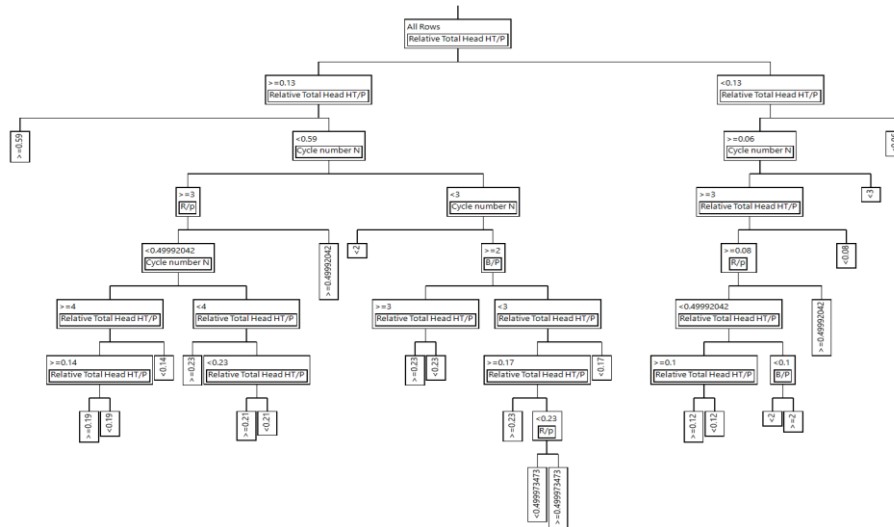
$$C_d = 0.581 \left(\frac{H_T}{P}\right)^{-0.121} \left(\frac{B}{P}\right)^{-0.035} N^{-0.047} \quad (20)$$

ارهام نمازی و مظفری (Arham Namazi & Mozaffari, 2023) برای حالت سرریز با تاج تک نیم دایره معادله زیر را برای برآورد ضریب دبی تعریف کرده اند:

$$C_d = 0.4731 - 0.158 \ln\left(\frac{H_t}{P}\right) \quad (21)$$

پیش تر گفته شد که در زمینه مدل های هوش مصنوعی در پیش بینی ضریب دبی سرریزهای کنگره ای تا کنون مطالعه ای گزارش نشده است. یلدیز و همکاران (Yıldız et al., 2024) معادله ای رگرسیون غیرخطی زیر را به منظور تخمین ضریب دبی سرریزهای کنگره ای با پلان هارمونیک به شکل زیر پیشنهاد داده اند:

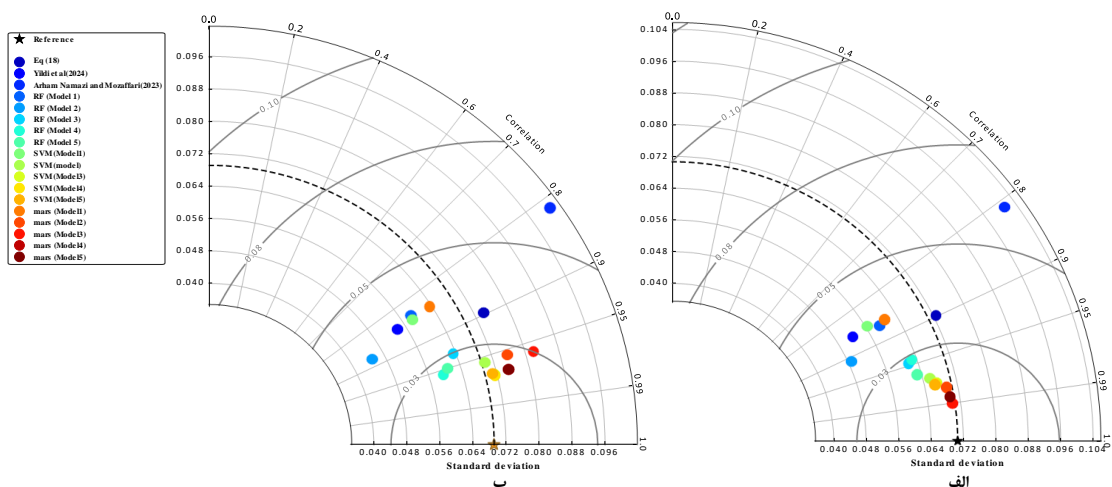
کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای کنگره‌ای با پلان هارمونیک



شکل ۱۱- ساختار بهترین درخت تصمیم در مدل RF به منظور برآورد ضریب دبی
 Fig. 11 - The structure of the Best Decision tree in the RF model to estimate the Cd

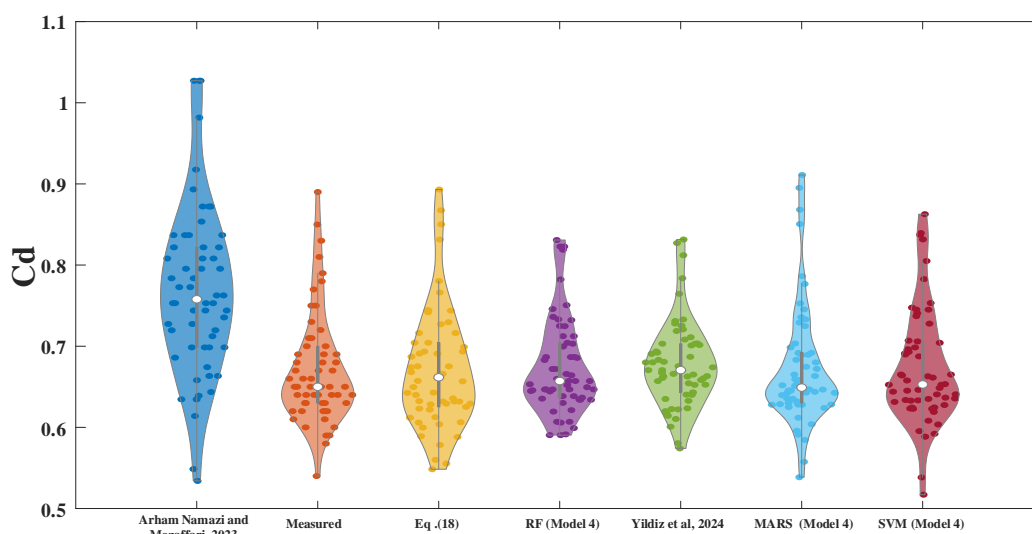
ضریب دبی نسبت به روش‌های کلاسیک و ناپارامتری بیشتر تأیید می‌شود. مشاهده می‌شود که نقاط محاسبه‌شده توسط الگوریتم جنگل تصادفی (RF) برای هر نوع سیکل سرریز هارمونیک، در مقایسه با نقاط ارائه‌شده توسط الگوریتم‌های دیگر، فاصله بیشتری از نقطه هدف دارند. علاوه بر این، معادله غیرخطی ارائه شده در این تحقیق نیز (معادله ۱۸) نسبت به مدل‌های رگرسیون سنتی گزارش داده شده، عملکرد بهتری داشته است.

شکل (۱۲) نمودارهای تیلور را برای داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های پیش‌بینی شده (شامل مجموعه‌های آموزش و آزمایش) نمایش می‌دهد که توسط مدل‌های مختلف یادگیری ماشین پیش‌بینی شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۱۲-ب مشاهده می‌شود، فاصله نقاطی که توسط الگوریتم‌های SVR و MARS به دست آمده‌اند، هر دو نزدیک‌ترین به نقطه اندازه‌گیری شده مرجع هستند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی شده ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم MARS در تخمین میزان



شکل ۱۲- دیاگرام تیلور عملکرد مدل‌های توسعه‌یافته (الف) بخش آموزش (ب) بخش اعتبارسنجی
 Fig. 12 - Taylor diagram of the performance of the developed models

شکل (۱۳) نمودارهای ویولنی را برای داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که توسط مدل‌های مختلف یادگیری ماشین استنتاج شده‌اند. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که هر سه مدل SVR، RF و MARS اساساً چارک اول، سوم و میانه مشابهی را با داده‌های اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کنند، در حالی که چارک اول یا سوم در معادله ۲۱ و معادله ۱۸ تفاوت قابل توجهی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. علاوه بر این، از دیدگاه توزیع کلی داده‌ها، الگوریتم SVR و MARS، نسبت به الگوریتم RF، به ترتیب شکل مشابه‌تری با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند، که این امر قابلیت پیش‌بینی قابل قبول استراتژی ماشین بردار پشتیبان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- نمودار ویولنی مقایسه مدل‌های یادگیری ماشین با معادله‌های پیشین

Figure 13- Violin diagram comparing machine learning models with previous relationships

MARS را تأیید می‌کند. نتایج پیش‌بینی این مطالعه به شرح

زیر خلاصه شده است:

برای کاهش خطاهای پیش‌بینی مدل‌های یادگیری ماشین، حساسیت پارامترها ابتدا تحلیل شد تا اهمیت نسبی پارامترهای مختلف ورودی مشخص شود. بر این اساس، پنج ترکیب ورودی مختلف طراحی و به مدل‌های یادگیری ماشین اعمال شد. مقایسه شاخص‌های آماری بین نتایج پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که برای پیش‌بینی ضریب دبی این نوع از سرریزها، ترکیب ورودی مشترک بهینه شامل $\frac{H_T}{P}$, $\frac{R}{P}$, $\frac{L}{P}$, N است. با استفاده از بهترین ترکیب ورودی، نتایج نشان داد که الگوریتم‌های SVR و MARS از مدل‌های مبتنی بر درخت تصمیم، مانند جنگل

نتیجه‌گیری

سرریزهای کنگره‌ای همواره به عنوان راه‌حلی مؤثر برای افزایش راندمان دبی سیلاب در مواقعی پیشنهاد می‌شوند که فضای محدودی برای ساخت سرریز وجود دارد. سرریزهای کنگره‌ای طول بیشتری نسبت به سرریزهای ساده خطی دارند. بنابراین سیلاب با عمق کمتری از روی آن عبور خواهد کرد. به دلیل ارتباط پیچیده بین ضریب دبی و پارامترهای مرتبط، معادلات تجربی به‌سختی می‌توانند ضریب دبی را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کنند. در مطالعه حاضر، سه مدل مختلف یادگیری ماشین برای مدل‌سازی ضریب دبی سرریزهای نیم‌دایره با طرح هارمونیک توسعه داده شده است که مزایای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVR) مدل

تصادفی (RF) در پیش‌بینی برای هر نوع از سرریز هارمونیک مطالعات پیشین استفاده شده‌اند نشان داد که این مدل نتایج با سیکل‌های مختلف عملکرد بهتری دارند. مقایسه مدل رضایت‌بخشی ارائه می‌دهد و در دقت، عملکرد بهتری نسبت MARS با دیگر مدل‌های رگرسیونی غیر خطی که در به آن‌ها دارد.

سپاسگزاری

حمایت‌های مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.WH1403.43525) زمینه اجرای این تحقیق را فراهم آورد که بدین‌وسیله از ایشان قدردانی می‌شود.

مراجع

- Arham Namazi, F. S., & Mozaffari, J. (2023). Investigation of labyrinth weirs discharge coefficient with the same length. *Flow Measurement and Instrumentation*, 94, 102468. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102468>
- Behdarvandi, B., Zayeri, M. R., Ghomeshi, M., & Daryaei, M. (2024). Performance of Support Vector Machines, Random Forest, and GMDH Methods for Predicting Flow Rate from Rectangular Flap Gates. *Irrigation and Water Engineering*. <https://doi.org/10.22125/iwe.2024.460044.1811>
- Bilhan, O., Aydin, M. C., Emiroglu, M. E., & Miller, C. J. (2018). Experimental and CFD Analysis of Circular Labyrinth Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(6), 04018007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001301](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001301)
- Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Gharabaghi, B., Sharifi, A., & Mosavi, A. (2020). *Prediction of Discharge Capacity of Labyrinth Weir with Gene Expression Programming* (No. arXiv:2002.02751). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.02751>
- Borghei, S. M., & Parvaneh, A. (2011). Discharge characteristics of a modified oblique side weir in subcritical flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5), 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.04.009>
- Borisova, N. M., & Belikov, V. V. (2023). Optimization of Spillway Design of Reconstructed Shavan Dam Using Numerical 2D-Modeling. *Power Technology and Engineering*, 57(1), 67–74. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01624-7>
- Dutta, D., Mandal, A., & Afzal, M. S. (2020). Discharge performance of plan view of multi-cycle W-form and circular arc labyrinth weir using machine learning. *Flow Measurement and Instrumentation*, 73, 101740. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101740>
- Emami, S., Parsa, J., Emami, H., & Abbaspour, A. (2021). An ISaDE algorithm combined with support vector regression for estimating discharge coefficient of W-planform weirs. *Water Supply*, 21(7), 3459–3476.
- Friedman, J. H. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *The Annals of Statistics*, 19(1), 1–67.
- Ghaderi, D., Ebrahimnezhadian, H., & Mollazadeh, M. (2024). Three-dimensional analysis of the performance of circular stepped spillways in the skimming flow regime. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(7). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05004-8>
- Hagbin, M., Sharafati, A., Aghamajidi, R., Asadollah, S. B. H. S., Noghani, M. H. M., & Jalón, M. L. (2022). Determination of discharge coefficient of stepped morning glory spillway using a hybrid data-driven method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 85, 102161.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (Vol. 2). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-21606-5>

- Hussein, B. S., & Jalil, S. A. (2024). Influence of Labyrinth Side Weir Shape Modification on the Hydrodynamic Performance: Experimental and Numerical Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09563-9>
- Ikinciogullari, E. (2024). Energy dissipation performance of labyrinth and harmonic stepped spillways. *Journal of Hydroinformatics*, 26(10), 2668–2682. Scopus. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.221>
- Kisi, O., Emiroglu, M. E., Bilhan, O., & Guven, A. (2012). Prediction of lateral outflow over triangular labyrinth side weirs under subcritical conditions using soft computing approaches. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3454–3460.
- Li, S., Shen, G., Parsaie, A., Li, G., & Cao, D. (2024). Discharge modeling and characteristic analysis of semi-circular side weir based on the soft computing method. *Journal of Hydroinformatics*, 26(1), 175–188.
- Lundberg, S. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *arXiv Preprint arXiv:1705.07874*.
- Momeni, E., Nazir, R., Jahed Armaghani, D., & Maizir, H. (2014). Prediction of pile bearing capacity using a hybrid genetic algorithm-based ANN. *Measurement*, 57, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.007>
- Parsa, A. B., Movahedi, A., Taghipour, H., Derrible, S., & Mohammadian, A. K. (2020). Toward safer highways, application of XGBoost and SHAP for real-time accident detection and feature analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 136, 105405. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457519311790>
- Rao, S. S., & Shukla, M. K. (1971). Characteristics of flow over weirs of finite crest width. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(11), 1807–1816. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003138>
- Safarrazavi Zadeh, M., Esmaeili Varaki, M., & Biabani, R. (2021). Experimental study on flow over sinusoidal and semicircular labyrinth weirs. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(sup1), 304–313. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1644679>
- Sangsefidi, Y., Mehraein, M., & Ghodsian, M. (2018). Experimental study on flow over in-reservoir arced labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 215–224. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598616303156>
- Shafiei, S., Najarchi, M., & Shabanlou, S. (2020a). A novel approach using CFD and neuro-fuzzy-firefly algorithm in predicting labyrinth weir discharge coefficient. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1), 44. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2109-9>
- Shafiei, S., Najarchi, M., & Shabanlou, S. (2020b). Simulation of labyrinth weir discharge coefficient by modern artificial intelligence models. *Modares Civil Engineering Journal*, 20(1), 204–218.
- Siasar, H., & Honar, T. (2019). Application of support vector machine, CHAID and random forest models, in estimated daily reference evapotranspiration in northern Sistan and Baluchestan Province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), 378–388.
- Simsek, O., Gumus, V., & Ozluk, A. (2023). Prediction of discharge coefficient of the trapezoidal broad-crested weir flow using soft computing techniques. *Neural Computing and Applications*, 35(24), 17485–17499.
- Suleimany, J. M. F. S., Aurahman, T. H., & S.mamand, B. (2022). Flow simulation over semicircular labyrinth weir using ANSYS-fluent. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 29(1), 83–98. Scopus. <https://doi.org/10.25130/tjes.29.1.7>
- Yıldız, A., Marti, A. İ., & Göğüş, M. (2024). The hydraulic investigation of harmonic plan weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 95, 102512. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102512>
- Zare, H., Vaghefi, M., Mahmoudi, A., & Behroozi, A. M. (2023). Experimental Exploration of Flow Hydraulics and Discharge Coefficient for an Inclined Circular Labyrinth Weir. *Water Resources Management*, 37(11), 4521–4536. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03577-y>
- Zayeri, M. (2023). Discharge Prediction in Flumes with Trapezoidal Contraction by Machine Learning Techniques. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 24(90), 55–70.
- Zhang, W. (2020). *MARS Applications in Geotechnical Engineering Systems: Multi-Dimension with Big Data*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7422-7>



Original Research

Application of Artificial Intelligence in Predicting the Discharge Coefficient of Labyrinth Weirs with Harmonic Plans

A. Savaedi, M. Zayeri*, M. Ghomeshi, M. Daryaei

***Corresponding Author:** Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 19 December 2024, **Accepted:** 4 January 2025

Email: m.zayri@scu.ac.ir

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2025.368037.1602

Extended Abstract

Introduction

Dams, as barriers constructed across rivers, are comprised of essential components such as the body, spillway, and drainage systems. Various labyrinth spillway designs, including triangular, trapezoidal, circular, and polygonal horizontal layouts, extend the effective flow path over a fixed width compared to linear spillways. Researchers aim to identify optimal designs balancing high performance and cost-efficiency. Recent advancements highlight the integration of optimization methods and computational fluid dynamics (CFD) to improve labyrinth spillway designs. Studies have explored the hydraulic and geometric factors affecting discharge coefficients (C_d) and flow velocity. Research includes the application of artificial intelligence (AI) models such as artificial neural networks (ANNs), adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS), and regression techniques to predict C_d . Notable contributions demonstrate that AI models effectively capture complex nonlinear relationships between geometric parameters and flow rates, outperforming traditional methods. For instance, models like support vector machines (SVM) and adaptive regression spline (MARS) have demonstrated high accuracy in predicting C_d .

Despite advancements, precise predictive models for labyrinth spillways with harmonic plans remain underdeveloped. This study addresses this gap by introducing new methodologies, including SVM, random forests (RF), and MARS, to predict C_d . It also quantifies the influence of dimensionless parameters on C_d , synthesizing experimental data to enhance understanding and bridge existing research gaps.

Methodology

In this study, soft computing models were developed using experimental results from Arham Namazi and Mozaffari (2023) and Yıldız *et al.* (2024). To evaluate the accuracy of proposed soft computing equations in estimating the discharge coefficient (C_d) for circular labyrinth weirs arranged harmonically in open channels, the following experimental data were utilized: Yıldız *et al.* (2024): conducted 215 experiments for weirs with three different heights ($P = 20$ cm, $P = 30$ cm, and $P = 40$ cm) and three different cycle numbers ($N = 2$, $N = 3$, and $N = 4$). Arham Namazi and Mozaffari (2023): performed 18 experiments with a fixed weir height ($P = 15$ cm) configured as a single cycle ($N = 1$).

In total, 233 experimental results were collected for soft computing-based modeling. Among these, 175 samples (75%) were used for model training, and 58 samples (25%) were allocated for testing the developed models.

Results and Discussion

Violin plots for both measured and predicted data inferred by various machine learning models are presented. Violin plots are typically used to compare the distribution of data across different groups in terms of their shape. Additionally, a small box plot is embedded within each violin plot, where the ends of the rectangle represent the first and third quartiles, and the central point denotes the median. It can be observed that all three models—RF, SVM, and MARS—predict similar first and third quartiles and medians, compared to the measured data. In contrast, the first or third quartiles in the equations proposed by Arham Namazi and Mozaffari (2023) and Equation 18 show significant deviations from the measured values. Furthermore, from the perspective of the overall data distribution, the SVM and MARS algorithms demonstrate distributions more similar to the measured data compared to the RF algorithm. This highlights the superior predictive capability of the support vector machine (SVM) approach.

Conclusions

Labyrinth weirs are consistently proposed as an effective solution for enhancing flood discharge efficiency, particularly in cases where space for weir construction is limited. These weirs have a longer crest length compared to linear weirs, allowing floods to pass at shallower depths. Due to the complex relationship between the discharge coefficient and its associated parameters, empirical equations often fail to predict the discharge coefficient with acceptable accuracy.

In this study, three different machine learning models were developed to predict the discharge coefficient of semicircular labyrinth weirs with harmonic designs. The results confirm the advantages of the Support Vector Machine (SVM) algorithm. Key findings of the study are summarized as follows:

1. **Parameter Sensitivity Analysis:** To minimize prediction errors in the machine learning models, a sensitivity analysis was conducted to identify the relative head importance of different input parameters. Based on this analysis, five input combinations were designed and applied to the machine learning models.
2. **Optimal Input Combination:** Statistical comparisons between predicted and experimental data revealed that the optimal input combination effectively predicted the discharge coefficient for this type of weir.
3. **Model Performance:** Using the best input combination, the results showed that the SVM and MARS algorithms outperformed tree-based models, such as Random Forest (RF), in prediction accuracy for harmonic weirs with varying cycles.
4. **MARS Model Evaluation:** Although the MARS model performed well, comparisons with other regression models from previous studies demonstrated that MARS delivered satisfactory and improved accuracy over those models.

