

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)



جلد ۲۶، شماره ۹۹، تابستان ۱۴۰۴



Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

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

پژوهشی

جلد ۲۶، شماره ۹۹، تابستان ۱۴۰۴

Vol. 26, No. 99, Summer 2025

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

فهرست مقالات

- ۱ ◀ بررسی مقایسه‌ای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه شده با کاربرد کشاورزی در استان گیلان
افشین اشرفزاده، جابر صالح‌پور لاقاتی
- ۲۱ ◀ اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها با استفاده از سرریز تیز مثلثی ۹۰ درجه با راس همتراز با کف کانال
ابراهیم ولیزادگان، فرزاد جلیلی
- ۲۷ ◀ ارزیابی یک سامانه هوشمند آبیاری برای مدیریت آبیاری گندم در منطقه مشهد
سیدابوالقاسم حقایقی مقدم، مجید کرامتی، اردلان ذوالفقاران
- ۵۵ ◀ بهبود تاب‌آوری کشاورزان در مدیریت مشارکتی منابع آب تحت شرایط کم آبی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده
از مدل‌سازی عامل محور
سمیه امامی، حسین دهقانی سانیج، حجت امامی
- ۷۵ ◀ مطالعه جریان و رسوب در مجرای مارپیچ قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
حسین پرویزی، زهره رفیعی، حدیث حاتمی، علی مومن‌پور
- ۹۵ ◀ مقایسه نتایج آزمون درجای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی
علی صابری ورزنده، محمود نادری

AERI

Contents

- ۱ ▶ Comparative Analysis of Pricing Methods for Treated Wastewater in Agricultural Applications in Guilan Province
Afshin Ashrafzadeh, Jaber Salehpour Laghani
- ۲۱ ▶ Flow Measurement in Canals Using 90 Degree Triangular Sharp Crested Weir With the Vertex at the Same Level to the Bottom of the Canal.
Ebrahim Valizadegan, Farzad Jalili
- ۲۷ ▶ Performance Evaluation of a Smart Irrigation System for Efficient Wheat Water Management in the Mashhad Region
Abolghasem Haghayeghi Moghaddam, Majid Keramati, Ardalan Zolfagharan
- ۵۵ ▶ Enhancing Farmer's Resilience in Participatory Water Resources Management under Water Scarcity Conditions in the Lake Urmia Basin Using Agent – Based Modeling
Somayeh Emami, Hossein Dehghanisani, Hojjat Emami
- ۷۵ ▶ Study of Flow and Sediment in the labyrinth Channel of Pressure Compensating emitters Using Computational Fluid Dynamics (CFD)
Hossein Parvizi, Zohre Rafiei, Hadis Hatami, Ali Momenpour
- ۹۵ ▶ Comparison of In-situ 'Cylindrical Chamber' Test Results with British Standard Method and Case Study on the Permeability of the Water Supply Canal
Ali Saberi Varzaneh, Mahmood Naderi

AERI

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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 ۲۶، شماره ۹۹، تابستان ۱۴۰۴ شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

فهرست مقالات

پژوهشی

بررسی مقایسه‌ای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه شده با کاربرد کشاورزی در استان گیلان

۱ افشین اشرف‌زاده، جابر صالح‌پور لاقاتی

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها با استفاده از سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه با راس همتراز با کف کانال

۲۱ ابراهیم ولیزادگان، فرزاد جلیلی

ارزیابی یک سامانه هوشمند آبیاری برای مدیریت آبیاری گندم در منطقه مشهد

۳۷ سید ابوالقاسم حقایقی مقدم، مجید کرامتی، اردلان ذوالفقاران

بهبود تاب‌آوری کشاورزان در مدیریت مشارکتی منابع آب تحت شرایط کم آبی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌سازی عامل محور

۵۵ سمیه امامی، حسین دهقانی سانج، حجت امامی

مطالعه جریان و رسوب در مجرای ماریچ قطرچکان‌های تنظیم‌کننده فشار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

۷۵ حسین پرویزی، زهره رفیعی، حدیث حاتمی، علی مومن‌پور

مقایسه نتایج آزمون درجای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی

۹۵ علی صابری ورزنده، محمود نادری

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 (Agris) (Agris)

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 بجستان	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:

- حسن اجاقلو	- فرشید تاران	- رحیم علیمحمدی نافچی	- شادمان ویسی
- کرامت اخوان	- سمیه جنت‌رستمی	- جواد قاسمی	- افشین یوسف گمرکچی
- مسعود اکبری	- امید رجا	- مهسا قطبی‌زاده	
- سمیه امامی	- فریبرز عباسی	- بیژن کمایی عباسی	
- عاطفه پرورش‌ریزی	- نادر عباسی	- علیرضا کیانی	

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: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۲۷۰۸۳۵۹ (۰۲۶)، دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (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.areeo.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 برگبرنده 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 مقلله 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 تجارتي 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- پایان‌نامه، 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.

Research Article

Comparative Analysis of Pricing Methods for Treated Wastewater in Agricultural Applications in Guilan Province

Afshin Ashrafzadeh¹✉, Jaber Salehpour Laghani²

1. Associate Professor of Water Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. PhD Student, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(✉ Corresponding Author: a.ashrafzadeh@ut.ac.ir)

ARTICLE INFO	HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Received: 15 April 2025 Revised: 18 May 2025 Accepted: 8 June 2025 Available Online: 12 July 2025	Ashrafzadeh, A., & Salehpour Laghani, J., (2025). Comparative Analysis of Pricing Methods for Treated Wastewater in Agricultural Applications in Guilan Province. (In Persian with English abstract). <i>Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research</i> .V.26, No.99, P: 1-20 https://doi.org/10.22092/idser.2025.369170.1614

Introduction

The management of treated wastewater is a critical issue in addressing water scarcity and ensuring environmental sustainability, particularly in regions like Guilan Province, Iran, where agricultural, urban, and industrial activities strain water resources. This study aims to investigate regional preferences for pricing methods of treated wastewater, cost-based, market-based, subsidized, and environmental, in various parts of Guilan, characterized by differing environmental priorities. The research addresses the problem of aligning pricing strategies with local needs to enhance sustainable wastewater reuse. Existing literature highlights the importance of wastewater reuse for agriculture and environmental protection (Areosa *et al.*, 2024; Hajjar *et al.*, 2025) and the role of pricing in resource management (Beecher & Gould, 2018; Fagundes & Marques, 2023). However, studies focusing on regional variations in pricing preferences, especially in Iran, remain limited (Deh-Haghi *et al.*, 2020; Zafari Koloukhi *et al.*, 2021). This study employs a mixed-methods approach, combining quantitative (Kruskal-Wallis test, Random Forest) and qualitative (thematic analysis, conceptual network) techniques to analyse data from 55 stakeholders across four regions with varying environmental priorities. The main results reveal distinct regional preferences, with subsidized and environmental methods favoured in high-priority areas and cost-based and market-based methods in lower-priority regions, underscoring the need for tailored pricing policies.

Methodology

The research was conducted in Guilan Province, a key agricultural region in northern of Iran, known for its humid climate and sensitive ecosystems like the Anzali International Lagoon. The province was divided into four categories based on environmental priority: very high (e.g., Rasht, Anzali), high (e.g., Someh Sara), medium (e.g., Lahijan), and low (e.g., Khomam). Data were collected from 55 stakeholders, including farmers, experts in water and environmental issues, and representatives of local institutions, using a structured questionnaire. The questionnaire comprised demographic details, 20 Likert-scale questions assessing the four pricing methods, choice scenarios, and open-ended questions for qualitative insights. Quantitative analysis included descriptive statistics, Cronbach's alpha for reliability, Kruskal-Wallis tests for inter-regional differences, and Random Forest modeling to identify influential factors. Qualitative analysis involved thematic analysis, keyword frequency counts, and conceptual network mapping using Python (version 3.8) and libraries like Pandas, Scikit-learn, and NetworkX. The research questions focused on identifying preferred pricing methods, their influencing

factors, and qualitative explanations of these preferences. The mixed-methods approach was chosen to capture both statistical trends and nuanced stakeholder perspectives, ensuring relevance to both theoretical frameworks (e.g., sustainable resource pricing) and practical policy design.

Results and Discussion

The findings indicate significant regional variation in pricing preferences. In very high-priority areas (e.g., Rasht), the subsidized method (mean score 4.73, 57.14% preference) and environmental method (mean 4.42, 28.57%) were most favored, reflecting the urgent need for government support and environmental protection amid severe pollution (e.g., Anzali Lagoon). In high-priority areas (e.g., Someh Sara), the subsidized method (mean 4.06) led, with cost-based (mean 3.76) and market-based (mean 3.57) methods also notable, suggesting a balance between affordability and economic considerations. Medium-priority areas (e.g., Lahijan) preferred the market-based method (mean 3.93, 64.29%), driven by high agricultural demand for wastewater, while low-priority areas (e.g., Khomam) favored the cost-based method (mean 3.93, 37.50%), emphasizing financial transparency. Kruskal-Wallis tests confirmed significant differences for subsidized ($p=0.001$) and environmental ($p=0.001$) methods across regions, but not for cost-based ($p=0.206$) or market-based ($p=0.323$) methods. Random Forest analysis identified the environmental method as the most influential (importance 0.284), followed by market-based (0.261), subsidized (0.228), and cost-based (0.226). Qualitative analysis revealed dominant themes: subsidized and environmental concerns in high-priority areas, market-based in medium-priority, and cost-based in low-priority areas. A conceptual network showed strong links between subsidized and environmental methods (weight 18), reflecting stakeholder priorities. These results align with studies emphasizing economic and environmental factors in wastewater pricing (Deh-Haghi *et al.*, 2020; Obaideen *et al.*, 2022) but offer novel insights into regional specificity.

Conclusions

The study concludes that pricing preferences for treated wastewater in Guilan Province are closely tied to regional environmental priorities. Subsidized and environmental methods dominate in areas with severe pollution, while market-based and cost-based methods suit regions with stable water resources or lower pollution. Limitations include a modest sample size (55 stakeholders) and cross-sectional data, which may not capture long-term trends. The findings suggest that pricing policies must be region-specific to balance economic viability and environmental sustainability. Theoretical implications include reinforcing the role of context in resource pricing models, while practical implications involve guiding policymakers to prioritize subsidies in high-priority areas and market mechanisms in agricultural hubs. Future research should explore cost-benefit analyses and longitudinal impacts of pricing strategies.

Acknowledgement

Hereby, we would like to express our sincere gratitude to the stakeholders in Guilan Province for their participation in completing the questionnaires. We also appreciate the provincial organizations for providing access to the data used in this study. Our heartfelt thanks go to the Editor-in-Chief and esteemed reviewers whose valuable comments greatly contributed to enhancing the quality of this article.

Keywords: Stakeholder preferences; Water policy; Mixed-methods analysis; Recycled wastewater



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369170.1614>

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی مقایسه‌ای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده با کاربرد کشاورزی در استان گیلان

افشین اشرف‌زاده^۱✉، جابر صالح‌پور لاقانی^۲id

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸

چکیده

استان گیلان به دلیل وابستگی زیاد به سفیدرود و محدودیت منابع آب کشاورزی در سال‌های اخیر به دلیل اجرای برنامه‌ها در بالادست حوضه سفیدرود، توسعه شهرنشینی و افزایش آلودگی‌های محیط‌زیستی، با چالش فزاینده‌ای در تأمین آب پایدار برای بخش کشاورزی مواجه است. از این‌رو بررسی راهکارهای جایگزین مانند استفاده از پساب تصفیه‌شده و شیوه‌های مناسب قیمت‌گذاری آن، ضرورتی روزافزون یافته است. این پژوهش با هدف بررسی ترجیحات مناطق مختلف در استان گیلان نسبت به روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده (هزینه‌محور، بازارمحور، یارانه‌ای، زیست‌محیطی) به اجرا درآمده است. داده‌ها از ۵۵ ذی‌نفع شامل کشاورزان، کارشناسان منابع آب و محیط زیست و نمایندگان نهادهای محلی در چهار بخش متفاوت از استان گیلان و با اولویت‌های متفاوت رسیدگی به مشکلات ناشی از پساب، با استفاده از پرسشنامه جمع‌آوری شد و با رویکرد ترکیبی (کمی: کروسکال-والیس، جنگل تصادفی؛ کیفی: تحلیل موضوع و شبکه مفاهیم) تحلیل گردید. نتایج تحقیق نشان داد در مناطق با اولویت بسیار بالای رسیدگی به مسائل زیست‌محیطی (مانند رشت) روش یارانه‌ای (میانگین ۴/۷۳) و زیست‌محیطی (میانگین ۴/۴۲)، در مناطق با اولویت بالا (مانند صومعه‌سرا)، روش یارانه‌ای (میانگین ۴/۰۶)، در مناطق با اولویت متوسط (مانند لاهیجان) روش بازارمحور (میانگین ۳/۹۳)، و در مناطق با اولویت پایین (مانند خمام) روش هزینه‌محور (میانگین ۳/۹۳) غالب است. جنگل تصادفی، روش زیست‌محیطی با اهمیت ۰/۲۸۴ را مؤثرترین عامل در پیش‌بینی ترجیحات نشان داد. یافته‌ها نشان دادند که در مناطق با آلودگی زیست‌محیطی بالا، ترجیح ذی‌نفعان به روش‌های یارانه‌ای و زیست‌محیطی بیشتر است، در حالی که در مناطق با اولویت پایین‌تر، روش‌های بازارمحور و هزینه‌محور پذیرش بیشتری دارند. بر اساس نتایج به‌دست آمده توصیه می‌شود سیاست‌گذاران از رویکرد تلفیقی در قیمت‌گذاری پساب بهره‌گیرند به گونه‌ای که در مناطق حساس‌تر از مدل‌های یارانه‌ای و زیست‌محیطی و در مناطق کمتر حساس، از روش‌های هزینه‌محور و بازارمحور استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: ترجیحات ذی‌نفعان؛ سیاست‌گذاری آب؛ تحلیل ترکیبی؛ پساب بازچرخانی‌شده

مقدمه

(Hajjar et al., 2025; Areosa et al., 2024). بر اساس

مدیریت پساب‌های کشاورزی، شهری و صنعتی یکی از چالش‌های کلیدی در حفاظت از منابع آبی و پایداری زیست‌محیطی است. با توجه به محدودیت‌های منابع آبی در بسیاری از کشورهای جهان، بازچرخانی پساب به عنوان منبعی نامتعارف برای تأمین آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و فضای سبز اهمیت فزاینده‌ای یافته است. گزارش‌های رسمی، سالانه حدود ۲/۴۴۶ میلیارد مترمکعب پساب در کشور جمع‌آوری می‌شود که ۱/۶ میلیارد مترمکعب آن پس از تصفیه در بخش‌هایی مانند کشاورزی (۵۱/۶۴ درصد)، فضای سبز شهر (۵/۳۷ درصد) صنعت (۴/۹۹ درصد) و تغذیه آبخوان (۰/۷۳ درصد) استفاده می‌شود و باقی‌مانده صنعت و فضای سبز اهمیت فزاینده‌ای یافته است (۳۷/۲۷ درصد) در آب‌های سطحی تخلیه می‌شود

^۱ دانشیار منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(✉) نویسنده مسئول: Email: a.ashrafzadeh@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین، ایران.

این روش ها را برجسته کرده است (Yazdani *et al.*, 2022). مطالعات اخیر نشان داده اند که قیمت گذاری مؤثر منابع آبی، علاوه بر مدیریت بهتر منابع، می تواند به اصلاح الگوهای کشت و بالابردن کارایی سامانه های آبیاری منجر شود (Zamani *et al.*, 2021). در همین راستا، تحلیل ارزش اقتصادی آب و پساب تصفیه شده و تعیین میزان آمادگی کشاورزان برای پرداخت هزینه های مرتبط، از جمله گام های کلیدی در طراحی سیاست های مبتنی بر بهره وری و عدالت منطقه ای محسوب می شود (Esmaili & Vazirzadeh, 2009). این موضوع زمانی با اهمیت تر است که به نقش تغییر اقلیم و تأثیر آن بر نیاز آبی گیاهان (مانند برنج در استان گیلان) نیز توجه شود (Hadinia *et al.*, 2017).

روش های قیمت گذاری پساب تصفیه شده شامل چهار رویکرد اصلی هستند: (۱) روش هزینه محور (بر مبنای هزینه های عملیاتی و سرمایه ای)، (۲) روش بازار محور (بر اساس مکانیسم عرضه و تقاضا)، (۳) روش یارانه ای (با حمایت مالی دولت) و (۴) روش زیست محیطی (بر مبنای ارزش های اکولوژیکی). هر یک از این روش ها اهداف، مزایا و محدودیت های خاص خود را دارد (Beecher & Gould, 2018; Fagundes & Marques, 2023). با توجه به رویکردهای مختلف در قیمت گذاری پساب تصفیه شده، بررسی تطبیقی آنها در مناطقی با ویژگی های متنوع می تواند درک بهتری از ترجیحات محلی فراهم کند. استان گیلان، با تنوع جغرافیایی و تفاوت چشمگیر در شدت آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی (Mahmoudpour *et al.*, 2020)، تراکم صنعتی و دسترسی به زیرساخت های تصفیه فاضلاب، نمونه ای برجسته از تفاوت های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی است که این تفاوت ها بر نگرش های جوامع محلی نسبت به قیمت گذاری پساب تصفیه شده تأثیر می گذارند. این استان، به عنوان یکی از قطب های کشاورزی و زیست محیطی ایران، به دلیل قرار گرفتن در حاشیه دریای خزر و دارا بودن اکوسیستم های حساسی مانند تالاب بین المللی انزلی، با چالش های ویژه ای در مدیریت پساب (Water and Wastewater Company of Iran, 2024). با این حال، تنها ۵۵/۸۹ درصد جمعیت شهری و ۰/۶۷ جمعیت روستایی تحت پوشش تأسیسات جمع آوری و تصفیه پساب هستند که این امر نشان دهنده نیاز مبرم به توسعه زیرساخت ها و سیاست گذاری مؤثر در این حوزه است (Water and Wastewater Company of Iran, 2024).

استان گیلان دارای ۲۵۴۲۲۷ انشعاب فاضلاب خانگی شهری و ۵۷۰۱۴ انشعاب فاضلاب غیر خانگی شهری است. در بخش غیر شهری، این مقادیر به ترتیب ۱۹۳ و ۱۴ انشعاب است. این استان در مجموع دارای ۶۹/۸۵ کیلومتر خطوط انتقال فاضلاب شهری و ۴/۵۰ کیلومتر خطوط انتقال فاضلاب روستایی است (Statistical Yearbook of the National). در استان گیلان، ۷۴/۹۸ درصد از جمعیت شهری و ۱/۶۴ درصد از جمعیت روستایی تحت پوشش شبکه جمع آوری فاضلاب هستند که این مقادیر بالاتر از میانگین کشوری است (Water and Wastewater Company of Iran, 2024).

به رغم تصفیه شدن حدود ۶۵/۴۱ درصد از پساب تولیدی در کشور، در برخی از مناطق کشور زمین های کشاورزی همچنان با فاضلاب خام آبیاری می شوند که این موضوع می تواند نگرانی هایی به ویژه درباره سلامت عمومی و محیط زیست ایجاد کند (Yazdani *et al.*, 2022; Zamani, 2021). Kebrabadi, 2021). در شرایط کم آبی، استفاده از پساب تصفیه شده می تواند راه حلی مؤثر برای تأمین آب کشاورزی باشد. با این همه، در مناطقی که هنوز زیرساخت های لازم وجود ندارد یا ظرفیت تصفیه ناکافی است، آلودگی آب و خاک تشدید می شود و فرصت استفاده از این منبع ارزشمند از بین می رود.

در ایران، با توجه به اقلیم نیمه خشک و وابستگی شدید به کشاورزی، قیمت گذاری نهاده های کشاورزی اهمیت ویژه ای دارد. یارانه های کشاورزی و سیاست های بازار محور، اگرچه به حمایت از کشاورزان کمک کرده اند، اما ناکارآمدی برخی سیاست ها و تفاوت های منطقه ای، نیاز به بازنگری در

بررسی مقایسه‌ای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده با کاربرد کشاورزی در استان گیلان

این شکاف پژوهشی، به‌ویژه در مناطقی با تنوع شرایط مانند استان گیلان، نیاز به مطالعاتی با رویکرد ترکیبی را برجسته می‌کند که داده‌های کمی (مانند نظرسنجی‌های ساختاریافته) و کیفی (مانند تحلیل دیدگاه‌های کشاورزان) را ادغام کنند. در شرایطی که مطالعات گذشته بر ارزش اقتصادی آب (Esmaili & Vazirzadeh, 2009; Yazdani *et al.*, 2022) یا تحلیل مدل‌های ریاضی تخصیص منابع (Zamani *et al.*, 2021) تمرکز داشته‌اند، پرداختن به ترجیحات اجتماعی و نگرش در مقیاس محلی می‌تواند مکملی کاربردی و ضروری باشد.

هدف این پژوهش، بررسی ترجیحات جوامع محلی در چهار منطقه متفاوت گیلان نسبت به روش‌های قیمت‌گذاری هزینه‌محور، بازارمحور، یارانه‌ای و زیست‌محیطی است. این مطالعه با استفاده از رویکرد ترکیبی، به دنبال پاسخ به این پرسش‌هاست: ۱- کدام روش قیمت‌گذاری در هر منطقه ترجیح داده می‌شود؟ ۲- چه عواملی بر این ترجیحات تأثیر می‌گذارند؟ و ۳- دیدگاه‌های کیفی چگونه این ترجیحات را توضیح می‌دهند؟ انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش با شناسایی الگوهای منطقه‌ای و عوامل کلیدی، به سیاست‌گذاران در طراحی نظام قیمت‌گذاری متناسب با نیازهای محلی کمک کند. نوآوری این پژوهش در ترکیب تحلیل کمی و کیفی برای شناسایی ترجیحات محلی نسبت به چهار الگوی متفاوت قیمت‌گذاری آب در مقیاس منطقه‌ای و با تأکید بر تنوع فرهنگی و اقتصادی استان گیلان است که در مطالعات پیشین کمتر به آنها توجه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان گیلان در شمال ایران و در حاشیه دریای خزر واقع شده است و به دلیل اقلیم مرطوب خیزی وجود سد سفیدرود و زمین‌های حاصلخیز، یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی کشور به‌شمار می‌رود. تولید محصولات مانند برنج، چای، زیتون و دیگر محصولات باغی، در کنار وجود

مواجهه است. آلودگی رودخانه‌هایی مانند زرجوب و گوهررود که از درون شهر رشت عبور می‌کنند و ورود حجم قابل توجهی از پساب کشاورزی، شهری و صنعتی به تالاب انزلی، این منطقه را در وضعیت بحرانی قرار داده است. کمبود تأسیسات تصفیه و بودجه محدود (پنج هزار میلیارد ریال در برابر نیاز دویست هزار میلیارد ریال، تنها برای دو شهر رشت و بندرانزلی) این چالش را تشدید کرده است. در این راستا، توسعه روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده، به‌عنوان ابزاری برای تأمین مالی زیرساخت‌ها و تشویق استفاده پایدار اهمیت بالایی دارد (Fu *et al.*, 2025).

در ایران، مطالعات ده‌حقی و همکاران (Deh-Haghi *et al.*, 2020) نشان می‌دهد تمایل کشاورزان به استفاده از پساب تصفیه‌شده و پرداخت مبلغی برای آن، به کیفیت و قیمت پیشنهادی وابسته است که این موضوع اهمیت درک ترجیحات محلی را تأیید می‌کند. با وجود اهمیت قیمت‌گذاری نهادی آب و روی آوردن به مطالعاتی در این خصوص، مطالعات محدودی در ایران به بررسی ترجیحات جوامع محلی در مقیاس منطقه‌ای پرداخته‌اند. برای نمونه، ظفری کلوخی و همکاران (Zafari Koloukhi *et al.*, 2021) هزینه‌های تصفیه پساب در مشهد را تحلیل کردند اما کمتر به نگرش‌ها و ترجیحات کشاورزان توجه داشتند. به‌طور مشابه، تهامی‌پور و همکاران (Tahamipour *et al.*, 2015) در استان گلستان بر تعادل بین ارزش ذاتی و تعرفه پرداخت‌شده برای آب تأکید کردند، اما تنوع روش‌های قیمت‌گذاری (مانند زیست‌محیطی یا یارانه‌ای) را به‌صورت جامع پوشش ندادند. تحلیل نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که برای بررسی ابعاد اقتصادی و نهادی استفاده از پساب در ایران گرچه تلاش‌هایی شده، اما اغلب این تلاش‌ها متمرکز بوده است بر جنبه‌های فنی یا هزینه‌ای و به‌ترجیحات محلی کشاورزان کمتر توجه شده است. به‌ویژه، پیوند میان کیفیت، قیمت و پذیرش اجتماعی در سیاست‌گذاری منابع آب نیازمند بررسی عمیق‌تری است.

کوهستانی املش و سیاهکل، که در معرض فشار آلودگی کمتری قرار دارند، به عنوان مناطق با "اولویت پایین" شناسایی شدند.

روش تحقیق

جامعه هدف این پژوهش شامل سه گروه اصلی ذی نفعان مدیریت منابع آب و پساب در استان گیلان است: (۱) کشاورزان فعال در تولید برنج، چای و زیتون با تجربه عملی در استفاده از منابع آبی؛ (۲) کارشناسان منابع آب و محیط زیست شاغل در نهادهایی مانند اداره کل حفاظت محیط زیست، شرکت آب منطقه ای و جهاد کشاورزی با تحصیلات مرتبط؛ و (۳) نمایندگان نهادهای محلی، شامل اعضای شوراهای اسلامی شهر و روستا و فعالان محیط زیست با نقش در تصمیم گیری های زیرساختی. نمونه ای متشکل از ۵۵ نفر از چهار منطقه با اولویت های زیست محیطی متفاوت انتخاب شد: ۱۵ نفر در هر یک از مناطق با اولویت بسیار بالا (رشت، انزلی)، بالا (صومعه سرا) و متوسط (لاهیجان) و ۱۰ نفر در منطقه با اولویت پایین (خمام). این ترکیب، تنوع دیدگاه های تخصصی، عملیاتی و محلی را تضمین کرد.

کفایت حجم نمونه با فرمول کوکران (سطح اطمینان ۹۵ درصد، خطای مجاز ۱۲ درصد) محاسبه شد که نمونه ای حدود ۵۶ نفر را پیشنهاد داد که نزدیک به حجم مورد استفاده در این مطالعه است. این حجم برای یک پژوهش اکتشافی ترکیبی کافی است. در منطقه با اولویت پایین، به دلیل جمعیت کمتر و محدودیت دسترسی به ذی نفعان واجد شرایط، ۱۰ نفر انتخاب شدند که رویکردی رایج در مطالعات مناطق کم جمعیت است. پایایی پرسشنامه با آلفای کرونباخ (بزرگ تر یا مساوی ۰/۷ برای هر روش قیمت گذاری) تأیید شد.

پرسشنامه از چهار بخش تشکیل شده است: (۱) بخش اطلاعات جمعیت شناختی شامل منطقه، سن، شغل و تجربه کاری (بیشتر یا کمتر از ۱۰ سال)، (۲) بخش ارزیابی کمی شامل ۲۰ پرسش لیکرت ۵ درجه ای (۱: کاملاً مخالف، ۵:

اکوسیستم های حساسی چون تالاب انزلی، اهمیت زیست محیطی این استان را دوچندان کرده است. با این حال، گسترش شهرنشینی، رشد فعالیت های صنعتی و نبود زیرساخت های کافی برای جمع آوری و تصفیه فاضلاب، موجب شده تا گیلان با چالش های گسترده ای در زمینه آلودگی آب و تهدید منابع طبیعی مواجه باشد.

در این پژوهش، استان گیلان به عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است و بر اساس میزان بار آلودگی، تراکم فعالیت های انسانی وضعیت زیرساخت های موجود و تأثیرگذاری بر منابع حساس، شهرستان های آن به چهار طبقه مجزا از نظر اولویت توسعه سیستم های تصفیه پساب تقسیم شده اند (Farrokhi et al., 2008). شهرستان های رشت، رودبار و انزلی به دلیل حجم بالای پساب تولیدی، تراکم زیاد صنایع و نقش مستقیم در آلودگی تالاب انزلی، در طبقه "اولویت بسیار بالا" قرار گرفتند. در مجموع، از این مناطق روزانه نزدیک به ۵۰۰۰۰ مترمکعب فاضلاب شهری و صنعتی بدون تصفیه یا با تصفیه ناکامل به تالاب بین المللی انزلی تخلیه می شود. از این مقدار حدود ۱۵۰۰۰ مترمکعب مستقیماً از خروجی های شهرک صنعتی رشت منشأ می گیرد که حاوی پساب های صنعتی با بار آلودگی شیمیایی بالاست (Gilan Department of Environmental Protection, 2024). این حجم عظیم و مداوم از ورودی آلاینده ها، تهدیدی جدی برای اکوسیستم آبی تالاب، تنوع زیستی منطقه و سلامت اجتماعی- زیست محیطی جوامع پیرامونی محسوب می شود و ضرورت بازچرخانی هدفمند و ایمن این فاضلاب ها را دوچندان می کند.

شهرستان های صومعه سرا، فومن، ماسال، شفت، تالش، آستارا و رضوانشهر که فعالیت های صنعتی و کشاورزی با فشار زیست محیطی نسبتاً بالا دارند، در گروه "اولویت بالا" طبقه بندی شدند. لاهیجان، لنگرود، رودسر، آستانه، املش و سیاهکل با برخورداری از منابع آبی نسبتاً پایدار و فعالیت های انسانی کم ریسک تر، در رده "اولویت متوسط" جای گرفتند و سرانجام، شهرستان خمام و بخش هایی از مناطق

کاملاً موافق) برای سنجش پذیرش چهار روش قیمت‌گذاری پساب شامل روش مبتنی بر هزینه با پنج سؤال در مورد هزینه‌های ساخت، نگهداری، انرژی، عدالت در قیمت‌گذاری و شفافیت مالی تأسیسات، روش مبتنی بر بازار با پنج پرسش درباره تقاضای کشاورزی، تقاضای صنعت و ارزش بازاری پساب تصفیه‌شده، روش یارانه‌ای با پنج پرسش در مورد یارانه دولتی، عدالت و حمایت از مناطق محروم و روش زیست‌محیطی با پنج پرسش درباره ارزش زیست‌محیطی و ضررهای آلودگی،^۳ بخش سناریوهای انتخابی شامل چهار پرسش برای مقایسه مستقیم روش‌های قیمت‌گذاری (مانند ترجیح پرداخت ۵۰۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب پساب تصفیه‌شده برای روش مبتنی بر هزینه یا ۱۰۰۰۰ ریال برای روش مبتنی بر یارانه) و ۴) بخش نظرهای کیفی شامل سه پرسش باز برای شناسایی ترجیحات، چالش‌ها و دیدگاه‌ها درباره آلودگی، هزینه‌ها و یارانه. متغیرهای کلیدی شامل امتیازهای لیکرت برای هر روش قیمت‌گذاری و مضامین کیفی بودند. سناریوهای انتخابی به‌منظور سنجش ترجیحات ذی‌نفعان در شرایط فرضی و ساده‌شده طراحی شدند و نه به‌عنوان پیشنهاد قیمت‌های اجرایی. این سناریوها با الهام از مطالعات مشابه و بر اساس هزینه‌های تقریبی تصفیه پساب در ایران (Water and Wastewater Company of Iran, 2024) تنظیم شدند تا درک ذی‌نفعان از ارزش اقتصادی روش‌های قیمت‌گذاری ارزیابی شود.

مدل تحلیلی شامل سه لایه است: ۱) توصیفی (میانگین، باکس پلات، نقشه حرارتی)، ۲) پیش‌بینی (جنگل تصادفی^۱ برای شناسایی عوامل مؤثر بر ترجیحات) و ۳) کیفی (تحلیل موضوعی و شبکه مفاهیم). با استفاده از آزمون کروسکال-والیس، تفاوت‌های آماری بررسی شد. مزیت‌بخشی روش‌های قیمت‌گذاری بر اساس ترجیحات ذی‌نفعان (امتیازات لیکرت)، فراوانی انتخاب در سناریوها و مضامین کیفی (پاسخ‌های باز) ارزیابی شد. مدل جنگل تصادفی وزن هر روش را در پیش‌بینی ترجیحات مشخص کرد. این معیارها مزیت روش‌ها را با توجه به شرایط منطقه‌ای (آلودگی، اقتصاد، زیرساخت) تعیین کردند.

نمونه‌ای از پرسش‌های کمی و کیفی این‌گونه‌اند: "روش یارانه‌ای قیمت‌گذاری پساب، دسترسی عادلانه به منابع آبی را برای کشاورزان فراهم می‌کند (گزینه‌ها: ۱=کاملاً مخالف، ۲=مخالف، ۳=بی‌نظر، ۴=موافق، ۵=کاملاً موافق)" یا "قیمت‌گذاری زیست‌محیطی پساب به کاهش آلودگی تالاب انزلی کمک می‌کند (گزینه‌ها: ۱=کاملاً مخالف، ۲=مخالف، ۳=بی‌نظر، ۴=موافق، ۵=کاملاً موافق)" و "به نظر شما، مهم‌ترین چالش در استفاده از پساب تصفیه‌شده برای کشاورزی در منطقه شما چیست؟".

برای بررسی عوامل مؤثر بر درک ذی‌نفعان از چالش‌های اجرایی (مانند کمبود تأسیسات تصفیه)، از مدل جنگل تصادفی استفاده شد که در آن متغیر هدف، امتیاز بالای ۴ در پرسش‌های مربوط به چالش‌ها بود. متغیرهای پیش‌بینی شامل میانگین امتیازات چهار روش قیمت‌گذاری بودند و اهمیت ویژگی‌ها^۲ برای تعیین وزن هر روش در ادراک چالش‌ها محاسبه شد.

تحلیل کیفی در سه سطح اجرا شد. در سطح اول، تحلیل موضوع‌ها برای شناسایی موضوع‌های اصلی بر اساس

² Feature Importance

¹ Random Forest

نتایج

نتایج بر مبنای مقایسه نظریات ذی نفعان در یک

منطقه: در منطقه با اولویت بسیار بالا، کارشناسان منابع آب و محیط زیست و نمایندگان نهادهای محلی بیشترین نمره را به روش های یارانه ای و زیست محیطی داده اند (اغلب نمره ها بین ۴ تا ۵)، در حالی که کشاورزان در این دو روش، نمره -هایی نزدیک به ۴ داده اند و در موارد معدودی نیز به روش یارانه ای نمره های پایین تر (۳ یا کمتر) داده اند. در مقابل، روش های بازارمحور و هزینه محور در میان سه گروه نمره های پایین تری داشته اند، به ویژه از سوی کارشناسان محیط زیست که نگرانی های خود را در مورد آثار منفی این مدل ها بر اکوسیستم تالاب انزلی مطرح کرده اند.

ترجیحات بالای کارشناسان و مسئولان محلی نسبت به روش های یارانه ای و زیست محیطی بازتاب دهنده حساسیت آنها نسبت به بحران اکولوژیکی تالاب انزلی و لزوم حمایت دولت در شرایط بحرانی است. کشاورزان نیز با وجود برخی تردیدها نسبت به کارآمدی نظام یارانه ای، روش های حمایتی را قابل پذیرش دانسته اند. در این منطقه، منطق زیست محیطی و عدالت اجتماعی بر منطق اقتصادی غلبه دارد.

در منطقه با اولویت بالا، کشاورزان روش یارانه ای را بالاتر از دیگر گزینه ها ارزیابی کرده اند، در حالی که کارشناسان منابع آب، دیدگاه متعادلی بین روش های زیست محیطی، بازارمحور و یارانه ای داشته اند. نمایندگان نهادهای محلی نیز نمره های نسبتاً بالایی به روش بازارمحور داده اند. در مجموع، روش هزینه محور پایین ترین میانگین نمره را میان هر سه گروه داشته است.

این منطقه از نظر زیست محیطی در شرایط نگران کننده قرار دارد اما هنوز به وضعیت بحرانی نرسیده است؛ بنابراین، تمایل به تلفیق سیاست های حمایتی و بازارمحور در اینجا بیشتر به چشم می خورد. کارشناسان سعی در متعادل سازی

فراوانی در پاسخ های باز هر طبقه صورت گرفت. در سطح دوم، تحلیل محتوای کمی شده با شمارش کلمات کلیدی مرتبط با روش های قیمت گذاری، مانند "یارانه" و "آلودگی"، برای مقایسه شدت تأکید در مناطق صورت گرفت. در سطح سوم، شبکه مفاهیم با استفاده از ابزار NetworkX رسم شد تا ارتباط بین روش های قیمت گذاری نمایش داده شود. وزن یال ها بر اساس هم رخدادی مضامین تعیین شد. برای تمامی تحلیل ها از زبان برنامه نویسی Python (نسخه ۳/۸) و کتابخانه های SciPy، NumPy، Pandas، Scikit-learn، Matplotlib، Seaborn و NetworkX استفاده شد. خروجی ها شامل جدول ها و نمودارهایی مانند نقشه حرارتی^۱، باکس پلات و نمودارهای میله ای بودند که در بخش نتایج تحلیل و بررسی شده اند.

نقشه حرارتی ابزاری است تجسمی که از رنگ برای نمایش شدت یا فراوانی مقادیر در یک ماتریس داده استفاده می کند. در این پژوهش، نقشه حرارتی برای نشان دادن الگوهای ترجیحات ذی نفعان در مناطق مختلف نسبت به روش های قیمت گذاری به کار رفته است. این روش به شناسایی سریع روابط و تفاوت های بین مناطق و روش ها کمک می کند. باکس پلات نیز نموداری آماری است که توزیع داده ها را از طریق نمایش میانه، چارک ها (Q1 و Q3) و نقاط پرت نشان می دهد. در این مطالعه، باکس پلات ها برای نمایش توزیع امتیازات ترجیح ذی نفعان برای هر روش قیمت گذاری در چهار طبقه اولویت استفاده شده اند. این نمودارها پراکندگی نظر ها، اجماع یا تنوع دیدگاه ها و وجود نظر های افراطی (نقاط پرت) را به وضوح نشان می دهند. این ابزار های تجسمی مکمل یکدیگرند؛ نقشه حرارتی الگوهای کلی را برجسته می کند، باکس پلات توزیع و پراکندگی داده ها را نشان می دهد و نمودارهای میله ای مقایسه مستقیم میانگین ها را ممکن می سازد. ترکیب این روش ها در تحلیل داده های پژوهش، درک جامعی از ترجیحات ذی نفعان را در قیمت گذاری پساب در استان گیلان ارائه کرده است.

¹ Heat Map

شفاف و قابل مدیریت قیمت‌گذاری شوند و نیاز به حمایت‌های غیرمستقیم دولتی را در اولویت بعدی می‌دانند. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده گذار از مدل‌های حمایتی به سمت سیاست‌های بازارمحور در شرایط باثبات‌تر باشد.

نتایج بر مبنای مقایسه روش قیمت‌گذاری در

مناطق مختلف: شکل (۱) میانگین امتیازهای چهار روش قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده را در چهار طبقه با اولویت‌های متفاوت نشان می‌دهد. در مناطق با اولویت بالا مانند رشت و انزلی، روش یارانه‌ای با میانگین ۴/۷۳ بالاترین امتیاز را کسب کرده‌است که نشان‌دهنده پذیرش بسیار بالای این روش در مناطقی با آلودگی شدید و کمبود زیرساخت است. روش زیست‌محیطی با میانگین ۴/۴۲ در همین طبقه نیز از اقبال بالایی برخوردار است که با توجه به تأثیر مستقیم پساب بر تالاب انزلی و رودخانه‌های زرجوب و گوهررود، قابل انتظار است. روش‌های مبتنی بر هزینه و بازار به ترتیب با میانگین‌های ۳/۴۴ و ۳/۴۱ کمتر مورد پذیرش قرار گرفته‌اند که احتمالاً به دلیل نگرانی‌های مالی و شفاف-نبودن هزینه‌های تأسیسات است.

در مناطق با اولویت بالا مانند صومعه‌سرا و تالش، روش یارانه‌ای با میانگین ۴/۰۶ پیشرو است، اما روش مبتنی بر هزینه با میانگین ۳/۷۶ پذیرش قابل توجهی دارد. روش‌های مبتنی بر بازار و زیست‌محیطی به ترتیب با میانگین‌های ۳/۵۷ و ۳/۶۶ کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما روش زیست‌محیطی در این طبقه نسبت به روش بازارمحور پذیرش بیشتری دارد. این یافته نشان می‌دهد که در این مناطق، حمایت‌های دولتی همچنان اولویت دارد، اما نگرش‌های زیست‌محیطی نیز مورد توجه بوده است.

در مناطق با اولویت متوسط مانند لاهیجان و لنگرود که فعالیت‌های کشاورزی مانند چای‌کاری غالب است، روش مبتنی بر بازار با میانگین ۳/۹۳ و روش یارانه‌ای با میانگین ۳/۹۱، تقریباً معادل با یکدیگرند. این یافته با تقاضای بالای پساب تصفیه‌شده در کشاورزی همخوانی دارد (۵۱/۶۴ درصد

رویکردها دارند و نمایندگان محلی نیز خواهان مدلی هستند که هم حمایت مالی و هم تحرک اقتصادی ایجاد کند. کشاورزان در این منطقه همچنان بر حمایت دولت تأکید دارند اما نسبت به دیگر مناطق دیدگاه‌شان در حال تغییر است.

در منطقه با اولویت متوسط، کشاورزان نمره بالایی به روش بازارمحور داده‌اند (اغلب ۴ تا ۵)، در حالی که کارشناسان منابع آب، دیدگاه متوسطی نسبت به این روش داشته‌اند و روش زیست‌محیطی را کمی بالاتر ارزیابی کرده‌اند. نمایندگان نهادهای محلی نیز روش بازارمحور را به‌عنوان گزینه‌ای اجرایی و مقبول میان ذی‌نفعان محلی تلقی کرده‌اند و به آن نمره‌های بالایی داده‌اند. نمره‌های روش یارانه‌ای در میان هر سه گروه کاهش یافته است.

در منطقه‌ای با فشار زیست‌محیطی کمتر و زیرساخت‌های نسبتاً فعال‌تر، کشاورزان ترجیح می‌دهند از منطق بازار بهره بگیرند و قراردادهای مستقیم برای تأمین آب تنظیم کنند. نمایندگان محلی نیز مدل‌های مشارکت عمومی-خصوصی را مؤثرتر می‌دانند. کاهش حمایت از مدل یارانه‌ای نشان می‌دهد که در شرایط با ثبات‌تر، بازیگران محلی به دنبال استقلال اقتصادی و پاسخگویی بیشتر هستند.

در منطقه با اولویت پایین، بیشترین نمره از سوی هر سه گروه به روش هزینه‌محور و پس از آن بازارمحور داده شده است. کشاورزان این روش‌ها را شفاف، قابل کنترل و عادلانه ارزیابی کرده‌اند. نمایندگان محلی نیز به دلیل اثربخشی در توزیع منابع و کاهش وابستگی به بودجه‌های دولتی، از این روش‌ها حمایت کرده‌اند. روش‌های یارانه‌ای و زیست‌محیطی نمره‌های پایین‌تری گرفته‌اند، به‌ویژه از سوی کشاورزان.

در این منطقه که فشار زیست‌محیطی کمتر و زیرساخت‌های خدماتی بهتر است، رویکردهای مبتنی بر هزینه واقعی و منطق اقتصادی مقبول‌تر هستند. ذی‌نفعان محلی بر این باورند که منابع آب تصفیه‌شده باید از طریق سازوکارهای

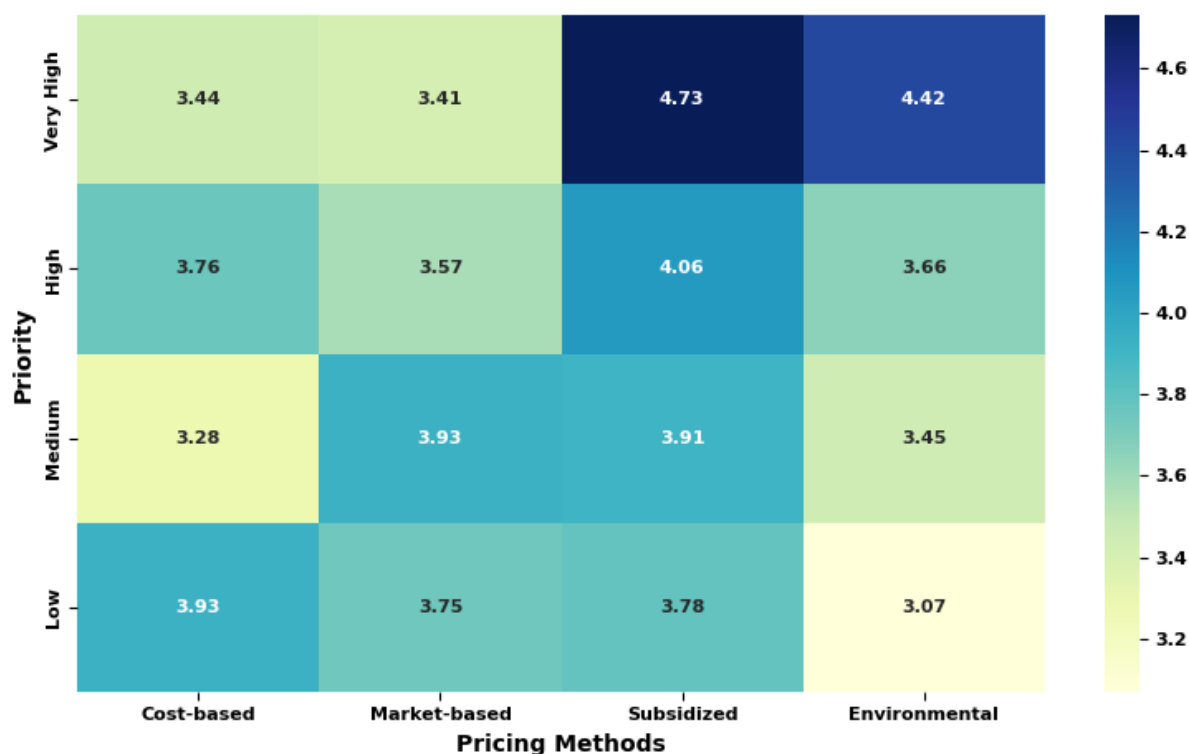
که روش های یارانه ای و بازار به ترتیب با میانگین های ۳/۷۸ و ۳/۷۵ در رتبه های بعدی قرار دارند. روش زیست محیطی با میانگین ۳/۰۷ کمترین امتیاز را کسب کرده است که احتمالاً به دلیل فشار آلودگی کمتر و تراکم جمعیتی پایین تر است. شکل (۱) تصویری روشن از تفاوت ترجیحات منطقه ای نسبت به چهار روش قیمت گذاری پساب تصفیه شده ارائه می دهد. الگوی کلی نشان می دهد که روش یارانه ای در مجموع بالاترین میانگین امتیاز را به ویژه در مناطق با فشار زیست محیطی بالا (مانند رشت و انزلی) کسب کرده است، در حالی که روش زیست محیطی تنها در همین مناطق جایگاه بالایی دارد و در دیگر مناطق به تدریج اهمیت کمتری یافته است. روش های بازار محور و هزینه محور، اگرچه در مناطق با اولویت پایین یا ساختار اقتصادی متنوع تر (مانند لاهیجان یا خمام) جایگاه بهتری دارند، اما همچنان در مناطق بحرانی کمتر مقبول هستند.

این تفاوت ها نشان می دهد که ترجیحات ذی نفعان تابعی از شرایط زیست محیطی، ساختار تولیدی و منطق اجرایی بومی هر منطقه است، به گونه ای که در مناطق بحران زده انتظار برای حمایت دولتی و حفاظت از منابع بیشتر است، اما ذی نفعان در مناطق پایدارتر رویکردهای اقتصادی تر و مستقل تر را مناسب تر می دانند. نکته مهم تر این است که حتی در مناطق با فعالیت گسترده کشاورزی، مانند رشت یا انزلی، شدت بحران زیست محیطی باعث شده نگاه ذی نفعان از منطق صرفاً اقتصادی فاصله بگیرد و به سوی سیاست های حمایتی و زیست محور متمایل شود. شکل (۱) تأکید می کند هیچ الگوی واحدی برای سیاست گذاری قیمت گذاری پساب وجود ندارد و لازم است رویکردهای منطقه محور و ترکیبی، متناسب با واقعیت های اکولوژیکی، اقتصادی و نهادی هر منطقه اتخاذ شود.