Keywords: Machine Learning, SHAP Sensitivity Analysis, Discharge Coefficient, Labyrinth Weirs



ارزیابی اثر عرض مجرای رسوبشوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوبشویی در سدهای انحراف آب

مهرداد اسدی^۱، محمدجواد منعم^{۲*}، جمال محمد ولی سامانی^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^{۲*} استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

چکیده

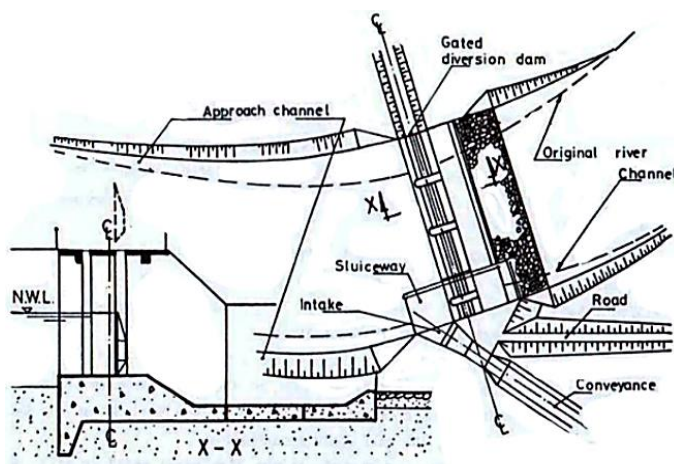
سدهای انحراف آب، به عنوان یکی از سازه‌های مهم برای کنترل جریان و برداشت آب، در معرض انباشت رسوب قرار دارند که این امر می‌تواند بهره‌برداری از آن‌ها را محدود کند. در دوره بهره‌برداری از سامانه آبیگری سد انحراف آب، رسوبات در مقابل دهانه آبیگری انباشته می‌شود. یکی از روش‌های موثر تخلیه رسوب از مقابل دهانه آبیگری، احداث مجرای رسوبشوی مجهز به دریچه کنترل است. نسبت بازشدگی به عرض دریچه مجرای تخلیه یکی از عوامل مهم موثر بر کارایی رسوبشویی است که متأسفانه معیار مشخصی برای آن وجود ندارد. در این تحقیق، با استفاده از مدل FLOW-3D، تاثیر این نسبت و عرض مجرا (W_s) بر میزان رسوبشویی بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها با دبی ثابت انجام شده‌اند و نسبت‌های مختلف بازشدگی به عرض دریچه برای هر عرض مجرا تحلیل شده است. نتایج تحقیق نشان داد نسبت $a/b=0.5$ و عدد فرود $0.16 < Fr < 0.3$ بهترین شرایط را برای رسوبشویی فراهم می‌کنند. افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب منجر به کاهش دامنه مؤثر رسوبشویی می‌شود به طوری که عرض‌های بسیار کوچک یا بزرگ، ناکارآمد بوده‌اند و محدوده $1.0W_i < W_s < 1.15W_i$ بیشترین کارایی را از نظر میزان و دامنه رسوبشویی داشته است. عدد فرود بالاتر از 0.3 موجب فرسایش بیش از حد و کمتر از 0.16 منجر به رسوب‌گذاری شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد برای تخلیه بهینه رسوبات، نسبت $a/b=0.5$ توصیه می‌شود تا شرایط هیدرودینامیکی پایدار و کارایی بالای تخلیه رسوب تضمین گردد.

واژه‌های کلیدی: سد انحراف آب، مجرای تخلیه رسوب، نسبت بازشدگی به عرض

مقدمه

سد انحراف آب همراه تأسیسات وابسته در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌طور کلی، شستشوی رسوب مؤثرتر خواهد بود اگر عمق آب کم، دبی زیاد، دریچه‌های تخلیه‌کننده عریض و رسوبات به تازگی ته‌نشین شده باشند (Bogárdi, 1974). وایت و بتیس (White and Bettess, 1984) با استفاده از تئوری جریان پتانسیل، جریان زیر دریچه را برای شرایط استاتیک شبیه‌سازی کردند.

سدهای انحراف آب، سازه‌هایی هستند که در رودخانه‌ها و در مقابل جریان آب احداث می‌شوند و با ایجاد مانع در مقابل جریان، تراز سطح آب را برای انتقال آب به محل مصرف بالا می‌آورند. یکی از اجزای سدهای انحرافی، مجرای تخلیه رسوبات (Sluiceway) است که معمولاً در مقابل دهانه آبیگری احداث و از آن بهره‌برداری می‌شود. پلان



شکل ۱- پلان سد انحراف آب و مقطع طولی مجرای تخلیه رسوب (Razvan, 1989)

Fig.1- Diversion Dam Plan and Longitudinal Section of Sluiceway (Razvan, 1989)

کارایی شستشوی رسوبات با ظهور فرسایش پیشرونده به طور چشمگیری افزایش می یابد.

طبق نظر رادکیوی (Raudkivim, 2020) اگر مجرای تخلیه رسوب دارای ابعاد مناسب باشد، جریان عبوری از آن شرایط تقرب جریان مناسبی را برای جریان انحرافی فراهم می کند و حداقل بازشدگی دریاچه مجرای تخلیه رسوب باید به اندازه ای باشد که بزرگ ترین اندازه ذرات رسوب بتواند از آن عبور کند. سطح مقطع مجرای تخلیه رسوب باید به اندازه کافی برای انتقال آب به کانال آبرگیر و نیز برای شستشوی رسوب بزرگ باشد و از طرفی برای حفظ سرعت لازم برای شستشوی رسوب در شرایط غالب یا در شرایط طراحی شده جریان در رودخانه باید به اندازه کافی کوچک باشد (Vanoni, 2006). طبق نظر رزوان (Razvan, 1989)، معیار طراحی عرض مجرای تخلیه رسوب بدین ترتیب است که در کمترین تراز سطح آب، جریان درون مجرا باید قادر به انتقال و حذف رسوبات ته نشین شده در محدوده مجرای تخلیه رسوب باشد.

غلامی علم (Gholami Alam, 1998) عوامل موثر در طراحی مجاری تخلیه رسوب سدهای انحراف آب را در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض ۷۵ سانتی متر، عمق ۸۰ سانتی متر و شیب کف صفر بررسی کرد. بستر فلوم

این محققان با روش سرعت فرسایش بحرانی نشان دادند فاصله ای که در آن سرعت به کمتر از سرعت بحرانی کاهش می یابد کوتاه است. این موضوع نشان می دهد آبشستگی کامل در بالادست به نواحی نزدیک دریاچه محدود می شود و معمولاً بین ۱ تا ۵ متر از دریاچه هاست، این فاصله بسته به نوع سیستم و طراحی می تواند متفاوت باشد. محققان یاد شده همچنین نشان دادند سطح آب باید به طور قابل توجهی در بالادست کاهش یابد تا رسوب به محدوده دریاچه منتقل شود. در سد Mangahao، ۷۵ درصد از رسوبات انباشته شده طی ۳۴ سال، در عملیات یک ماهه رسوب شویی حذف شد. این عملیات با تخلیه حجم بالایی از آب همراه بود. وایت و بتیس می گویند ذخیره سازی مؤثر پس از رسوب شویی باید بیش از ۵۰ درصد از ظرفیت اولیه مخزن باشد تا عملیات اقتصادی و کارآمد تلقی شود. شن و همکاران (Shen et al., 1993) برای رسوب غیر چسبنده، به کمک تحلیل ابعادی، عمق شستشو را در رسوب شویی موضعی جلو دریاچه تخلیه رسوب تخمین زدند. این محققان مدل یک بعدی شبیه سازی و مدل دو بعدی تغییر شکل بستر را در هنگام تغییر رسوب مخزن به کار بردند و به این نتیجه رسیدند تخلیه رسوبات تابعی از عوامل هیدرولیکی از جمله دبی خروجی، شیب سطح آب و عرض کانال شستشو است و

تحقیق، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D، به بررسی تاثیر عرض مجرای تخلیه رسوب و اثر نسبت بازشدگی به عرض دریاچه مجرای تخلیه رسوب بر میزان شستشوی رسوبات پرداخته شده است.

رابطه بین نسبت بازشدگی به عرض دریاچه (a/b) و کارایی شستشوی رسوب در مجاری مختلف تخلیه رسوب به‌طور جامع تحلیل شده است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً معیار مشخصی برای این نسبت ارائه نمی‌دادند، این تحقیق نشان می‌دهد نسبت $a/b=0.5$ شرایط بهینه را از نظر میزان و دامنه تخلیه رسوب فراهم می‌کند.

در این تحقیق، اثر عرض‌های مختلف مجرای تخلیه رسوب بررسی شده است. مطالعه تأثیر عرض مجرا (W_s) بر دامنه رسوب‌شویی و حجم رسوبات تخلیه‌شده نشان می‌دهد که عرض‌های بسیار کوچک یا بزرگ، ناکارآمد هستند و محدوده $1.0W_i < W_s < 1.15W_i$ بیشترین کارایی را دارد. این محدوده به طراحان امکان انتخاب ابعاد بهینه را برای مجرای تخلیه رسوب می‌دهد که علاوه بر افزایش کارایی، از مشکلاتی مانند فرسایش یا تجمع رسوبات جلوگیری می‌کند. استفاده از عرض کانال آبیگر (W_i) به عنوان معیاری جدید برای انتخاب عرض مجرای تخلیه رسوب مطرح شده است. این معیار که شاخصی است کمی، در مقایسه با دیگر معیارهای انتخاب عرض مجرای تخلیه رسوب که شاخص‌های کیفی هستند، منجر به سردرگمی طراحان نمی‌شود.

مواد و روش‌ها

در مواردی که برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته، به دلایل مختلف، استفاده از مدل‌های فیزیکی باصرفه یا امکان‌پذیر نباشد، می‌توان از مدل‌های ریاضی معتبر استفاده کرد. مدل‌های ریاضی اخیراً به خوبی توسعه یافته‌اند و مبتنی بر حل همزمان معادلات ناویر-استوکس هستند.

به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از ذرات یکنواخت با قطر متوسط یک میلی‌متر پوشانیده شده بود. این مدل بر اساس شستشوی رسوبات توسط آب زلال طراحی شده بود تا حداکثر شستشو و تخلیه رسوبات قابل مشاهده باشد. در این مطالعه، اثر دیواره جداکننده مستقیم در شرایط مستغرق با طول‌های ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد عرض مجرا بررسی گردید و نتایج نشان داد که طول برابر ۲۵ درصد عرض مجرا عملکرد مناسب‌تری دارد. اسدی و همکاران (Asadi et al., 2023) با استفاده از مدل FLOW-3D تاثیر ابعاد مختلف دیوار جداکننده را بر عملکرد مجرای تخلیه رسوب بررسی کردند و نشان دادند ارتفاع دیوار جداکننده که یکی از عوامل مهم طراحی هیدرولیکی سدهای انحراف آب است، نقش بسزایی بر میزان شستشوی رسوب از مجرای تخلیه رسوب دارد. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که بیشترین میزان شستشوی رسوبات در حالتی رخ می‌دهد که ارتفاع دیوار جداکننده برابر با تراز سطح آب سیلاب طرح باشد، و به عبارت دیگر تحت هیچ شرایطی جریان آب از روی آن عبور نکند.

استفاده از مدل عددی، به جای مدل فیزیکی، برای شبیه‌سازی به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و زمان، انعطاف‌پذیری بالا، و دقت قابل قبول ترجیح داده می‌شود. مدل‌های عددی امکان شبیه‌سازی شرایط پیچیده و تحلیل سناریوهای متنوع را با هزینه کمتر و سرعت بیشتر فراهم می‌کنند. این مدل‌ها با ارائه جزئیات دقیق، مانند توزیع سرعت و فشار در نقاط مختلف، و امکان تغییر آسان پارامترها، ابزاری قدرتمند برای تحلیل سیستم‌های مهندسی هستند. مدل‌های عددی محدودیت‌های مقیاس آزمایشگاهی را ندارند و می‌توانند شرایط واقعی و بزرگ‌مقیاس را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کنند، در حالی که مدل‌های فیزیکی برای هر تغییر نیازمند بازطراحی یا اصلاح هستند. این ویژگی‌ها، مدل عددی را به رویکردی موثر و کارآمد برای مطالعات هیدرودینامیکی و مدیریت رسوبات تبدیل می‌کند. در این

معادلات حاکم بر جریان

معادله های ناویر-استوکس با متوسط گیری رینولدز (RANS). در این مدل، ترم های اضافی به معادله های ناویر-استوکس افزوده می شود تا تاثیر نوسان های آشفته بر مومنتم جریان شبیه سازی شود.

مدل آشفتگی

مدل $k-\varepsilon$ RNG یکی از مدل های آشفتگی پر کاربرد در دینامیک سیالات محاسباتی است که به طور ویژه برای شبیه سازی جریان های آشفته توسعه یافته است. این مدل، نسبت به مدل استاندارد $k-\varepsilon$ ، در بسیاری از کاربردها به ویژه جریان هایی با نواحی پیچیده، جریان های برشی شدید و تغییرات سریع چندین مزیت و دقت بالاتری دارد.

مدل $k-\varepsilon$ RNG را یاخوت و اورزاگ (Yakhot and Orszag, 1986) توسعه دادند و برخلاف مدل استاندارد، مبتنی بر نظریه نرمال سازی گروهی (Renormalization Group Theory) است. این مدل، مشابه مدل استاندارد $k-\varepsilon$ ، از دو معادله دیفرانسیل جزئی برای توصیف میدان آشفتگی استفاده می کند. معادله k انرژی جنبشی آشفتگی را مدل می کند. معادله ε میزان اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی را توصیف می کند. این دو معادله به مدل RNG امکان می دهند که میزان تولید و اتلاف انرژی جنبشی آشفته را در سیال های آشفته شبیه سازی کند.

معادله های اصلی این مدل برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و میزان اتلاف آن (ε) به صورت روابط ۳ و ۴ بیان می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

که در آن:

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{\frac{1}{2}}$$

است.

برای حل مسائل مکانیک سیالات و هیدرودینامیک، مدل های ریاضی را می توان با اطمینان نسبتاً مناسبی جایگزین مدل های فیزیکی کرد. مدل FLOW-3D ابزاری قدرتمند و دقیق است که بر پایه مدل های ریاضی می تواند انواع مسائل مربوط به مکانیک سیالات و هیدرودینامیک را حل کند. این مدل با حل معادله های پیوستگی و ناویر-استوکس می تواند مسائل را به صورت سه بعدی حل کند. معادله های پیوستگی و ناویر-استوکس برای جریان غیر قابل تراکم آشفته با لزوجت و چگالی ثابت را می توان به صورت روابط ۱ و ۲ بیان کرد (Flow Science Inc., 2014)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_i A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

در رابطه های بالا u_i = معرف سرعت در جهات x ، y و z ، t = زمان، A = کسر سطح آزاد در جهت i جریان، V_F = کسر حجمی سیال در هر سلول، ρ = چگالی سیال، p = فشار هیدرواستاتیک، f_i = نشان دهنده تنش های رینولدز است. برای حل تنش های رینولدز نیاز به استفاده از یک مدل آشفتگی است.

در جریان های آشفته، از مدل های آشفتگی برای شبیه سازی نیروهای اضافی ناشی از نوسان های کوچک مقیاس در سرعت استفاده می شود. در این مطالعه، از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG استفاده شده که مبتنی است بر

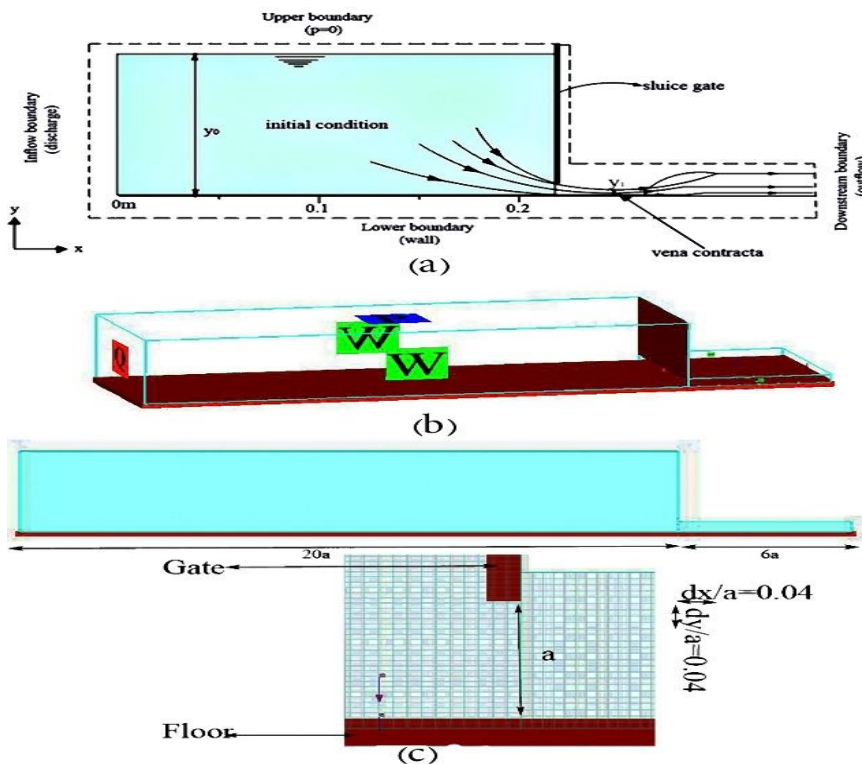
ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

در این معادله‌ها، k = انرژی جنبشی آشفتگی و معیاری است برای شدت آشفتگی. ε = میزان اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی است که میزان انتقال انرژی را از مقیاس‌های بزرگ به مقیاس‌های کوچک آشفتگی بیان می‌کند. لزوجت آشفته و بیانگر انتقال مومنتم ناشی از آشفتگی است و به صورت $\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ محاسبه می‌شود.

میزان P_k تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از برش‌های جریان است و از رابطه $P_k = \mu_t (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \cdot \nabla \bar{u}$ به دست می‌آید. پارامترهای پراکندگی هستند که معمولاً مقادیر 0.7194 و 0.7194 برای آن‌ها انتخاب می‌شود $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ ضرایب تجربی است که به ترتیب برابر با $1/42$ و $1/68$ هستند. **صحت‌سنجی شبکه‌بندی میدان محاسباتی و معادله انتقال رسوب** دریاچه سازه کنترل‌کننده مجرای تخلیه رسوب است که در این مطالعه کارکرد آن به صورت جریان آزاد در نظر گرفته

در این مطالعه، بنابراین پارامتر حساس و تعیین‌کننده بر کارایی دریاچه، ارتفاع سطح آب در بالادست دریاچه خواهد بود. برای صحت‌سنجی نتایج مدل، ابعاد سلول‌های شبکه‌بندی فضای محاسباتی باید به گونه‌ای انتخاب شود که نتایج مستقل از ابعاد شبکه‌بندی و با دقت مورد نیاز به دست آید.

در این مطالعه، برای صحت‌سنجی نتایج محاسبه شده از داده‌های تجربی آکوز و همکاران (Akoz et al., 2009) استفاده شده است. در شکل 2a، نمای شماتیکی از دریاچه، شرایط و میدان محاسبات نشان داده شده است. طبق توصیه کیم (Kim, 2007) فاصله طولی در بالادست و پایین‌دست دریاچه برای شروع و پایان محاسبات به ترتیب برابر $20a$ و $6a$ (میزان بازشدگی دریاچه) در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (2b) و (2c) نمایی از میدان محاسبات و شبکه‌بندی در مدل FLOW-3D نشان داده شده است.



شکل ۲- نمای شماتیکی از دریاچه، شرایط و میدان محاسباتی

Fig.2-Schematic view of the sluice gate, boundary condition, computational domain.

جریان بالادست دریچه ایجاد می شود. در حالی که کاهش این نسبت از ۰/۰۴ به ۰/۰۳ به رغم افزایش هزینه محاسبات، بهبود چندانی در افزایش دقت محاسبه تراز سطح آب ایجاد نمی کند. بنابراین، نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه برابر با ۰/۰۴ به عنوان نسبت بهینه در نظر گرفته شد.

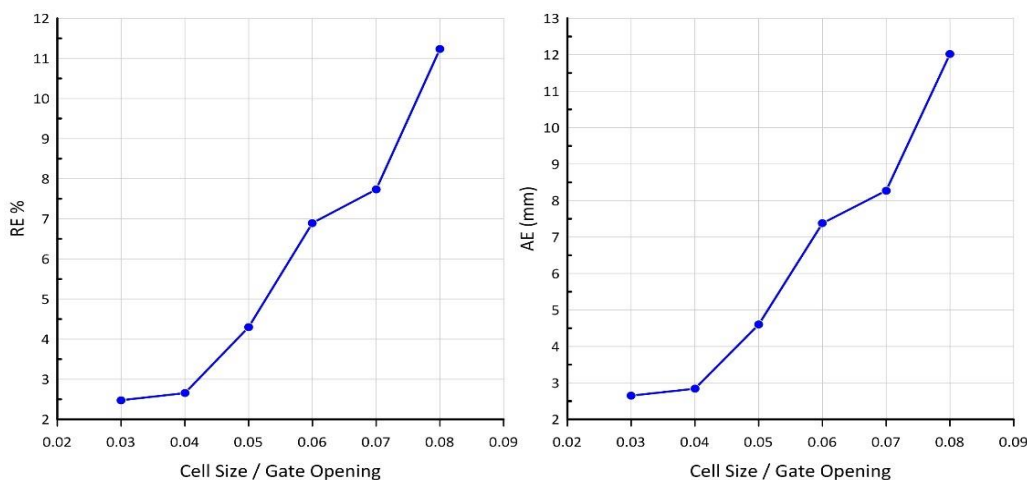
$$AE = |y_{0(exp)} - y_{0(comp)}| \quad (5)$$

$$RE\% = \left| \frac{y_{0(exp)} - y_{0(comp)}}{y_{0(exp)}} \right| \times 100 \quad (6)$$

$y_{0(exp)}$ = عمق بالادست دریچه است که توسط آکوز و همکاران (Akoz et al., 2009) اندازه گیری شده و $y_{0(comp)}$ = عمق بالادست دریچه است که با مدل FLOW-3D محاسبه شده است.

برای ارزیابی تاثیر شبکه بندی بر دقت شبیه سازی جریان عبوری از زیر دریچه، شش نسبت بدون بعد اندازه سلول به بازشدگی دریچه (۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷، ۰/۰۸) بررسی و برای هر یک از نسبت ها، عمق جریان در بالادست دریچه محاسبه شده است. این مقادیر با هدف شناسایی تعادل بین دقت شبیه سازی و هزینه محاسباتی انتخاب شدند.

با استفاده از روابط ۵ و ۶ (Daneshfaraz et al., 2023) میزان خطای مطلق (AE) و خطای نسبی (RE) عمق آب بالادست دریچه محاسبه و نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهند با کاهش نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه از مقدار ۰/۰۸ تا ۰/۰۴ بهبود قابل توجهی در دقت شبیه سازی و به ویژه در پیش بینی عمق



شکل ۳- خطای مطلق و نسبی برآورد ارتفاع سطح آب بالادست دریچه در مقابل نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه

Fig.3- The absolute and relative error of estimating the upstream water level of the sluice gate versus the ratio of the cell size to gate opening.