از پساب تصفیه شده در کشور در بخش کشاورزی استفاده می شود. روش های زیست محیطی و مبتنی بر هزینه به ترتیب با میانگین های ۳/۴۵ و ۳/۲۸ کمتر مورد توجه اند که نشان دهنده اولویت کمتر نگرش های زیست محیطی و هزینه ای در این مناطق است. توجه به این نکته مهم است که همه مناطق مورد مطالعه، از جمله مناطق با اولویت بالا و بسیار بالا، دارای فعالیت های کشاورزی هستند. اما آنچه در منطقه با اولویت متوسط مانند لاهیجان و لنگرود تمایز ایجاد می کند، نه صرف وجود کشاورزی، بلکه نوع ساختار کشاورزی، شیوه بهره برداری و نظام اقتصادی حاکم بر تولیدات کشاورزی است. در این مناطق، چای کاری به عنوان فعالیت غالب، معمولاً توسط تعاونی ها و واحدهای خرد و نیمه صنعتی مدیریت می شود و بازار فروش آن، نسبت به دیگر مناطق وابستگی بیشتری به نوسان های قیمتی و شبکه عرضه دارد. این ویژگی موجب شده است تا کشاورزان و نهادهای محلی این منطقه، به روش های بازار محور نیز تمایل نشان دهند. به همین دلیل، میانگین نمره روش بازار محور (۳/۹۳) و روش یارانه ای (۳/۹۱) بسیار نزدیک است و تفاوت آماری معناداری ندارد.

در مناطق با اولویت بسیار بالا، با اینکه کشاورزی سهم عمده ای از اقتصاد را دارد، اما شدت بحران زیست محیطی و تهدیدهای اکولوژیکی (مانند آلودگی تالاب انزلی) به گونه ای است که نگاه غالب ذی نفعان (اعم از کشاورزان، کارشناسان و نهادهای محلی) به سمت سیاست های حمایتی و زیست محور گرایش دارد، حتی اگر فعالیت های کشاورزی به طور گسترده پیش رود. بنابراین، تفاوت در ترجیح روش ها بیشتر ناشی از شرایط زیست محیطی و نهادی هر منطقه است تا وجود کشاورزی یا نبود کشاورزی.

سرانجام، در مناطق با اولویت پایین مانند خمام، روش مبتنی بر هزینه با میانگین ۳/۹۳ بالاترین امتیاز را دارد، در حالی



شکل ۱- نقشه حرارتی میانگین امتیازهای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده در مناطق با اولویت‌های متفاوت

Fig. 1- Heat map of the average scores of treated wastewater pricing methods across regions with different priority levels

شکل (۲) توزیع امتیازهای چهار روش قیمت‌گذاری را در چهار طبقه با اولویت‌های متفاوت به صورت باکس پلات نشان می‌دهد. این نمودارها پراکندگی داده‌ها، میانه و نقاط پرت را برای هر روش و طبقه اولویت نمایش می‌دهند. در روش مبتنی بر هزینه، توزیع امتیازات با میانه‌ای بین ۳/۰۶ تا ۳/۹۱ در تمامی طبقات نسبتاً متغیر است. مناطق با اولویت بسیار بالا میانه ۳/۴۷ و پراکندگی قابل توجهی (محدوده ۲/۲۵ تا ۴/۴۵) دارند که بیانگر تنوع دیدگاه‌های ذی‌نفعان در این مناطق است. در مناطق با اولویت بالا، میانه به ۳/۸۲ افزایش می‌یابد و پراکندگی مشابه است (محدوده ۲/۹۲ تا ۴/۷۰)، اما یک نقطه پرت (۲/۵۹) وجود دارد که می‌تواند نماینده‌ای از وجود دیدگاه‌های افراطی در مورد هزینه‌ها باشد. در مناطق با اولویت متوسط، میانه به ۳/۰۶ کاهش می‌یابد و پراکندگی (محدوده ۲/۲۵ تا ۴/۷۴) همچنان گسترده است که نشان‌دهنده نظرات متنوع است. در مقابل، مناطق با اولویت پایین میانه ۳/۹۱ و پراکندگی کمتری دارند

شکل (۲) توزیع امتیازهای چهار روش قیمت‌گذاری را در چهار طبقه با اولویت‌های متفاوت به صورت باکس پلات نشان می‌دهد. این نمودارها پراکندگی داده‌ها، میانه و نقاط پرت را برای هر روش و طبقه اولویت نمایش می‌دهند. در روش مبتنی بر هزینه، توزیع امتیازات با میانه‌ای بین ۳/۰۶ تا ۳/۹۱ در تمامی طبقات نسبتاً متغیر است. مناطق با اولویت بسیار بالا میانه ۳/۴۷ و پراکندگی قابل توجهی (محدوده ۲/۲۵ تا ۴/۴۵) دارند که بیانگر تنوع دیدگاه‌های ذی‌نفعان در این مناطق است. در مناطق با اولویت بالا، میانه به ۳/۸۲ افزایش می‌یابد و پراکندگی مشابه است (محدوده ۲/۹۲ تا ۴/۷۰)، اما یک نقطه پرت (۲/۵۹) وجود دارد که می‌تواند نماینده‌ای از وجود دیدگاه‌های افراطی در مورد هزینه‌ها باشد. در مناطق با اولویت متوسط، میانه به ۳/۰۶ کاهش می‌یابد و پراکندگی (محدوده ۲/۲۵ تا ۴/۷۴) همچنان گسترده است که نشان‌دهنده نظرات متنوع است. در مقابل، مناطق با اولویت پایین میانه ۳/۹۱ و پراکندگی کمتری دارند

زیستی مواجه‌اند، ذی‌نفعان محلی فراتر از جایگاه یا تخصص خود اهمیت ویژه‌ای برای ملاحظات محیط‌زیستی قائل‌اند. این اتفاق می‌تواند نشان‌دهنده چند واقعیت کلیدی باشد: نخست، افزایش آگاهی و حساسیت عمومی نسبت به پیامدهای بلندمدت تخریب محیط‌زیست، حتی در میان گروه‌هایی چون کشاورزان که معمولاً مسائل اقتصادی را در اولویت قرار می‌دهند؛ دوم، درونی شدن اهمیت پایداری اکولوژیکی در حافظه جمعی ساکنان مناطق بحرانی، به‌ویژه در اثر تجربه شخصی از خسارت‌های مکرر؛ و سوم، احتمال موفقیت سیاست‌های مبتنی بر محیط‌زیست در صورتی که شفاف و همراه باشند با عدالت و مشوق‌های مناسب.

این داده‌ها نه تنها به معنای پذیرش روشی خاص است، بلکه باید به عنوان فرصتی برای تقویت سیاست‌گذاری زیست‌محیطی مشارکت‌محور تلقی شود. در چنین مناطقی، پتانسیل اجتماعی برای اجرای سیاست‌هایی مانند تعرفه‌گذاری اکولوژیکی، نظام‌های انگیزشی برای بازچرخانی پساب و مدل‌های مشارکتی مدیریت منابع به وضوح وجود دارد. این الگو می‌تواند الگویی برای دیگر مناطق در حال ورود به بحران نیز محسوب شود.

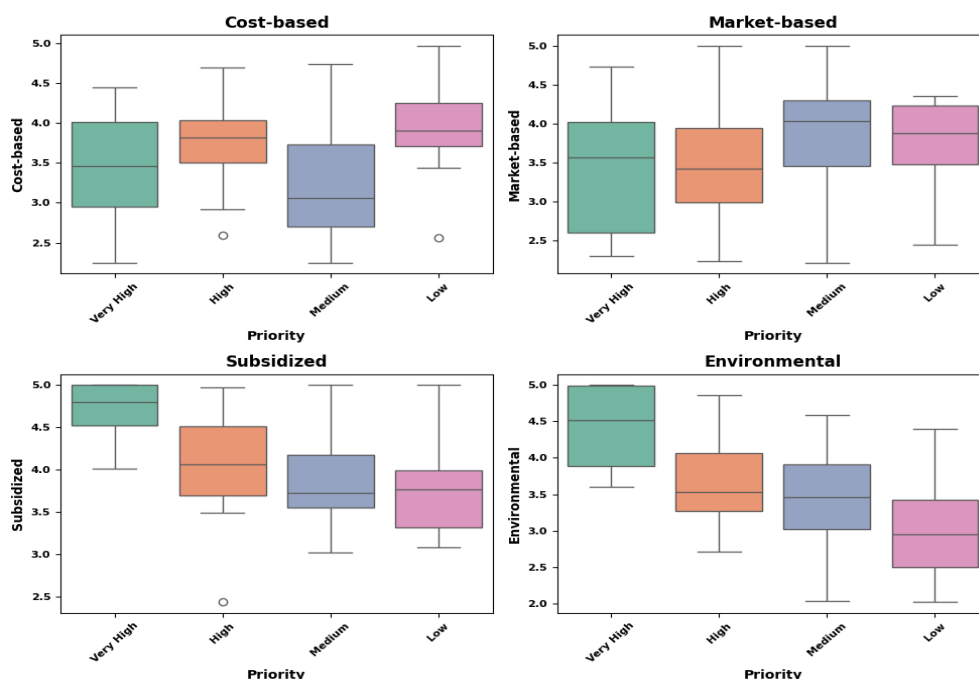
در مناطق با اولویت بالا، میانه به ۳/۵۴ کاهش می‌یابد و پراکندگی کمی بیشتر است (محدوده ۲/۷۱ تا ۴/۸۶) اما همچنان نقطه پرتی وجود ندارد. در مناطق با اولویت متوسط و پایین، میانه به ترتیب به ۳/۴۶ و ۲/۹۵ می‌رسد و پراکندگی مشابهی مشاهده می‌شود (محدوده ۲/۰۳ تا ۴/۵۹ برای متوسط و ۲/۰۲ تا ۴/۴۰ برای پایین) که نشان‌دهنده کاهش اهمیت ملاحظات زیست‌محیطی در مناطق با فشار آلودگی کمتر است.

نشان‌دهنده پذیرش نسبتاً خوب این روش در این مناطق است.

روش یارانه‌ای در مناطق با اولویت بسیار بالا، بالاترین میانه را دارد (۴/۸۰)، پراکندگی کم است (محدوده ۴/۰۱ تا ۵/۰۰) و نقطه پرتی مشاهده نمی‌شود. این داده‌ها نشان‌دهنده پذیرش بسیار بالای این روش از سوی تقریباً همه گروه‌های ذی‌نفع، از جمله کشاورزان، کارشناسان محیط‌زیست و نمایندگان نهادهای محلی است. این اجماع گسترده احتمالاً ناشی از درک مشترک نسبت به بحران زیست‌محیطی و اقتصادی در این مناطق و نیاز به حمایت مستقیم دولت برای جبران ناترازی مالی، زیرساختی و نهادی مرتبط با بازچرخانی پساب است. در مناطق با اولویت بالا، میانه به ۴/۰۷ کاهش می‌یابد، پراکندگی کمی بیشتر است (محدوده ۳/۴۹ تا ۴/۹۷) و یک نقطه پرت (۲/۴۴) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده دیدگاه‌های متضاد است. در مناطق با اولویت متوسط و پایین، میانه به ترتیب به ۳/۷۳ و ۳/۷۷ می‌رسد و پراکندگی مشابهی مشاهده می‌شود (محدوده ۳/۰۲ تا ۵/۰۰ در متوسط و ۳/۰۸ تا ۵/۰۰ در پایین)، که نشان‌دهنده پذیرش قابل قبول این روش در این مناطق است، اما نسبت به مناطق با اولویت بسیار بالا کمتر است.

روش زیست‌محیطی در مناطق با اولویت بسیار بالا، میانه ۴/۵۲ را کسب کرده، پراکندگی کم است (محدوده ۳/۶۰ تا ۵/۰۰) و نقطه پرتی مشاهده نمی‌شود. این داده‌ها نشان‌دهنده اهمیت بالای ارزش‌گذاری زیست‌محیطی در این مناطق است. برخلاف تصورات اولیه مبنی بر ترجیح منافع اقتصادی کوتاه‌مدت، داده‌ها نشان می‌دهند در مناطقی مانند رشت و انزلی که با بحران‌های اکولوژیکی جدی مانند آلودگی تالاب انزلی، تخریب اکوسیستم رودخانه‌ها و تهدید امنیت

بررسی مقایسه‌ای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده با کاربرد کشاورزی در استان گیلان



شکل ۲- باکس پلات‌های توزیع امتیازهای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده در مناطقی با اولویت‌های متفاوت

Fig. 2- Boxplots of the score distribution of treated wastewater pricing methods across regions with different priority levels

شفافیت، کنترل‌پذیری و پایداری مالی را به جای اتکای صرف به یارانه ترجیح می‌دهند. از این‌رو، کاهش نسبی حمایت از مدل یارانه‌ای الزاماً به معنای مخالفت با حمایت نیست، بلکه بازتابی از ترجیح منطق اجرایی کارآمدتر و تجربه‌محور در مواجهه با نظام‌های حمایتی ناکارآمد است. تحلیل ترجیحات قیمت‌گذاری با استفاده از مدل جنگل تصادفی نیز نشان می‌دهد روش زیست‌محیطی با بیشترین میزان اهمیت (۰/۲۸۴) نقش کلیدی در پیش‌بینی ترجیحات دارد. پس از آن، روش بازارمحور (۰/۲۶۱)، یارانه‌ای (۰/۲۲۸) و مبتنی بر هزینه (۰/۲۲۶) قرار دارند. تحلیل سناریوها نشان می‌دهد در مناطق با اولویت بسیار بالا، روش یارانه‌ای با ۵۷/۱۴ درصد و زیست‌محیطی با ۲۸/۵۷ درصد؛ در مناطق با اولویت بالا، روش‌های یارانه‌ای و بازارمحور هر یک با ۳۵/۷۱ درصد؛ در مناطق با اولویت متوسط، روش بازارمحور با ۶۴/۲۹ درصد؛ و در مناطق با اولویت پایین، روش یارانه‌ای با ۵۰/۰۰ درصد و هزینه‌محور با ۳۷/۵۰ درصد

یافته‌های شکل‌های (۱ و ۲) نشان می‌دهند در مناطق با اولویت بسیار بالا مانند رشت و انزلی، روش‌های یارانه‌ای و زیست‌محیطی بیشترین پذیرش را دارند. در مناطق با اولویت بالا مانند صومعه‌سرا، روش یارانه‌ای غالب است، اما دیگر روش‌ها نیز مورد توجه هستند. در مناطق با اولویت متوسط مانند لاهیجان، روش بازارمحور بیشترین ترجیح را دارد و در اولویت‌های پایین مانند خمam، روش هزینه‌محور غالب است. اگرچه روش یارانه‌ای در نگاه نخست می‌تواند برای اغلب ذی‌نفعان جذاب باشد، اما داده‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ترجیح به آن در مناطق مختلف یکسان نیست. در مناطق با بحران شدید مانند رشت و انزلی، یارانه به‌مثابه ضرورتی حیاتی برای بقای سیستم‌ها تلقی می‌شود؛ اما در مناطقی با اولویت متوسط و پایین، که زیرساخت‌ها نسبی بهتر و تجربه بهره‌برداران از حمایت‌های دولتی با بی‌اعتمادی همراه بوده است، تمایل به روش‌های مستقل‌تر مانند بازارمحور یا هزینه‌محور بیشتر دیده می‌شود. در این مناطق، ذی‌نفعان

بیشترین ترجیح را دارند که این الگوها تأثیر سطح اولویت را بر ترجیحات ذی نفعان نشان می دهد.

در نگاه اول، این نتایج ممکن است با وضعیت نامطلوب زیست محیطی کنونی برخی مناطق مانند آلودگی شدید تالاب انزلی، تناقض داشته باشد. با این حال، این یافته نه تنها نشان دهنده آگاهی ذی نفعان از اهمیت حفاظت محیط زیست است، بلکه بیانگر شکاف بین نگرش مثبت و عمل واقعی در این مناطق است. تحلیل داده های ثبت شده نشان می دهد کارشناسان منابع آب و محیط زیست و نمایندگان نهادهای محلی، به دلیل درک عمیق تر از پیامدهای زیست محیطی و تعهد حرفه ای، امتیازهای بالایی به روش زیست محیطی داده اند. حتی کشاورزان که به طور سنتی کسب درآمد را اولویت می دانند، در این مناطق به دلیل تجربه مستقیم خسارات ناشی از آلودگی (مانند کاهش بهره وری کشاورزی یا تهدید معیشت) نمره های بالایی به این روش اختصاص داده اند. با این همه، تبدیل این ترجیح به بهبود واقعی زیست محیطی با موانعی مانند کمبود زیرساخت های تصفیه پساب، ناکارآمدی نهادی و محدودیت های مالی مواجه است. این تناقض خود یافته ای است کلیدی که نشان می دهد وجود تمایل به ارزش گذاری زیست محیطی، بدون پشتیبانی سیاستی، مالی و اجرایی کافی نمی تواند به بهبود شرایط منجر شود. از این رو، این یافته بر ضرورت تقویت سیاست های تشویقی، آموزش عمومی و سرمایه گذاری در زیرساخت های بازچرخانی پساب تأکید دارد تا نگرش مثبت ذی نفعان به اقدام های عملی تبدیل شود.

آزمون کروסקال-والیس برای مقایسه امتیازات روش های قیمت گذاری پساب بین چهار طبقه با اولویت های متفاوت اجرا شد. نتایج آزمون نشان داد که برای روش مبتنی بر هزینه، تفاوت معنی داری بین طبقات اولویت وجود ندارد (stat=4.58, p=0.206). این امر با میانگین های تقریباً

یکسان در شکل (۱) برای روش مبتنی بر هزینه (۳/۲۸ تا ۳/۹۳) همخوانی دارد و بیانگر این است که پذیرش این روش به سطح اولویت منطقه وابسته نیست. به طور مشابه، برای روش مبتنی بر بازار نیز تفاوت معنی داری بین طبقات اولویت مشاهده نشد (stat=3.49, p= 0.323). این موضوع با میانگین های این روش در شکل (۱) (۳/۴۱ تا ۳/۹۳) سازگار است و نشان می دهد میزان پذیرش این روش در مناطق با اولویت های متفاوت، تفاوت قابل توجهی ندارد. با این همه باید گفت در مناطق با اولویت متوسط (میانگین ۳/۹۳)، روش مبتنی بر بازار پذیرش بیشتری دارد که می تواند به تقاضای بالای پساب تصفیه شده در بخش کشاورزی (مانند چای کاری در لاهیجان) مرتبط باشد. در مقابل، برای روش یارانه ای تفاوت معنی داری بین طبقات اولویت وجود دارد (stat=15.89, p=0.001) به گونه ای که میانگین امتیازها در طبقه با اولویت بسیار بالا (۴/۷۳)، به طور قابل توجهی بیشتر از میانگین در طبقه با اولویت پایین (۳/۷۸) است شکل (۱). این امر اهمیت حمایت های دولتی را در مناطق با اولویت بالا (مانند رشت و انزلی) نشان می دهد. روش زیست محیطی نیز تفاوت معنی داری بین طبقات با اولویت های متفاوت نشان داد (stat=16.87, p=0.001)، به طوری که میانگین امتیازها در طبقه با اولویت بسیار بالا (۴/۴۲)، بسیار بیشتر از میانگین امتیازها در طبقه با اولویت پایین (۳/۰۷) است شکل (۱). این موضوع بر اهمیت ملاحظات زیست محیطی در مناطق با آلودگی شدید (مانند تالاب انزلی) تأکید می کند.

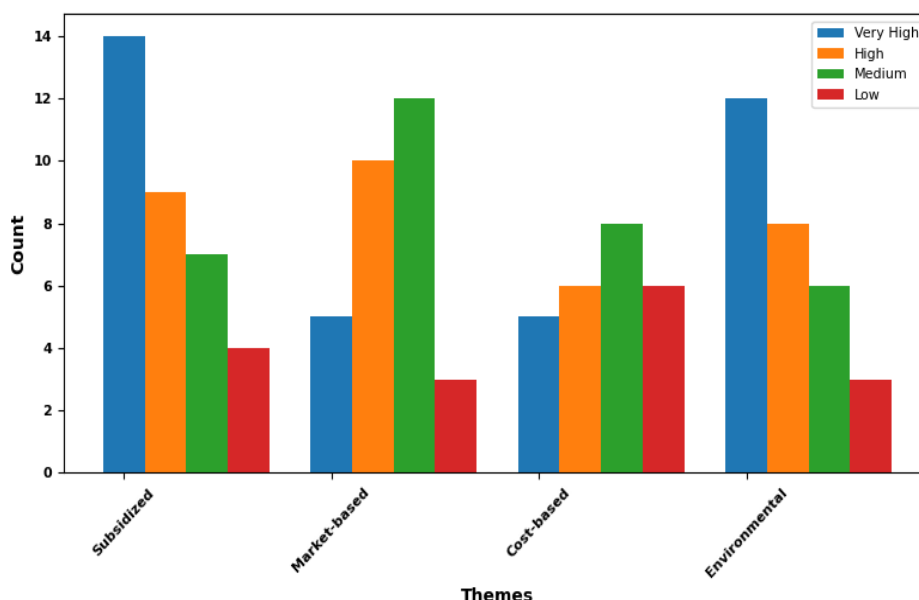
در شکل (۳)، فراوانی موضوع های کیفی مرتبط با روش های قیمت گذاری پساب تصفیه شده در چهار سطح اولویت نشان داده شده است. این موضوع ها از تحلیل پاسخ های کارشناسان و ذی نفعان استخراج شده اند. در میان پاسخ ها، عباراتی مانند «تخصیص یارانه برای بهره برداران ضروری است»، «قیمت گذاری باید متناسب با ارزش آب باشد»،

بررسی مقایسه‌ای روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده با کاربرد کشاورزی در استان گیلان

«شفاف‌سازی هزینه‌ها اعتماد مصرف‌کنندگان را افزایش می‌دهد» و «ملاحظات زیست‌محیطی باید در تعیین تعرفه لحاظ شود» به‌صورت مکرر مشاهده شده است. بر این اساس، داده‌های کیفی در قالب چهار موضوع اصلی طبقه‌بندی شدند: موضوع‌های یارانه‌ای (مرتبط با حمایت‌های دولتی)، موضوع‌های زیست‌محیطی (مرتبط با پیامدهای اکولوژیک)، موضوع‌های بازارمحور (مرتبط با سازوکار عرضه و تقاضا) و موضوع‌های هزینه‌محور (مرتبط با شفافیت و منطق اقتصادی تعرفه‌ها).