اختلاف آن ها با داده های مرجع، از روش میانگین مربعات خطا (رابطه ۷) استفاده شد.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_0^2} (u_{comp} - u_{exp})^2 \quad (7)$$

که MSE = میانگین مربعات خطا، u_{comp} = مولفه طولی سرعت جریان محاسبه شده توسط مدل و u_{exp} = مولفه طولی سرعت

به منظور ارزیابی دقیق تر صحت نتایج مدل عددی و حصول اطمینان از تطابق آن با رفتار واقعی جریان، پروفیل های سرعت در بالادست دریچه به طور جامع بررسی شدند. در این راستا، در سه موقعیت مشخص در بالادست دریچه پروفیل های سرعت جریان محاسبه شدند. به منظور سنجش میزان دقت پروفیل های محاسبه شده و تعیین

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

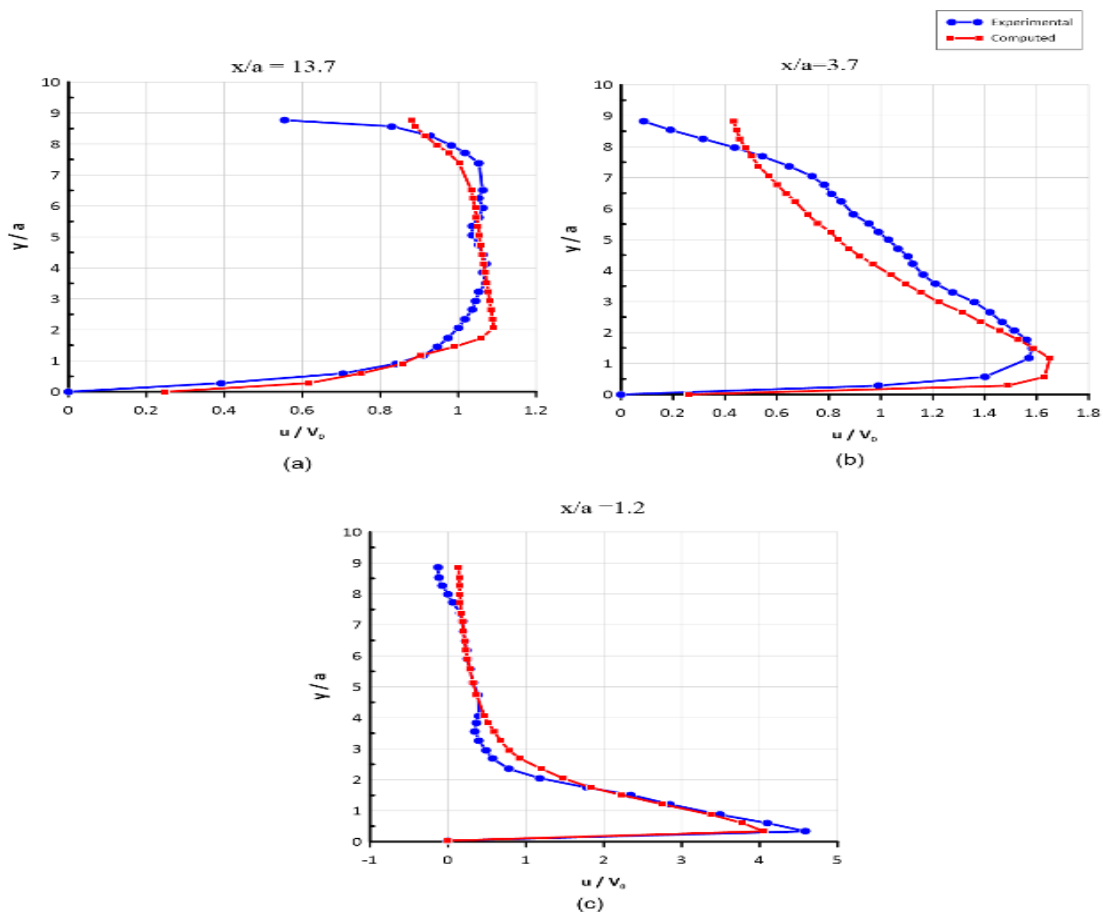
است که اکوز و همکاران (Akoz *et al.*, 2009) آن را اندازه‌گیری کرده‌اند، V_0 = سرعت متوسط جریان در بالادست دریاچه است و n = تعداد نقاطی است که در آن مقدار سرعت اندازه‌گیری و محاسبه شده است. در جدول (۱)، موقعیت نقاط مورد بررسی و مقادیر میانگین مربعات خطا (MSE) محاسبه شده برای هر نقطه ارائه شده است. علاوه بر این، در شکل (۴) پروفیل‌های

محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده مؤلفه طولی سرعت به صورت گرافیکی نمایش داده شده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که پروفیل‌های محاسبه‌شده با استفاده از نسبت اندازه سلول به میزان بازشدگی دریاچه برابر با ۰/۰۴، از دقت مناسبی برخوردار است و تطابق خوبی با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده دارند. این امر نشان‌دهنده توانایی مدل عددی در بازتولید رفتار واقعی جریان در بالادست دریاچه است.

جدول ۱- مقادیر میانگین مربعات خطا مربوط به پروفیل‌های سرعت.

Table 1- the mean squared error for velocity profiles.

MSE	موقعیت position
0.01	1.2a
0.03	3.7a
0.04	13.7a



شکل ۴- مقایسه پروفیل‌های مولفه طولی سرعت محاسبه و اندازه‌گیری شده

Fig.4-Comparison of computed and measured velocity profiles

در مطالعه حاضر، با انتخاب نسبت اندازه سلول به بازشدگی دریچه برابر با ۰/۰۴ روند شستشوی رسوب با استفاده از هر سه رابطه انتقال رسوب بررسی شد.

شکل (۵) مقایسه‌ای بین توپوگرافی بستر مجرای تخلیه رسوب اندازه‌گیری شده توسط غلامی علم (Gholami Alam, 1998) و توپوگرافی‌های محاسبه شده بر اساس روابط انتقال رسوب را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از توپوگرافی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد حداکثر طول حفره آبستنگی ایجاد شده در فلوم آزمایشگاهی حدود ۵۰ سانتی‌متر و عرض آن تقریباً ۵۰ سانتی‌متر است. در این میان، نزدیک‌ترین تطابق میان ابعاد حفره آبستنگی محاسبه شده و داده‌های آزمایشگاهی، مربوط به رابطه میسر-پیتر و مولر است که طول حفره را حدود ۶۰ سانتی‌متر و عرض آن را تقریباً ۵۵ سانتی‌متر پیش‌بینی کرده است.

در جدول (۲) میزان خطای مطلق و نسبی هر یک از روابط در برآورد حجم رسوبات تخلیه شده ارائه شده است. در شکل (۶) روند رسوب‌شویی محاسبه شده با روابط انتقال رسوب در مقابل زمان نشان داده شده است. این نتایج بیانگر آن است که رابطه انتقال رسوب میسر-پیتر و مولر با دقت بیشتری، نسبت به دو رابطه دیگر، روند و میزان شستشوی رسوبات را تخمین می‌زند. این امر نشان‌دهنده کارایی بالای این رابطه در شبیه‌سازی فرآیندهای انتقال رسوب ترسیب شده در بالادست دریچه است.

مدل FLOW-3D در بخش انتقال رسوب امکان استفاده از روابط ۸، ۹ و ۱۰ را فراهم کرده است (Flow Science Inc., 2014).

$$\phi_i = \beta_i (\theta_i - \theta_{cr,i}^*)^{1.5} c_{b,i} \quad (8)$$

$$\phi_i = \beta_i d_{*i}^{-0.3} \left(\frac{\theta_i}{\theta_{cr,i}^*} - 1 \right)^{2.1} c_{b,i} \quad (9)$$

$$\phi_i = \beta_i \theta_i^{0.5} (\theta_i - \theta_{cr,i}^*) c_{b,i} \quad (10)$$

این روابط به ترتیب معادله انتقال رسوب میسر-پیتر و مولر، فان راین، و نیلسن هستند که در آن مقدار β_i معمولاً در رابطه میسر-پیتر و مولر برابر ۸، در رابطه فان راین برابر با ۰/۰۵۳ و در رابطه نیلسن برابر با ۱۲ است. $C_{b,i}$ جز حجمی گونه‌های i در مصالح بستر است. این ضریب در معادله‌های اصلی وجود ندارد اما در معادله‌های بالا برای منظور کردن اثر چندگانگی مصالح بستر آورده شده است. θ_i شدت انتقال بار بستر بدون بعد است و به میزان حجمی انتقال بار بستر در واحد عرض بستگی دارد.

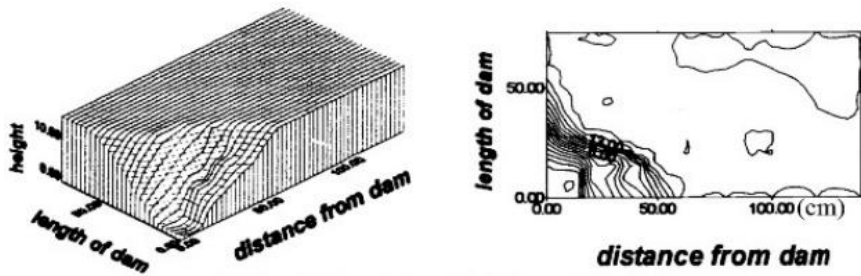
در گام دوم این تحقیق، برای تعیین مناسب‌ترین معادله انتقال رسوب از داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط غلامی علم (Gholami Alam, 1998) استفاده شده است. یکی از گزینه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در این مطالعه، مربوط به دریچه‌ای با بازشدگی ۲۰ سانتی‌متر، عرض ۷ سانتی‌متر و دبی جریان ۲۸ لیتر بر ثانیه است که در آن حجم رسوب تخلیه شده برابر با ۱۱۷۲۴ سانتی‌متر مکعب گزارش شده است.

جدول ۲- میزان خطای نسبی و مطلق معادله‌های انتقال رسوب در برآورد حجم رسوب‌شویی

Table 2- Absolute and relative errors of sediment transport equations in estimating sediment extraction

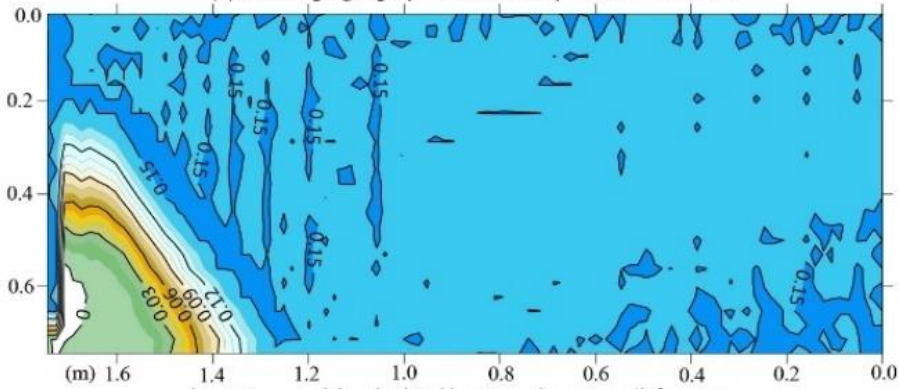
خطای نسبی %	خطای مطلق (cm ³)	حجم رسوب‌شویی محاسبه شده (cm ³)	رسوب‌شویی اندازه‌گیری شده (cm ³)	رابطه
Relative Error	Absolute Error	Com. sediment	Meas. sediment	Equation
0.08	9.77	11733.77	11724	میسر پیتر و مولر
62.64	7343.73	19063.73	11724	نیلسن
114.03	1336.99	25092.99	11724	فان راین

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوبشوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوبشویی در سدهای انحراف آب



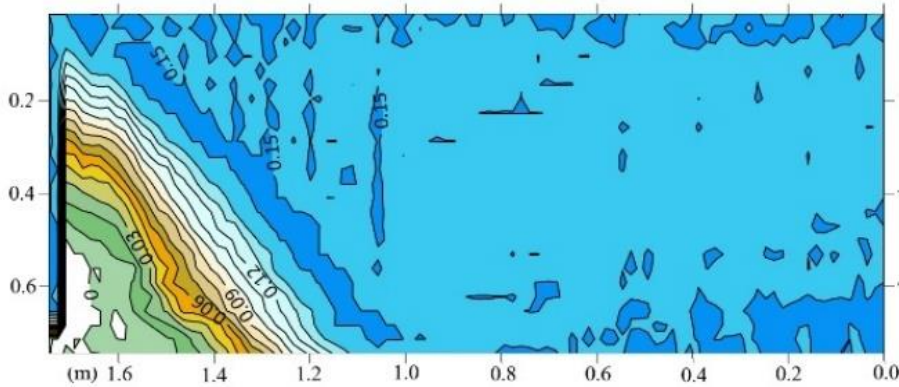
(الف) توپوگرافی بستر اندازه گیری شده توسط غلامی (۱۳۸۷).

(a) Bed topography measured by Gholami Alam



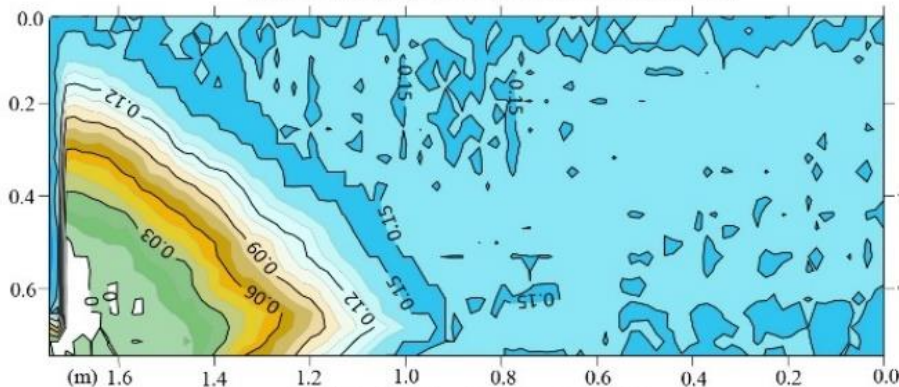
(ب) توپوگرافی بستر محاسبه شده با استفاده از معادله میسر پیتر و مولر

(b) Bed topography computed with Meyer Peter and Muler Eq.



(ج) توپوگرافی بستر محاسبه شده با استفاده از معادله نیلسن.

(c) Bed topography computed with Nielson Eq.

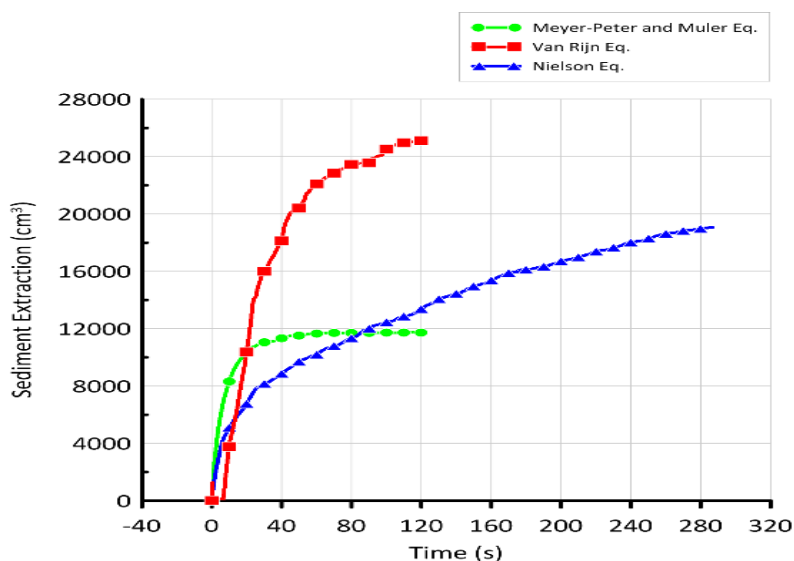


(د) توپوگرافی بستر محاسبه شده با استفاده از فان راین.

(d) Bed topography computed with Van Rijn Eq.

شکل ۵- توپوگرافی بستر محاسبه شده با روابط انتقال رسوب و اندازه‌گیری شده توسط غلامی علم (Gholami Alam, 1998).

Fig.5- Bed topography, computed with sediment transport equations and measured by Gholami Alam



شکل ۶- مقایسه فرآیند تخلیه رسوب حاصل از روابط انتقال رسوب

Fig.6- Comparison of sediment extraction process by sediment transport equations

هر دو دریچه کاملاً باز بوده و دبی $60 \text{ m}^3/\text{s}$ در مجرای تخلیه رسوب جریان داشته است. با توجه به کارکرد معمول سدهای انحراف آب در میانه عمر مفید آنها، فرض شده است که سد انحراف آب در دوره بهره‌برداری تا تاج سد با رسوبات کاملاً پر شده است. همچنین محدوده دهانه آبگیر تا تراز آستانه و کف آبگیر یعنی تا ارتفاع $1/8$ متر مملو از رسوبات است.

برای انتخاب عرض مجرای تخلیه رسوب، معیارهای مختلفی ارائه شده است که سه معیار توصیه شده عبارت‌اند از: بیشتر از عرض دهانه آبگیر باشد، 10 تا 15 درصد طول تاج سرریز سد انحرافی باشد (Zahiri & Jafari, 2020) و قادر به عبور 10 تا 20 درصد سیلاب طرح باشد (IS6966-1, 1996).

معیارهای بیان شده، در موقعیت‌های مختلف احداث سد انحراف آب دامنه‌ای وسیع از اعداد را پیش روی طراح قرار می‌دهد و موجب سردرگمی و بعضاً انتخاب نادرست می‌شود. در این مطالعه، به دلایل زیر عرض مجرای رسوب‌شوی به صورت ضریبی از عرض کانال انتقال آب آبگیر در نظر گرفته شد و مورد بررسی قرار گرفته است.

عرض کانال انتقال آب با ملاحظات فنی، اقتصادی و اجرایی بر اساس اصول دقیق هیدرولیکی و شرایط مناسب

مشخصات فیزیکی مجرای تخلیه رسوب

طبق معمول برای کنترل و تخلیه رسوبات انباشته‌شده در مقابل دهانه آبگیر، مجرای تخلیه رسوب مجهز به دو دریچه طراحی و اجرا می‌شود. اداره احیای ایالات متحده (USBR) توصیه کرده است که دبی عبوری از مجرای تخلیه رسوب، دو برابر دبی سامانه انحراف آب باشد (Martin and Carlson, 1953). انتخاب دبی دو برابر دبی انحراف به این دلیل است که تخلیه رسوب معمولاً نیاز به جریان سریع‌تر و قوی‌تر دارد تا بتواند تمامی ذرات را به پایین دست منتقل کند. در این حالت، جریان از انرژی کافی برخوردار است که از ته‌نشینی رسوبات در مجرای تخلیه جلوگیری می‌کند. این معیار همچنین باعث می‌شود با تغییرات دبی ورودی به سد، عملکرد مجرای تخلیه ثابت بماند و نیازی به تنظیمات پیچیده نباشد.

در این مطالعه، دبی سامانه انحراف آب برابر با $30 \text{ m}^3/\text{s}$ فرض شده است و این دبی، پروژه انحراف را در زمره پروژه‌های متوسط مقیاس قرار می‌دهد. بدین ترتیب دبی مجرای تخلیه رسوب برابر با $60 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شد. بنابراین، هر یک از دریچه‌های مجرای تخلیه رسوب باید ظرفیت عبور $30 \text{ m}^3/\text{s}$ را داشته باشد. در کلیه شبیه‌سازی‌ها

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

شرایط مرزی در بالادست سد انحراف آب به صورت دبی و برابر با $200 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در پایین دست سرریز و دریچه به صورت جریان خروجی (outflow) است، دبی خروجی از سرریز برابر $140 \text{ m}^3/\text{s}$ و دبی خروجی در پایین دست مجرای تخلیه رسوب برابر با $60 \text{ m}^3/\text{s}$ است. شرط مرزی در سطح آب برابر با $P=0$ است. با توجه به مطالب گفته شده، مقادیر پارامترهای طراحی به شرح جدول (۳) در نظر گرفته شد.

در شکل (۷)، نمای شماتیکی از سیستم تخلیه رسوب و اجزای سد انحراف آب نشان داده شده است. شکل (a) نمای کلی از رودخانه، دیوار جداکننده، سرریز و مجرای تخلیه رسوب را نمایش می‌دهد. در شکل (b) شرایط مرزی و ضخامت اولیه رسوبات در بالادست دریچه‌ها مشاهده می‌شود. شکل (c) نمایی از سرریز و انباشت رسوبات در بالادست آن و شکل (d) نمای دریچه‌های تخلیه رسوب را نشان می‌دهد.

جریان طراحی می‌شود تا جریان آب در محدوده‌ای از سرعت مناسب قرار گیرد که از نظر انتقال دبی و رسوبات به طور همزمان قابل قبول باشد. به همین دلیل، این عرض چندان تابع موقعیت مکانی پروژه نیست و از مکانی به مکان دیگر با ظرفیت یکسان تغییر قابل توجه ندارد. بر خلاف آن، عرض سد انحرافی بسته به شرایط توپوگرافی، هندسه و هیدرولوژی رودخانه می‌تواند بسیار متفاوت باشد.

انتخاب عرض مجرای تخلیه بر اساس ضریبی از عرض کانال آبگیر، کنترل بیشتری بر نسبت دبی به عرض مجرای تخلیه می‌دهد. این امر در شرایطی اهمیت بیشتری دارد که دبی عبوری محدود باشد، زیرا با محدودتر کردن عرض مجرای تخلیه می‌توان سرعت جریان و نیروی برشی لازم را برای جابه‌جایی رسوبات حفظ کرد. در مقابل، استفاده از عرض سد انحرافی به عنوان معیار، ممکن است در شرایطی که عرض سد بسیار بیشتر از عرض کانال انتقال آب باشد، منجر به جریان‌های کند و ناپایدار در مجرای تخلیه گردد و در نتیجه راندمان رسوب‌شویی کاهش یابد.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای طراحی مجرای تخلیه رسوب

Table 3-The values of the design parameters of the sluiceway

مقدار Value	واحد Unit	پارامتر Parameter
35	m	عرض رودخانه
5.5	m	ارتفاع سد انحرافی
200	m^3/s	دبی سیلاب
60	m^3/s	دبی مجرای تخلیه رسوب
11.58	m	طول دیوار جداکننده
7.5	m	ارتفاع دیوار جداکننده
6.0	m	عرض کانال آبگیر
1.0	mm	قطر متوسط ذرات رسوب

دارند. برای تعیین پارامترهای گزینه‌های مختلف، ابتدا عرض مجرای رسوب‌شوی به صورت ضریبی از عرض کانال آبگیر انتخاب شده است. پس از آن با تعیین مقادیر مناسب تکیه‌گاه‌ها (P) و (Lg)، عرض هر یک از دریچه‌ها (b) تعیین شده است. سپس با مشخص بودن دبی دریچه‌ها و تراز سطح

برای ارزیابی کارایی سیستم تخلیه رسوب گزینه‌های مختلفی طبق جدول (۴) در نظر گرفته شده است. در این گزینه‌ها شش عرض متفاوت برای مجرای تخلیه (W_s) در محدوده 0.58 تا 1.83 برابر عرض کانال آبگیر (W_i) انتخاب شده است، که در محدوده توصیه شده برای طراحی قرار

عرض دریچه ها و نیز کاهش میزان بازشدگی دریچه ها می شود. بنابراین، افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب موجب کاهش نسبت بازشدگی به عرض دریچه می شود.

$$a = \frac{Q}{0.891b\sqrt{gh} \left(\frac{h-a}{h+15a} \right)^{0.0649}} \quad (11)$$

آب بالادست (h) با استفاده از رابطه ۱۱ بازشدگی دریچه (a) محاسبه شده است (Swamee, 1992). برای حفظ یک دبی عبوری ثابت در مجرای تخلیه رسوب (۶۰ m³/s) با رعایت ملاحظات سازه ای مربوط به تکیه گاه ها و فاصله بین دو دریچه، افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب، منجر به افزایش

جدول ۴- گزینه های مشخصات دریچه و مجرای تخلیه رسوب.

Table 4- Options for specifications of the sluice gate and sluiceway

W_s/W_i	a/b	L_g/W_i	W_s/W_i	a/b	L_g/W_i
0.58	1.15	0.000	1.30	0.50	0.200
1.00	0.60	0.043	1.30	0.60	0.277
1.00	0.70	0.050	1.30	0.70	0.350
1.00	0.80	0.100	1.50	0.32	0.150
1.00	0.90	0.147	1.50	0.40	0.267
1.15	0.50	0.050	1.50	0.50	0.400
1.15	0.60	0.127	1.50	0.60	0.477
1.15	0.70	0.200	1.83	0.20	0.167
1.30	0.32	0.050	1.83	0.40	0.600
1.30	0.40	0.067	1.83	0.50	0.733
			1.83	0.60	0.810

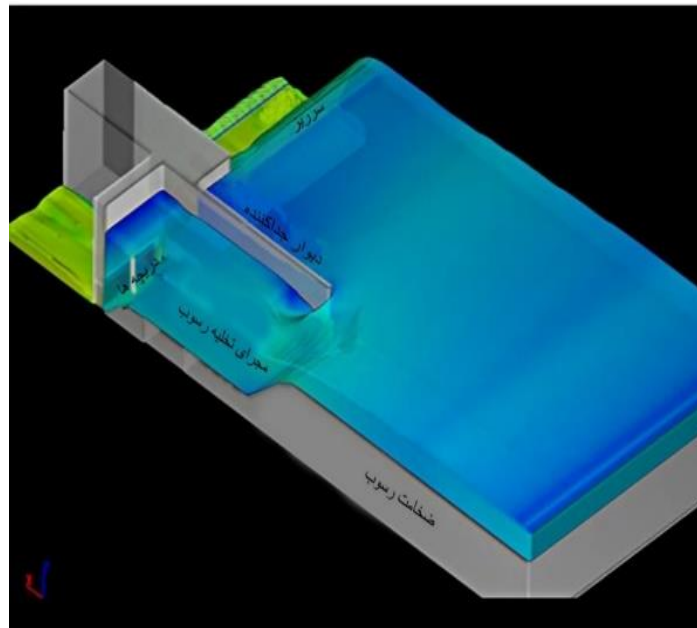
نتایج

اثر عرض مجرای تخلیه رسوب

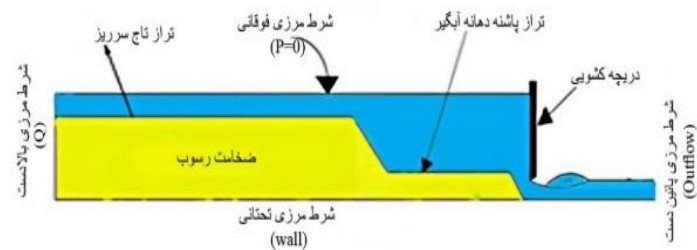
تخلیه رسوب به عرض کانال آبیگر (W_s/W_i) نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد برای یک دبی مشخص، با افزایش عرض مجرا، مقدار عدد فرود کاهش پیدا می کند. با توجه به اینکه مجرای تخلیه رسوب معمولاً در شرایط سیلابی وارد عمل می شود بنابراین با افزایش عرض مجرا، سرعت عبور جریان از این محدوده کاهش می یابد. تاثیر عرض های مختلف مجرای تخلیه رسوب بر حجم شستشوی رسوب ترسیب شده در مجرای تخلیه رسوب در دوره بهره برداری نرمال، بررسی و نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. برای عرض ها و نسبت های a/b مختلف، مدت شبیه سازی ها متفاوت است. بنابراین در شکل (۹)، نتایج مربوط به مناسب ترین نسبت a/b و حداقل مدت شبیه سازی برابر ۱۸۰۰ ثانیه نشان داده شده است.

در شبیه سازی های ابتدایی، مشخص شد که شرایط جریان به لحاظ هیدرودینامیکی پس از مدتی در حدود ۸ دقیقه پایدار می شود و بنابراین بازه زمانی شبیه سازی ها به صورت ده دقیقه ای انتخاب شده است. پس از آن، نتایج با یکدیگر مقایسه شدند و در صورت نزدیکی مقادیر به دست آمده، مدت شبیه سازی افزایش داده شده است تا اینکه بتوان تمایز نتایج را به درستی نشان داد. بدین ترتیب، در هزینه محاسبات و زمان اجرای گزینه ها صرفه جویی شده است. در شکل (۸) مقادیر عدد فرود $Fr = \frac{Q}{W_s y \sqrt{g y}}$ که در آن W_s عرض مجرای تخلیه رسوب، y فاصله تراز سطح آب تا کف دریچه مجرای تخلیه رسوب، Q دبی عبوری از مجرای تخلیه رسوب و g شتاب ثقل است) در مقابل نسبت عرض مجرای

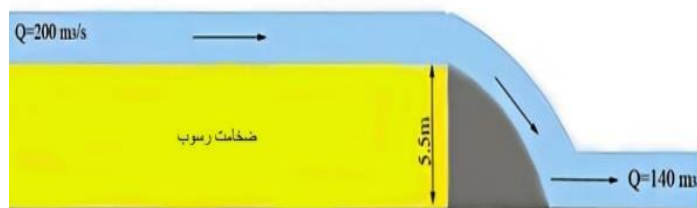
ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب



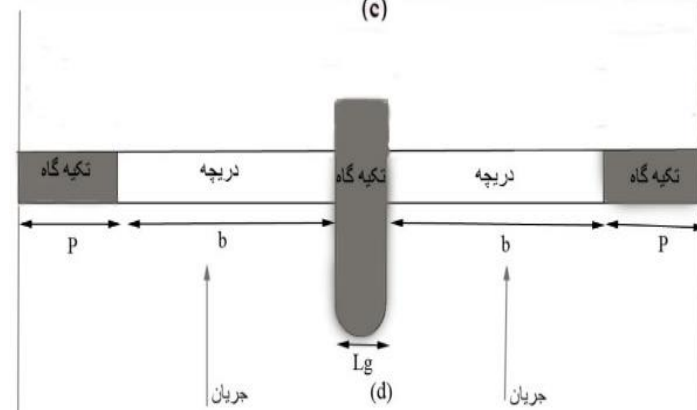
(a)



(b)

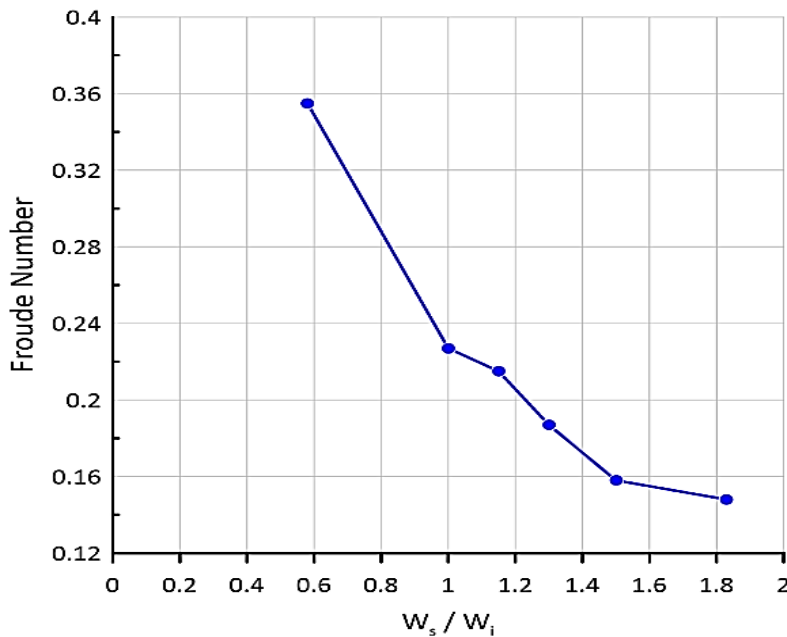


(c)



شکل ۷- نمای شماتیکی از رودخانه، سد انحراف آب، شرایط مرزی و اولیه جریان و دریچه‌های رسوب‌شوی

Fig. 7-Schematic view of the river, diversion dam, boundary and initial conditions, and sediment flushing gates



شکل ۸- رابطه عدد فرود با نسبت عرض مجرای تخلیه رسوب به عرض کانال آبگیر

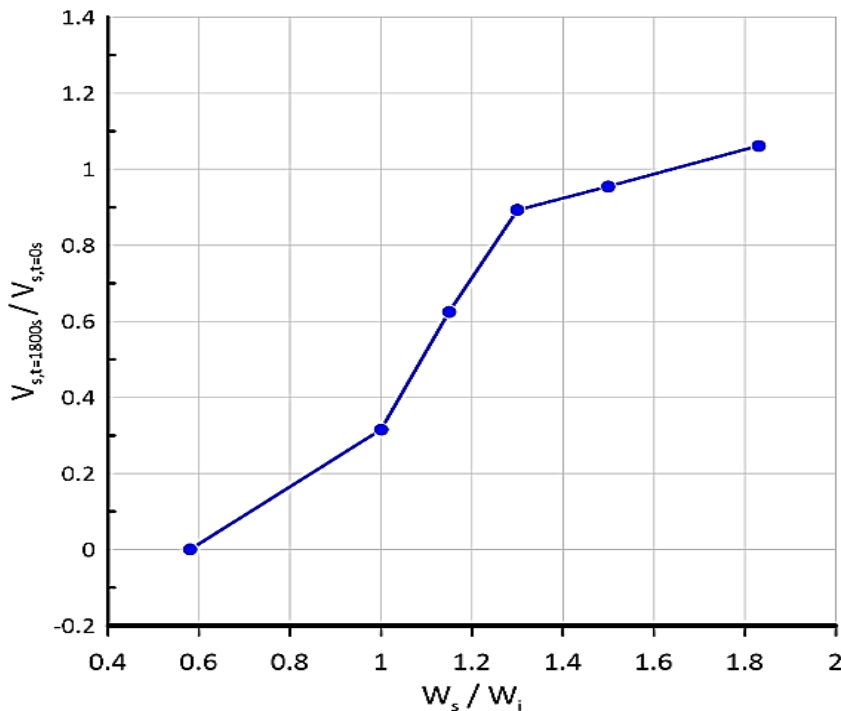
Fig. 8- Dependency of the Froude number and the ratio of the sluiceway width to the intake channel width

شکل (۹) نشان می‌دهد که در عرض $W_s=0.58W_i$ ، این وضعیت ناکارآمد است، منجر به تجمع رسوبات در نزدیکی دریچه می‌شود، و می‌تواند در آینده موجب کاهش کارایی و حتی مسدود شدن مجرا و ورود بیشتر رسوبات به دهانه آبگیر شود. از این‌رو، این وضعیت نیز با هدف‌های طراحی و کارایی سامانه تناسب ندارد. فرآیند رسوب‌شویی در دو عرض مجرای $W_s=1.3W_i$ و $W_s=1.5W_i$ به‌طور جزئی رخ داده است و تامین‌کننده هدف طراحی مجرای تخلیه رسوب نیست. دو عرض مجرای $W_s=1.0W_i$ و $W_s=1.15W_i$ منجر به رسوب‌شویی کامل شده است بطوری که راندمان تخلیه رسوبات تا حدود ۶۰ درصد افزایش یافته است. بازه $1.0 \leq \frac{W_s}{W_i} < 1.3$ نشان دهنده حالتی مطلوب برای رسوب‌شویی است. انتخاب عرض مجرا در این محدوده منجر به بهبود تخلیه رسوب به شکل کنترل‌شده و متناسب با جریان عبوری می‌شود و شرایط جریان هیدرودینامیکی در تعادل قرار دارد. این بخش از نمودار به عنوان حالت ایده‌آل برای هدف‌های طراحی در نظر گرفته می‌شود، زیرا رسوب با کارایی مناسب تخلیه می‌شود و از مشکلات ناشی از گسترش فرسایش به بالادست یا انباشت رسوب جلوگیری می‌کند.

نسبت حجم رسوب موجود در زمان $t=1800s$ به حجم اولیه رسوب برابر صفر است بنابراین، فرآیند رسوب‌شویی از حالت موضعی خارج می‌شود و به سمت بالادست پیشروی می‌کند. این وضعیت نشان می‌دهد که مجرا به‌شدت در حال تخلیه رسوب است، به‌گونه‌ای که ممکن است فرسایش رسوبات به سمت سازه‌های بالادست پیشروی کند و موجب ناپایداری و ایجاد آسیب به سازه‌های حفاظتی آبگیر و ساحل رودخانه شود. از نظر طراحی، این وضعیت نامطلوب و با هدف‌های پایدارسازی ناسازگار است. این امر در شرایط آبگیری همزمان با عملیات رسوب‌شویی، موجب انتقال و ورود بیشتر رسوب به دهانه آبگیر نیز می‌شود که مطلوب نیست و باید از آن پرهیز کرد. در عرض $W_s=1.83W_i$ ، این نسبت، بزرگ‌تر از یک است که نشان دهنده شروع فرآیند رسوب‌گذاری و افزایش حجم رسوبات در مجرای تخلیه رسوب است. در این حالت، به‌دلیل عرض زیاد مجرا، جریان انرژی کافی برای تخلیه رسوب ندارد و به همین دلیل ذرات رسوب به‌صورت متمرکز در این محدوده انباشته می‌شوند.

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریاچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

نکته دیگری که در ارتباط با عرض‌های مورد بررسی باید در اینجا اشاره شود این است که معیارهای مختلفی برای عرض مجرا توصیه می‌شود. این معیارها عبارت‌اند از ۱۱ درصد طول تاج سرریز که معادل $W_s=0.58W_i$ می‌شود، و یا متناسب با عرض دهانه آبگیر که معادل $W_s=1.83W_i$ می‌شود. همان‌طور که از نتایج بالا قابل مشاهده است هر دو عرض‌های به دست آمده از معیارهای توصیه شده هدف نهایی احداث مجرای تخلیه رسوب را برآورده نمی‌کنند.



شکل ۹- تاثیر نسبت عرض مجرای تخلیه رسوب به عرض کانال آبگیر بر حجم رسوب‌شویی

Fig. 9- Effect of the ratio of the width of the sluiceway to the width of the intake channel on sediment flushing volume

اثر نسبت باز شدگی به عرض دریاچه (a/b) بر حجم رسوب‌شویی

برای پنج مقدار مختلف عرض مجرای رسوب‌شوی، مقادیر مختلف نسبت بازشدگی به عرض دریاچه و اثر آن بر حجم رسوب‌شویی بررسی شده است. دلیل بررسی این گزینه‌ها آن است که در عرض‌های مختلف مجرا، شرایط هیدرودینامیک جریان متفاوت است و انتخاب نسبت مناسب a/b می‌تواند به بهبود رسوب‌شویی، جلوگیری از رسوبگذاری، و بهینه‌سازی عملکرد سیستم کمک کند. به این ترتیب، با ارزیابی نسبت‌های مختلف می‌توان ترکیب مناسبی از ابعاد دریاچه و مجرا را برای دستیابی به جریان پایدار و تخلیه مؤثر رسوب پیدا کرد که همزمان از فرسایش و تجمع بیش از حد رسوبات جلوگیری کند. در کلیه این شبیه‌سازی‌ها از دو دریاچه فعال با نسبت a/b یکسان در مجاری تخلیه رسوب استفاده شده است.

ابتدا گزینه‌های معرفی شده در (جدول ۴) به مدت ۶۰۰ ثانیه شبیه‌سازی شده‌اند. پس از آن، نتایج به دست آمده برای هر عرض مجرا (جدول ۵) بر اساس غلظت رسوب خروجی و حجم پاک‌سازی رسوب ارزیابی شده و شبیه‌سازی مناسب‌ترین نسبت‌ها ادامه یافته است.

جدول ۵- میزان ورود و خروج رسوبات از مجرای تخلیه رسوب در مدت ۶۰۰ ثانیه

Table 5- Sediment influx and efflux from the sediment discharge channel over a duration of 600 seconds

غلظت رسوب خروجی (kg/m ³)	حجم پاک سازی رسوب (m ³)	حجم رسوب خروجی (m ³)	حجم رسوب ورودی (m ³)	a/b	W _s /W _i
Sediment efflux concentration	Volume of sediment flushing	Volume of sediment efflux	Volume of sediment influx		
12.50	57.81	260.20	202.39	0.6	
14.55	67.00	309.60	242.60	0.7	1.00
17.83	102.43	337.00	234.57	0.8	
15.52	83.90	325.83	242.74	0.9	
13.61	57.46	292.32	234.86	0.5	
12.33	43.98	250.49	206.51	0.6	1.15
10.67	37.87	231.61	193.74	0.7	
10.32	14.35	210.20	195.85	0.32	
10.20	14.12	218.76	204.64	0.4	
11.24	11.57	238.83	227.26	0.5	1.3
9.02	-1.78	186.49	188.27	0.6	
9.85	-4.78	204.24	209.02	0.7	
8.32	14.96	163.15	148.19	0.32	
8.25	4.77	172.73	167.96	0.4	1.5
8.03	6.17	173.21	167.04	0.5	
7.71	7.38	153.10	145.72	0.6	
5.51	-12.83	119.55	132.38	0.2	
4.95	-43.09	101.38	144.47	0.4	1.83
5.42	-50.64	120.27	170.91	0.5	
4.75	-7.01	97.92	104.93	0.6	

در جدول (۶) نتایج نهایی مربوط به هر عرض و را به گونه ای تعریف کرد که بیشترین مقدار رسوب شویی رخ نسبت های a/b نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهد دهد. نتایج همچنین نشان داد در اکثر عرض ها نسبت که برای هر عرض مجرای تخلیه رسوب می توان نسبت a/b=0.5 مؤثرترین نسبت برای رسوب شویی است.

جدول ۶- نتایج گام آخر شبیه سازی مربوط به هر عرض مجرای تخلیه رسوب

Table 6- Results of the final step of the simulation related to each width of the sluiceway

غلظت رسوب خروجی (kg/m ³)	حجم پاک سازی رسوب (m ³)	حجم رسوب خروجی (m ³)	حجم رسوب ورودی (m ³)	زمان (s)	a/b	W _s /W _i
Sediment efflux concentration	Volume of sediment flushing	Volume of sediment efflux	Volume of sediment influx	Time		
11.06	124.96	713.63	588.67	1800	0.8	1.00
9.94	115.72	636.49	520.77	1800	0.9	
9.23	78.59	599.35	520.76	1800	0.5	1.15
8.62	61.97	530.63	468.66	1800	0.6	
6.79	19.23	440.69	421.46	1800	0.4	1.30
7.48	25.50	483.74	458.24	1800	0.5	
5.13	9.24	404.93	395.69	2400	0.32	
4.97	13.96	427.21	413.25	2400	0.4	1.50
4.96	4.69	430.23	425.54	2400	0.5	
3.85	-24.71	421.49	446.20	3000	0.2	1.83
3.72	-20.62	417.23	437.85	3000	0.5	

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

اثر نسبت a/b بر روی دامنه رسوب‌شویی

ضخامت متوسط رسوب به ارتفاع آستانه آبخیز استفاده شده است. دامنه موثر تا نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که این نسبت کمتر از یک باشد. در شکل (۱۰)، دامنه موثر ایجاد شده توسط بهترین گزینه‌های a/b در هر عرض مجرا نشان داده شده است.

این شکل نشان می‌دهد که در عرض $W_s=1.0W_i$ ، کل محدوده مجرای تخلیه رسوب تحت تاثیر فرآیند رسوب‌شویی قرار می‌گیرد و نسبت $a/b=0.8$ در برداشت رسوب از ۶۰ درصد ابتدایی طول مجرای تخلیه رسوب موثرتر عمل کرده است. به تدریج با افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب، دامنه موثر رسوب‌شویی نیز کاهش پیدا کرده است به طوری که در عرض $W_s=1.5W_i$ این دامنه به ۴۰ درصد انتهایی طول مجرای تخلیه رسوب محدود شده است.

توپوگرافی‌های مجرای تخلیه رسوب

در شکل (۱۱)، توپوگرافی بستر در محدوده مجرای تخلیه رسوب مربوط به مقادیر مختلف عرض مجرا پس از عبور سیلاب به مدت ۳۰ دقیقه نشان داده شده است. عرض مجرا از شکل a تا f به ترتیب افزایش یافته است. ترازهای بستر نشان می‌دهد که در مجرای (a)، فرآیند رسوب‌شویی به سمت بالادست مجرای تخلیه رسوب انتقال یافته و از حالت موضعی خارج شده است. در مجرای (b)، فاصله‌ای به طول ۵ متر از انتهای مجرای تخلیه رسوب و در مجاورت دریچه‌های این مجرا کاملاً پاک‌سازی شده است. در مجرای (c)، طول پاک‌سازی کامل رسوب کاهش یافته و به ۴ متر رسیده است. به همین ترتیب طول پاک‌سازی کامل رسوب از مجاورت دریچه‌های مجرای تخلیه رسوب به تدریج کاهش می‌یابد و در مجرای (f) به کمترین مقدار در حدود ۲/۵ متر می‌رسد.

این موضوع نشان می‌دهد افزایش عرض مجرای تخلیه رسوب نه تنها منجر به کاهش دامنه رسوب‌شویی در مجرای تخلیه رسوب می‌شود بلکه طول پاک‌سازی کامل در مجاورت دریچه‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

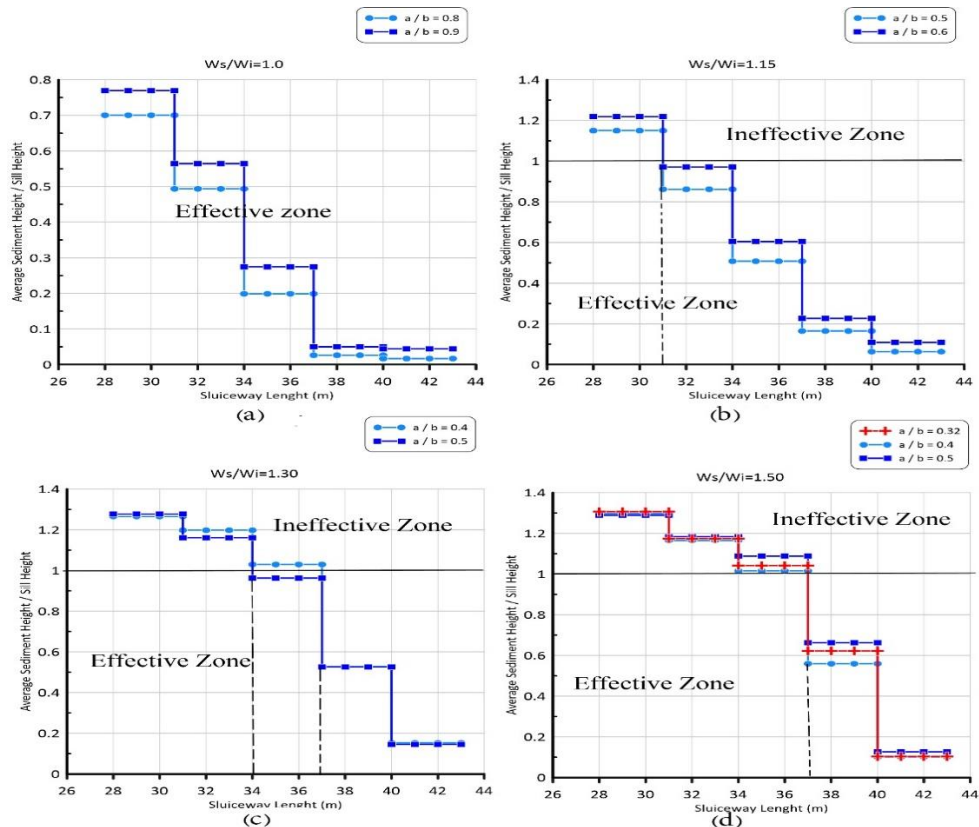
دریچه‌های مجرای تخلیه رسوب در پایین دست دهانه آبخیز قرار دارند. بنابراین، دامنه موثر رسوب‌شویی ایجاد شده توسط این دریچه‌ها یکی از عواملی است که در شرایط بهره‌برداری نرمال بر میزان ورود رسوب به دهانه آبخیز تاثیر تعیین کننده‌ای دارد.