در مناطق با اولویت بسیار بالا (مانند رشت و انزلی)، موضوع‌های یارانه‌ای با فراوانی ۱۴ و زیست‌محیطی با فراوانی ۱۲ غالب‌اند، که با میانگین بالای این دو روش در شکل (۱) (به‌ترتیب ۴/۷۳ و ۴/۴۲) همخوانی دارد. این یافته‌ها بر اهمیت حمایت‌های دولتی و وجود نگرانی‌های زیست‌محیطی

در مناطق با اولویت بسیار بالا (مانند رشت و انزلی)، موضوع‌های یارانه‌ای با فراوانی ۱۴ و زیست‌محیطی با فراوانی ۱۲ غالب‌اند، که با میانگین بالای این دو روش در شکل (۱) (به‌ترتیب ۴/۷۳ و ۴/۴۲) همخوانی دارد. این یافته‌ها بر اهمیت حمایت‌های دولتی و وجود نگرانی‌های زیست‌محیطی



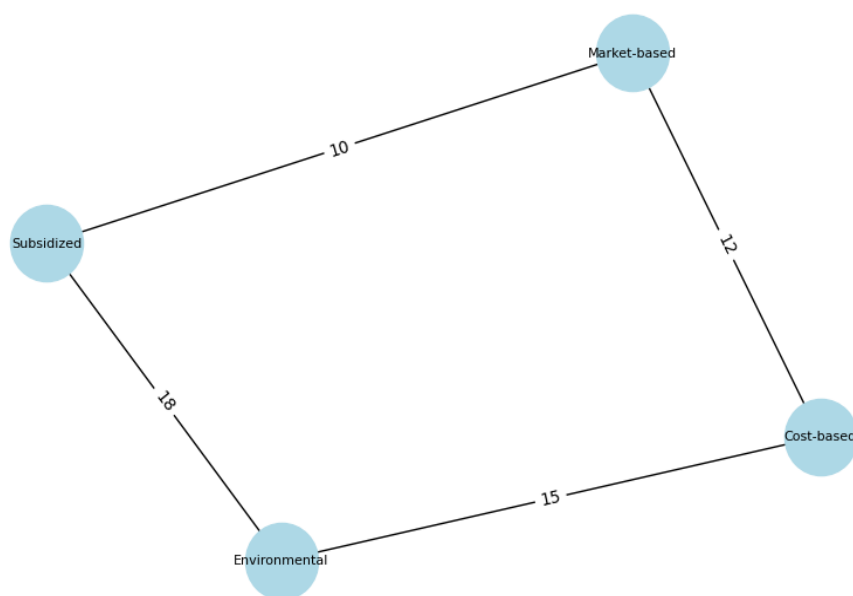
شکل ۳- فراوانی موضوع‌های کیفی روش‌های قیمت‌گذاری پساب تصفیه‌شده در مناطقی با اولویت‌های متفاوت

Fig. 3- Frequency of qualitative themes related to treated wastewater pricing methods across regions with different priority levels

شکل (۴) شبکه مفاهیم حاصل از تحلیل هم‌رخدادی یارانه‌ای و زیست‌محیطی با وزن ۱۸ مشاهده می‌شود که با موضوع‌ها را نمایش می‌دهد. قوی‌ترین ارتباط بین روش فراوانی بالای این موضوع‌ها در مناطق با اولویت بسیار بالا

شکل (۳) و میانگین بالای آنها در شکل (۱) همخوانی دارد. این پیوند بر هم افزایی بین حمایت مالی و دغدغه های زیست محیطی در ذهن ذی نفعان تأکید می کند. ارتباط میان روش زیست محیطی و هزینه محور (وزن ۱۵) و نیز میان روش بازار محور و هزینه محور (وزن ۱۲) نیز به خوبی نشان می دهد که ذی نفعان استانداردهای زیست محیطی و

سازوکارهای بازار را با ملاحظات هزینه ای مرتبط می دانند. در مقابل، ضعیف ترین ارتباط بین روش یارانه ای و بازار محور (وزن ۱۰) دیده می شود که با ترجیح متفاوت این روش ها در اولویت های مختلف (یارانه ای در بسیار بالا و بالا و بازار محور در متوسط) سازگار است.



شکل ۴- شبکه مفاهیم روش های قیمت گذاری پساب تصفیه شده بر اساس هم رخدادی موضوع های کیفی

Fig. 4- Conceptual network of treated wastewater pricing methods based on co-occurrence of qualitative themes.

بحث و نتیجه گیری

تخصیص منابع تمرکز داشته اند و کمتر به ترجیحات اجتماعی و نگرش های محلی در مقیاس منطقه ای پرداخته اند. تنوع روش های قیمت گذاری، به ویژه روش های زیست محیطی و یارانه ای، به صورت جامع بررسی نشده است. این پژوهش با ادغام داده های کمی و کیفی، تلاش کرد تا این شکاف تحقیقاتی را پر کند و الگوهای منطقه ای ترجیحات را در استان گیلان بشناسد.

نتایج به دست آمده از مناطق با اولویت متوسط و پایین نشان داد که روش های مبتنی بر ملاحظات زیست محیطی و هزینه واقعی در مقایسه با دیگر روش ها، میانگین امتیاز کمتری کسب کرده اند. این یافته، در نگاه اول ممکن است با

هدف این پژوهش بررسی ترجیحات جوامع محلی در چهار منطقه مختلف استان گیلان نسبت به روش های قیمت گذاری پساب تصفیه شده (هزینه محور، بازار محور، یارانه ای و زیست محیطی) با استفاده از رویکرد ترکیبی بود. این مطالعه به دنبال پاسخ به این پرسش ها بود: کدام روش قیمت گذاری در هر منطقه ترجیح داده می شود؟ چه عواملی بر این ترجیحات تأثیر می گذارند؟ و دیدگاه های کیفی چگونه این ترجیحات را توضیح می دهند؟ با وجود اهمیت قیمت گذاری پساب در مدیریت منابع آبی، مطالعات گذشته در ایران بیشتر بر ارزش اقتصادی آب یا مدل های ریاضی

انتظارات کارشناسی در تعارض به نظر برسد زیرا حفظ پایداری منابع آب و خاک، به‌ویژه در شرایط تنش آبی و آلودگی تدریجی، مستلزم اولویت دادن به رویکردهای مبتنی بر حفاظت محیط‌زیست و واقعی‌سازی هزینه‌هاست.

با این حال، تحلیل ساختار پاسخ‌دهندگان نشان می‌دهد که بخش زیادی از نمره‌های پایین به این روش‌ها از سوی کشاورزان و نمایندگان نهادهای محلی ارائه شده است. این گروه‌ها، به‌طور طبیعی، ترجیح خود را بر اساس منافع ملموس، دسترسی فوری و قابلیت اجرایی در کوتاه‌مدت ابراز می‌کنند. در شرایطی که درآمد کشاورزان ناپایدار، قیمت نهاده‌ها بالا و سازوکارهای حمایتی ناکارآمد است روش‌هایی که بار مالی مستقیم بیشتری بر دوش بهره‌برداران می‌گذارند، حتی اگر از نظر فنی مطلوب باشند، کمتر استقبال می‌شوند.

این روند بیانگر شکاف مشخصی میان ضرورت‌های بلندمدت زیست‌محیطی و اولویت‌های تصمیم‌گیری روزمره ذی‌نفعان محلی است؛ شکافی که در بسیاری از پروژه‌های مدیریت منابع طبیعی و محیط‌زیست نیز مشاهده می‌شود.

از این منظر، پایین بودن امتیاز روش‌های زیست‌محیطی نباید به ناآگاه‌بودن یا بی‌اعتنا بودن ذی‌نفعان تعبیر شود، بلکه نشانه‌ای از ضرورت طراحی سیاست‌های ترغیبی، آموزشی و ساختاریافته است که بتواند بین الزام‌های بلندمدت زیست‌محیطی و دغدغه‌های کوتاه‌مدت اقتصادی و اجرایی آشتی برقرار کند. بر این اساس توصیه می‌شود در سیاست‌گذاری‌های مرتبط با بازچرخانی پساب، ضمن ترویج مدل‌های زیست‌محور، از مکانیسم‌های تشویقی-تنبیهی هوشمندانه، حمایت مالی هدفمند و برنامه‌های ارتقای آگاهی محلی استفاده شود تا مسیر گذار از ترجیحات کوتاه‌مدت به رفتارهای پایدار هموار گردد.

نتایج این پژوهش با مطالعات داخلی و بین‌المللی همخوانی دارد و در عین حال دیدگاه‌های جدیدی ارائه می‌دهد. برای مثال، مشابه با یافته‌های ده‌حقی و همکاران (Deh-Haghi *et al.*, 2020) در غرب ایران که تمایل کشاورزان به استفاده از پساب تصفیه‌شده را وابسته به کیفیت و قیمت آن می‌دانند، در مناطق با اولویت متوسط مانند لاهیجان، روش بازارمحور با میانگین ۳/۹۳ و ترجیح ۶۴/۲۹ درصد غالب بود که نشان‌دهنده اهمیت عوامل اقتصادی در ترجیحات است. این موضوع با پژوهش اسماعیلی و وزیرزاده (Esmaeili & Vazirzadeh, 2009) در جنوب ایران نیز همخوانی دارد که قیمت‌گذاری مؤثر را برای اصلاح الگوهای کشت مؤثر می‌دانند. ترجیح روش هزینه‌محور با میانگین ۳/۹۳ در مناطق با اولویت پایین (مانند خمام)، با تأکید ظفری کلوخی و همکاران (Zafari Koloukhi *et al.*, 2021) بر اهمیت هزینه‌ها در مدیریت پساب در مشهد و یافته‌های جونگ و همکاران (Jung *et al.*, 2018) در هند همخوانی دارد. جونگ و همکاران (Jung *et al.*, 2018) با مقایسه هزینه‌های سیستم متمرکز و غیرمتمرکز تصفیه پساب نشان دادند که در صورت طراحی دقیق سیستم‌های غیرمتمرکز، این روش می‌تواند با صرفه‌تر باشد و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را کاهش دهد، اگرچه نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه و زمین بیشتری است. این نتیجه، مشابه با تأکید بر تحلیل هزینه‌ها در تعیین شیوه‌های مدیریت بهینه پساب در مناطق با اولویت پایین است. از سوی دیگر، ترجیح روش یارانه‌ای با میانگین ۴/۷۳ در مناطق با اولویت بسیار بالا (مانند رشت) با نتایج مطالعات یوسفی و مهدیان (Yousefi & Mahdian, 2015) همخوانی دارد که بر ضرورت اقتصادی بازیافت پساب تأکید دارد و نیز با نتایج پژوهش‌های ویلر و همکاران (Wheeler *et al.*, 2025) هماهنگ است که روش نرخ‌گذاری پلکانی را برای حمایت از جوامع کم‌درآمد مؤثر می‌دانند. علاوه بر این، اهمیت روش زیست‌محیطی با میانگین ۴/۴۲ و اهمیت ۰/۲۸۴ در جنگل تصادفی در مناطق با آلودگی بالا

با مطالعات داخلی مانند مطالعات رحیمی و همکاران (Rahimi *et al.*, 2018) همخوانی دارد که بر کیفیت پساب و کاهش آلودگی تأکید داشتند و با نتایج مطالعات عبیدین و همکاران (Obaideen *et al.*, 2022) همخوانی دارد که نشان دادند مدیریت مؤثر پساب نقش قابل توجهی در تحقق ۱۱ هدف از ۱۷ هدف توسعه پایدار سازمان ملل دارد (از جمله بهبود سلامت، افزایش دسترسی به آب، کاهش فقر، تولید انرژی پاک و کاهش اثرهای زیست محیطی). این یافته ها بر اهمیت استراتژیک بازیافت و مدیریت زیست محیطی پساب در سطوح ملی و جهانی تأکید دارند. با این حال، این پژوهش با تقسیم بندی مناطق بر اساس اولویت و ترکیب تحلیل کمی و کیفی، درک دقیق تری از ترجیحات محلی در قیمت گذاری پساب ارائه می دهد که آن را از دیگر مطالعات متمایز می کند.

این مطالعه با محدودیت هایی روبه رو بود. حجم نمونه (۵۵ نفر) ممکن است تنوع کامل دیدگاه ها را در کل استان گیلان پوشش ندهد، به ویژه در مناطق با اولویت پایین که تنها ۱۰ نفر شرکت داشتند. تحلیل ها بر اساس داده های مقطعی نبودند و تغییرات احتمالی ترجیحات در بلندمدت

بررسی نشدند. به علاوه، دسترسی نداشتن به داده های دقیق هزینه- فایده برای هر روش قیمت گذاری، امکان تحلیل عمیق تر اثرهای اقتصادی را محدود کرد.

با وجود این محدودیت ها، یافته های پژوهش کاربردهای عملی متعددی دارند. سیاست گذاران می توانند از این نتایج برای طراحی نظام قیمت گذاری متناسب با نیازهای محلی استفاده کنند؛ برای مثال، در مناطق با اولویت بالا و بسیار بالا تأکید بر روش های یارانه ای و زیست محیطی می تواند به جبران کمبود بودجه و کاهش فشار بر اکوسیستم های حساس کمک کند، در حالی که در مناطق با اولویت متوسط و پایین، روش های بازارمحور و هزینه محور می توانند پاسخگوی نیازهای اقتصادی و شفافیت مالی باشند. این الگوها می توانند به تخصیص بهینه منابع مالی برای توسعه زیرساخت های تصفیه پساب در استان گیلان کمک کنند. پیشنهاد می شود تحقیقات آینده بر تحلیل هزینه- فایده روش های قیمت گذاری و تأثیر آنها بر رفتار کشاورزان در بلندمدت تمرکز کنند تا اثربخشی این سیاست ها ارزیابی شود.

قدردانی

بدین وسیله مراتب قدردانی خود از ذی نفعان استان گیلان برای مشارکت شان در تکمیل پرسشنامه ها را اعلام می کنیم و از نهادهای استانی نیز برای فراهم کردن دسترسی به داده های مورد استفاده در این مطالعه سپاسگزاریم. از سردبیر محترم نشریه "تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی"، داوران محترمی که با دیدگاه های ارزشمندشان باعث ارتقای کیفیت مقاله شدند و همچنین ویراستار محترم مجله بسیار سپاسگزاریم.

مراجع

- Areosa, I., Martins, T. A. E., Lourinho, R., Batista, M., Brito, A. G., & Amaral, L. (2024). Treated wastewater reuse for irrigation: A feasibility study in Portugal. *Science of The Total Environment*, 954, 176698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176698>
- Beecher, J., & Gould, T. (2018). Pricing wastewater to save water: Are theory and practice transferable? *Utilities Policy*, 52, 81–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jup.2018.04.005>

- Deh-Haghi, Z., Bagheri, A., Fotourehchi, Z., & Damalas, C. A. (2020). Farmers' acceptance and willingness to pay for using treated wastewater in crop irrigation: A survey in western Iran. *Agricultural Water Management*, 239, 106262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106262>
- Esmaeili, A., & Vazirzadeh, S. (2009). Water Pricing for Agricultural Production in the South of Iran. *Water Resources Management*, 23(5), 957–964. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9308-y>
- Fagundes, T. S., & Marques, R. C. (2023). Challenges of recycled water pricing. *Utilities Policy*, 82, 101569. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101569>
- Farrokhi, M., Hajrasoliha, M., Meemari, G., Fahiminia, M., Talebi, M., & Kohansal, M. (2008). The creation of management systems for funding priorities in wastewater project in rural communities in the Islamic Republic of Iran. *Water Science and Technology*, 58(6), 1181–1186. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.347> (in Persian)
- Fu, B., Wu, J., Chen, S., Cheng, J., Zheng, Z., Zhang, Y., Lin, X., & Xiao, L. (2025). Does resource recovery and utilization improve environmental and economic performance of rural wastewater treatment plants? A case study in Xiamen, China. *Water Research*, 283, 123791. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123791>
- Gilan Department of Environmental Protection (2024). <https://gilan.doe.ir>
- Hadinia, H., Pirmoradian, N., & Ashrafzadeh, A. (2017). Effect of changing climate on rice water requirement in guilan, north of Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 8(1). <https://doi.org/10.2166/wcc.2016.025>
- Hajjar, T., Mohtar, R. H., Abou Jaoude, L., & Yanni, S. F. (2025). Treated wastewater reuse for irrigation in a semi-arid region. *Science of The Total Environment*, 966, 178579. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178579>
- Jung, Y. T., Narayanan, N. C., & Cheng, Y.-L. (2018). Cost comparison of centralized and decentralized wastewater management systems using optimization model. *Journal of Environmental Management*, 213, 90–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.081>
- Mahmoudpour, H., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2020). Qualitative Assessment of the Coastal Plain of Talesh using the Modified DRASTIC Vulnerability Method. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 24(3), 97–118.
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S., & Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Rahimi, M., Ebrahimi, K., & Araghinejad, S. (2018). Introduction and Assessment of a New Effluents Usage Method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 963–974. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.229798.667648> (in Persian)
- Statistical Yearbook of the National Water and Wastewater Industry (2023). <https://www.nww.ir/documentation-center-stat>
- Tahamipour, M., Kalashami, M., & Chizari, A. (2015). Irrigation Water Pricing in Iran: The Gap between Theory and Practice. *International Journal of Agricultural Management and Development*, 5(2), 109. <https://doi.org/10.5455/ijamd.168344>
- Water and Wastewater Company of Iran (2024). <https://www.nww.ir>
- Wheeler, S. A., Nauges, C., & Grafton, R. Q. (2025). Water pricing and markets: Principles, practices and proposals. *Applied Economic Perspectives and Policy*, n/a(n/a). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aep.13505>
- Yazdani, S., Hasanvand, M., Rafiei, H., & Saleh, I. (2022). Determining the optimal tariff for Treated wastewater in the agricultural sector in the south of Tehran province. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 53(1), 91–108.

- <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2021.314897.668981> (in Persian)
- Yousefi, A., & Mahdian, S. (2015). The Economic and Social Necessity of Water Reuse in Iran. *Water Reuse, I*(1), 1–7. https://wrj.ut.ac.ir/article_52347.html (in Persian)
- Zafari Koloukhi, H., Akbarzadeh, A., & Tafazzoli, S. M. (2021). Sewage Treatment Method and its Role on Wastewater Price: Case Comparison of Sewage Treatment Plants No. 4 and 5 in Mashhad. *Journal of Water and Sustainable Development*, 7(4), 1–10. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i4.85580> (in Persian)
- Zamani Kebrabadi, B. (2021). Quality of Industrial Effluents from Plants in Northeast Isfahan for Agricultural Reuse. *Land Management Journal*, 9(1), 157–165. <https://doi.org/10.22092/lmj.2021.341763.222> (in Persian)
- Zamani, O., Azadi, H., Mortazavi, S. A., Balali, H., Moghaddam, S. M., & Jurik, L. (2021). The impact of water-pricing policies on water productivity: Evidence of agriculture sector in Iran. *Agricultural Water Management*, 245, 106548. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106548>

Research Article

Flow Measurement in Canals Using 90 Degree Triangular Sharp Crested Weir With the Vertex at the Same Level to the Bottom of the Canal

Ebrahim Valizadegan^{1✉} , Farzad Jalili²

1. Department of Science and engineering of water, Khoy C., Islamic Azad University, Khoy, Iran.

2. Department of Science and engineering of Soil, Khoy C., Islamic Azad University, Khoy, Iran.

(✉ Corresponding Author: ebrahim.valizadegan@iau.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 3 April 2025

Revised: 2 May 2025

Accepted: 17 July 2025

Available Online:

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Valizadegan, E., & Jalili, F., (2025). Flow measurement in canal using 90 degree triangular sharp crested weir with the vertex at the same level to the bottom of the canal. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. V.26, No.99, P: 21-36

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369030.1612>

Introduction

Despite the development and construction of advanced equipment for measuring discharge in canals, sharp crested weirs are always used in irrigation and water supply networks due to their simplicity in operation and low cost. Extensive research has been done to obtain the discharge calculation relationship in all types of sharp crested weirs. To increase the efficiency and accuracy of weirs, researchers have performed various researches by applying various changes in the geometry of sharp crested weirs, such as Borghai *et al.* 2003, Igathinathane *et al.* 2007, Nicosia *et al.* 2019, Vatankhah and Khamisabadi 2019, Diwedat *et al.* 2022, Zeinivand *et al.* 2024 and other researches. Flow calculation relationships using triangular sharp crested weirs have been developed for the special conditions of installing these weirs, one of these conditions is the location of the vertex of the weir at a certain height from the bottom of the canal ($P>0$). In this research, a 90 degree triangular sharp crested weir was installed in the canal so that the vertex of the weir be the same level with the bottom of the canal in the central axis ($P=0$). To find the flow calculation relationship, several experiments were carried out in free and submerged conditions in 2 canals with different floor width.

Methodology

The modified head-discharge equation for triangular sharp crested weir proposed by Kindsvater and Carter (1957) (Eq. 1) was the basis for conducting experiments and arriving at the discharge calculation relationships in free flow conditions.

$$Q = C_d Q_{theo.} \quad (1)$$

$$Q_{theo.} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_e^{2.5}, (H_e = H + K_h) \quad (2)$$

In the above equations, Q = flow rate, H_e = effective height of water on vertex of the weir, g = acceleration of gravity, θ = angle of the weir vertex, C_d = discharge coefficient, which is affected by the geometry of the weir, H = water height on the vertex of weir and K_h = a quantity that depends on the characteristics of the fluid and the angle of the vertex of weir, and its value is presented in a graph for water at a temperature of 5 to 30 degrees Celsius.

In submerged flow conditions, following functional equations were based for conducting experiments and arriving at the discharge calculation equations.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = f\left(\frac{H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (3)$$

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^5}} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (4)$$

Where H_1 and H_2 = flow depth in the upstream and downstream of the weir respectively, Q_s = submerged flow rate, Q_f = free flow rate per H_1 .

10 experiments in free flow and 77 experiments in submerged flow conditions conducted in a flume with a length of 3, width of 0.2 and height of 0.2 meters with an adjustable floor slope in the hydraulic laboratory. To verify the obtained results, all the experiments were repeated again in another flume with a floor width of 25 cm.

Results and Discussion

Based on equation 1 and experiments in the canal with floor width of 20 cm, the variation of the measured flow (Q) with the theoretical flow ($Q_{theo.}$) is shown in Figure 1-a. In order to check the accuracy of the obtained graph and equation, all the experiments were repeated by installing another 90° triangular sharp crested weir in another flume (with a floor width of 25 cm). Based on the these experiments (validation tests), the value of C_d coefficients were obtained as 0.6602 (Fig.1-b), same as fig. 1-a, (Fig.1-b).

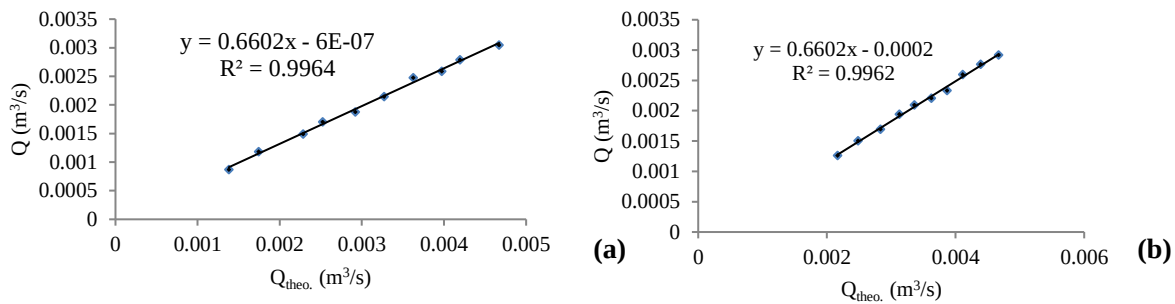


Fig. 1- variation of the measured flow (Q) with the theoretical flow ($Q_{theo.}$), a, in canal with floor width of 20 cm b, in canal with floor width of 25cm

Also based on Eq. 3 and 4, the following equations are obtained to discharge calculation under the submerged flow conditions.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = 1.1218 \left(\frac{H_1 - H_2}{H_1} \right)^{0.1574} \quad R^2 = 0.9672 \quad (5)$$

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^5}} = 0.67 \left(\frac{H_1 - H_2}{H_1} \right)^{0.1574} \quad R^2 = 0.9673 \quad (6)$$

Conclusions

In this research, a 90 degree triangular sharp crested weir was installed in the flume so that the vertex of the weir be the same level with the bottom of the channel in the central axis. After conducting several tests in the canal with a floor width of 20 cm, the relationships for calculating the discharge under free and submerged flow conditions were obtained based on dimensional analysis and the general relationship for calculating the discharge in triangular sharp crested weirs. In order to check the accuracy of the obtained relationships and verify them, experiments were carried out in another laboratory channel with a floor width of 25 cm (both in free flow and submerged flow conditions). The accuracy of the obtained relationships was evaluated using statistical functions of mean absolute value of relative error (MARE) and root mean square error (RMSE) for both channels. Results indicate the high accuracy of discharge calculation relationships both in free flow and submerged flow conditions. Based on the obtained

results, both in free flow and submerged flow conditions, the flow permeability of triangular sharp crested weirs with $P=0$ is higher than weirs with $P>0$.