دامنه موثر رسوب‌شویی به فاصله‌ای اطلاق می‌شود که طی آن، رسوبات در طول مجرای تخلیه رسوب جابه‌جا می‌شوند. این دامنه معیاری برای سنجش کارایی فرآیند شستشوی رسوب در برداشت و انتقال رسوبات به شمار می‌آید. دامنه موثر نه تنها به سرعت و دبی جریان، بلکه به ویژگی‌های فیزیکی رسوبات مانند اندازه و چگالی ذرات بستگی دارد. به طور کلی، دامنه موثر بیشتر نشان‌دهنده توان جریان در جابه‌جایی کامل تر رسوبات و جلوگیری از ته‌نشینی آن‌ها در طول مسیر است و از این رو به عنوان شاخص کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های رسوب‌شویی و طراحی مناسب مجرای تخلیه رسوب کاربرد دارد.

دامنه موثر رسوب‌شویی تابعی از شرایط هیدرودینامیکی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه است. انتخاب صحیح نسبت a/b و تنظیم عدد فرود در محدوده مناسب می‌تواند شرایط لازم را برای انتقال رسوبات از مسافت‌های دورتر و بهبود عملکرد شستشوی رسوبات را فراهم کند.

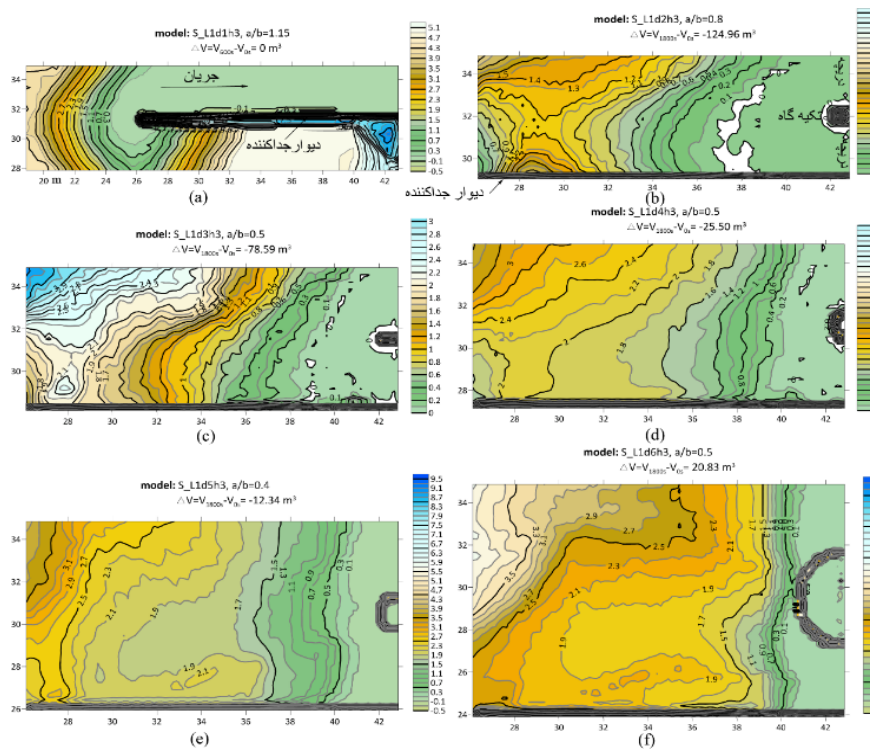
برای محاسبه دامنه رسوب‌شویی، طول مجرای تخلیه رسوب به پنج قسمت مساوی تقسیم و پس از آن ضخامت متوسط رسوب در هر قسمت از تقسیم حجم رسوب به مساحت سطح مجرا محاسبه شده است.

در فرآیند رسوب‌شویی، هدف کاهش تراز رسوبات در مجرای تخلیه رسوب به ترازهایی پایین‌تر از آستانه آبخیز است تا اینکه در دوره بهره‌برداری نرمال از آبخیز امکان ته‌نشینی بیشتر رسوب در مجرای تخلیه رسوب و کاهش ورود رسوب به دهانه آبخیز فراهم گردد. بنابراین، در این مطالعه برای ارزیابی دامنه موثر رسوب‌شویی از نسبت



شکل ۱۰ - دامنه موثر رسوب شویی ایجاد شده توسط نسبت های مختلف a/b در عرض های مختلف.

Fig.10-The effective sediment flushing range created by various a/b ratios at different sluiceway widths



شکل ۱۱ - توپوگرافی بستر در مجرای تخلیه رسوب در زمان $t=1800$ s.

Fig. 11-Topography of the bed in the sluiceway at time $t=1800$ seconds

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

جدول ۷- مقادیر متوسط عدد فرود برای نسبت‌های مختلف a/b
Table 7- Average values of the Froud Number for different ratio a/b

انحراف معیار Standard deviation	عدد فرود Froud Number	نسبت a/b Ratio a/b	عرض مجرای تخلیه رسوب Width of sluiceway
0.110	0.355	1.15	Ws/Wi = 0.58
0.090	0.238	0.6	Ws/Wi = 1.00
0.092	0.276	0.7	
0.106	0.290	0.8	
0.101	0.281	0.9	
0.095	0.224	0.5	Ws/Wi = 1.15
0.098	0.222	0.6	
0.096	0.221	0.7	
0.084	0.202	0.32	Ws/Wi = 1.30
0.086	0.207	0.4	
0.084	0.209	0.5	
0.079	0.192	0.6	
0.083	0.195	0.7	
0.069	0.163	0.32	Ws/Wi = 1.50
0.071	0.162	0.4	
0.07	0.161	0.5	
0.072	0.158	0.6	
0.073	0.153	0.2	Ws/Wi = 1.83
0.070	0.151	0.4	
0.071	0.154	0.5	
0.063	0.148	0.6	

اثر نسبت a/b بر عدد فرود

همان‌طور که از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، برای عرض‌های بزرگ‌تر مانند $W_s/W_i=1.83$ ، عدد فرود در سطح پایین‌تری باقی می‌ماند (حدود ۰/۱۷ تا ۰/۱۸)، که بیانگر جریان آرام‌تر و تلاطم کمتر در مقایسه با عرض‌های کوچک‌تر است. این وضعیت به دلیل ایجاد رسوبگذاری بیشتر در مجاری با عرض‌های بزرگ رخ می‌دهد و نشان می‌دهد که در چنین حالتی بازدهی شستشوی رسوب کاهش می‌یابد.

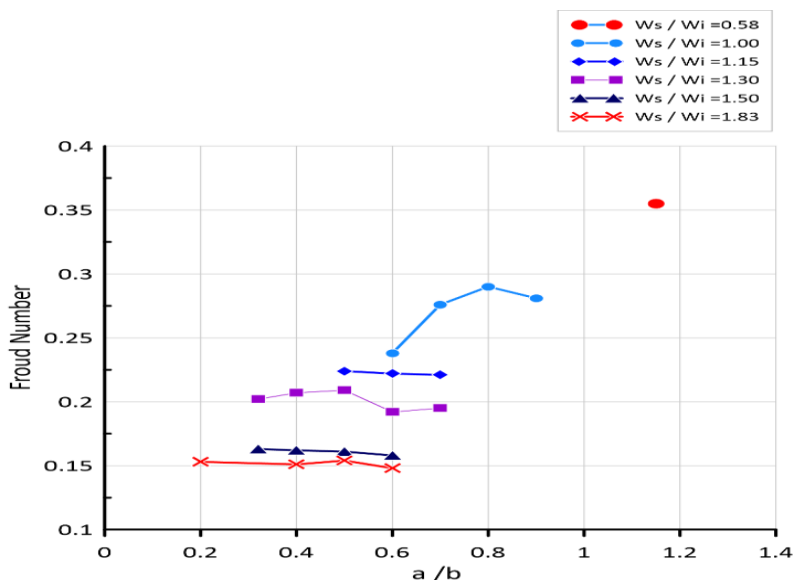
برای نسبت $W_s/W_i=1.0$ با افزایش نسبت a/b مشاهده می‌شود که عدد فرود افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده جریان با انرژی بالاتر و احتمال شستشوی بهتر رسوبات است. جریان در این حالت قوی‌تر و تلاطمی‌تر است و می‌تواند به شستشوی رسوبات از مجرای تخلیه رسوب کمک کند.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که با کنترل مناسب نسبت a/b می‌توان عدد فرود را در سطح مطلوبی نگه داشت

نسبت بازشدگی به عرض دریچه می‌تواند رفتار هیدرودینامیکی جریان را در محدوده مجرای تخلیه رسوب تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، عدد فرود جریان در مجرای تخلیه رسوب برای یک دبی عبوری ثابت، علاوه بر عرض مجرا تحت تاثیر این نسبت نیز قرار می‌گیرد. در جدول (۷) مقادیر متوسط و انحراف معیار عدد فرود در مجرای تخلیه رسوب در محدوده‌ای به طول ۸ متر قبل از دریچه‌های این مجرا ارائه و در شکل (۱۲) تغییرات عدد فرود با عرض مجرا و نسبت a/b نشان داده شده است.

تغییر در این نسبت می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و عدد فرود داشته باشد. از آنجا که عدد فرود به نوع و شدت جریان مربوط است، این نسبت می‌تواند به‌طور مستقیم بر رفتار جریان و انتقال انرژی تاثیر بگذارد.

که شستشوی مؤثر رسوبات را تضمین کند و نیز از تلاطم بیش از حد جلوگیری شود. نسبت های a/b که عدد فرود را در محدوده ۰/۲ تا ۰/۲۳ نگه می دارند، معمولاً عملکرد بهتری برای شستشوی رسوب نشان می دهند، زیرا جریان دارای انرژی کافی برای جابه جایی رسوب است و از تجمع آن در بالادست جلوگیری می کند.



شکل ۱۲- رابطه بین عدد فرود و نسبت a/b .

Fig. 12- Dependency of the Froude number and the ratio a/b .

می دهد که چگونه تغییر عرض مجرا می تواند بر روند رسوب شویی تاثیر بگذارد. عرض های ناکارآمد شامل مقاطعی هستند که راندمان تخلیه رسوب در آن ها پایین است و اغلب باعث ته نشینی بیشتر رسوب می شوند یا اینکه فرآیند رسوب شویی از حالت موضعی خارج شده و به بالادست انتقال یافته است. عرض های موثر، مقطعی با عملکرد مناسب در رسوب شویی هستند و دارای سرعت جریان کافی و الگوی مناسبی برای تخلیه رسوب هستند. دسته سوم، عرض های کم تاثیر را در بر می گیرد که اگرچه نسبت به عرض های ناکارآمد عملکردشان بهتر است، اما از کارایی عرض های موثر فاصله دارند.

نتایج تحقیق نشان داد چنانچه عرض مجرای تخلیه در محدوده $1 \leq \frac{W_s}{W_i} \leq 1.15$ (که W_i عرض کانال آبیگر است) قرار گیرد بیشترین میزان رسوب شویی رخ می دهد. بررسی ارتباط بین اعداد فرود و فرآیند رسوب شویی نشان داد که در اعداد فرود بزرگ تر از ۰/۳ احتمال خروج فرآیند رسوب شویی

در کل، این نمودار تأکید می کند که تنظیم مناسب نسبت a/b برای هر عرض خاص مجرای تخلیه می تواند به شستشوی بهینه رسوبات و حفظ بازده سیستم کمک کند.

بحث و نتیجه گیری

با توجه به اینکه تاکنون معیاری مناسب برای نسبت بازشدگی به عرض دریاچه مجرای تخلیه رسوب ارائه نشده است بنابراین در این مطالعه به بررسی اثر این نسبت بر میزان رسوب شویی مجرای تخلیه رسوب در شرایط مختلف پرداخته شده است. در این مطالعه همچنین معیارهای مختلف ارائه شده برای تعیین عرض مجرای تخلیه رسوب ارزیابی و معیار مناسبی برای این عرض پیشنهاد شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، عرض های مختلف را می توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: عرض های ناکارآمد، عرض های کم تأثیر و عرض های موثر. این دسته بندی به منظور تشخیص کارایی هر عرض در انتقال و تخلیه رسوبات پیشنهاد شده است و نشان

ارزیابی اثر عرض مجرای رسوب‌شوی و نسبت بازشدگی به عرض دریچه آن بر میزان رسوب‌شویی در سدهای انحراف آب

از حالت موضعی بسیار افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، در اعداد فرود کوچک‌تر از 0.16 فرآیند رسوب‌شویی به فرآیند رسوب‌گذاری تبدیل می‌شود که با هدف‌های احداث مجرای تخلیه رسوب ناسازگار است. بنابراین برای رسوب‌شویی موثر، دامنه مناسب برای اعداد فرود به $0.16 < Fr < 0.3$ محدود می‌شود. بررسی اثر نسبت بازشدگی به عرض دریچه نشان داد که این نسبت می‌تواند رفتار هیدرودینامیکی جریان در محدوده مجرای تخلیه رسوب را تحت تاثیر قرار دهد. با تغییر رفتار هیدرودینامیکی و ثابت بودن دیگر عوامل، نیروهای موثر بر انتقال رسوبات دستخوش تغییر می‌شود. در نسبت $a/b=0.5$ یک عدد فرود مناسب ایجاد می‌شود که می‌تواند به انتقال بیشتر رسوبات به پایین‌دست مجرای تخلیه رسوب کمک کند. با توجه به اینکه معیار مشخصی برای نسبت a/b ارائه نشده است بنابراین در این مطالعه به بررسی اثر این نسبت بر میزان تخلیه رسوب پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد برای هر عرض مجرای تخلیه رسوب در محدوده عدد فرود قابل قبول ذکر شده در بالا، نسبت $a/b = 0.5$ مناسب‌ترین عملکرد را در انتقال و تخلیه رسوبات از مجرای تخلیه رسوب دارد.

مراجع

- Akoz, Mevlut Sami, Mehmet Salih Kirkgoz, & Ahmet Alper Oner. (2009). Experimental and Numerical Modeling of a Sluice Gate Flow. *Journal of Hydraulic Research* 47(2):167–76.
- Asadi, M., Monem, M. J., & Samani, J. (2023). Investigation of the Effect of Straight Divider Wall Dimensions on the Performance of the Sluiceway of a Diversion Dam. *Proceedings of 22th Iranian Hydraulic Conference, University of Maragheh*, pp. 1-9 (in Farsi).
- Bogárdi, János. (1974). *Sediment Transport in Alluvial Streams*. Akademiai Kiado Budapest.
- Daneshfaraz, Rasoul, Reza Norouzi, Parisa Ebadzadeh, & Alban Kuriqi. (2023). Influence of Sill Integration in Labyrinth Sluice Gate Hydraulic Performance. *Innovative Infrastructure Solutions* 8(4):118.
- Flow Science Inc. (2014). FLOW-3D user's manual version 11.0. Flow Science Inc., Santa Fe.
- Gholami Alam, A. (1998). Investigation of Effective Parameters in Designing the Sluiceway of Diversion Dams and Examination of Design Criteria. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Theran, Iran (in Farsi).
- Kim, Dae-Geun. (2007). Numerical Analysis of Free Flow Past a Sluice Gate. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11:127–32.
- Martin, Harold M., & E. J. Carlson. (1953). Model Studies of Sediment Control Structures on Diversion Dams. Pp. 109–22 in *Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention*. ASCE.
- Raudkivi, Arved J. (2020). *Sedimentation: Exclusion and Removal of Sediment from Diverted Water*. CRC Press.
- Razvan, Ernest. (1989). River Intakes and Diversion Dams. *Developments in Civil Engineering* 25.
- Shen, Hsieh Wen, Jihn-Sung Lai, & Dihua Zhao. (1993). Hydraulic Desiltation for Noncohesive Sediment. Pp. 119–24 in *Hydraulic Engineering*. ASCE.
- Swamee, Prabhata K. (1992). Sluice-Gate Discharge Equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118(1):56–60.
- Vanoni, Vito A. (2006). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers.

- White, W. R., & R. Bettess.(1984). The Feasibility of Flushing Sediments through Reservoirs. *IAHS-AISH Publication* (144):577-87.
- Yakhot, Victor, & Steven A. Orszag. (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory. *Journal of Scientific Computing* 1(1):3-51.
- Zahiri, A. R., & Jafari, S. M. (2020). Design of Diversion Dams and River Side Intakes. Jahad-e-Daneshgahi Press (in Farsi).

Original Research

Investigating the effect of Sluiceway width and the ratio of gate Opening to Gate Width on Sediment flushing in Diversion Dams

M. Asadi, M.J. Monem*, J.M.V. Samani

***Corresponding Author:** Professor Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran Iran,

Received: 12 November 2024, **Accepted:** 3 January 2025

Email: monem_mj@modares.ac.ir

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2025.367651.1600

Extended Abstract

Introduction

Sediment accumulation is a persistent challenge in the operation of diversion dams, which are critical infrastructures for water diversion and flow management. Sediments tend to deposit in front of intake structures, obstructing water flow and impairing operational efficiency. Sediment flushing, achieved through sluiceways equipped with control gates, is an effective approach to alleviate these deposits. However, one of the key design parameters the gate opening-to-width ratio (a/b) significantly influences flushing efficiency, though no standardized guideline for optimizing this ratio currently exists. This study investigates how the gate opening-to-width ratio (a/b) and sluiceway width (W_s) affect sediment flushing performance using the FLOW-3D computational fluid dynamics (CFD) model. Simulations under controlled flood conditions provide insights into optimal design parameters to enhance sediment flushing efficiency, aiming to inform best practices in hydraulic design.

Methodology

This study employs FLOW-3D, a high-resolution CFD software that solves the Navier-Stokes equations for incompressible, turbulent flow. The model integrates the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, which accurately captures complex shear flows and turbulent interactions, making it ideal for studying sediment transport in hydraulic structures.

Simulations were conducted under constant flood inflow conditions, with variations in the gate opening-to-width ratio (a/b) for each sluiceway width (W_s). To ensure model accuracy, results were validated against experimental data from prior research, confirming the model's ability to reproduce sediment flushing patterns. The study examined sluiceway widths from 0.58 to 1.83 times the intake channel width (W_i), assessing how each width and its corresponding a/b ratio affected flushing performance. Key parameters such as Froude number (Fr), gate dimensions, and sluiceway configurations were analyzed to determine their impact on sediment removal efficiency.

Results and Discussion

Results indicated that a Froude number between 0.16 and 0.3 produced the best flushing efficiency, providing sufficient flow energy to mobilize and transport sediments while minimizing turbulence and backflow. Analysis of sluiceway widths showed that as the width increased, flushing efficiency declined due to reduced flow velocities. A narrower sluiceway width of $0.58W_i$ exhibited high sediment removal rates, but this aggressive flushing risked destabilizing upstream structures due to increased erosive forces. Conversely, a wider sluiceway ($1.83W_i$) promoted sediment deposition, as lower flow energy led to ineffective flushing and potential blockages.

An optimal range for sluiceway width between 1.0 and 1.15 times the intake width (W_i) was identified. This range provided adequate flow velocity and shear stress to minimize sediment deposition within the sluiceway and control downstream sediment transport without risking erosion of upstream structures.

Regarding the gate opening-to-width ratio (a/b), simulations showed that an a/b ratio of 0.5 consistently enhanced flushing efficiency across different sluiceway widths. Lower ratios (<0.5) resulted in reduced flushing due to insufficient flow energy, while higher ratios (>0.5) created localized turbulence and erosion, compromising overall system stability. Optimizing the a/b ratio at 0.5 balanced sediment mobilization with flow stability, achieving efficient flushing without excessive backflow or structural impacts.

The study further evaluated sediment transport length, or the effective flushing range, within the sluiceway. With an a/b ratio of 0.5, the effective sediment transport distance reached approximately 60% of the sluiceway length for narrower configurations, though this range decreased with increased sluiceway widths. These results underscore the need to balance sluiceway width and gate ratio to maintain effective sediment transport along the sluiceway length.

Conclusion

This research presents essential guidelines for enhancing sediment flushing in diversion dams through optimized sluiceway design. A Froude number between 0.16 and 0.3, combined with an a/b ratio of 0.5, was found to maximize sediment removal efficiency. An optimal sluiceway width between 1.0 and 1.15 times the intake width (W_i) further improved sediment transport, achieving efficient flushing with controlled downstream flow and minimizing upstream erosion.