Key Words: Discharge coefficient, Flow measurement, Free flow, Submerged flow, Triangular weir



نوع مقاله: پژوهشی

اندازه گیری دبی جریان در کانال ها با استفاده از سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه با راس همتراز با کف کانال

ابراهیم ولیزادگان^۱، فرزاد جلیلی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

چکیده

سرریزهای لبه تیز مثلثی یکی از ابزارهای کم هزینه و دقیق برای اندازه گیری جریان در کانال ها هستند. با وجود ساخت تجهیزات پیشرفته و گرانی قیمت اندازه گیری جریان، استفاده از سرریزها بخصوص سرریز لبه تیز مثلثی برای بهره برداران از شبکه های آبیاری و آبرسانی انتخاب اول بوده است. روابط محاسبه دبی جریان با استفاده از سرریزهای لبه تیز مثلثی برای شرایط خاص نصب این سرریزها توسعه داده شده اند که یکی از این شرایط قرار گرفتن راس سرریز در ارتفاع معین نسبت به کف کانال (P) است. اما اگر نتوان این ارتفاع را تامین کرد، استفاده از این روابط دقت بالایی نخواهد داشت. در این تحقیق سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه طوری در کانال نصب شد که راس سرریز در محور مرکزی بر کف کانال منطبق شود ($P=0$). آزمایش های متعددی در شرایط جریان آزاد و مستغرق صورت گرفت. در شرایط جریان آزاد ضریب C در رابطه $Q=CH_e^{2.5}$ دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و H_e ارتفاع مؤثر آب روی راس سرریز بر حسب متر، برابر ۱/۵۵۹۴ شد. برای شرایط جریان مستغرق روابط محاسبه دبی به دست آمدند. برای ارزیابی صحت روابط به دست آمده، آزمایش ها در کانال آمایشگاهی دیگر تکرار شد و متوسط قدر مطلق خطای نسبی ($MARE$) روابط به دست آمده در برآورد دبی جریان در شرایط جریان آزاد ۷/۷ و در شرایط جریان مستغرق ۴/۳ درصد تعیین شد.

واژه های کلیدی: اندازه گیری جریان، جریان آزاد، جریان مستغرق، سرریز مثلثی، ضریب دبی

مقدمه

گرفت که ضریب دبی سرریز با تغییر در ارتفاع آب روی سرریز، تغییر می کند. استریکلند (Strickland, 1910) بر اساس داده های آزمایش های بار (Barr, 1910) رابطه محاسبه ضریب دبی سرریز را به دست آورد. در این رابطه، ضریب دبی سرریز تابعی از ارتفاع آب روی راس سرریز است (Shen, 1981). در آزمایش های کن (Cone, 1916) راس سرریزها در ارتفاع ۱۳۷/۱۶ سانتی متر نسبت به کف کانال قرار داشتند. وی با حذف داده های مربوط به سرریز ۱۲۰ درجه (به دلیل سرریز نشدن آزادانه جریان از روی آن) رابطه محاسبه دبی جریان را که تابع ارتفاع آب روی راس سرریز و زاویه راس سرریز بود به دست آورد. گریو (Greve, 1932) برای سرریزهایی با زاویه راس ۲۰ تا ۱۲۰ درجه، رابطه ای دیگر برای محاسبه ضریب دبی ارائه کرد. در آزمایش های این محقق، راس سرریز در ارتفاع ۱۳۷/۱۶ تا ۱۵۲/۴ سانتی متر نسبت به کف کانال قرار داشت

به رغم توسعه و ساخت تجهیزات پیشرفته اندازه گیری دبی جریان در کانال ها، سرریزهای لبه تیز به دلیل سادگی در بهره برداری و کم هزینه بودن، همواره در شبکه های آبیاری و آبرسانی به کار گرفته می شوند. تحقیقات زیادی برای به دست آوردن رابطه محاسبه دبی جریان در انواع سرریزهای لبه تیز صورت گرفته است. این روابط برای شرایط و محدوده های خاص سازه ای و هیدرولیکی توسعه داده شده اند. تامسون (Thomson, 1861) در شرایط بسیار محدود هیدرولیکی، ضریب دبی در رابطه عمومی محاسبه دبی عبوری از روی سرریزهای لبه تیز مثلثی را برای سرریزهای ۹۰ و ۱۲۷ درجه به ترتیب ۰/۵۹۳ و ۰/۶۱۷ بدست آورد. بار (Barr, 1910) با آزمایش روی سرریزهای لبه تیز مثلثی که راس سرریز در ارتفاع $P=۶۰/۹۶$ سانتی متری (۲ فوتی) از کف کانال قرار داشت نتیجه

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران. (Email: ebrahim.valizadegan@iaui.ac.ir)^۲ گروه علوم و مهندسی خاک، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران.

کردند. وطن‌خواه (Vatankhah, 2010) پس از اجرای آزمایش‌های متعدد، معادله‌ای برای محاسبه دبی جریان با استفاده از سرریز لبه تیز دایره‌ای به‌دست آورد و مقدار خطای این معادله را حداکثر ۰/۰۸ درصد اعلام کرد. سوامی و همکاران (Swamee et al., 2011) مشخصات جریان عبوری از روی سرریزهای مایل را بررسی و رابطه محاسبه ضریب دبی جریان را استخراج کردند. تخمین دبی جریان در سرریزهای لبه تیز مرکب به روش عددی توسط ظهیری (Zahiri, 2012) بررسی شد. وی از تشابه هیدرولیک جریان در انواع سرریزهای لبه تیز مرکب با هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب استفاده کرد و به کمک مدل ریاضی شبه دوبعدی ابتدا توزیع عرضی سرعت روی سرریز مرکب و پس از آن دبی جریان در انواع مختلف سرریزهای مرکب را به روش عددی محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرد و خطای نسبی در برآورد دبی جریان را یک درصد گزارش داد. دی استفانو و فرو (Di Stefano and Ferro, 2013) برای به‌دست آوردن رابطه دبی-اشل در سرریزهای لبه تیز مثلثی در پلان (در مقطع افقی) با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه خود تشابه ناقص تحقیق کردند و بر اساس نتایج آزمایشگاهی موجود در تحقیقات دیگر، قابلیت رابطه به‌دست آمده را بررسی کردند. آیاز و منصور (Ayaz and Mansoor, 2015) بر اساس نتایج آزمایش‌های برقی و همکاران (Borghei et al., 2003) ضریب دبی جریان را در سرریز لبه تیز مایل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق شبیه سازی کردند و خطای برآورد دبی و ضریب دبی جریان را یک درصد گزارش دادند. محمدعلی و همکاران (Mohamed Ali et al., 2015) کارایی سرریز لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی را برای اندازه‌گیری جریان به صورت آزمایشگاهی بررسی و دقت بالای این سرریز را در اندازه‌گیری محدوده‌ای وسیع از دبی جریان اعلام کردند. رضایی و همکاران (Rezaee et al., 2016) با مقایسه سرریزهای کنگره‌ای و مستقیم، نتیجه گرفتند که در

(Shen, 1981). تاثیر ویسکوزیته و کشش سطحی روی دبی عبوری از روی سرریز لبه تیز مثلثی را لنز (Lenz, 1943) بررسی کرد. در این بررسی، که راس سرریزها در ارتفاع ۹۱/۴۴ سانتی‌متری از کف کانال قرار داشتند، رابطه محاسبه ضریب دبی که تابع عدد رینولدز، عدد وبر و زاویه راس سرریز است به‌دست آمد. نومچی و همکاران (Numachi et al., 1940) نیز رابطه محاسبه ضریب دبی سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه را به‌دست آوردند که راس آن حداقل ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از کف کانال نصب شده بود. این محققان آزمایش‌های تکمیلی را در شرایطی اجرا کردند که راس سرریز حداقل ۳ میلی‌متر و حداکثر ۵ سانتی‌متر بالاتر از کف کانال نصب شده بود ($5\text{cm} \geq P \geq 3\text{mm}$) و رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب دبی ارائه دادند (Shen, 1981). کینگ (King, 1916) پس از تحقیق روی سرریزهای ۲۲/۵، ۶۰ و ۹۰ درجه رابطه محاسبه ضریب دبی را برای هر سرریز به طور جداگانه به‌دست آورد. در تحقیقات وی راس سرریزها ۶۰/۹۶ سانتی‌متر بالاتر از کف کانال قرار داشت.

برای افزایش کارایی، قابلیت عبوردهی و دقت سرریزها، محققان در سالهای اخیر با اعمال تغییرات مختلف در هندسه سازه انواع سرریزهای لبه تیز، به تحقیقات متنوعی دست زده‌اند. ایگاتیناتان و همکاران (Igathinathane et al., 2007) با بررسی ویژگی‌های سرریز سهموی تنها عامل مؤثر بر ضریب دبی را زاویه رأس سرریز در نظر گرفتند و رابطه‌ای را برای به‌دست آوردن ضریب دبی پیشنهاد دادند. کاسترو-اورقاز و همکاران (Castro-Orgaz et al., 2008) نشان دادند در سرریزهای دایره‌ای ضریب دبی با افزایش نسبت انرژی مخصوص (E) به شعاع انحنای سرریز (R) افزایش می‌یابد و جریان روی تاج سرریز به ازای نسبت E/R از ۰/۵ تا ۰/۶ بحرانی و برای مقادیر بیشتر فوق بحرانی است. باقری و حیدرپور (Bagheri and Heidarpour, 2010) با اجرای آزمایش‌هایی روی مدل سرریزهای لبه تیز مستطیلی با عرض و ارتفاع متفاوت، معادلاتی برای پروفیل فوقانی و تحتانی و ضریب دبی این سرریزها پیشنهاد

استفاده از رابطه عمومی دبی-اشل را ۲/۵۱ درصد گزارش دادند. دیودار و همکاران (Diwedat et al., 2022) با آزمایش‌هایی، هیدرولیک جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز مثلثی لبه تیز و دریچه V شکل معکوس را بررسی کردند و روابط و نمودارهای مربوط را به‌دست آوردند. با توجه به اینکه سرریزهای لبه تیز مثلثی نسبت به سرریزهای مستطیلی توانایی عبوردهی جریان کمتری دارند زینی‌وند و همکاران (Zeinivand et al., 2024) به منظور افزایش قابلیت عبوردهی جریان در سرریزهای لبه تیز مثلثی به ایجاد روزنه‌هایی با ابعاد معین در بدنه سرریز دست زدند و بررسی‌ها را انجام دادند. آنها ضمن اعلام افزایش توانایی عبوردهی سرریز با استفاده از این روش، رابطه محاسبه ضریب دبی جریان با دقت بالا را پیشنهاد دادند. نیکوزیا و همکاران (Nicosia et al., 2024) بر اساس آنالیز ابعادی و نظریه خود تشابه ناقص معادله دبی-اشل را برای محاسبه دبی عبوری از روی سرریزهای لبه تیز مثلثی که بدنه آن با روزنه‌های مربعی سوراخ شده است به‌دست آوردند و در ۹۸/۹ درصد موارد خطای برآورد دبی با استفاده از این رابطه را برابر ۲۰ درصد اعلام کردند. برای استفاده از روابط توسعه داده شده به‌منظور محاسبه دبی جریان با استفاده از سرریزهای لبه تیز مثلثی، سرریز باید طوری در کانال نصب شود که راس آن در ارتفاع معینی از کف کانال قرار گیرد که در برخی شرایط نمی‌توان این ارتفاع را در داخل کانال تامین کرد. با توجه به اینکه در یک دبی معین، ارتفاع آب پشت سرریز لبه‌تیز مثلثی با $P>0$ ، بزرگتر از سرریز لبه تیز مثلثی با $P=0$ خواهد شد، احتمال سرریز شدن جریان از دیواره‌های کانال به بیرون در سرریزهای با $P>0$ بیشتر است. میزان تجمع تدریجی رسوبات پشت سرریزهای با $P>0$ به مراتب بیشتر است تا سرریزهای با $P=0$ و به همین دلیل با استفاده از سرریزهای بررسی شده در این تحقیق می‌توان دبی‌های بزرگتری را نسبت به سرریزهای با $P>0$ اندازه‌گیری کرد (بدون سرریز شدن آب به بیرون از کانال)

دبی‌های مختلف، تغییر در ارتفاع آب در بالادست سرریزهای کنگره‌ای نسبت به سرریزهای معمولی کمتر است (به‌دلیل داشتن طول تاج زیاد) و به ارتفاع آزاد کمتری در بالادست نیاز خواهد بود. این محققان استفاده از سرریزهای کنگره‌ای در شبکه‌های آبیاری را نسبت به سرریزهای معمولی مناسب‌تر تشخیص دادند. سعادت نژاد قره‌حسنلو و همکاران (Saadatnejadgharahassanlou et al., 2017) سرریزهای لبه تیز جدید به‌نام SCVW را که تاج آن دندانه‌دار مثلثی است معرفی و با آزمایش‌های متعدد تغییرات ضریب دبی جریان در برابر زاویه راس مثلث و ارتفاع راس مثلث نسبت به کف کانال را بررسی کردند. بابایی و همکاران (Babaei et al., 2018) به روش عددی، مشخصات جریان عبوری از سرریز لبه تیز با مقطع افقی مثلثی با زوایه راسهای مختلف در پایین‌دست را بررسی کردند و به طور میانگین افزایش ۶ درصد در ضریب آبگذری سرریزهای پیشنهادی را در مقایسه با سرریز با راس در بالادست گزارش کردند. مهتابی و ارونقی (Mahtabi and Arvanaghi, 2018) با آزمایش‌های متعدد روی جریان عبوری از سرریز لبه تیزمستطیلی بدون فشرده‌گی جانبی، برای یافتن بهترین فرم رابطه ضریب دبی، از تکنیک بهینه‌سازی استفاده کردند. نیکوزیا و همکاران (Nicosia et al., 2019) با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه خود تشابه ناقص، رابطه دبی-اشل را برای سرریزهای لبه تیز power-low به‌دست آوردند و قابلیت این رابطه را بر اساس اطلاعات موجود در مقالات مختلف بررسی کردند. وطن خواه و خمیس آبادی (Vatankhah and Khamisabadi, 2019) برای اندازه‌گیری جریان با استفاده از سرریزهای لبه تیز power-law با $1 \leq n \leq 2$ به تحقیقات آزمایشگاهی پرداختند و با استفاده از تئوری آنالیز ابعادی و جریان بحرانی، رابطه دبی-اشل عمومی را برای سرریزهای مثلثی ($n=1$) و لبه منحنی^۱ با $n>1$ به‌دست آوردند. این محققان خطای برآورد دبی جریان با

¹ Curved edge

راس سرریز، B =عرض کف کانال، g =شتاب ثقل زمین، θ =زاویه راس سرریز، ρ =جرم حجمی سیال، μ =ویسکوزیته دینامیک سیال، σ =ضریب نیروی کشش سطحی، Re =عدد رینولدز، We =عدد وبر، C_d =ضریب دبی جریان، H =ارتفاع آب روی راس سرریز و K_h =کمیتی است که به ویژگیهای سیال و زاویه راس سرریز بستگی دارد و مقدار آن برای آب معمولی در دمای ۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد در نموداری ارائه شده است.

رابطه محاسبه دبی جریان آزاد را می‌توان به صورت رابطه ۸ نیز در نظر گرفت (رابطه دبی-اشل).

$$Q = CH_e^{2.5} \quad (8)$$

که C ضریب دبی رابطه ۸ است.

بر اساس آنالیز ابعادی، برای جریان مستغرق رابطه تابعی و بدون بعد زیر را می‌توان در نظر گرفت.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = f\left(\frac{H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (9)$$

همچنین برای شرایط جریان مستغرق، رابطه ۳ به فرم زیر نیز در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^5}} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}, \theta\right) \quad (10)$$

ویلمونت (Villemonte 1947) از رابطه ۱۱ برای محاسبه دبی جریان مستغرق استفاده کرد.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = \left(1 - \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^n\right)^{0.385} \quad (11)$$

در رابطه‌های ۹، ۱۰ و ۱۱، H_1 و H_2 به ترتیب عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز، Q_s =دبی جریان مستغرق، Q_f =دبی جریان آزاد به ازای H_1 و n =توان درجه استغراق است. ویلمونت (Villemonte, 1947) برای سرریزهای لبه تیز مثلثی که به طور کامل و جزئی منقبض^۱ شده‌اند مقدار n را ۲/۵ و برای سرریزهای لبه تیز مستطیلی ۱/۵ گزارش کرده‌است.

و نیز از تجمع رسوبات پشت سرریز جلوگیری کرد. مرور تحقیقات محققان مختلف نشان می‌دهد تاثیر انطباق راس سرریز با کف کانال چندان مورد توجه قرار نگرفته و ضریب دبی جریان در این حالت به دست نیامده است. از این رو در این تحقیق با انطباق راس سرریز لبه تیز مثلثی بر کف کانال، آزمایش‌های متعددی برای بررسی اندازه‌گیری جریان و بدست آوردن ضریب دبی صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

عوامل موثر در جریان آزاد از روی سرریز لبه تیز مثلثی با راس هم‌تراز با کف کانال ($P=0$) به صورت رابطه تابعی زیر است.

$$f(Q, H, B, \theta, g, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (1)$$

بر اساس تئوری باکینگهام، با در نظر گرفتن متغیرهای H ، g و ρ به عنوان متغیرهای تکرار شونده، پارامترهای بی‌بعد زیر به دست می‌آیند.

$$\pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{gH^5}}, \pi_2 = \frac{H}{B}, \pi_3 = Re, \pi_4 = We, \pi_5 = \theta \quad (2)$$

بنابراین رابطه تابعی و بدون بعد زیر برای یک سرریز با θ مشخص بدست می‌آید.

$$\frac{Q}{\sqrt{gH^5}} = f\left(\frac{H}{B}, Re, We, \theta\right) \quad (3)$$

بر اساس رابطه ۳ و رابطه انرژی، رابطه ۴ برای محاسبه دبی عبوری از سرریزهای لبه تیز مثلثی توسط کیندزواتر و کارتر (Kindsvater and Carter, 1957). به دست آمده است،

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_e^{2.5} \quad (4)$$

$$H_e = H + K_h \quad (5)$$

رابطه ۴ را به فرم زیر نیز می‌توان نوشت.

$$Q = C_d Q_{theo} \quad (6)$$

$$Q_{theo} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_e^{2.5} \quad (7)$$

در رابطه‌های بالا Q =دبی جریان، H_e =ارتفاع مؤثر آب روی

¹ Fully or partially contracted

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۳، عرض ۰/۲ و ارتفاع ۰/۲ متر با شیب کف قابل تنظیم در آزمایشگاه هیدرولیک اجرا گردید. کف و دیواره‌های فلوم شیشه‌ای با چارچوب فلزی است و دبی جریان توسط مخزنی که در انتهای فلوم نصب شده است به روش حجمی اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری عمق جریان در کانال از عمق‌سنجی با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها روی سرریز لبه تیز مثلثی با زاویه راس ۹۰ درجه صورت گرفت که از ورق نازک PVC ساخته شده است. این سرریز در داخل فلوم طوری نصب شد که راس سرریز در محور مرکزی و منطبق بر کف فلوم باشد. شکل (۱) کانال آزمایشگاهی را حین آزمایش نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در دو حالت جریان آزاد (بدون تاثیر عمق پایاب) و جریان مستغرق به اجرا درآمدند. ابتدا در یک دبی معین، آزمایش در شرایط جریان آزاد دنبال گردید و پس از اندازه‌گیری‌های لازم، بی‌آنکه دبی جریان تغییر داده شود، حداقل ۵ و حداکثر ۱۰ درجه استغراق با استفاده از دریچه نصب شده در انتهای کانال ایجاد و داده‌های مورد نیاز در شرایط جریان مستغرق اندازه‌گیری و ثبت شدند. بدین‌ترتیب ۱۰ آزمایش در شرایط جریان آزاد و ۷۷ آزمایش در شرایط جریان مستغرق اجرا شد. برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، تمامی آزمایش‌ها بار دیگر در یک فلوم دیگر با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر تکرار شدند (شکل ۲). حد بالا و حد پایین پارامترهای مورد نیاز

در جدول (۱) ارائه شده است. در این تحقیق کلیه آزمایش‌ها و تحلیل‌ها روی پارامترهای اندازه‌گیری شده بر اساس روابط ۶، ۸، ۹ و ۱۰ صورت گرفت. به منظور بررسی دقت روابط به‌دست آمده برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد و مستغرق از توابع آماری متوسط قدر مطلق خطای نسبی^۱ (MARE) و خطای جذر میانگین مربعات^۲ (RMSE) استفاده شد.

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (13)$$

که در آن x_i و y_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده (اندازه‌گیری شده) و محاسبه شده پارامترهای مورد بررسی و n تعداد آزمایش‌هاست.

نتایج و بحث

جریان آزاد (بدون تاثیر عمق پایاب)

ده آزمایش در شرایط جریان آزاد روی سرریز ۹۰ درجه در کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر اجرا شد. پس از اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای مورد نیاز، ضرایب دبی و نمودارهای مربوطه با توجه به رابطه‌های ۶ و ۸ به‌دست آمدند.

بر اساس رابطه ۶ تغییرات دبی اندازه‌گیری شده (Q) با دبی تئوریک (Q_{theo}) و بر اساس رابطه ۸ تغییرات $He^{2.5}$ در برابر دبی اندازه‌گیری شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱- حد بالا و پایین پارامترهای مورد نیاز در آزمایش‌ها

Table 1- Upper and lower limit of required parameters in experiments

$\theta(^{\circ})$	پارامتر Parameter	جریان آزاد Free Flow		جریان مستغرق Submerged Flow		
		H/B	$Q/(gH_1^5)^{2.5}$	H/B	$Q/(gH_1^5)^{2.5}$	H_2/H_1
90	حد بالا lower limit	0.25	0.498	0.23	0.23	0.6
	حد پایین Upper limit	0.41	0.532	0.47	0.52	0.99

¹ Mean Absolute Relative Error

² Root Mean Square Error



شکل ۱- کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر حین آزمایش. الف، جریان آزاد ب، جریان مستغرق
Fig. 1- flume with a floor width of 20 cm during testing. a; Free flow b; submerged flow



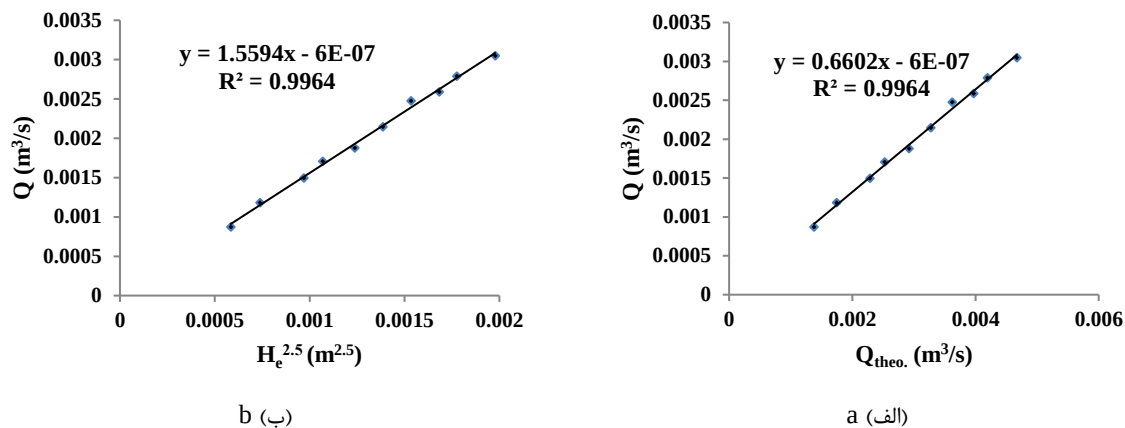
شکل ۲- کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر حین آزمایش
Fig. 2- flume with a floor width of 25 cm during testing

درجه که راس آن با کف کانال هم‌تراز بود ($P=0$) اجرا کرد و نتیجه گرفت که در این حالت مقدار C_d نسبت به حالت قبلی افزایش می‌یابد.

برای تایید ضریب‌های بدست آمده، کلیه آزمایش‌ها با نصب سرریز لبه تیز مثلثی دیگر در کانال آزمایشگاهی دیگر (با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر) تکرار شدند. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، ضریب‌های C و C_d (طبق شکل ۴) نیز به ترتیب $۱/۵۵۹۳$ و $۰/۶۶۰۲$ به‌دست آمده‌اند که مؤید نتایج آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر است.