Keywords: Diversion dam, FLOW-3D, Gate opening-to-width ratio, Sluiceway



مکان‌یابی زمین‌های دیم مستعد آبیاری تکمیلی به منظور ارتقای بهره‌وری مصرف آب

حسن اوجاقلو^{۱*}، زهرا امیری آبدوچالی^۲، سپیده ارومی^۳

^{۱*} استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۳ دانشجوی کارشناسی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

چکیده

ارتقای بهره‌وری مصرف آب کشاورزی یکی از راهکارهای به‌زراعی مهم برای رسیدن به کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. در این راستا، مکان‌یابی زمین‌های دیم مناسب به‌منظور اجرای آبیاری تکمیلی از اقداماتی است که برای بهبود بهره‌وری مصرف آب و امنیت غذایی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش، با استفاده از روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی (AHP) زمین‌های دیم مستعد آبیاری تکمیلی در استان زنجان تعیین شد. برای این منظور، معیارهای دسترسی به منابع آب، کیفیت آب، ویژگی‌های کمی و کیفی خاک، اقلیم، راه دسترسی و توپوگرافی در نظر گرفته شد. مقایسه‌های زوجی بین معیارها و طبقه‌بندی زمین‌ها با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده در محیط ArcGIS اجرا و نشان داده شد که بیشترین وزن و اهمیت را معیار دسترسی به منابع آب و کمترین وزن را معیارهای جاده دسترسی و توپوگرافی داراست. بر اساس نقشه‌های مکان‌یابی تهیه شده و انطباق آن با نقشه زمین‌های دیم استان زنجان، کلاس زمین‌های دیم از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی شامل ۱۹ درصد کاملاً مناسب، ۴۰/۶ درصد مناسب، ۲۷/۸ درصد با محدودیت متوسط، ۱۰/۶ درصد نامناسب و ۲ درصد کاملاً نامناسب شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری تکمیلی، به‌زراعی، زمین‌های دیم، نقشه پهنه‌بندی

مقدمه

بهره‌وری آب کشاورزی از اولویت‌های مهم بخش کشاورزی است (Gomrokchi & Parvareh Rizi, 2017; Abdzad & Gohari, 2019). افزایش روزافزون جمعیت در جهان، کشورها را به فکر بالا بردن تولید محصولات کشاورزی در واحد سطح و به‌طور مشخص افزایش بهره‌وری سوق داده است. بهره‌وری بهینه به‌معنای افزایش محصول تولیدی به‌ازای حجم آب مصرفی بهینه و متناسب با نیاز واقعی محصول است (Mamanpoosh & Mosavi, 2006). مطالعه پتانسیل‌های موجود و قابلیت زمین‌ها و تطابق دادن الگوی کشت با توانمندی‌های منطقه در بسیاری از مناطق برای توسعه محصولات می‌تواند هم از لحاظ منابع و هم از لحاظ

با توجه به محدودیت منابع آبی موجود و بحران کم‌آبی، بهینه‌سازی و بهینه‌یابی عوامل تولید یکی از اصول مهم در فعالیت‌های دنیای امروزه است. بخش کشاورزی نیز مانند دیگر بخش‌ها از این قاعده کلی مستثنی نیست و با توجه به نوع اقلیم کشور و محدودیت‌های منابع آبی از نظر مکانی و زمانی و محدودیت‌های کشت، استفاده درست و اصولی از منابع آب از مولفه‌هایی است که در اولویت قرار دارد (Aria & Azar *et al.*, 2019). با توجه به شرایط خاص اقلیمی کشور و ناممکن بودن توسعه منابع آبی جدید در بخش کشاورزی، استفاده از روش‌های علمی و فنی مناسب به‌منظور افزایش

اقتصادی منجر به بهره‌وری مناسب‌تری گردد (Stigter *et al.*, 2006). افزون بر این، تطبیق نوع مدیریت آبیاری متناسب با شرایط زمین‌های کشاورزی در هر منطقه یکی از راه‌های مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی است. به‌نژادی (اصلاح ژنتیکی ارقام محصولات) و به‌زراعی (مدیریت مصرف نهاده‌ها) دو راهکار مهم به‌منظور افزایش تولید و بهره‌وری شناخته می‌شوند (Koocheki *et al.*, 2019). آبیاری تکمیلی یکی از برنامه‌های به‌زراعی در زمین‌های دیم است که می‌تواند موجب کاهش ریسک و ایجاد ثبات در عملکرد محصولات در زمین‌های دیم گردد (Tavakoli, 2001). در سال‌های اخیر کاربرد این برنامه به‌زراعی در ارتقای بهره‌وری زمین‌های دیم مورد توجه محققان قرار گرفته است. نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد با این برنامه آبیاری، محصول تولیدی و در نهایت بهره‌وری مصرف آب را می‌توان به‌طور چشمگیر افزایش داد (Karimi & Joleini, 2019). نتایج مطالعات مرتبط با آبیاری تکمیلی در کشورهای مراکش، ترکیه، قبرس و پاکستان نشان‌دهنده افزایش عملکرد حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ درصد در آبیاری تکمیلی نسبت به دیم است (Perrier & Salkini., 1991). نتایج گزارش شده از مرکز بین‌المللی تحقیقات کشاورزی در مناطق خشک ایکاردا در سوریه نشان دهنده افزایش عملکرد گندم از ۲/۵ به ۵/۹ تن در هکتار تحت‌تأثیر اجرای آبیاری تکمیلی در زمین‌های دیم است (Oweis *et al.*, 1998). کمالی و شهبان (Kamali & Shahabian, 2020) بررسی اثر آبیاری تکمیلی و کود نیتروژن بر ویژگی‌های کمی و کیفی گندم در مازندران نشان دادند که آبیاری تکمیلی روی تعداد سنبله و طول آن تأثیر زیادی ندارد ولی بر مقدار پروتئین اثر مقابل دارد. این محققان اضافه می‌کنند دو نوبت آبیاری می‌تواند بهترین حالت از نظر محصول‌دهی را به‌دنبال داشته‌باشد. نتایج تحقیقات توکلی و همکاران (Tavakoli *et al.*, 2010) در دو استان لرستان و کرمانشاه نشان داد که تک آبیاری پاییزه یا بهاره به‌همراه مدیریت‌های زراعی، بهره‌وری کل آب مصرفی را به محدوده ۰/۷۱-۰/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب ارتقا می‌دهد. احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2019) با مطالعه اثر خشکی بر ژئوتیپ‌های پیشرفته عدس نشان دادند که با آبیاری تکمیلی، عملکرد دانه تا ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. طبق تحقیقات انجام یافته در استان زنجان، دو نوبت آبیاری تکمیلی در مرحله داناب و خوشاب در هر مرحله به‌طور مجزا ۵۰۰ مترمکعب در هکتار، عملکرد گندم دیم رقم سرداری را تا ۴ برابر افزایش می‌دهد (Babazadeh *et al.*, 2011) در جهان حدود ۸۰ درصد زمین‌های کشاورزی به‌صورت دیم کشت می‌شوند که در حدود ۷۰ درصد از کل تولیدات کشاورزی جهان را به‌دست می‌دهند (Tavakoli *et al.*, 2010). در کشور ما نیز در حال حاضر ۷/۸ میلیون هکتار و ۶ میلیون هکتار از زمین‌ها به‌ترتیب به‌صورت آبی و دیم کشت می‌شوند که نشان‌دهنده سهم ۴۳ درصدی زمین‌های دیم از کل زمین‌های زراعی است. حدود ۱۰ درصد از فرآورده‌های خام کشاورزی در کشور از بخش دیم تولید می‌شود (Verdi Nezhad *et al.*, 2010). زمین‌های دیم سهم قابل توجهی از سطح زیر کشت و تولید محصولات زراعی را در کشور و جهان دارند. عملکرد این نوع مزارع به‌شدت وابسته به بارندگی است. با توجه به خشکسالی‌های متعدد در سال‌های اخیر، از یک سو و لزوم ارتقای بهره‌وری از سوی دیگر، این نوع اراضی موردتوجه ویژه قرار گرفته است. پتانسیل افزایش تولید و بهره‌وری به‌طور چشمگیر در زمین‌های دیم با استفاده از مدیریت‌های به‌زراعی مانند آبیاری تکمیلی وجود دارد. درباره این مدیریت آبیاری توجه به دو نکته ضروری است یکی قابلیت زمین‌ها از نظر کاربرد آبیاری تکمیلی و دیگری در دسترس بودن منابع آب. بنابراین، بررسی پتانسیل زمین‌های دیم از نظر معیارهای مختلف به‌منظور آبیاری تکمیلی گام نخست برای اجرای این مدیریت آبیاری در زمین‌های دیم است (Saeidi *et al.*, 2021; Salak

صنعتی کشور (Masoomzadeh & Torabzadeh, 2004)، اولویت‌بندی صنایع بر مبنای قابلیت بازسازی بین‌المللی و تجارت الکترونیکی (Khodad Hosseini & Fathi, 2002)، صنعت، مکان‌یابی امکانات (Yang & Lee, 1997) را محققان گزارش کرده‌اند. بررسی منابع پیشین نشان می‌دهد مطالعات در زمینه مکان‌یابی زمین‌های مناسب برای آبیاری تکمیلی محدود است. پتانسیل زمین‌های دیم به‌منظور آبیاری تکمیلی در استان قزوین با استفاده از دو معیار شیب و کاربری زمین‌ها مطالعه شده و بر اساس نتایج به‌دست آمده حدود ۹۷/۵ درصد زمین‌های دیم استان قزوین مناسب اجرای آبیاری تکمیلی شناخته شده است که بیشتر این زمین‌ها در دشت قزوین و در مجاورت زمین‌های آبی قرار دارند (Ramezani Etedali *et al.*, 2022). سطح زیر کشت زمین‌های دیم در استان زنجان قابل توجه است به‌طوری که با مساحت حدود ۳۳۸ هزارهکتار رتبه هفتم کشور را دارد و از این نظر به‌عنوان یکی از استان‌های با ظرفیت بالای تولید محصولات دیم در سطح کشور شناخته می‌شود. با توجه به پتانسیل بالای تولید در زمین‌های دیم از یک سو و کاهش منابع آب در دسترس مزارع آبی از سوی دیگر، به‌کارگیری تکنیک‌های به‌نژادی و به‌زراعی از راهکارهای مهم در بهبود بهره‌وری آب کشاورزی در این گونه زمین‌های کشاورزی شناخته می‌شود. آبیاری تکمیلی یکی از تکنیک‌های به‌زراعی با قابلیت اجرایی مناسب محسوب می‌گردد و عملکرد آن وابسته به عوامل متعدد است. نتایج رضایت‌بخش از اجرای این تکنیک زمانی قابل حصول خواهد بود که ضمن بررسی عوامل مؤثر، زمین‌های دیم مناسب شناسایی و انتخاب گردد.

هدف از این تحقیق تعیین زمین‌های دیم مناسب به‌منظور آبیاری تکمیلی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است. مطالعات پیشین نشان می‌دهد کاربرد روش مذکور در اولویت‌بندی زمین‌ها به‌منظور اجرای آبیاری تکمیلی بررسی نشده‌است. برای این منظور

(Zamani, 2016). روش‌های متعددی به‌منظور بررسی قابلیت و طبقه‌بندی زمین‌ها از نظر اهداف مختلف وجود دارد. امروزه با توسعه سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی GIS و روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره، این امکان فراهم است تا با تهیه و ترکیب لایه‌های اطلاعاتی هر یک از عوامل مورد بررسی، طبقه‌بندی زمین‌ها میسر گردد (Malczewski, 1999). یکی از کارآمدترین روش‌های تصمیم‌گیری، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP¹) است. AHP ابزاری است بسیار کاربردی که به‌صورت گسترده در فرآیند تصمیم‌گیری‌های چند معیاره استفاده می‌شود (Saaty, 1996). این تکنیک بر اساس مقایسه‌های زوجی بنا شده و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران می‌دهد (Ghodsipour, 2013). فرآیند AHP روشی است منعطف، قوی و ساده برای تصمیم‌گیری در شرایطی که معیارهای متضاد انتخاب بین گزینه‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. در چنین شرایطی، روش‌های ارزیابی چند معیاری با توجه به اینکه هر یک از محورها، بعد یا محور جداگانه‌ای هستند به‌کار گرفته می‌شوند (Zebardast, 2001). در سال‌های اخیر، این تکنیک کاربرد وسیعی در مطالعات مرتبط با مکان‌یابی و طبقه‌بندی در حوزه‌های مختلف مانند کشاورزی و محیط زیست داشته است.

مکان‌یابی مناطق مناسب از نظر کیفیت آب زیرزمینی (Das & Pal, 2019; Karakus, 2018; Mallik *et al.*, 2020; Nair Nithya, 2019) اجرای سامانه‌های آبیاری تحت فشار (Moradzadeh *et al.*, 2019; Azad Talatpeh *et al.*, 2018; Ahmadi *et al.*, 2018; Anane *et al.*, 2012; Neissi *et al.*, 2020) شناسایی نقاط مناسب برای احداث مخازن و سدهای ذخیره آب (Amani *et al.* 2015; Jozaghi and Shamsai 2017; Amanian *et al.*, 2019) با استفاده از روش AHP بررسی شده‌اند. عملکرد قابل قبول این روش تصمیم‌گیری در مطالعات دیگر با اهداف مختلف مانند رتبه‌بندی تولیدات

¹Analytical Hierarchy Process

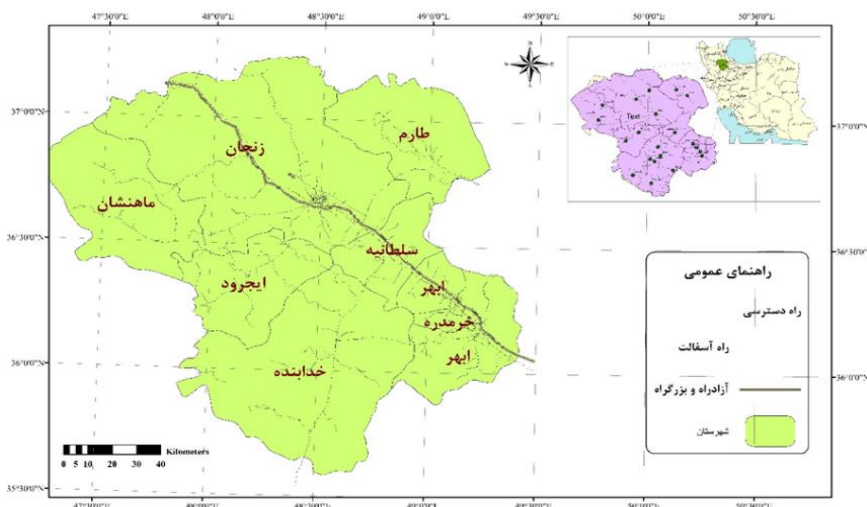
معیارهای اثرگذار بر عملکرد آبیاری تکمیلی شامل کیفیت آب، توپوگرافی، دسترسی به منابع آب، ویژگی های کمی و کیفی خاک، اقلیم و جاده دسترسی در نظر گرفته شد. عوامل دیگری نظیر دسترسی به انرژی بر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی موثر می باشد. با توجه به اینکه اجرای آبیاری تکمیلی با روش های سطحی و بدون نیاز به انرژی مورد پیشنهاد است، از این رو معیار دسترسی به انرژی بررسی نگردید. معیارهایی مانند ویژگی های کمی و کیفی آب، خاک و توپوگرافی به طور مستقیم بر قابلیت آبیاری زمین ها مؤثر هستند. معیار دسترسی به منابع آب به عنوان یک عامل وتویی مطرح است و اگر دسترسی به منابع آبی وجود نداشته باشد، امکان اجرای آبیاری تکمیلی هم فراهم نخواهد بود. راه دسترسی نیز عاملی مهم و تعیین کننده در اجرای آبیاری تکمیلی محسوب می شود. عامل اقلیم نیز به دلیل اثرگذاری بر حجم منابع آب سطحی قابل دسترس در نظر گرفته شد. با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره AHP، مقایسه های زوجی بین معیارها صورت گرفت و اهمیت هر یک در تعیین قابلیت زمین ها از نظر اجرای آبیاری تکمیلی مشخص شد. سرانجام نقشه اولویت بندی زمین های استان زنجان از لحاظ دارا بودن شرایط لازم برای اجرای آبیاری تکمیلی تهیه شد. با تطبیق

نقشه زمین های دیم بر نقشه اراضی طبقه بندی شده، زمین های دیم از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی اولویت بندی شد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

استان زنجان با وسعت ۲۲۱۶۴ کیلومتر مربع با آب و هوای سرد و نیمه خشک در منطقه شمال غرب کشور قرار گرفته است. از لحاظ موقعیت جغرافیایی، این استان بین طول جغرافیایی ۴۷/۱۸ تا ۴۹/۴۶ درجه و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۹ تا ۳۷/۲۳ درجه قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت زمین های زراعی دیم استان زنجان در حدود ۳۳۸ هزار هکتار است و به طور میانگین حدود ۶۷ درصد سطح زیر کشت استان را دارد (SCI, 2022). اقلیم استان نیمه خشک تا مدیترانه ای و متوسط بارش سالانه آن ۳۰۳ میلی متر است. استان زنجان از نظر نوع و میزان بارندگی، در مقایسه با بیشتر مناطق کشور، وضعیت مناسب تری دارد که از این نظر مزیت بالایی برای زمین های دیم و پتانسیل بالای تولید محصولات دیم محسوب می شود. با این وجود در سال های اخیر، الگو و توزیع زمانی بارش ها تغییر یافته و مقدار آن نیز نسبت به بلندمدت کاهش یافته است



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (استان زنجان)

Fig. 1- The geographic location of study area (Zanjan Province)

مهم‌ترین محصولات زراعی در زمین‌های دیم گندم، جو، نخود، عدس است. توزیع مکانی و زمانی بارش‌ها در مناطق مختلف استان زنجان متفاوت است و از این رو عملکرد و بهره‌وری محصولات دیم نیز متغیر و کاملاً وابسته به میزان ریزش‌های جوی است. با توجه به سطح زمین‌های دیم و تناسب قابل قبول سطح قابل توجهی از این اراضی از نظر قابلیت آبیاری، امکان اجرای آبیاری تکمیلی وجود دارد.

روش AHP

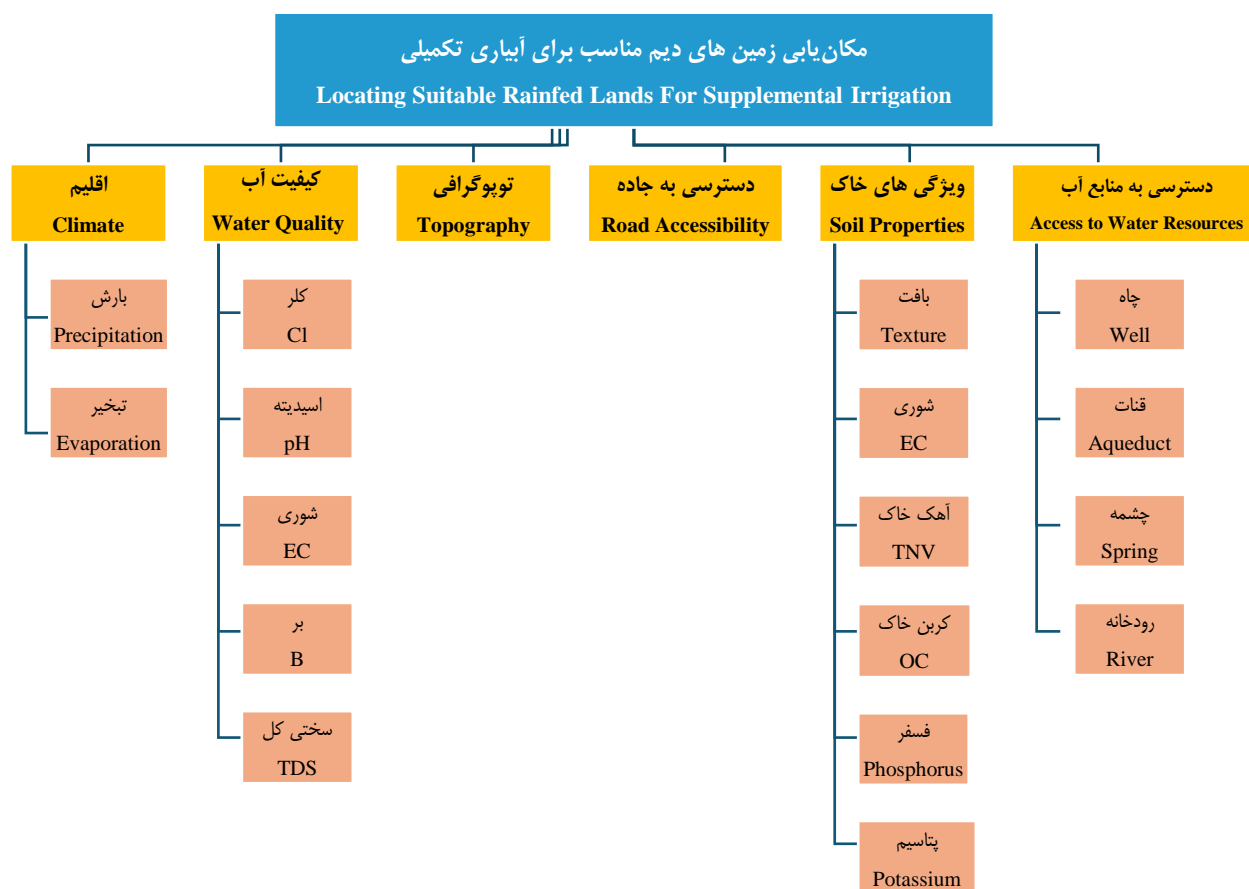
روش AHP بر اساس مقایسه‌های زوجی بنا شده است و امکان بررسی سناریوهای مختلف را فراهم می‌سازد. اولین مرحله شناسایی و اولویت‌بندی عناصر تصمیم‌گیری شامل هدف‌ها، معیارها و گزینه‌های احتمالی است. فرآیند شناسایی این عناصر و ارتباط بین آن‌ها در نهایت منجر به ایجاد ساختاری سلسله‌مراتبی می‌شود. روش AHP یکی از

اجرای مدل تصمیم‌گیری AHP

به‌منظور اجرای مدل تصمیم‌گیری AHP، ابتدا نقشه پهنه‌بندی برای هر یک از زیرمعیارها با استفاده از روش درون‌یابی (Inverse Distance Weighted) IDW در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد و پس از آن امتیازدهی مجدد لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از ابزار Reclassify صورت گرفت. امتیازدهی برای مقادیر مختلف زیرمعیارها مطابق (جدول ۲) دنبال شد. داده‌های مربوط به زیرمعیارهای منابع آب شامل چاه‌ها، چشمه‌ها، قنات‌ها و رودخانه‌ها از شرکت آب منطقه‌ای استان زنجان اخذ شد. اطلاعات مربوط به ۳۰۰ منبع آبی با پراکنش مکانی مناسب در سطح استان زنجان، که دربرگیرنده تمام پارامترهای کیفی مورد نیاز بود، به‌صورت تصادفی انتخاب شد.

به‌منظور تهیه نقشه‌های رستری مربوط به معیار دسترسی به منابع آبی، با استفاده از ابزار Buffer در نرم‌افزار ArcGIS 10.8، حریم‌های مختلف هر یک از انواع منابع آبی تهیه شد. داده‌های کیفی منابع آب شامل شوری، کلر، اسیدیته، بر و سختی آب بررسی و لایه‌های رستری امتیازدهی شده برای این زیرمعیارها تهیه شد.