با توجه به نمودارهای شکل (۳) برای سرریز پرکاربرد ۹۰ درجه، مقدار C و C_d در این تحقیق (رابطه ۶ و ۸) به ترتیب $۱/۵۵۹۴$ و $۰/۶۶۰۲$ به‌دست آمده در صورتیکه مقدار این ضرایب برای سرریز مثلثی ۹۰ درجه کاملاً یا تقریباً متراکم که راس آن در ارتفاع معینی نسبت به کف کانال نصب شده به ترتیب $۱/۳۸$ و $۰/۵۸۵$ است (Henderson, 1966). بنابراین، ضریب‌های C و C_d در این تحقیق بیشتر از مقادیر متناظرشان در سرریزهای مثلثی کاملاً و یا تقریباً متراکم شده است. کن (Cone, 1916) نیز در شرایط جریان آزاد آزمایش‌هایی را روی سرریز ۹۰

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها با استفاده از سرریز تیز مثلی ۹۰ درجه با راس هم‌تراز با کف کانال



شکل ۳- نتایج آزمایش‌ها در کانال با عرض کف ۲۰ سانتی‌متر الف، تغییرات دبی اندازه‌گیری شده (Q) در برابر دبی تئوریک (Q_{theo.}) ب، تغییرات H_e^{2.5} در برابر دبی اندازه‌گیری شده (Q)

Fig. 3- The results of the experiments in the canal with a floor width of 20 cm. a; variations of the measured discharge (Q) vs. the theoretical discharge (Q_{theo.}) b; variations of the H_e^{2.5} vs. the measured discharge (Q)

پارامترهای بی بعد موجود در رابطه ۱۴ نسبت به هم در شکل ۵ (الف) و تغییرات پارامترهای بی‌بعد موجود در رابطه ۱۵ نسبت به هم در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر بی‌بعد می‌یابد. بنابراین، با افزایش اختلاف ارتفاع سطح آب در بالادست و پایین‌دست سرریز، دبی جریان مستغرق افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در هر دو نمودار با افزایش درجه استغراق (H₂/H₁) دبی عبوری از روی سرریز کاهش می‌یابد.

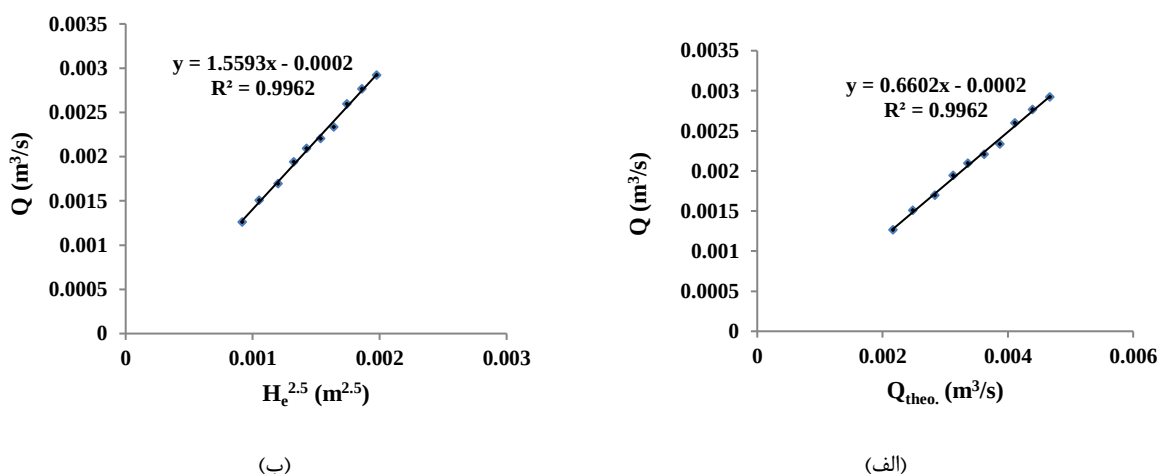
جریان مستغرق

در این تحقیق در شرایط جریان مستغرق و در سرریزی با زاویه راس مشخص رابطه ۹ و ۱۰ به ترتیب به صورت رابطه ۱۴ و ۱۵ در نظر گرفته شدند.

$$\frac{Q_s}{Q_f} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}\right) \quad (14)$$

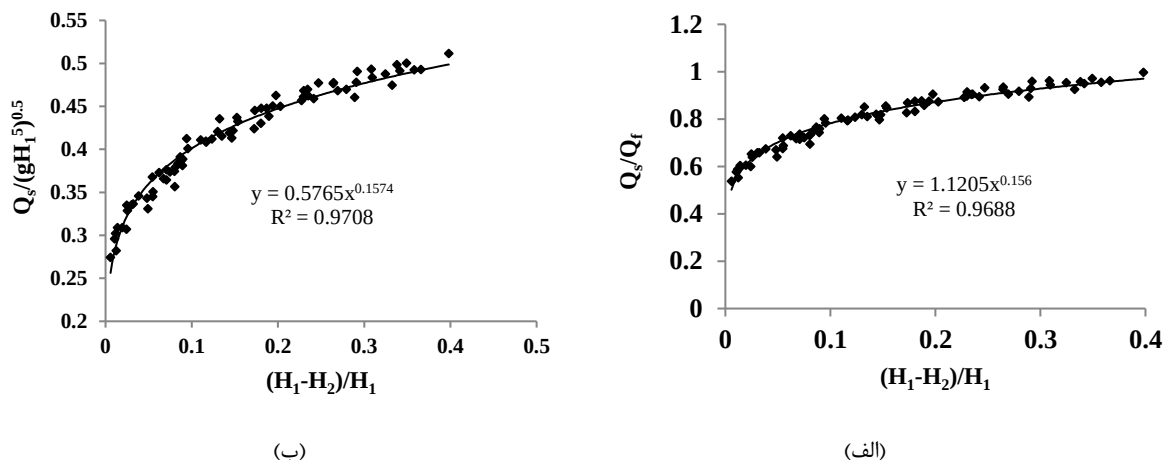
$$\frac{Q_s}{\sqrt{gH_1^5}} = f\left(\frac{H_1 - H_2}{H_1}\right) \quad (15)$$

برای ایجاد جریان مستغرق از دریچه نصب شده در انتهای کانال استفاده شد. در این شرایط ۷۷ آزمایش صورت گرفت. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، تغییرات



شکل ۴- نتایج آزمایش‌ها در کانال با عرض کف ۲۵ سانتی‌متر (آزمایش‌های صحت‌سنجی). الف، تغییرات دبی اندازه‌گیری شده (Q) در برابر دبی تئوریک (Q_{theo.}) ب، تغییرات H_e^{2.5} در برابر دبی جریان (Q).

Fig. 4- The results of the experiments in the canal with a floor width of 25 cm. (Validation tests). a; Variations of the measured discharge (Q) vs. the theoretical discharge (Q_{theo.}) b; Variations of the H_e^{2.5} vs. the measured discharge (Q)



شکل ۵- الف، تغییرات $(H_1-H_2)/H_1$ در برابر Q_s/Q_f ب، تغییرات $(H_1-H_2)/H_1$ در برابر $Q/(gH_1^5)^{0.5}$

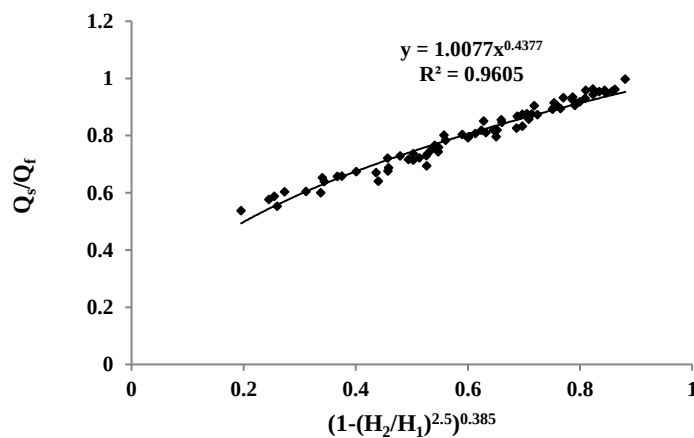
Fig. 5- a; Variations of the $(H_1-H_2)/H_1$ vs. Q_s/Q_f b; Variations of the $(H_1-H_2)/H_1$ vs. $Q/(gH_1^5)^{0.5}$

نشان داده شده در جدول (۲) حاکی از دقت مناسب رابطه‌ها در برآورد دبی جریان هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق است.

مقایسه با دیگر تحقیقات

تحقیقات پیشین برای محاسبه دبی جریان عبوری از روی سرریز لبه تیز مثلثی اغلب در شرایطی صورت گرفته است که راس سرریز در ارتفاع معینی نسبت به کف کابال نصب شده باشد ($P \geq 0$) (همانطوریکه در مقدمه اشاره شده است).

بررسی ارتباط بین طرف اول و دوم رابطه ویلمونت (رابطه ۱۱) نشان داد که توان ۰/۳۸۵ موجود در رابطه ویلمونت در شرایط تحقیق حاضر تقریباً ۰/۱۶۸۵ است (شکل ۶). بنابراین در شرایط یکسان از نظر درجه استغراق، قابلیت عبوردهی جریان در سرریزهای بررسی شده در این تحقیق نسبت به سرریزهایی که راس آنها بالاتر از کف کانال نصب شده، بیشتر است. برای بررسی دقت روابط به‌دست آمده از توابع آماری MARE و RMSE (رابطه‌های ۱۲ و ۱۳) استفاده شد. مقادیر این توابع در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۶- تغییرات $(1-(H_2/H_1)^{2.5})^{0.385}$ در برابر Q_s/Q_f (رابطه ویلمونت، رابطه ۱۱)

Fig. 6- variations of the $(1-(H_2/H_1)^{2.5})^{0.385}$ vs. Q_s/Q_f (Villemonete eq. 11)

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها با استفاده از سرریز تیز مثلی ۹۰ درجه با راس همتراز با کف کانال

جدول ۲- مقادیر توابع آماری MARE و RMSE در محاسبه دبی جریان بر اساس روابط بدست آمده

Table 2- The values of the MARE and RMSE statistical functions in calculating the discharge based on the obtained relationships

Relationships					
RMSE	MARE	رابطه Eq.	کانال با عرض کف (cm) Canal with floor width of (cm)	شرایط جریان Flow conditions	
4E-5	0.02	شکل ۳- ب Fig. 3b	20	آزاد Free	
1.57E-4	0.077	شکل ۴- ب Fig. 4b	25		
5.44E-5	0.0218	شکل ۵- الف Fig. 5a	20	مستغرق Submerged	
5.39E-5	0.0216	شکل ۵- ب Fig. 5b			
1.26E-4	0.042	شکل ۵- الف Fig. 5a	25		
1.34E-4	0.0436	شکل ۵- ب Fig. 5b			

$$C_d = \frac{0.589}{H^{0.03}}$$

(۱۷) تامسون (Thomson, 1861) می‌گوید ارتفاع نصب

برخلاف نظر تامسون، کن (Cone, 1916) و نومچی و همکاران (Numachi et al., 1940) ارتفاع نصب راس سرریز را در محاسبه دبی مؤثر دانسته‌اند. نومچی و همکاران (Numachi et al., 1943) با آزمایش‌هایی روی سرریز لبه تیز مثلی ۹۰ درجه که راس آن در ارتفاعات مختلف (در محدوده ۳ میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر) نسبت به کف کانال نصب شده بود، رابطه زیر را برای محاسبه ضریب دبی در شرایط جریان آزاد ارائه داده‌اند.

راس سرریز نسبت به کف کانال (P) تاثیر قابل توجهی روی نتایج ندارد. استریکلند (Strickland, 1910) بر اساس داده‌های آزمایش‌های بار (Barr, 1910) که $P=60.96 \text{ cm}$ بود به این نتیجه رسید که ضریب دبی سرریز تابعی از ارتفاع جریان روی راس سرریز است (H بر حسب فوت).

$$C_d = 0.566 + \frac{0.0157}{\sqrt{H}} \quad (۱۶)$$

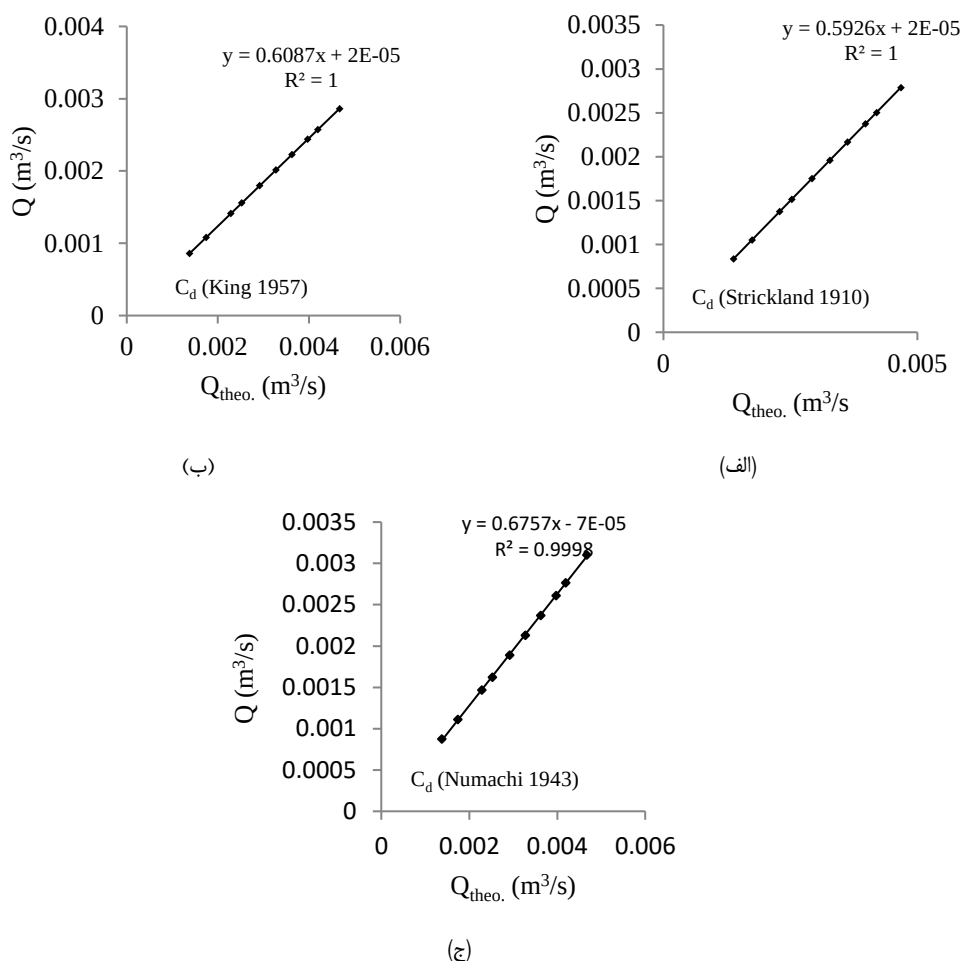
کینگ (King, 1916-1954) پس از تحقیق روی سرریزهای ۲۲/۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با $P=60.96 \text{ cm}$ رابطه محاسبه ضریب دبی سرریز ۹۰ درجه را به‌دست آورد (H بر حسب فوت).

$$C_d = 0.574 + \frac{0.0055}{H} + \left(0.055 + \frac{0.278}{0.886 + P}\right) \left[\frac{H}{B} - \left(0.1 - \frac{0.0098}{0.079 + P}\right)\right]^2 \quad (۱۸)$$

شرایط جریان آزاد محاسبه و طبق رابطه‌های ۶ و ۷، دبی واقعی (Q) به‌دست می‌آید. تغییرات Q_{theo} در برابر Q واقعی که بر اساس رابطه ۱۶، ۱۷ و ۱۸ در شکل (۷) نشان داده شده است.

که در آن H = ارتفاع آب روی راس سرریز (فوت)، B = عرض کف کانال (فوت) و P = ارتفاع راس سرریز نسبت به کف کانال (فوت) است.

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، مقادیر C_d (طبق رابطه‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸) برای هر آزمایش در



شکل ۷- تغییرات دبی تئوریک ($Q_{theo.}$) در برابر دبی واقعی محاسبه شده طبق تحقیقات الف: استریکلند (رابطه ۱۶)، ب: کینگ (رابطه ۱۷) و ج: نوماچی (رابطه ۱۸)

Fig. 7. variations of the theoretical discharge ($Q_{theo.}$) vs, actual calculated discharge according to the research of a; Strickland (Eq. 16) b; King (Eq. 17) and c; Nomachi (Eq. 18)

۰/۳۸۵ است اما با توجه به شکل (۶)، برای سرریزهای بررسی شده در این تحقیق توان گفته شده برابر با ۰/۱۶۸۵ می‌شود. بنابراین، هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق عبوردهی سرریزهای بررسی شده در این تحقیق (با $P=0$) بیشتر است تا سرریزهایی با $P>0$.

نتیجه‌گیری

در محدوده پارامترهای ذکر شده، ضریب C_d در سرریز بررسی شده در این تحقیق (با $P=0$) معادل ۰/۶۶۰۲ به دست آمد که این مقدار با آزمایش‌های صحت سنجی نیز تایید شد. در حالیکه بر اساس تحقیقات استریکلند و کینگ برای سرریزهای لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه کاملاً یا

با توجه به شکل (۷)، مقدار C_d بر اساس تحقیقات استریکلند، کینگ و نوماچی به ترتیب ۰/۵۹۲۶، ۰/۶۰۸۷ و ۰/۶۷۵۹ به دست می‌آید. این مقدار در تحقیق حاضر ۰/۶۶۰۲ به دست آمده است. C_d به دست آمده از رابطه نوماچی (رابطه ۱۸) در محدوده P از ۳ میلی‌متر تا ۵ سانتی‌متر حاصل شده به همین دلیل به مقدار C_d به دست آمده در این تحقیق نزدیکتر است. اما در تحقیقات استریکلند و کینگ که راس سرریز در فاصله ۶۰/۹۶ سانتی‌متری از کف کانال نصب شده، مقدار C_d کمتر از مقدار آن در تحقیق حاضر است. در شرایط جریان مستغرق برای سرریزهای کاملاً یا نسبتاً متراکم شده با $P>0$ ، توان طرف دوم رابطه ویلمونت (رابطه ۱۱) معادل

نسبتاً متراکم شده (با P برابر با ۶۰/۹۶ سانتی‌متر) مقدار C_d به‌ترتیب معادل ۰/۵۹۲۶ و ۰/۶۰۸۷ و بر اساس تحقیقات نوماچی (با P از ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ متر) معادل ۰/۶۷۵۷ به‌دست می‌آید. بنابراین در شرایط جریان آزاد ضریب‌های دبی به‌دست آمده در این تحقیق بزرگتر از ضریب‌های دبی در سرریزهای متناظر با $P > 0$ هستند. در شرایط جریان مستغرق توان طرف دوم در رابطه ویلمونت در سرریز بررسی شده کمتر از سرریزهای متناظر با $P > 0$ است. از این‌رو هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق قابلیت عبوردهی سرریزهای لبه تیز مثلثی با $P = 0$ بیشتر است تا از سرریزهای با $P > 0$ و دبی‌های بزرگتری را می‌توان انتقال داد. پیشنهاد می‌شود روی سرریزهای لبه تیز مثلثی (با راس هم‌تراز با کف) با زاویه‌های مختلف راس سرریز و نیز تاثیر زبری بستر کانال روی جریان از روی این سرریزها، در کانال‌های بزرگتری تحقیقات انجام شود.

منابع

- Ayaz, M.d. & Mansoor, T. (2018). Discharge coefficient of oblique sharp crested weir for free and submerged flow using trained ANN model. *Water Science*. 32(2). pp. 192-212.
- Babaei, E. Karami, H. & Farzin, S. (2019). Numerical investigation of flow characteristics horizontal sharp edge triangular weir with vertex at downstream. *Journal of irrigation and water engineering*. 9(35). 49-65 (in persian).
- Bagheri, S. & Heidarpour, M. (2010). Flow over rectangular sharp-crested weirs. *Irrigation Science*. 28. pp. 173-179.
- Castro-Orgaz, O. Giraldez, J. & Ayuso, J. L. (2008). Critical flow over circular crested weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 134(11). pp. 1661-1664
- Carlier, M. (1980). *Hydraulique générale et appliquée*, Eyrolles.
- Chaudhry, M.H. (2008). *Open-Channel Flow*. Second edition. University of South Carolina.
- Cone, V. M. (1916). Flow through weir notches with thin edges and full contractions. *Journal of Agricultural Research*. 5(23). p. 1051.
- Di Stefano, C. & Ferro, V. (2013). A new approach for deducing the stage-discharge relationship of triangular in plan sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 32. pp. 71-75
- Diwedat, A. I. Mamdouh L. and Ibrahim, M. M. (2022). Hydraulics of combined triangular sharp crested weir with inverted V-shaped gate. *Alexandria Engineering Journal*. 51(10). 8249-8262
- Hamed, M. H. (2002). *Open channel hydraulics*, Tehran: Khaje Nasir University of technology publishing.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan publishing company.
- Igathinathane, C. Srikanth, I. Prakash, K. Ramesh, B. & Womac, A. R. (2007). Development of parabolic weirs for simplified discharge measurement. *Biosystems Engineering*. 96(1). pp.111-119
- Kindsvater, C. E. & Carter, R. W. (1957), Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs: *Am. Soc., Civil Engineers Trans.* 124. p. 772.
- King, H. W. (1916). Flow of water over right-angled V-notch weir. *Univ. Michigan Technic.* (29(3) p. 189
- Lenz, A.T. (1943). Viscosity and surface tension effects on V-notch weir coefficients. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 108. pp. 759-782.
- Mahtabi G. & Arvanaghi, H. (2018). Experimental and numerical analysis of flow over a rectangular full-width sharp-crested weir. *Water Science and Engineering*. 11(1). pp. 75-80
- Mohamed Ali, A.A. Ibrahim, M. & Diwedat, A. I. (2015). The Discharge Coefficient for a Compound Sharp Crested V-Notch Weir. *Asian Journal of Engineering and Technology*. 3(5). pp. 494-501.
- Nicosia, A. Di Stefano C. & Ferro, V. (2022). A generalized stage-discharge relationship for sharp-crested power-law weirs by dimensional analysis and self-similarity. *Flow Measurement and Instrumentation*. 86(12). 102200.

- Nicosia, A. Serio, M. A. Costanza. A. Di Stefano, C. & Ferro, V. (2024). The stage-discharge relationship of a sharp-crested triangular weir pierced by square orifices. *Flow Measurement and Instrumentation*. 100.102705.
- Ranga Raju, K.G. (1989). Flow Through Open-Channel. Mc Graw-Hill Company.
- Rezaee, M. Emadi, A. & Aqajani Mazandarani, Q. (2016). Laboratory study overflow rectangular Congress. *Journal of Water and Soil Science*. 29(6).pp.1438-1446.
- Saadatnejadgharahassanlou, H., Gharehbaghi, A. Mehdizadeh, S. Kaya B. & Behmanesh, J. (2017). Experimental investigation of discharge coefficient over novel kind of sharp-crested V-notch weir. *Flow Measurement and Instrumentation*. 54. pp. 236-242.
- Shen, J. (1981). Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs. United States.Geological Survey water-supply. paper ; 1617-B.
- Swamee, P. K. Ojha C. S. P. & Mansoor, T. (2011). Discharge characteristics of skew weirs. *Journal of Hydraulic Research*. 49(6). pp. 818–820.
- Vatankhah A.R. (2010). Flow measurement using circular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 21. pp. 118-122.
- Vatankhah, A. R. & Khamisabadi, M. (2019). Stage-discharge relationship for triangular and curved-edge triangular weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 69. 101609
- Zahiri, A. (2012). Quasi-two dimensional mathematical model for prediction of flow discharge over compound sharp-crested weirs. *Journal of Water and Soil Conservation*. 19(3). pp.27-42 (in Persian).
- Zeinivand, M. Sadat Ahmadi, S. N. & Ghomeshi, M. (2024). The discharge coefficient of sharp triangular weir pierced by orifices. *Flow measurement and Instrumentation*. 97. 102560.