روش AHP بر اساس مقایسه‌های زوجی بنا شده است و امکان بررسی سناریوهای مختلف را فراهم می‌سازد. اولین مرحله شناسایی و اولویت‌بندی عناصر تصمیم‌گیری شامل هدف‌ها، معیارها و گزینه‌های احتمالی است. فرآیند شناسایی این عناصر و ارتباط بین آن‌ها در نهایت منجر به ایجاد ساختاری سلسله‌مراتبی می‌شود. روش AHP یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه در نرم‌افزار ArcGIS است زیرا امکان در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی را به وجود می‌آورد. این فرآیند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت می‌دهد و تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را امکان‌پذیر می‌سازد. این روش تصمیم‌گیری بر مبنای مقایسه‌های زوجی بنا شده است و از این رو به ساده شدن محاسبات و قضاوت‌ها می‌انجامد. در این تکنیک، میزان سازگاری و ناسازگاری سیستم مشخص می‌شود که از مزایای ممتاز این فرآیند در تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. در این تحقیق، هدف آن است که زمین‌های دیم مناسب برای آبیاری تکمیلی شناسایی شود. معیارهای اصلی شامل توپوگرافی، ویژگی‌های کیفی منابع آب، اقلیم، راه دسترسی، دسترسی به منابع آب و ویژگی‌های کمی و کیفی خاک است. برخی از معیارهای اصلی شامل زیرمعیارهای مختص به خود است. با توجه به هدف مسئله



شکل ۲- درخت تصمیم طراحی شده به منظور مکان یابی زمین های مناسب برای آبیاری تکمیلی
Fig. 2- A decision tree designed to identify suitable land for supplemental irrigation

جدول ۱- مقیاس مقایسه دوتایی معیارها در فرایند AHP

Table 1- the scale of paired comparison of criteria in AHP Process

امتیاز Score	شرح Definition
1	اهمیت مساوی Equally preferred
3	اهمیت اندکی بیشتر Moderately preferred
5	اهمیت بیشتر Strongly preferred
7	اهمیت خیلی بیشتر Very strongly preferred
9	اهمیت مطلق Absolutely preferred
2,4,6,8	ترجیحات بین فواصل فوق Intermediate situation

پرسشنامه‌ای بر اساس معیارهای مشخص شده تنظیم شد و در اختیار متخصصان قرار گرفت. جدول‌های مقایسه‌های زوجی با استفاده از افزونه extAhp در نرم‌افزار ArcGIS بر اساس میانگین دیدگاه‌های گردآوری شده تکمیل و مقدار وزن معیارها تعیین شد. مقدار عددی ناسازگاری ماتریس ساخته شده با توجه به وزن‌های محاسبه شده تعیین و کنترل شد. در صورتی که مقدار شاخص اشاره‌شده کمتر از ۰/۱ باشد، وزن‌های به‌دست آمده قابل قبول خواهد بود. با استفاده از افزونه اشاره‌شده، وزن‌های به‌دست آمده در لایه‌های رستری امتیازدهی شده اعمال شد و از تلفیق لایه‌های وزن‌دهی شده نقشه زمین‌های امتیازدهی شده تهیه شد. سرانجام، زمین‌ها بر اساس امتیازهای کسب شده با استفاده از ابزار Symbology طبقه‌بندی شدند.

نتایج و بحث

نقشه پهنه‌بندی معیارهای اصلی شامل دسترسی به منابع آب، کیفیت آب، خاک، اقلیم، توپوگرافی و راه دسترسی در (شکل ۳) ارائه شده‌است. نقشه پهنه‌بندی معیار دسترسی به منابع آب از طریق هم‌پوشانی نقشه‌های وزن‌دهی شده زیرمعیارهای مرتبط شامل فاصله از چشمه، فاصله از رودخانه، فاصله از قنات و فاصله از چاه به‌دست آمد. مقدار وزن‌های زیرمعیارها از طریق مقایسه‌های زوجی تعیین شد به‌طوری که بیشترین وزن را فاصله از رودخانه و چشمه به‌دست آورد. با توجه به اینکه تأمین آب برای آبیاری تکمیلی در زمین‌های دیم از منابع سطحی در اولویت است، رودخانه‌ها و چشمه‌ها نسبت به دیگر منابع آبی اهمیت بالاتری دارند.

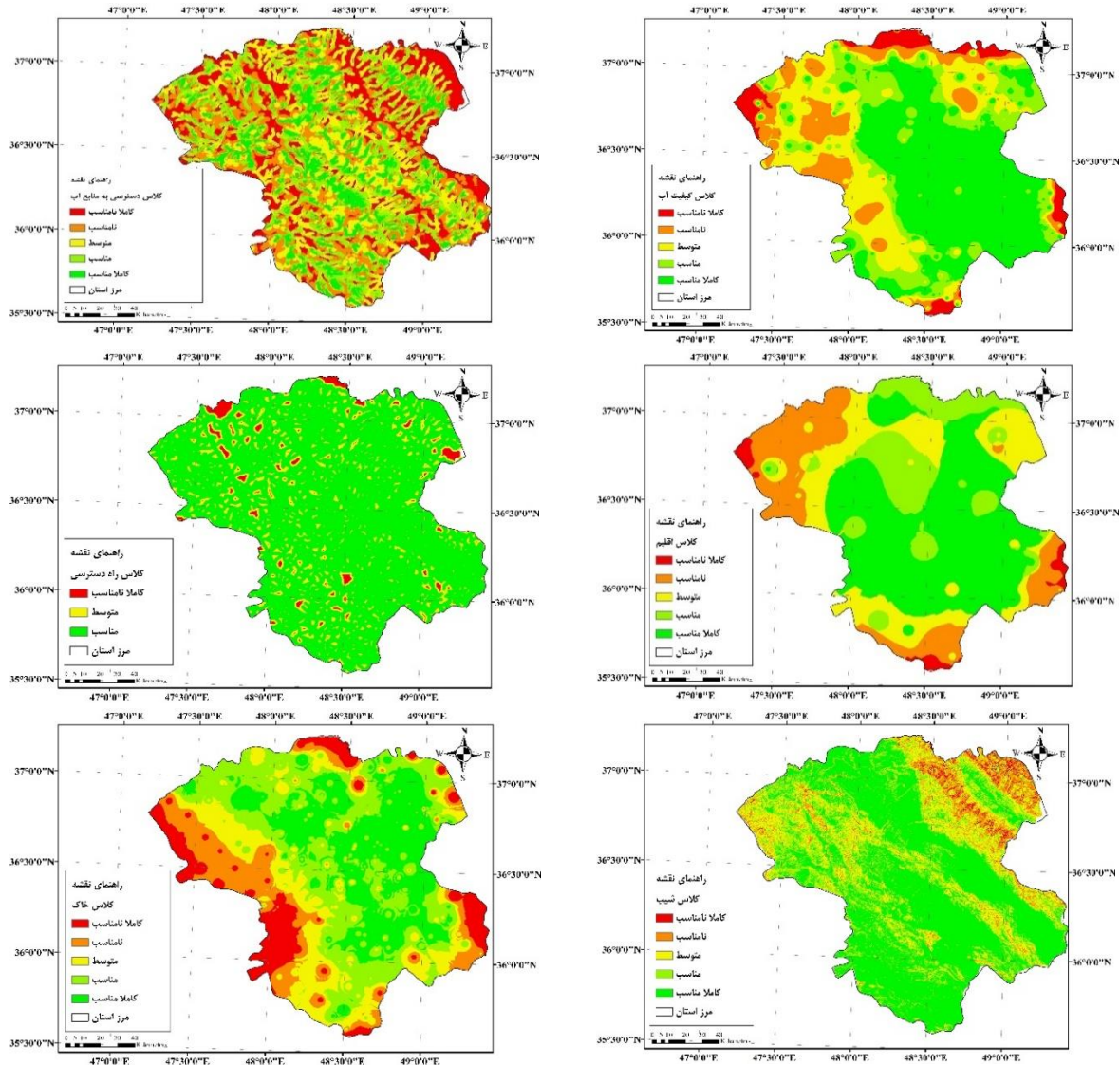
در این امتیازدهی، راهنمای طبقه‌بندی کیفی آب آبیاری ارائه شده توسط فائو (FAO, 1985) لحاظ شد. نقشه‌های پهنه‌بندی مربوط به عوامل کمی و کیفی خاک شامل شوری، بافت، درصد آهک، کربن، فسفر و پتاسیم با استفاده از نتایج آزمایش‌های خاک در بیش از ۲۵۰ نقطه با توزیع مکانی مناسب در محدوده مورد مطالعه ایجاد شد. برای تهیه نقشه‌های خاک از تمامی داده‌های موجود استفاده شد. نقشه شیب مناطق مختلف استان با استفاده از نقشه رقومی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ استخراج شد. از نظر معیار توپوگرافی، مناسب‌ترین محل زمین‌های مسطح هستند. شیب‌های ملایم کمتر از ۲ درصد کلاس مناسب برای آبیاری تکمیلی شناخته شد و بیشترین امتیاز را در این طبقه‌بندی به‌دست آوردند. در خصوص جاده دسترسی نیز با استفاده از نقشه راه‌های استان، نقشه رستری فاصله‌های مختلف ترسیم و امتیازدهی شد. بیشترین امتیاز مربوط به محدوده‌ای است که فاصله از جاده کم باشد و با افزایش فاصله از جاده از امتیاز نقاط کاسته می‌شود. از دیگر معیارهایی که در این پروژه اهمیت دارد، معیار اقلیم با دو زیر معیار بارش و تبخیر است. با توجه به هدف مدل تصمیم‌گیری، از نظر معیار اقلیم مناطقی مناسب هستند که بیشترین بارش و کمترین تبخیر را دارند. به‌منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی بارش و تبخیر، از آمار و اطلاعات ۷ ایستگاه سینوپتیک، ۱۸ ایستگاه تبخیر سنجی و ۳۷ ایستگاه باران سنجی واقع در کل استان زنجان استفاده شد. پس از تهیه لایه‌های امتیازدهی شده، وزن هر لایه با تکمیل جدول مقایسه‌های زوجی توسط کارشناسان خبره تعیین می‌گردد. به‌منظور تکمیل جدول مقایسه‌های زوجی،

جدول ۲ - امتیازدهی معیارها با هدف مکان یابی زمین های مناسب برای آبیاری تکمیلی

Table 2- Scoring the criteria to identify suitable lands for supplemental irrigation

امتیاز Score	مقدار Value	زیر معیار Sub-Criteria	معیار Criteria	
7-9	<1000	فاصله از چاه (متر)	دسترسی به منابع آب	
2-6	>1000	Distance from the well (m)		
7-9	<2000	فاصله از چشمه (متر)	Access to Water Resources	
2-6	>2000	Distance from the spring (m)		
7-9	<2000	فاصله از قنات (متر)		
2-6	>2000	Distance from the aqueduct (m)		
7-9	<2000	فاصله از رودخانه (متر)		
2-6	>2000	Distance from the river (m)		
7-9	<2	شوری (ds/m)	کیفیت آب Water Quality	
2-6	>2	EC (ds/m)		
7-9	<10	کلر (meq/lit)		
2-6	>10	Cl (meq/lit)		
7-9	<2	بر (meq/lit)		
2-6	>2	B (meq/lit)		
7-9	6.5-7.5	اسیدیته (meq/lit)		
2-6	<6.5 or >7.5	pH (meq/lit)		
7-9	<200	سختی آب (mg/lit)		
2-6	>200	TDS (mg/lit)		
7-9	<20	شیب (درصد)	توپوگرافی Topography	
2-6	>20	Slope (%)		
7-9	Loam, Sandy Loam, Clay Loam, Silty Loam	بافت Texture	ویژگی های خاک Soil Properties	
2-6	Sandy, Clay, Sandy Clay			
7-9	>1	ماده آلی (درصد)		
2-6	<1	Organic Matter (%)		
7-9	>10	فسفر (meq/lit)		
2-6	<10	Phosphorus (meq/lit)		
7-9	>100	پتاسیم (meq/lit)		
2-6	<100	Potassium (meq/lit)		
7-9	<30	آهک (درصد)		
2-6	>30	TNV (%)		
7-9	<4	شوری (d/m)	راه دسترسی Access Road	
2-6	>4	EC (ds/m)		
7-9	<3000	فاصله از جاده (متر)		
2-6	>3000	Distance from road (m)		
7-9	>250	بارش (میلی متر)		عوامل اقلیمی Climate Factors
2-6	<250	Precipitation (mm)		
7-9	<2000	تبخیر (میلی متر)		
2-6	>2000	Evaporation (mm)		

مکان‌یابی زمین‌های دیم مستعد آبیاری تکمیلی به‌منظور ارتقای بهره‌وری مصرف آب



شکل ۳ - نقشه‌های طبقه‌بندی شده معیارهای اصلی

Fig. 3- The classified maps of the main criteria

زیرمعیارهای اشاره‌شده، زیر معیار شوری بیشترین اهمیت را دارد. مطابق نقشه ارائه شده مشاهده می‌گردد در بیشتر مناطق استان زنجان از نظر کیفیت آب به‌منظور اجرای آبیاری تکمیلی محدودیت جدی وجود ندارد. مناطق مرکزی استان دارای کلاس مناسب و کاملاً مناسب هستند که محدوده‌ای وسیع را در بر گرفته‌اند. در نواحی محدودی واقع در غرب و جنوب غربی استان، کلاس نامناسب کیفی آب مشاهده می‌شود. در بین عوامل کیفی آب، شوری بیشترین عامل محدودکننده محسوب می‌گردد. نقشه نهایی

مطابق نقشه معیار دسترسی به منابع آب، مناطق با تراکم بالای رودخانه‌ها در کلاس مناسب قرار گرفته‌اند. در مقابل، ارتفاعات استان به‌طور مشخص در نواحی مرزی در کلاس نامناسب قرار گرفتند. به‌طور کلی از نظر معیار دسترسی به منابع آب، سطح قابل توجهی از زمین‌های استان در کلاس متوسط یا نامناسب قرار گرفته است. نقشه پهنه‌بندی معیار کیفیت آب نیز از طریق هم‌پوشانی نقشه‌های وزن‌دهی شده زیرمعیارهای مرتبط شامل شوری، کلر، بر و اسیدیته و سختی آب به‌دست آمد. در بین

مقایسه‌های زوجی بین آن‌ها ادامه یافت و نقشه نهایی کلاس زمین‌ها از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی تهیه شد. ضریب‌های وزنی به‌دست آمده برای هر یک از معیارهای اصلی در جدول (۳) آورده شده‌است. بر اساس قضاوت‌های کارشناسی، اجرای آبیاری تکمیلی وابسته است به دسترسی به منابع آب و این معیار با وزن ۰/۳۴ بیشتر اهمیت را در بین معیارهای مورد بررسی دارد. در بین زیرمعیارهای دسترسی به منابع آب نیز فاصله از رودخانه بیشترین وزن را دارد و زیرمعیارهای فاصله از چشمه و قنات در رتبه‌های بعدی از نظر وزن و اهمیت قرار گرفتند. برآیند دیدگاه‌های کارشناسی بر این است که به‌منظور تأمین آب مورد نیاز، منابع آب سطحی نسبت به زیرزمینی در اولویت قرار دارند. معیار کیفیت آب با وزن ۰/۲۳ در رتبه دوم از نظر اهمیت و میزان تأثیرگذاری بر هدف مورد نظر قرار گرفت. در بین زیرمعیارهای کیفیت آب نیز پارامتر شوری بیشترین اهمیت را داشته است. بنابراین می‌توان گفت معیارهای دسترسی به منابع آب و کیفیت آب با مجموع وزن ۰/۵۷ مهم‌ترین معیارهای تعیین کننده در طبقه‌بندی زمین‌ها از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی شناخته شدند. در مطالعات پیشین در مکان‌یابی زمین‌های مناسب از نظر اجرای سامانه‌های آبیاری، وزن و اهمیت بالای معیارهای مرتبط با کمیت و کیفیت آب گزارش شده‌است (Moradzadeh et al., 2019). نتایج مقایسه‌های زوجی منطقی ارزیابی می‌گردد و کاملاً قابل‌انتظار است که اجرای عملیات آبیاری در درجه اول به وجود منابع آبی و در درجه دوم به کیفیت آب وابسته باشد. معیارهای اقلیم و خاک نیز در رتبه‌های سوم و چهارم از نظر اهمیت قرار گرفتند. بارش در بین زیرمعیارهای اقلیم و ماده آلی خاک در بین زیرمعیارهای خاک بیشتر وزن را به‌دست آوردند. نقش بارش در حجم منابع آبی قابل دسترس و اثر ماده آلی خاک بر درجه حاصلخیزی و بالا رفتن عملکرد و بهره‌وری از مهم‌ترین عوامل بالا بودن وزن‌های دو عامل یادشده

خاک از تلفیق نقشه‌های وزن‌دهی شده شش زیر معیار شوری، بافت، ماده آلی، فسفر، پتاسیم و آهک تهیه شد. در بین عوامل مرتبط با خاک، ماده آلی بیشترین وزن و اهمیت را دارد. در واقع، بر اساس نتایج مقایسه‌های زوجی بین زیرمعیارهای خاک، در تعیین مناطق مناسب به‌منظور اجرای آبیاری تکمیلی، میزان حاصلخیزی اهمیت بالاتری دارد. دیگر عوامل با اختلاف کمتری نسبت به هم در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. با توجه به نقشه طبقه‌بندی شده معیار خاک، بیشتر مناطق استان و به‌خصوص دشت‌ها در کلاس مناسب یا کاملاً مناسب قرار گرفته‌اند. مناطق واقع در ارتفاعات از نظر عوامل کمی و کیفی مرتبط با خاک امتیاز کمتری دارند. در بین زیرمعیارها نیز از نظر کربن آلی و پتاسیم محدودیت جدی وجود ندارد. با این همه از نظر فسفر، محدودیت جدی و متوسط در بیشتر مناطق استان مشاهده می‌شود. از نظر بافت و آهک خاک محدودیت کم تا متوسط در برخی مناطق وجود دارد. نقشه زمین‌های طبقه‌بندی شده از نظر معیار اقلیم نیز با استفاده از هم‌پوشانی نقشه‌های وزن‌دهی شده بارش و تبخیر به‌دست آمد. بر اساس نتایج جدول‌های مقایسه‌های زوجی، وزن بارش نسبت به تبخیر بیشتر بود. میانگین بارش و تبخیر در استان زنجان به ترتیب ۳۰۳ میلی‌متر و ۱۷۳۲ میلی‌متر است. از نظر اقلیم، بیشتر مناطق مرکزی استان در کلاس مناسب قرار گرفته است. بخش‌هایی از استان نیز به دلیل میزان بارش کم در کلاس متوسط یا نسبتاً نامناسب قرار گرفته است. مطابق نقشه طبقه‌بندی شده زمین‌های استان از نظر شیب، محدودیت جدی برای اجرای آبیاری تکمیلی در بیشتر مناطق استان وجود ندارد. بخش‌هایی هم که با محدودیت جدی مواجه هستند در واقع زمین‌های غیرقابل کشت و به‌طور مشخص ارتفاعات هستند. از نظر راه دسترسی نیز بیشتر مناطق استان به دلیل دارا بودن جاده‌های دسترسی در کلاس مناسب قرار گرفته‌اند. پس از تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی شده معیارهای اصلی،

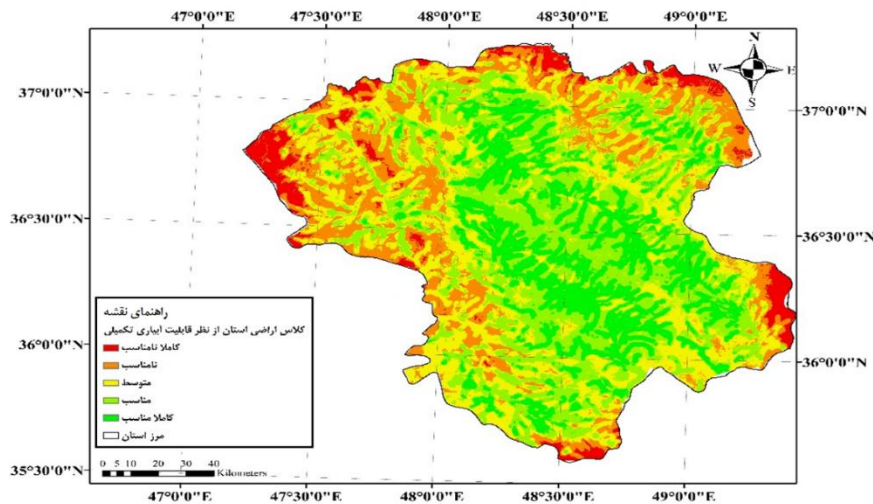
مکان‌یابی زمین‌های دیم مستعد آبیاری تکمیلی به‌منظور ارتقای بهره‌وری مصرف آب

هستند. معیارهای جاده دسترسی و توپوگرافی، نسبت به دیگر معیارها، کمترین اهمیت و وزن را دارند و از نظر اثرگذاری بر هدف در یک سطح ارزیابی شدند. میزان ناسازگاری در مقایسه‌های زوجی معیارها و زیرمعیارها کنترل گردید و در تمام جدول‌های مقایسه‌ای، مقدار آن کمتر از ۰/۱ محاسبه شد. نقشه زمین‌های طبقه‌بندی شده از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی با استفاده از روش AHP در (شکل ۴) ارائه شده‌است. پس از تلفیق نقشه زمین‌های دیم با نقشه زمین‌های طبقه‌بندی شده، نقشه زمین‌های دیم نیز طبقه‌بندی و در (شکل ۵) ارائه شده‌است.

جدول ۳ - ضریب‌های وزنی معیارها در روش AHP

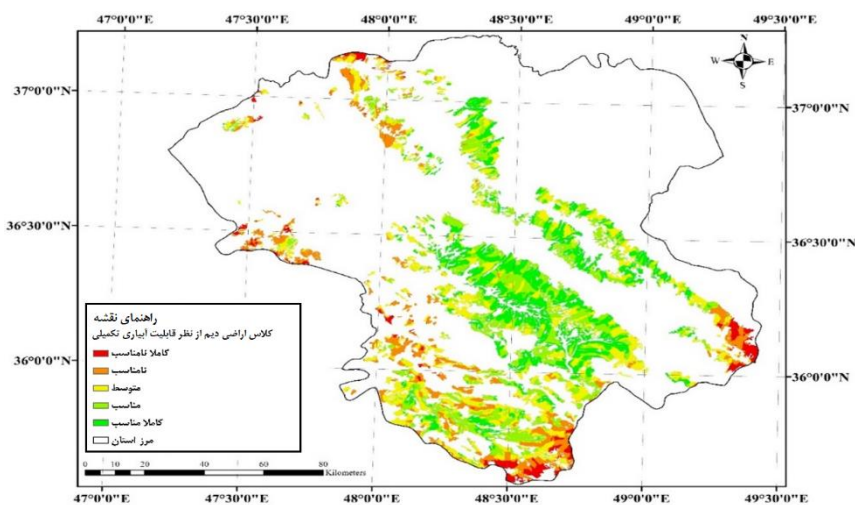
Table 3- The weighting coefficients of the criteria in AHP method

معیار Criteria	راه دسترسی Access Road	توپوگرافی Topography	عوامل اقلیمی Climate Factors	ویژگی‌های خاک Soil Properties	کیفیت آب Water Quality	دسترسی به منابع آب Access to Water Resources
وزن Weight	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۳۴



شکل ۴ - نقشه زمین‌های طبقه‌بندی شده از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی

Fig.4- Classified map of lands in terms of the implementation of supplemental irrigation



شکل ۵ - نقشه زمین‌های دیم طبقه‌بندی شده از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی

Fig.5- Classified map of rainfed lands in terms of the implementation of supplemental irrigation

بر اساس نقشه زمین‌های طبقه‌بندی شده در (شکل ۴)، مناطق مرکزی و شرقی استان زنجان در کلاس مناسب و یا نسبتاً مناسب قرار گرفت. این بخش از زمین‌ها بیشتر از دیگر بخش‌های استان مستعد اجرای آبیاری تکمیلی است. از انطباق نقشه‌های مربوط به معیار دسترسی به منابع آب و نقشه نهایی تهیه شده (شکل ۴) مشاهده می‌شود مناطقی که از نظر این معیار در کلاس مناسب قرار دارند در نقشه نهایی نیز امتیاز بالا را از نظر اجرای آبیاری تکمیلی کسب کرده‌اند. با توجه به (شکل ۵)، مناطق مرکزی زمین‌های دیم امتیاز بالایی از نظر قابلیت آبیاری تکمیلی دارند. توزیع و دسترسی به منابع آب در این مناطق وضعیت خوبی دارد و به همین دلیل آن مناطق در نقشه مکان‌یابی تهیه شده نیز مناسب یا کاملاً مناسب شناخته شده‌اند. علاوه بر این، با توجه به اهمیت نسبتاً بالای معیار کیفیت آب، یکی از دلایل کسب امتیاز بالای مناطق در نقشه نهایی بالا بودن امتیاز کیفیت آب در این بخش از زمین‌هاست. در (جدول‌های ۴ و ۵)، مساحت و درصد کلاس‌های مختلف زمین‌های کل و دیم استان تعیین شده با روش AHP ارائه شده‌است. برابر نتایج ارائه شده در (جدول ۴)، در مجموع ۴۴/۲ درصد از زمین‌های استان مناسب یا کاملاً مناسب، ۳۲/۴ درصد در کلاس متوسط و ۲۳/۴ درصد نیز نامناسب از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی است. با توجه به (جدول ۵)، در مجموع ۵۹/۶ درصد از زمین‌های دیم در کلاس مناسب یا کاملاً مناسب، ۲۷/۸ درصد در کلاس متوسط و ۱۲/۶ درصد نیز در کلاس نامناسب از نظر اجرای آبیاری تکمیلی طبقه‌بندی شده‌اند.