Research Article

Performance Evaluation of a Smart Irrigation System for Efficient Wheat Water Management in the Mashhad Region

Abolghasem Haghayeghi Moghaddam^{1✉}, Majid Keramati², Ardalan Zolfagharan³

1,3. Assistant professor, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran

2. Master's degree, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran

(✉ Corresponding Author: sahm51@yahoo.com)

ARTICLE INFO

Received: 7 April 2025

Revised: 5 May 2025

Accepted: 8 July 2025

Available Online:

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Haghayeghi Moghaddam, A., Keramati, M., & Zolfagharan, A., (2025). Performance evaluation of a Smart Irrigation System for efficient wheat water management in the mashhad region. (In Persian with English abstract). Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research.V.26, No.99, P: 37-54

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369010.1613>

Introduction

Water, as a vital and limited resource in agriculture, plays a decisive role in crop production. With the growing population and water resource constraints, optimizing water use in agriculture has become a major challenge. The use of modern technologies and real-time meteorological data can improve irrigation management and enhance water productivity. In recent years, efforts have been made to develop irrigation systems based on meteorological data. These systems use information such as temperature, humidity, precipitation, and evapotranspiration to estimate crop water requirements more accurately. However, many of these systems are still in the experimental and developmental stages, requiring field evaluations to assess their performance and efficiency. This study aimed to evaluate an intelligent irrigation planning system for wheat cultivation in the Mashhad region using real-time meteorological data.

Methodology

The study was conducted over two years in the Mashhad region, focusing on wheat cultivation. The irrigation treatments included: (1) irrigation based on real-time meteorological data from the intelligent system, (2) irrigation supplying 80% of the water volume used in the first treatment, and (3) irrigation supplying 120% of the water volume used in the first treatment. Water productivity was calculated based on irrigation volume and effective rainfall. A paired T-test was used to compare the treatments. Data on crop yield, water consumption, and water productivity were collected and analyzed.

Results and Discussion

The results showed that wheat yield in the treatment based on the intelligent system increased compared to the average yield in Mashhad farms. However, this treatment did not show an advantage in reducing water consumption, as it used more water than the regional average. Water productivity in this treatment was also not superior to the average wheat farms in the *region*. The intelligent system

estimated water requirements to be more than double those calculated using data from the Mashhad meteorological station. In terms of usability, the system was simple and user-friendly for experts but required further optimization for farmers with limited technical knowledge.

In the first year, surface irrigation showed that the 80% treatment had a significantly lower yield (4890 kg/ha) compared to the intelligent system (6600 kg/ha). The 120% treatment (6285 kg/ha) did not differ significantly from the intelligent system. In drip irrigation, the 120% treatment had the highest yield (6345 kg/ha), but it was not significantly different from the intelligent system (6170 kg/ha). In the second year, a 60% treatment was added. Surface irrigation showed that the 80% treatment (3550 kg/ha) had a significantly lower yield than the intelligent system (4680 kg/ha), while the 60% treatment (4600 kg/ha) did not differ significantly. The 120% treatment (6000 kg/ha) showed a significant difference compared to the intelligent system.

Water consumption in the first year for surface irrigation was highest in the intelligent system (100% treatment), while the 80% and 120% treatments used 67% and 90% of this volume, respectively. In drip irrigation, the 100% treatment used the most water (4560 m³/ha), while the 80% and 120% treatments used 2840 and 4180 m³/ha, respectively. Water productivity in surface irrigation was highest in the 120% treatment (0.723 kg/m³), while in drip irrigation, the 80% treatment had the highest productivity (1.63 kg/m³).

The intelligent system overestimated water requirements compared to data from the Mashhad meteorological station, primarily due to differences in minimum and maximum temperatures, relative humidity, and sunshine hours. The system's performance was rated as good for maximum temperature, moderate for relative humidity, and poor for minimum temperature and sunshine hours.

Conclusion

The intelligent irrigation scheduling system showed potential for improving wheat yield but did not reduce water consumption or enhance water productivity significantly. The system's overestimation of water requirements highlights the need for algorithmic improvements. While the system was user-friendly for experts, it requires further optimization for farmers with limited technical knowledge. This study serves as a preliminary step toward developing more efficient irrigation systems based on real-time meteorological data.

Keywords: Water productivity, Irrigation scheduling, Real-time meteorological data, Wheat, Mashhad region.



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idsr.2025.369010.1613>

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی یک سامانه هوشمند آبیاری برای مدیریت آبیاری گندم در منطقه مشهد

سید ابوالقاسم حقایقی مقدم^۱، مجید کرامتی^۲، اردلان ذوالفقاران^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند «هوشاب» در برنامه‌ریزی آبیاری گندم با استفاده از داده‌های بهنگام هواشناسی، طی دو سال زراعی در منطقه مشهد اجرا شد. تیمارهای آبی شامل: (۱) آبیاری بر اساس توصیه سامانه هوشاب (۱۰۰ درصد)، (۲) آبیاری با ۸۰ درصد و (۳) آبیاری با ۱۲۰ درصد حجم آب محاسبه شده توسط سامانه بودند. پس از برداشت محصول، حجم آب مصرفی، میزان بارش مؤثر، عملکرد گندم و بهره‌وری فیزیکی آب (بر اساس حجم آب آبیاری و مجموع آب آبیاری به همراه بارش مؤثر) اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از آزمون آماری t تحلیل شدند. نتایج تحقیق نشان داد در سامانه آبیاری سطحی، عملکرد گندم در تیمار هوشاب به‌طور معنی‌داری از تیمار کاهش یافته (۸۰ درصد) بیشتر است اما مصرف آب در تیمار هوشاب تا ۴۵۶۰ مترمکعب در هکتار افزایش یافته است که بیش از میانگین استانی است. در آبیاری قطره‌ای، تفاوت آماری معناداری میان تیمارهای ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد مشاهده نشد. بیشترین بهره‌وری آب در آبیاری قطره‌ای و در تیمار ۸۰ درصد به میزان ۱/۶۳ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. برآورد نیاز آبی توسط سامانه هوشاب نیز حدود دو برابر مقدار محاسبه شده با داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد بود. اگرچه استفاده از داده‌های بهنگام سامانه موجب بهبود عملکرد محصول شد، اما بهره‌وری آب به شکل معنادار افزایش نیافت و مصرف آب بیشتر از حد انتظار بود. به‌طور کلی، سامانه هوشاب پتانسیل بالایی در به‌کارگیری داده‌های لحظه‌ای در مدیریت آبیاری دارد، اما برای دستیابی به هدف بهینه‌سازی مصرف آب، نیازمند بازنگری در الگوریتم تخمین نیاز آبی است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری هوشمند، برنامه‌ریزی آبیاری، بهره‌وری آب، گندم

مقدمه

(Abbasi, 1998). در سال‌های اخیر، برای توسعه سامانه‌های

آبیاری مبتنی بر به‌کارگیری داده‌های هواشناسی تلاش‌هایی شده است. این سامانه‌ها با استفاده از اطلاعاتی مانند دما، رطوبت، بارش و تبخیر-تعرق، سعی در برآورد دقیق‌تر نیاز آبی بهنگام گیاهان دارند. با این حال، بسیاری از این سامانه‌ها هنوز در مراحل آزمایشی و توسعه قرار دارند و نیاز به ارزیابی‌های میدانی برای بررسی عملکرد و کارایی آنها وجود دارد.

آب، یکی از منابع حیاتی و محدود در کشاورزی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید محصولات زراعی و باغی دارد. با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت منابع آبی، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی به یکی از چالش‌های اصلی تبدیل شده است. در این راستا، استفاده از فناوری‌های نوین و داده‌های بهنگام هواشناسی می‌تواند به بهبود مدیریت آبیاری و افزایش بهره‌وری آب کمک کند (Kiani & ...)

^۱ استادیار پژوهشی بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران. (نویسنده مسئول: Email: sahm51@yahoo.com)

^۲ مربی پژوهشی بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

افزایش و مصرف آب را کاهش دهند. این سامانه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، نیاز آبی گیاهان را به طور خودکار محاسبه و آبیاری را بهینه می‌کنند (Zhang et al., 2019). مطالعات شخار و همکاران (Shekhar et al., 2015) به طراحی یک سامانه آبیاری هوشمند با بهره‌گیری از اینترنت اشیا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین اختصاص دارد. در این مطالعات از انواع حسگرهای محیطی برای جمع‌آوری داده‌های زراعی استفاده و داده‌ها توسط مدل‌های یادگیری ماشین تحلیل شد و به تصمیم‌گیری خودکار در مورد زمان و میزان آبیاری انجامید. این سامانه ضمن کاهش مصرف آب، افزایش عملکرد محصول را نیز نشان می‌دهد.

آیدین و همکاران (Aydin et al., 2015) در مطالعه‌ای به طراحی سامانه آبیاری هوشمند بر پایه هوش مصنوعی و اینترنت اشیا پرداختند. در این سامانه، داده‌های محیطی مانند دما، رطوبت خاک و تابش خورشیدی توسط حسگرها جمع‌آوری و توسط الگوریتم‌های هوشمند تحلیل می‌شود. خروجی این تحلیل‌ها منجر به اجرای برنامه‌های آبیاری دقیق و مبتنی بر نیاز واقعی گیاه شده است. در تحلیل فرایندی توسط والجو و همکاران (Vallejo et al., 2015) سامانه‌های هوشمند آبیاری در کشاورزی به شکلی جامع بررسی شده است. این مقاله با مرور فناوری‌هایی مانند حسگرهای بی‌سیم، سامانه‌های تصمیم‌یار و الگوریتم‌های داده‌کاوی، مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی این سیستم‌ها را در مقیاس‌های مختلف بررسی و تأکید می‌کند که بهره‌گیری از این فناوری‌ها می‌تواند مصرف آب را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد. افزایش کمیت و کیفیت تولید، صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی، صرفه‌جویی در نیروی کارگری، کاهش مصرف کود و سم، افزایش میزان برگشت سرمایه، آبیاری کارآمد و پایداری تولید از جمله مزایای هوشمندسازی آبیاری است. با توجه به وضعیت بحرانی منابع آب کشور و مصرف بیش از ۷۰ درصد منابع آب در بخش کشاورزی (Abbasi & Abbasi, 2020)،

در تحقیقی روش‌های محاسبه نیاز آبی گیاهان مورد بررسی قرار گرفته و روش‌هایی مانند پنمن-مانتیت برای برآورد تبخیر-تعرق گیاهی (ET) معرفی و ارائه شده است. این روش‌ها به عنوان مرجع اصلی در مدیریت آبیاری استفاده می‌شوند. روش پنمن-مانتیت یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای محاسبه ET است که بر اساس داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت، سرعت باد و تشعشع خورشیدی عمل می‌کند. این روش به طور گسترده‌ای در برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب استفاده می‌شود (Allen et al., 1998). در پژوهشی دیگر، روش‌های پیشرفته‌تری برای محاسبه نیاز آبی گیاهان و مدیریت آبیاری ارائه شده است. محققان تأکید کردند که دقت در برآورد نیاز آبی به بهبود بهره‌وری آب منجر می‌شود. محققان روش‌هایی مانند استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای را برای بهبود دقت برآورد ET پیشنهاد کردند. این روش‌ها به کشاورزان کمک می‌کنند تا مدیریت آب را به طور مؤثرتری ارتقا بخشند (Jensen and Allen, 2016). محقق دیگری به بررسی مزایا و محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر گیاه برای برنامه‌ریزی آبیاری پرداخت. او از اندازه‌گیری شاخص‌های گیاهی (مانند پتانسیل آب برگ و تعرق)، حسگرهای رطوبت خاک و داده‌های هواشناسی استفاده کرد و نتیجه گرفت ترکیب این داده‌ها دقت پیش‌بینی نیاز آبی را افزایش می‌دهد و به بهینه‌سازی مصرف آب کمک می‌کند (Jones, 2004). برخی از محققان کاربرد فناوری اینترنت اشیا (IoT) را در کشاورزی بررسی کردند و نشان دادند که داده‌های بلادرنگ هواشناسی و خاک می‌توانند برای بهبود مدیریت آبیاری استفاده شوند. با استفاده از حسگرهای IoT، کشاورزان می‌توانند شرایط خاک و هوا را به طور مداوم رصد و تصمیمات آبیاری را بر اساس داده‌های واقعی اتخاذ کنند (Liakos et al., 2018). برخی از محققان نتیجه گرفتند که فناوری‌هایی مانند IoT و هوش مصنوعی می‌توانند دقت برآورد نیاز آبی را

را از طریق حسگرهای کار گذاشته شده و پیش‌بینی داده‌های اقلیمی دریافت و بعد از تحلیل بهنگام توسط سامانه هوشمند، اقدام به آبیاری کردند. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه هوشمند قادر است در حین آبیاری مقدار آب مورد نیاز گیاه را تشخیص دهد و قطع آبیاری را به کاربر اعلام کند (Navarro-Hellín *et al.*, 2016). نتایج مطالعات در ایتالیا نشان داد که سامانه هوشمند آبیاری مزرعه برنج، اگرچه مصرف آب (۲۰۰۰-۳۷۰۰ میلی‌متر) و عملکرد (۸ تن در هکتار) را بهبود نداد، اما زمان کار کارگران را کاهش داد و بدون نقص مکانیکی عمل کرد. با توجه به قیمت مناسب (۶۳۸-۶۸۹ یورو در هکتار)، این سامانه گزینه مناسبی برای توسعه است (Masseroni *et al.*, 2018). در یک سامانه آبیاری خودکار به منظور استفاده بهینه از آب، از شبکه حسگرهای رطوبت و دمای خاک در عمق توسعه ریشه گیاه بهره‌برداری شد. با استفاده از قابلیت سامانه خودکار در مزرعه مریم‌گلی به مدت ۱۳۶ روز، در مقایسه با آبیاری سنتی رایج منطقه، صرفه‌جویی آب تا ۹۰ درصد به دست آمد (Gutiérrez *et al.*, 2015). نتایج به‌کارگیری یک شبکه از حسگرهای بدون سیم برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و تراز آب در مدیریت آبیاری مزرعه برنج در چین نشان داد برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس این سامانه می‌تواند، در مقایسه با تیمار آبیاری معمول منطقه، موجب ۶۵/۲ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب شود (Kehui *et al.*, 2010). در تحقیقی دو ساله در عربستان، تاثیر روش برنامه‌ریزی آبیاری خودکار بر عملکرد و بهره‌وری آب گوجه‌فرنگی در سامانه آبیاری قطره زیرسطحی در منطقه بسیار خشک این کشور ارزیابی شد. سه روش برنامه‌ریزی آبیاری شامل (۱) دستگاه کنترلر تبخیر-تعرق^۱ (۲) حسگر رطوبت خاک^۲ و (۳) تیمار شاهد با استفاده از داده‌های هواشناسی، برای تعیین زمان و مقدار آب به‌کارگرفته شد.

استفاده از هوشمندسازی آبیاری می‌تواند یک راه حل مطمئن و مطلوب برای برون رفت از بحران آب و مدیریت مناسب آن باشد. در تحقیقی، نتایج برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان با استفاده از ابزارهای مختلف مانند تانسومتر، رطوبت‌سنج و برآورد تبخیر-تعرق در شرایط سامانه آبیاری قطره‌ای نشان داد با استفاده از این ابزارها بین ۲۱ تا ۴۰ درصد در مصرف آب، نسبت به آبیاری معمول، صرفه‌جویی می‌شود و میزان مصرف کود نیز ۳۹ تا ۷۴ درصد کاهش می‌یابد. در این تحقیق، کاهش معنی‌داری در رشد گیاه و کیفیت محصول مشاهده نشد (Incrocci *et al.*, 2014). در منطقه دیاربکر ترکیه از داده‌های هواشناسی بهنگام در برنامه‌ریزی آبیاری پنبه با سه سطح آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی استفاده شد و نتایج نشان داد آبیاری با تامین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، بیشترین بهره‌وری آب پنبه (۰/۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب) را در پی دارد. برنامه‌ریزی آبیاری بر مبنای تامین ۱۲۵ درصد نیاز آبی، عملکرد پنبه دانه را به میزان ۷ درصد افزایش داد اما مقدار بهره‌وری آب به ۰/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش یافت. تیمار تامین ۷۵ درصد نیاز آبی به لحاظ بهره‌وری آب تفاوتی با تیمار تامین ۱۰۰ درصد (۰/۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب) نداشت اما عملکرد محصول ۳۸ درصد کاهش نشان داد (Çetin *et al.*, 2021). در دو باغ پرتقال در شهرستان فسا در استان فارس کاربرد چند ابزار برنامه‌ریزی آبیاری شامل تانسومتر، دماسنج فروسرخ، رطوبت‌سنج، بلوک گچی و سند ملی آب با تیمار مدیریت سنتی باغدار مقایسه گردید. در این تحقیق مصرف آب نسبت به مدیریت سنتی در دو باغ به ترتیب ۵۶ و ۴۶ درصد کاهش و بهره‌وری آب آبیاری ۱۱۰ و ۵۴ درصد افزایش نشان داد (Shahrokhnia *et al.*, 2015). محققان یک سامانه آبیاری هوشمند و خودکار را معرفی کردند که در باغ مرکبات در اسپانیا به‌کار گرفته شده بود. آنها داده‌های خود

¹Hunter ET controller

² water mark

مدیریت هوشمند و مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال است که با هدف بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی، افزایش بهره‌وری آبیاری و کاهش اتلاف منابع آب طراحی شده است. این سامانه با استفاده از داده‌های لحظه‌ای (مانند رطوبت خاک، شرایط اقلیمی و نیاز آبی گیاه) و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، تصمیم‌های دقیقی برای زمانبندی و مقدار آبیاری اتخاذ می‌کند. این تحقیق با هدف ارزیابی سامانه هوشاب در سطوح مختلف تأمین نیاز آبی و در دو روش آبیاری قطره‌ای و سطحی در مزرعه اجرا شده است. از هدف‌های دیگر این تحقیق، تحلیل بهره‌وری فیزیکی آب در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای با استفاده از سامانه هوشاب و بررسی دقت برآورد نیاز آبی توسط این سامانه نسبت به داده‌های استاندارد ایستگاه هواشناسی است.

مواد و روش‌ها

با توجه به شرایط بحرانی آب زیرزمینی در استان خراسان رضوی، دشت بحرانی مشهد-چناران برای اجرای این تحقیق انتخاب شد. پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی طرق، واقع در شهرستان مشهد، اجرا گردید. ارتفاع ایستگاه طرق از سطح آب‌های آزاد ۹۹۹ متر است و اقلیم منطقه خشک بیابانی سرد با میانگین بارندگی سالانه ۲۳۵ میلی‌متر، متوسط حداکثر دمای ۲۲/۹ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداقل دمای ۹/۷ درجه سانتی‌گراد است. سطح زیر کشت گندم آبی در شهرستان مشهد در سال زراعی ۹۸-۹۹ برابر ۱۲۶۰۴۵ هکتار با میانگین عملکرد ۴۱۹۶ کیلوگرم در هکتار بود. قطعه‌ای به مساحت حدود نیم هکتار برای ارزیابی سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری با نام تجاری سامانه هوشاب انتخاب شد. عملیات آماده‌سازی زمین برای کشت گندم در آبان‌ماه شامل شخم‌زدن، دیسک‌زدن و و تسطیح به اجرا در آمد. کودهای اصلی (نیترژن، فسفر و پتاسیم) بر اساس توصیه کارشناسی قبل از کاشت توسط دستگاه سانتریفوژ در زمین پخش و با عملیات دیسک‌زنی با خاک مخلوط شدند. در این

نتایج تحقیق نشان داد استفاده از تیمار کنترل‌کننده ET در مقایسه با دو روش حسگر رطوبت و شاهد، به ترتیب مقدار آب آبیاری را ۵/۸ و ۲۰/۸ درصد صرفه‌جویی کرد. استفاده از کنترلر ET، نسبت به حسگر رطوبت و تیمار شاهد به ترتیب ۷/۹ و ۱۱/۳ درصد افزایش عملکرد گوجه‌فرنگی را موجب شد (Al-Ghobari, 2014). برنامه‌ریزی آبیاری، تصمیم‌گیری در مورد زمان و میزان مصرف آب در مزرعه است و بنابراین تأثیر مستقیم بر بهره‌وری مصرف آب دارد (Bwambale et al., 2022). نتایج بررسی منابع نشان می‌دهد که در مجموع استفاده از روش‌ها و ابزارهای برنامه‌ریزی آبیاری در اغلب موارد می‌تواند در مقایسه با روش‌های سنتی آبیاری، باعث کاهش مصرف آب یا افزایش بهره‌وری آب شود؛ اما لازم است کاربرد این ابزار و روش‌ها در سطح مزارع و باغ‌ها با تحقیقات بیشتر در محصولات و مناطق مختلف توسعه باید و در شرایط واقعی آزمایش شود. با وجود توسعه سامانه‌های هوشمند آبیاری مبتنی بر داده‌های هواشناسی و فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، هنوز فاصله قابل توجهی میان عملکرد این سامانه‌ها در شرایط آزمایشگاهی و کارایی واقعی آنها در مزرعه وجود دارد. بیشتر پژوهش‌های پیشین یا در محیط‌های کنترل‌شده بوده‌اند یا تمرکز آنها صرفاً بر عملکرد الگوریتم‌های پیش‌بینی نیاز آبی بوده است، بی آنکه به‌طور جامع تأثیر این سامانه‌ها بر عملکرد زراعی، مصرف آب و بهره‌وری آب در شرایط واقعی مزرعه بررسی شود. از سوی دیگر، بسیاری از این سامانه‌ها در کشورهای توسعه‌یافته طراحی شده‌اند و کارایی آنها در شرایط اقلیمی و مدیریتی ایران، به‌ویژه در منطقه نیمه‌خشک مانند مشهد، به‌خوبی ارزیابی نشده است. از این رو سامانه «هوشاب» به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار ایرانی برای مدیریت آبیاری با استفاده از داده‌های هواشناسی به‌نگام توسعه یافته است، اما تاکنون بررسی علمی و میدانی دقیقی در مورد دقت پیش‌بینی آن صورت نگرفته است. سامانه هوشاب سامانه

توسط سامانه هوشاب. در سال دوم، برای بررسی اثر سطوح شدید کم آبیاری، یک تیمار اضافی نیز در نظر گرفته شد: ۴- آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی تعیین شده توسط سامانه هوشاب.

این تیمارها با دو روش آبیاری سطحی (جویچه‌ای) و قطره‌ای (تیپ) اجرا شدند. کرت‌های هر تیمار به عرض ۱۶ متر (۲۶ ردیف کشت) و طول ۸۰ متر در نظر گرفته شدند. در سال دوم اجرای پروژه، عرض هر کرت به ۱۰ متر (۱۶ ردیف کشت) با همان طول ۸۰ متر کاهش یافت.

برای محاسبه نیاز آبی، از اطلاعات بهنگام هواشناسی ایستگاه مستقر در قطعه آزمایشی استفاده شد. این ایستگاه پارامترهای سرعت باد در ارتفاع دومتری سطح زمین، دمای حداقل و حداکثر روزانه، رطوبت نسبی و مقدار بارش را اندازه‌گیری و ثبت می‌کرد و داده‌ها را از طریق اینترنت به سرور مستقر در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی می‌فرستاد شکل (۱).