جدول ۴ - مساحت (هکتار) و درصد کلاس زمین‌های استان از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی

Table 4- The area (ha) and percentage of land classes in terms of the implementation of supplemental irrigation

اراضی کل استان از نظر قابلیت آبیاری تکمیلی	کلاس				
	کاملاً نامناسب	نامناسب	متوسط	مناسب	کاملاً مناسب
	۱۰۶۱۲/۰۹	۳۹۸۳۸۸/۶	۶۹۹۱۵۳/۳	۷۰۴۹۱۵/۸	۲۴۹۸۴۵/۹
	۴/۹	۱۸/۵	۳۲/۴	۳۲/۷	۱۱/۵

جدول ۵ - مساحت (هکتار) و درصد کلاس زمین‌های دیم از نظر قابلیت اجرای آبیاری تکمیلی (هکتار)

Table 5- The area (ha) and percentage of rainfed land classes in terms of the implementation of supplemental irrigation

زمین‌های دیم از نظر قابلیت آبیاری تکمیلی	کلاس				
	کاملاً نامناسب	نامناسب	متوسط	مناسب	کاملاً مناسب
	۹۶۰۳/۹	۵۳۲۷۶/۷	۱۴۱۴۶۳/۰۲	۳۰۶۳۱۰/۰۱	۹۶۸۰۳/۹
	۲	۱۰/۶	۲۷/۸	۴۰/۶	۱۹

تکمیلی از مناطق با کلاس مناسب انتخاب کرد. در این تحقیق، تا حد امکان داده‌ها و اطلاعات متنوع موجود در استان زنجان گردآوری و از آن‌ها استفاده شد. بدیهی است تمامی عوامل بررسی نگردید و در صورت وجود اطلاعات این معیارها مانند عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی دقت تصمیم‌گیری و حصول اطمینان بیشتر خواهد شد. از سوی دیگر، روش مورد مطالعه و قضاوت‌های

روش اولویت‌بندی AHP در مطالعات مختلف بررسی شده است و نتایج رضایت بخش آن را محققان (Moradzadeh *et al.*, 2019; Neissi *et al.*, 2020; Amani *et al.*, 2016) گزارش کرده‌اند. با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، مناطق مختلف بین یک تا ۱۰ امتیازدهی شده‌اند. با توجه به نقشه زمین‌های طبقه‌بندی شده، می‌توان زمین‌های مد نظر را به‌منظور اجرای آبیاری

در استان زنجان به‌منظور اجرای آبیاری تکمیلی با در نظر گرفتن معیارهای اثرگذار و استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) شناسایی شد. نتایج تحقیق نشان داد اجرای آبیاری تکمیلی به میزان ۵۷ درصد وابسته به معیارهای مرتبط با آب و به‌طور مشخص دسترسی به منابع آبی است. در مجموع حدود ۵۹/۶ درصد از زمین‌های دیم استان شامل دشت‌های مرکزی و شرقی مناسب یا کاملاً مناسب برای اجرای آبیاری تکمیلی شناخته شده است و بقیه زمین‌های دیم نیز با محدودیت کم تا جدی مواجه‌اند. با توجه به اینکه در حال حاضر برداشت از منابع آبی بیش از حد مجاز است و ما با بحران کم آبی شدید مواجه هستیم، تأمین منابع آب مورد نیاز اجرای آبیاری تکمیلی صرفاً از تخصیص‌های مجاز فعلی و بدون بارگذاری جدید بر منابع آبی مورد تأکید است. می‌توان عملکرد روش AHP را قابل قبول دانست و استفاده از آن را در مرحله شناخت پروژه‌های آبیاری تکمیلی در مناطق مختلف توصیه کرد. انتخاب نهایی مکان‌های مناسب به‌منظور اجرای آبیاری تکمیلی از طریق تلفیق نتایج حاصل شده از AHP با نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های میدانی و شرایط منطقه‌ای پیشنهاد می‌گردد.

کارشناسی بر دقت نتایج به‌دست آمده مؤثرند و از این رو پیشنهاد می‌شود تا در تحقیقات بعدی روش‌های دیگر مانند روش تحلیل شبکه‌ای، منطق فازی و بولین مورد مطالعه قرار گیرد. نقشه‌های به‌دست آمده از مطالعات اولویت‌بندی می‌توانند در مرحله شناخت یا مطالعات فاز اول پروژه‌ها به‌عنوان راهنمایی کاربردی استفاده شوند. نتایج حاصل از بازدیدهای فنی و کارشناسی مکمل نقشه‌های به‌دست آمده و در تصمیم‌گیری مناسب خواهند بود.

نتیجه‌گیری

بهبود عملکرد و بهره‌وری مصرف آب از طریق آبیاری تکمیلی در زمین‌های دیم به‌عنوان راهکار به‌زراعی مهم شناخته می‌شود. استان زنجان با دارا بودن سطح قابل توجه زمین دیم، میزان بارندگی و کیفیت خاک نسبتاً مناسب در بیشتر مناطق، از پتانسیل تولید و بهره‌وری بالایی در زمین‌های زراعی برخوردار است. با این همه، تغییر الگو، توزیع و کاهش بارندگی در سال‌های اخیر سبب شده تا اهمیت راهکارهای به‌زراعی از جمله آبیاری تکمیلی به‌منظور جلوگیری از وارد شدن تنش شدید کم آبی و نیز برای بهبود بهره‌وری در محصولات زمین‌های دیم بیش از پیش نمایان گردد. در این پژوهش زمین‌های دیم مناسب

مراجع

- Abdzaad Gohari, A. (2019). Improving the performance and efficiency of water consumption in peanut cultivation through irrigation management. *Water Management in Agriculture*. 6(2), 57-64. (in Persian).
- Ahmadi, A., Amini Dehghi, M., Fotokian, M., & Sedghi, M. (2019). The impact of drought stress on the enzymatic activity of antioxidant and chlorophyll content in advanced lentil genotypes. *Journal of Environmental Stresses in Agricultural Sciences*. 12(4), 1105-1116. (in Persian).
- Ahmadi, A., Hezarjaribi, A., Ghorbani, K.H., & Hesam, M. (2018). Location identification of regions suitable for implementing modern irrigation systems (localized, rainfed, low pressure) using Analytic Hierarchy Process (AHP) in GIS (case study: Esfarayen County, North Khorasan). *Journal of Water and Soil Conservation Research*. 25(5), 69-87. (in Persian)

- Amani, M., Najafinejad, A., Dehghani, A.A., & Maramaei, M. Gh. (2015). Site selection for earth small dam using criterion elimination and AHP (Kal Aji Watershed, Golestan Province). *Journal of Water and Soil Conservation*. 22, 231-249. (in Persian).
- Amani, M., Zanjirchy, M., & Azizi, F. (2016). Prioritizing automated parking systems by combining Taguchi experimental design methods and fuzzy hierarchical analysis. *Geography and Environmental Planning*. 62(2), 131-146. (in Persian)
- Amanian, N., Iliati, A. & Mokhtari, M.H. (2019). Underground dam location using remote sensing and geographic information system (case study: Kashan plain). *Journal of Arid Biome*. 9, 21-37. (in Persian).
- Anane, M., Bouziri, L., Limam, A., & Jellali, S. (2012). Ranking suitable sites for irrigation with reclaimed water in the Nabeul-Hammamet region (Tunisia) using GIS and AHP multicriteria decision analysis. *Resources Conservation and Recycling*. 65, 36-46.
- Aria Azar, N., Majnooni Haris, A., & Dalir Hasannia, R. (2019). Classification of irrigation system implementation in the lands of Aji Chay River Basin. *Journal of Water and Soil*. 33(2), 217-228. (in Persian)
- Azad Talatapeh, N., Rezaei Abajlo, A., & Behmaneh, J. (2018). Identification of suitable areas for implementing surface and pressurized irrigation systems using the fuzzy hierarchical analysis process in the Miandoab plain. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 41(4), 69-87. (in Persian).
- Babazadeh, H., Shahrokhi, F., Manshoori, M., & Davoodi, F. (2011). Studying the effects of supplementary irrigation on the yield and yield components of rainfed wheat in the Abhar region, Zanjan Province. *Water Resources Engineering*. 4(10), 75-84. (in Persian).
- Das, B., & Pal, S.C. (2019). Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of west Bengal. India. *Hydro research*. 2, 21-30.
- FAO. (1985). *Water Quality for Agriculture*. R.S. and D.W. Westcot. Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1. Rome. 174 pp.
- Gomrokchi, A., & Parvaresh Rizi, A. (2017). An Overview of Automatic Operation Methods in Pressurized Irrigation Systems. *Water management in agriculture*. 4(1), 9-20. (in Persian).
- Ghodsipour, H. (2013). *Hierarchical analysis process (AHP)*. Amirkabir University of Technology Publications. (in Persian).
- Jozaghi, A., & Shamsai, A. (2017). Application of geospatial information system and technique for order preference by similarity to ideal solution for sitting water reservoirs (Case study: south of Sistan&Balouchestan Province). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data*. 25, 5-15. (in Persian).
- Kamali, M.A., & Shahabian, M. (2020). Study on the impact of supplementary irrigation and Nitrogen fertilizer on quantitative and qualitative characteristics of wheat in Mazandaran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 14(6), 2217-2233. (in Persian).
- Karakus, C.B. (2018). Evaluation of groundwater quality in Sivas Province (Turkey) using water quality index and GIS-based analytic hierarchy process. *International Journal of Environmental Health Research*. 29(5), 500-519.
- Karimi, M., & Joleini, M. (2019). Supplemental irrigation in cultivation of rainfed wheat. *Journal of Water and Sustainable Development*. 6(1), 29-34. (in Persian).

- Khodad Hosseini, S., & Fathi, S. (2002). Presenting a method for prioritizing Iran's industries based on international marketability and e-commerce. *Journal of Business Research*. 25, 147-168. (in Persian).
- Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Amin Ghafoori, A., & Mahlouji Rad, M. (2019). Contribution of Genetic and Agronomic Measures to Yield Gain of Wheat in Iran. *Journal Of Agroecology*, 11(1), 137-153.
- Masoomzadeh, S., & Torabzadeh, A. (2004). Ranking of Industrial Products in the Country. *Journal of Business Research*. 30, 67-81. (in Persian).
- Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. *Journal of the Operational Research Society*. 51(2), 247.
- Mallik, S., & Shivam, Mishra, U. (2020). Assessment of spatial variations in groundwater quality of Agartala, Tripura for drinking employing GIS and MCDA techniques. *Applications of Geomatics in Civil Engineering*. 33, 273-288.
- Mamanpoosh, A.R., & Moosavi, F. (2006). *Water productivity in Zayandehrood irrigation networks (Nekooabad and Abshar)*. *First National Conference on Irrigation and Drainage Management*. May 2. University of Chamran, Ahvaz. (in Persian).
- Moradzadeh, P., Ojaghloou, H., & Ghabaei Sough, M. (2019). Assessment of Sprinkler Irrigation Systems Situation Using Analytical Hierarchy Process Method (Case Study: Zanjan Plain). *Journal of Water and Soil*. 33(4), 565-578. (in Persian).
- Nair Nithya, C., Srinivas, Y., Magesh, N.S., & Kaliraj, S. (2019). Assessment of groundwater potential zones in Chittar basin, Southern India using GIS based AHO technique. *Remote Sensing Applications: Society and Environments*. 15, 1-8.
- Neissi, L., Albaji, M., & Nasab, S.B. (2020). Combination of GIS and AHP for site selection of pressurized irrigation systems in the Izeh plain, Iran. *Agricultural Water Management*. 231, 106004.
- Oweis, T., Pala, M., & Ryan, J. (1998). Stabilizing rainfed wheat yields with supplemental Irrigation and nitrogen in the Mediterranean Climate. *Agronomy Journal*. 90(5), 672-681.
- Perrier, E.R., & Salkini, A.B. (1991). *Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands, 611.
- Ramezani Etedali, H., Gorgin Parveh, F., & Tavakoli, A.R. (2022). Identifying Potential Rainfed Fields for Supplementary Irrigation in Qazvin Province. *Journal of Water Management in Agriculture*. 9(1), 89-100. (in Persian).
- Saaty, T.L. (1996). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw Hill. New York.
- Saeidi, R., Sotodeh Nia, A., & Babaei, S. GH. (2021). The impact of single irrigation with different salinity levels on rainfed wheat performance in Qazvin. *Water Management in Agriculture*. 8(2), 89-100. (in Persian)
- Salak Zamani, A. (2016). Analyzing the efficiency of rainwater utilization in rainfed wheat production. *Water Management in Agriculture*. 3(2), 79-84. (in Persian)
- SCI (2022). *Iran Statistical Yearbook, 2022*. Statistical Center of Iran, Tehran.
- Stigter, T., Ribeiro, L., & Dill, A. (2006). Elevation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinization and nitrate contamination levels in two agriculture regions in the south of Portugal. *Journal of Hydrogeology*. 14, 79-99.

- Tavakoli, A.R. (2001). Optimal management of single irrigation on draland wheat farming. Journal of Agricultural Engineering Research. 2(7), 41-50. (in Persian)
- Tavakoli, A.R., Liaghat, A., Alizadeh, A., & Oweis, T. (2010). Improving water efficiency through integrated water management and superior agronomic practices in rainfed cereal farming. (Ph.D. Thesis). University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian).
- Verdi Nezhad, V., Sohrabi, T., Araghi Nezhad, S.H., & Heidari, N. (2010). Optimizing cropping patterns and allocating water consumption in saline conditions and water scarcity in irrigation networks. (Ph.D. Thesis). University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian).
- Yang, J., & Lee, H. (1997). An AHP Decision Model for Facility Location Selection. Facilities. 15(9/10), 241-254.
- Zebardast, E. (2001). Application of the "Analytic Hierarchy Process" in urban and regional planning. The Publishing System of Tehran University Scientific Journals. 10(2), 13-21. (in Persian).



Original Research

Locating Suitable Rainfed Land for Supplemental Irrigation to Improve Water Productivity

H. Ojaghloou*, Z. Amiri Abdobochali, S. Oroumi

***Corresponding Author:** Assist. Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 12 November 2024, **Accepted:** 10 January 2025

Email: ojaghloou@znu.ac.ir

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2025.367655.1599

Extended Abstract

Introduction

Population pressures continue to undermine effective land and water management in many developing countries. Improving water productivity in agricultural lands is essential for enhancing production and adapting to the water scarcity crisis. Rainfed lands play a crucial role in food production. Breeding and crop improvement are two important strategies for increasing water productivity. Supplemental irrigation is considered one of the crop improvement managements in rainfed lands. This management approach involves providing one or two irrigations during critical growth periods, which can significantly improve yield and water productivity on rainfed lands. However, the effectiveness of supplemental irrigation depends on accessibility to water resources, water quality, soil fertility, and other important factors. Therefore, locating suitable rainfed areas for implementing supplemental irrigation will be the first step. The area under cultivation of rainfed lands in Zanjan Province is substantial, covering 338,000 ha. It is recognized as one of the provinces with a high capacity for producing rainfed crops in the country. This paper presents a comparative analysis of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in the context of decision-making for supplemental irrigation site selection using Geographic Information Systems (GIS) in Zanjan Province. For this purpose, several criteria were employed in the selection process, based on the literature concerning factors that influence supplementary irrigation performance.

Methodology

In this research, Zanjan Province was selected as the study area. The criteria examined in this research encompass the accessibility of water resources, water quality, soil properties, climatic factors, topography, and road accessibility, including its sub-criteria. The AHP method was employed to prioritize rainfed lands for supplemental irrigation. The AHP process consists of three key components: identifying a hierarchy of objectives, criteria and alternatives; conducting pairwise comparisons of the criteria; and integrating the results from these comparisons to determine the relative importance across all levels of the hierarchy. The factors influencing site selection exhibit various characteristics; some are descriptive and can vary in quantity, while others possess numerical values. Consequently, it is essential to standardize the values and weights of each factor. Zoning maps for each sub-criterion were prepared as information layers using ArcGIS software, and subsequently, all prepared maps were re-scored through a reclassification process. The pairwise comparison tables for the AHP method were generated using the extAHP plugin in ArcGIS software, establishing the weight coefficients for the criteria. The land classification map was created by overlaying the zoning maps corresponding to each criterion while considering the assigned weights. Finally, by integrating

the obtained map with the rainfed land map of Zanjan Province, suitable rainfed fields for supplementary irrigation were determined.

Results and Discussion

There are generally no significant restrictions in most areas of Zanjan Province regarding the water quality, soil properties, climatic factors, road accessibility, and topography for implementing supplemental irrigation. However, in certain regions, limited accessibility to water resources has caused restrictions. The access to water resources received the highest weight and importance in the AHP prioritization method, while the water quality criterion ranked second in significance and influence on decision-making. Based on classified land maps of Zanjan Province, the central and eastern regions received higher scores for implementing supplemental irrigation. Additionally, the central areas of rain-fed lands were identified as having a high potential for supplemental irrigation capability. The area and percentage of various land classes were calculated. Approximately 44.2% of the province's land is classified as either completely suitable or suitable for supplemental irrigation, while about 32.4% falls within the moderate range, and 23.4% is deemed unsuitable. Furthermore, around 59.6% of rainfed land is classified as suitable or completely suitable, about 27.8% falls within the moderate range, and 12.6% is considered unsuitable.

Conclusions

Improving yield and water productivity through supplemental irrigation in rainfed areas is a crucial crop improvement strategy. Zanjan Province, with its significant area of rainfed land, relatively favorable rainfall, and good soil quality in most regions, possesses significant production and productivity potential in these agricultural areas. In this research, suitable rainfed areas in Zanjan Province were identified for supplemental irrigation by considering relevant criteria and utilizing the AHP method. Approximately 59.6.2% of the areas in the Zanjan Province, particularly in the central and eastern regions of Zanjan, were identified as suitable or fully suitable for supplemental irrigation, while the remaining lands faced low to severe limitations. Ultimately, the effectiveness of the AHP method can be assessed in feasibility studies for the implementation of viable water projects, and its use is recommended during the initial project identification phase. The final selection of suitable locations for implementing supplemental irrigation is suggested by integrating the results obtained from AHP with findings from field surveys and regional conditions. It is indicated that the water resources required for implementing supplemental irrigation can be harvested from the current permitted allocations, without any new extraction of water resources.

Acknowledgment

This research was conducted with the scientific support of the Regional Water Company and the Agricultural Research Center of Zanjan Province.

Keywords: Supplemental irrigation, Crop improvement, Rainfed land, Zoning map





Ministry of Jihad - e - Agriculture
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

Vol. 25, No. 96, Autumn 2024

Print ISSN: 3060-6764 Online ISSN:3060-6772

Contents

Research Paper

Evaluation the Effectiveness of Management Strategies to Reduce Agricultural Water Use by Using the AquaCrop Model (Case Study: Hashtgerd plain) Omid Raja, Sajjad Veysi, Ali Barzegar	1
Quantitative Simulation of Diverged Flow Using Machine Learning Techniques and FLOW-3D Numerical Modeling Iman Karimi Sarmeydani, Mohammad Heidarnejad, Aslan Egdernezhad	27
Investigating the volume of applied irrigation water and water productivity in cherry Orchards of Razavi Khorasan province, Iran Mohammad Joleini, Ardalan Zolfagharan	47
Application of Artificial Intelligence in Predicting the Discharge Coefficient of Labyrinth Weirs with Harmonic Plans Amal Savaedi, Mohammad Reza Zayeri, Mahdi Ghomeshi, Mahdi Daryae	61
Investigating the effect of Sluiceway width and the ratio of gate Opening to Gate Width on Sediment flushing in Diversion Dams Mehrdad Asadi, Mohammad Javad Monem, Jamal Mohammad Vali Samani	83
Locating Suitable Rainfed Land for Supplemental Irrigation to Improve Water Productivity Hassan Ojaghrou, Zahra Amiri Abdochali, Sepide Oroumi	107

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research (Agricultural Engineering Research)

Vol. 25 No. 96 2024

Published by: Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Executive Director: H. Dehghani-sanij, Professor

Editor in Chief: N. Abbasi, Professor
Assistant Editor: O. Raja

Editorial Board:

F. Abbasi	Professor, Agricultural Engineering Research Institute
N. Abbasi	Professor, Agricultural Engineering Research Institute
N. Heydari	Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute
A. Kiani	Professor, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
S. Koochakzadeh	Professor, University of Tehran
M. J. Monem	Professor, Tarbiat Modares University
A. Nasser	Associate Professor, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
M. H. Omid	Professor, University of Tehran
A. Parvaresh Rizi	Associate Professor, University of Tehran
M. Shafai-Bejestan	Professor, Shahid Chamran University of Ahvaz

International Editorial Board:

M. A. Sharifi	Professor, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente Enschede, Netherlands
A. Torabi Haghighi	Professor, Leader of Hydrosystems Engineering & Management research group at Water, Energy, and Environmental Research unit in University of Oulu, Finland

Text Editor: M. R. Dahi

English Editor: M. R. Dahi

Coordinating Manager: A. Uossef -Gomrokchi

Typesetting & Layout: Sh. Jabbari

Reviewers:

- M. Esmaili Varki	- H.R. Janbaz	- N. Abbasi	- S.M.R. Naghedifar
- S. Behrozinia	- N. Heydari	- V. Kazem Alilo	- A. Naseri
- A. Tafteh	- R.Daneshfaraz	- M. Godarzi	- P. Varjavand
- A. Tavakoli	- F. Abbasi	- Y. Mehri	

AERI Site: www.aeri.ir

Journal Site: <http://idser.areeo.ac.ir>

E-mail: aridsej@areeo.ac.ir