راستا، ۵۰ کیلوگرم کود اوره، ۱۵۰ کیلوگرم پتاس (در سال دوم ۵۰ کیلوگرم پتاس) و ۲۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات (در سال دوم ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات) استفاده شد. نوع و مقدار بذر مورد استفاده بر اساس نظر کارشناس زراعی پروژه، رقم سیروان (در سال دوم رقم حیدری) تعیین گردید. میزان بذر مصرفی ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار بود که با ماشین کارنده خطی کار همدانی با فاصله ردیف ۶۰ سانتی‌متر (چهار ردیف با فاصله ۱۲ سانتی‌متر روی پشته) در تاریخ‌های ۲۶ آبان ۱۳۹۸ و ۲۱ آبان ۱۳۹۹ کشت شد. تیمارهای طرح آزمایشی اجرا شده شامل روش آبیاری در دو سطح: ۱- آبیاری سطحی، ۲- آبیاری قطره‌ای و سطوح مختلف تأمین نیاز آبی گیاه گندم بر اساس خروجی سامانه هوشاب در سال اول شامل سه سطح: ۱- آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی تعیین شده توسط سامانه هوشاب. ۲- آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی تعیین شده توسط سامانه هوشاب. ۳- آبیاری بر اساس ۱۲۰ درصد نیاز آبی تعیین شده



شکل ۱- ایستگاه هواشناسی برای جمع‌آوری داده‌های بهنگام هواشناسی

Fig. 1- The meteorological station used for collecting real-time meteorological data

ایستگاه طرق، با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای کاربردی (اپلیکیشن) و پایگاه داده شرکت سازنده (شرکت فناور آوند میراب) در دسترس مجریان تحقیق قرار گرفت. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل این موارد بود: تعیین بافت و جرم

داده‌های هواشناسی پس از تجزیه و تحلیل و محاسبه نیاز آبی با روش پنمن-مانتیت و قرار گرفتن در بیلان آبی محتوای خاک مزرعه، به برنامه آبیاری (دور و عمق آبیاری) تبدیل شدند. برنامه آبیاری گندم برای قطعه هوشاب در

داده‌های بهنگام ایستگاه مستقر در قطعه آزمایشی مقایسه شد.

ارزیابی آماری

با استفاده از چند شاخص آماری، اعتبار و دقت فایل‌های خروجی نرم‌افزار سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری با داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد از مزرعه مقایسه شد. شاخص‌های آماری مورد استفاده شامل ضریب تبیین^۲ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده^۴ (NRMSE)، ضریب کارایی نش‌ساتکلیف^۵ (EF) و شاخص توافق ویلموت^۶ (d) بودند. مقادیر NRMSE کمتر از ۱۰ به عنوان عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ متوسط و بیشتر از ۳۰ ضعیف ارزیابی شدند (Moriassi et al., 2010).

محاسبه بهره‌وری فیزیکی آب

پس از برداشت محصول و مشخص شدن حجم آب مصرفی و میزان بارش در دوره رشد گیاه، بهره‌وری فیزیکی آب از دو روش (بر مبنای حجم آب مصرفی و حجم آب به علاوه بارش مؤثر) محاسبه شد. برای محاسبه باران مؤثر، از روش سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شد که برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است (Khaleghi, 2015).

نتایج و بحث

عملکرد دانه گندم

عملکرد دانه گندم در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای در تیمارهای مختلف تحقیق با آزمون تی جفت شده طی دو سال تحقیق با هم مقایسه شدند و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. در سال اول تحقیق، در روش

مخصوص ظاهری خاک، تعیین شوری عصارة اشباع خاک و آب آبیاری، گردآوری اطلاعات هواشناسی و محاسبه بهنگام نیاز آبی گندم، تعیین دبی ورودی به جویچه‌های آبیاری و دبی خروجی قطره‌چکان‌ها، تعیین رطوبت خاک به روش وزنی قبل و بعد از تعدادی از نوبت‌های آبیاری.

برای تعیین وزن دانه و عملکرد زیست‌توده در هر تیمار، ۱۰ نمونه در ابعاد یک مترمربع از تیمارها به صورت دستی جمع‌آوری و وزن شدند. نمونه‌ها به طور جداگانه با کمباین آزمایشی غلات پردازش شدند و کاه از دانه تفکیک گردید. دانه‌های گندم هر تیمار در کیسه‌های کتان جمع‌آوری و در محل مزرعه با ترازوی با دقت ۰/۱ گرم وزن شدند.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون t مستقل استفاده شد. به منظور بررسی اثر سال، داده‌های مربوط به دو سال به صورت جداگانه تحلیل شدند و برای مقایسه عملکرد تیمارها در سال‌های مختلف از آزمون t زوجی استفاده گردید. در تمامی تحلیل‌ها، سطح احتمال ۵ درصد به عنوان سطح معنی‌داری در نظر گرفته شد. بهره‌وری آب آبیاری بر حسب کیلو گرم به‌ازای هر مترمکعب آب از نسبت عملکرد گندم (کیلوگرم بر هکتار) به مجموع آب مصرفی (آبیاری + بارندگی مؤثر) (مترمکعب بر هکتار) محاسبه شد.

صحت‌سنجی داده‌های سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری

برای صحت‌سنجی داده‌های سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری، نیاز آبی گیاه با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی منطقه (ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مشهد) در دوره رشد گندم و با استفاده از نرم‌افزار ET_o Calculator (نسخه ۳/۲) (FAO, 2012) محاسبه و با

⁴ Normalized Root Mean Square Error

⁵ Nash-Sutcliffe Efficiency

⁶ Willmott's index of agreement

¹ Paired t-test

² Coefficient of determination

³ Root Mean Square Error

آبیاری سطحی میانگین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد با ۴۸۹۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به تیمار سامانه هوشمند با مقدار ۶۶۰۰ کیلوگرم در هکتار کمتر و این کاهش از نظر آماری معنی‌دار است؛ اما مقدار عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد با ۶۲۸۵ کیلوگرم بر هکتار تفاوت معنی‌دار با مقدار تیمار سامانه هوشمند ندارد. در روش آبیاری قطره‌ای، تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد با مقدار ۶۳۴۵ کیلوگرم در هکتار داشته است اما از لحاظ آماری با مقدار عملکرد دانه در تیمار سامانه هوشمند (برابر با ۶۱۷۰ کیلوگرم بر هکتار) اختلاف معنی‌داری ندارد. بین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد (۴۶۲۰ کیلوگرم بر هکتار) با تیمار سامانه هوشمند اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

جدول ۱- آزمون T جفتی برای عملکرد دانه گندم در تیمارهای مختلف آبیاری سطحی و قطره‌ای

Table 1- Paired T-test for grain yield of wheat under different surface and drip irrigation treatments

روش آبیاری سطحی		روش آبیاری قطره‌ای		تیمار آبیاری Irrigation Treatment	متغیر Variable
Surface Irrigation Method		Drip Irrigation Method			
مقدار P P-value	میانگین Mean	مقدار P P-value	میانگین Mean		
۰/۰۰۳	۴۶۲۰	۰/۰۰۱	۴۸۹۰	تیمار ۸۰٪	عملکرد دانه در سال اول (کیلوگرم بر هکتار)
	۶۱۷۰		۶۶۰۰	سامانه هوشمند	
۰/۳۵۷	۶۳۴۵	۰/۱۴۹	۶۲۸۵	تیمار ۱۲۰٪	
	۶۱۷۰		۶۶۰۰	سامانه هوشمند	
۰/۱۶۱	۵۲۶۰	۰/۸۲۰	۴۶۰۰	تیمار ۶۰٪	عملکرد دانه در سال دوم (کیلوگرم بر هکتار)
	۴۶۷۰		۴۶۸۰	سامانه هوشمند	
۰/۱۹۳	۴۰۹۰	۰/۰۰۱	۳۵۵۰	تیمار ۸۰٪	
	۴۶۷۰		۴۶۸۰	سامانه هوشمند	
۰/۲۹۵	۵۰۲۵	۰/۰۰۴	۶۰۰۰	تیمار ۱۲۰٪	
	۴۶۷۰		۴۶۸۰	سامانه هوشمند	

کاهش از نظر آماری معنی‌دار است. مقدار عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۶۰ درصد برابر ۴۶۰۰ کیلوگرم بر هکتار است که تفاوت معنی‌دار با مقدار تیمار سامانه هوشمند ندارد. در تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد عملکرد دانه به میزان ۶۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار اختلاف معنی‌دار با تیمار سامانه هوشمند دارد. در روش آبیاری قطره‌ای، عملکرد دانه در تیمار آبیاری قطره‌ای ۶۰ درصد برابر با ۵۲۶۰ کیلوگرم در هکتار و در تیمار سامانه هوشمند برابر ۴۶۷۰ کیلوگرم در هکتار است

در سال دوم اجرای تحقیق، علاوه بر تیمارهای آبیاری تامین ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی، تیمار آبیاری تامین ۶۰ درصد نیاز آبی نیز به اجرا درآمد. در تیمار ۶۰ درصد دیدگاه‌های کارشناسی و عرف منطقه نیز مدنظر قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد در روش آبیاری سطحی، میانگین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد با ۳۵۵۰ کیلوگرم بر هکتار نسبت به میانگین عملکرد دانه در تیمار سامانه هوشمند با مقدار ۴۶۸۰ کیلوگرم بر هکتار کمتر است و این

که از نظر آماری بین این دو تیمار تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. در تیمار آبیاری ۸۰ درصد عملکرد دانه برابر ۴۰۹۰ و در تیمار ۱۲۰ درصد برابر با ۵۰۲۵ کیلوگرم در هکتار بوده است، اما بین این تیمارها نیز از لحاظ آماری با تیمار سامانه هوشمند تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که آبیاری قطره‌ای عملکرد گندم را نسبت به آبیاری سطحی افزایش می‌دهد. این یافته با نتایج مطالعات ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2019) همسوست که گزارش کردند آبیاری قطره‌ای عملکرد گندم را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. سطوح کمتر آبیاری (مانند ۸۰ درصد) می‌تواند عملکرد گندم را کاهش دهد، اما این کاهش در روش‌های کارآمدتر آبیاری کمتر است که این موضوع توسط زوارت و باستینسن (Zwart & Bastiaanssen, 2004) تأیید شده است. استفاده از سامانه‌های پیشنهادی مبتنی بر داده‌های هواشناسی نیز می‌تواند عملکرد گندم را افزایش دهد. این یافته با یافته مطالعات اسمیت و همکاران (Smith et al., 2010) همخوانی دارد. برخی مطالعات مانند مطالعات کیچنه و همکاران (Kijne et al., 2003) نشان داده‌اند که در شرایط خاص، تفاوت معنی‌داری در عملکرد گندم بین سطوح مختلف آبیاری وجود ندارد. در مناطق بسیار خشک، آبیاری قطره‌ای ممکن است مزیت چندانی نداشته باشد (Evans & Sadler, 2008) و سطوح بسیار کم آبیاری (مانند ۶۰ درصد) می‌تواند عملکرد گندم را به طور معنی‌داری کاهش دهد (Raes., 2011).

تعیین حجم آبیاری

مقدار آب آبیاری در تیمارهای مختلف تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است. در سال اول تحقیق، در روش آبیاری سطحی تیمار ۱۰۰ درصد مطابق با برنامه سامانه هوشمند بر اساس داده‌های بهنگام هواشناسی آبیاری شده است. مقدار آبیاری در تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد در هر نوبت (به غیر از خاکاب) به اندازه ۲۰ درصد کمتر و بیشتر از تیمار

۱۰۰ درصد است. در تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد در تاریخ ۹ دی ۱۳۹۸ بنا به تشخیص مجری و همکار زراعی پروژه به دلیل رطوبت پایین خاک عملیات آبیاری صورت گرفت و در تاریخ ۱۶ اردیبهشت و ۲۳ خرداد سال ۱۳۹۹ به دلیل رطوبت مناسب خاک آبیاری انجام نشد. به همین دلیل مقدار آب آبیاری در تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد در عمل معادل ۶۷ و ۹۰ درصد تیمار سامانه هوشمند (۱۰۰ درصد) شده است. در روش آبیاری قطره‌ای، آبیاری تاریخ ۸ دی ۱۳۹۸ با توجه به نظر کارشناس همکار زراعی پروژه و کمبود رطوبت خاک برای تیمارهای ۸۰ درصد و ۱۲۰ درصد به اجرا در آمد اما برای تیمار هوشمند این آبیاری پیش بینی نشده بود و اعمال نگردید. آبیاری تاریخ ۲۲ خرداد ۱۳۹۹ که توسط سامانه هوشمند اعلام گردیده بود، فقط برای تیمار سامانه هوشمند اعمال گردید اما با نظر کارشناس زراعی پروژه مبنی بر رسیدگی محصول، این آبیاری برای تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد صورت نپذیرفت. بدین ترتیب تیمار ۱۰۰ درصد بیشترین مقدار آب مصرفی را معادل ۴۵۶۰ مترمکعب در هکتار داشته است. تیمارهای آبیاری ۸۰ و ۱۲۰ درصد به ترتیب ۲۸۴۰ و ۴۱۸۰ مترمکعب در هکتار معادل ۶۲ و ۹۲ درصد میزان آبیاری تیمار هوشمند آبیاری شدند.

در سال دوم تحقیق، در روش آبیاری سطحی تیمار ۱۰۰ درصد مطابق با برنامه سامانه هوشمند براساس داده‌های بهنگام هواشناسی آبیاری شده است. مقدار آبیاری در تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد در هر نوبت (به غیر از خاکاب) به اندازه ۴۰ و ۲۰ درصد کمتر و در تیمار ۱۲۰ درصد، به اندازه ۲۰ درصد بیشتر از تیمار سامانه هوشمند بوده است. در تیمار ۶۰ درصد در تاریخ ۲۴ دی ۱۳۹۹ بنا به تشخیص مجری و همکار زراعی پروژه، به دلیل رطوبت پایین خاک آبیاری اجرا شد. در روش آبیاری قطره‌ای، در تاریخ ۲۴ دی ۱۳۹۹ یک نوبت آب برای تیمار ۶۰ درصد با توجه به شرایط خاک و نظر کارشناس زراعی به اجرا درآمد اما برای دیگر تیمارها اعمال نگردید.

جدول ۲- مقادیر آب آبیاری مورد استفاده در تیمارهای مختلف

Table 2- Irrigation water amounts used in different treatments

روش آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation Method		روش آبیاری سطحی Surface Irrigation Method		تیمار آبیاری Irrigation Treatment	متغیر Variable
میانگین Mean	تعداد Number	میانگین Mean	تعداد Number		
۲۸۴۰	۵	۵۱۴۰	۵	تیمار ۸۰٪	حجم آب آبیاری
۴۵۶۰	۶	۷۶۷۰	۶	سامانه هوشمند	سال اول
۴۱۸۰	۵	۶۹۲۰	۵	تیمار ۱۲۰٪	(مترمکعب در هکتار)
۷۲۶۰	۱۰	۵۹۱۰	۱۱	تیمار ۶۰٪	حجم آب آبیاری
۶۰۷۰	۹	۷۷۳۰	۱۰	تیمار ۸۰٪	سال دوم
۷۵۶۰	۹	۹۹۵۰	۱۰	سامانه هوشمند	(مترمکعب در هکتار)
۹۰۸۰	۹	۱۱۵۹۰	۱۰	تیمار ۱۲۰٪	

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب آبیاری بین تیمار ۸۰ و ۱۰۰ درصد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد مشاهده شد اما بین تیمارهای ۱۲۰ و ۱۰۰ درصد اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. بهره‌وری آب کاربردی در روش قطره‌ای بین هیچ یک از تیمارها اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. مقادیر بهره‌وری آب کاربردی برابر با ۱، ۰/۹۷۳ و ۱/۰۶۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به‌ترتیب برای تیمارهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به دست آمده است.

در سال دوم تحقیق، مقدار بارش ۷۷ میلی‌متر و میزان باران موثر در دوره رشد در این سال ۵۶ میلی‌متر محاسبه شد. در روش آبیاری سطحی در این سال، مطابق جدول (۳) بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی (آب آبیاری + باران موثر) در بین تیمارهای ۶۰ و ۱۰۰ درصد آبیاری تفاوت معنی‌داری دیده می‌شود اما تفاوت بین تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد با تیمار ۱۰۰ درصد معنی‌دار نیست. بهره‌وری آب آبیاری در تیمار آبیاری ۶۰ درصد با ۰/۷۸ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بیشترین مقدار را در بین تیمارها دارد.

بهره‌وری آب بر مبنای آب آبیاری و بر مبنای آب آبیاری به اضافه باران موثر محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است. در سال اول تحقیق، مقدار بارش ۲۷۵ میلی‌متر و میزان باران موثر در دوره رشد در این سال ۱۷۸ میلی‌متر محاسبه شد. در سال اول تحقیق، در روش آبیاری سطحی بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی (آب آبیاری + باران موثر) در بین تیمارهای مختلف آبیاری تفاوت معنی‌داری ندارد. بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای ۸۰، ۱۲۰ و ۱۰۰ درصد به‌ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۱ و ۰/۸۶ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب محاسبه شده است؛ اما بهره‌وری آب کاربردی در تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد با ۰/۷۲۳ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بیشترین مقدار است و بعد از آن تیمارهای ۸۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب با ۰/۷۰۷ و ۰/۶۹۹ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب قرار دارند. در روش آبیاری قطره‌ای، بهره‌وری آب آبیاری برای تیمارهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به‌ترتیب ۰/۶۳، ۱/۳۵ و ۱/۵۲ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به دست آمد. در مقایسه آماری، مقادیر

جدول ۳- آزمون T جفتی برای بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمارهای مختلف

Table 3- Paired T-test for water productivity (kg per cubic meter) under different treatments

شاخص Index	سال Year	تیمار آبیاری Surface Irrigation Method	روش آبیاری سطحی Surface Irrigation Method		روش آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation Method	
			میانگین Mean	P مقدار P-value	میانگین Mean	P مقدار P-value
بهره‌وری آب آبیاری (WP _{ir})	اول	تیمار ۸۰٪	۰/۹۵	۰/۱۳۱	۱/۶۳	۰/۰۳۶
		سامانه هوشمند	۰/۸۶		۱/۳۵	
		تیمار ۱۲۰٪	۰/۹۱	۰/۰۹۸	۱/۵۲	۰/۰۷۷
		سامانه هوشمند	۰/۸۶		۱/۳۵	
	دوم	تیمار ۶۰٪	۰/۷۸	۰/۰۰۰	۰/۷۲	۰/۰۹۶
		سامانه هوشمند	۰/۴۷		۰/۶۲	
بهره‌وری آب کاربردی (WP _{ir} +P _e)	اول	تیمار ۸۰٪	۰/۴۶	۰/۶۶۵	۰/۶۷	۰/۲۸۸
		سامانه هوشمند	۰/۴۷		۰/۶۲	
		تیمار ۱۲۰٪	۰/۵۲	۰/۱۶۴	۰/۵۵	۰/۲۱۶
		سامانه هوشمند	۰/۴۷		۰/۶۲	
	دوم	تیمار ۸۰٪	۰/۷۰۷	۰/۸۴۵	۱	۰/۳۸۱
		سامانه هوشمند	۰/۶۹۹		۰/۹۷۳	
		تیمار ۱۲۰٪	۰/۷۲۳	۰/۲۸۱	۱/۰۶۴	۰/۱۲۷
		سامانه هوشمند	۰/۶۹۹		۰/۹۷۳	
		تیمار ۶۰٪	۰/۷۱۱	۰/۰۰۰	۰/۶۷۳	۰/۱۰۰
		سامانه هوشمند	۰/۴۴۵		۰/۵۷۵	
	دوم	تیمار ۸۰٪	۰/۴۲۸	۰/۴۸۶	۰/۶۱۷	۰/۳۲۵
		سامانه هوشمند	۰/۴۴۵		۰/۵۷۵	
	دوم	تیمار ۱۲۰٪	۰/۴۹۴	۰/۱۳۶	۰/۵۲۱	۰/۲۴۰
		سامانه هوشمند	۰/۴۴۵		۰/۵۷۵	

در مقایسه آماری مقادیر بهره‌وری آب آبیاری بین هیچ یک از تیمارها با تیمار سامانه هوشمند اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. مقادیر به دست آمده بهره‌وری آب کاربردی برابر با ۰/۶۷۳، ۰/۶۱۷، ۰/۵۷۵ و ۰/۵۲۱ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به‌ترتیب برای تیمارهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به دست آمد. در مقایسه بهره‌وری آب کاربردی نیز بین تیمارهای سطح آبیاری با تیمار سامانه هوشمند اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد.

بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای آبیاری ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به ترتیب برابر ۰/۴۶، ۰/۴۷ و ۰/۵۲ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب محاسبه شده است. بهره‌وری آب کاربردی در تیمار آبیاری ۶۰ درصد با ۰/۷۱ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بیشترین مقدار و در تیمار ۸۰ درصد با ۰/۴۳ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب کمترین مقدار را است. در روش آبیاری قطره‌ای، بهره‌وری آب آبیاری برای تیمار آبیاری ۶۰ تا ۱۲۰ درصد به‌ترتیب برابر ۰/۷۲، ۰/۶۷، ۰/۶۲ و ۰/۵۵ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب حاصل شد.

معنی داری در بهره‌وری آب بین سطوح مختلف آبیاری وجود ندارد.

نیاز آبی گیاه گندم

نیاز آبی گندم محاسبه شده با روش پنمن مانیتیت بر اساس داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل اجرای تحقیق (ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مشهد) و براساس میزان تبخیر طشت همان ایستگاه، در جدول (۴) آورده شده و با اعداد نیاز آبی ارائه شده توسط سامانه هوشمند (هوشاب) مقایسه شده است. جدول (۴) نشان می‌دهد بین نیاز آبی برآورد شده در سند ملی آب و داده‌های ایستگاه فرودگاه مشهد اختلاف ناچیز است اما سامانه هوشاب، نیاز آبی گندم را در همان بازه زمانی در حدود دو برابر برآورد کرده است.

نتایج بررسی‌ها نشان داد که آبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی بهره‌وری آب را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. این یافته با یافته‌های اسمیت و همکاران (Smith et al., 2010) همسوست که گزارش کردند آبیاری قطره‌ای می‌تواند بهره‌وری آب را تا ۵۰ درصد افزایش دهد. سطوح کمتر آبیاری (مانند ۸۰ درصد) می‌تواند بهره‌وری آب را بهبود بخشد، به شرطی که عملکرد محصول کاهش نیابد که این موضوع توسط زوارت و باستینسن (Zwart & Bastiaanssen, 2004) نیز تأیید شده است. علاوه بر این، باران موثر می‌تواند بهره‌وری آب را افزایش دهد، به ویژه در مناطق با بارش متوسط که این یافته با مطالعات راس و همکاران (Raes et al., 2011) همخوانی دارد. با این حال، برخی مطالعات مانند مطالعات کیجنه و همکاران (Kijne et al., 2003) نشان داده‌اند که در شرایط خاص تفاوت

جدول ۴- مقایسه تبخیر و تعرق گیاه گندم در منطقه مشهد (میلی‌متر) در دوره رشد

Table 4- Comparison of wheat crop evapotranspiration in Mashhad region (in millimeters) during the growing season

ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند Intelligent System Meteorological Station		ایستگاه هواشناسی فرودگاه مشهد Mashhad Airport Meteorological Station		طشت تبخیر Evaporation Pan	سند ملی آب National Water Document
سال دوم Second Year	سال اول First Year	سال دوم Second Year	سال اول First Year		
۵۲۳	۶۵۴	۲۶۰	۳۰۱	۵۳۲	۳۱۳

است. به طوری که قدرمطلق اختلاف دمای حداقل روزانه بین ایستگاه مشهد و ایستگاه سامانه هوشمند ۵/۵ درجه سانتی‌گراد و برای دمای حداکثر روزانه ۲ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین یکی از دلایل تبخیر- تعرق زیاد برآورد شده حاصل از داده‌های ایستگاه هوشمند را می‌توان برآورد بیشتر دما به‌ویژه دمای حداقل ذکر کرد. مقایسه رطوبت نسبی حداقل و حداکثر به‌دست آمده از ایستگاه مشهد با آنچه از ایستگاه سامانه هوشمند به‌دست آمده است نیز نشان

به منظور واکاوی دلیل اختلاف زیاد تبخیر- تعرق گندم برآورد شده از داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد با آنچه از ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری به دست آمده است، به مقایسه داده‌های ورودی این دو منبع پرداخته شد. در سال اول تحقیق، داده‌های ایستگاه مشهد و داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند از نظر دمای حداقل و حداکثر مقایسه و مشخص گردید که اختلاف بین دماهای روزانه حداقل بیشتر از اختلاف بین دماهای روزانه حداکثر

می‌دهد قدرمطلق اختلاف به ترتیب ۶/۷ و ۱۶/۸ درصد است. در هر دو پارامتر رطوبت نسبی، اعداد به دست آمده از ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند کمتر از داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد هستند. ورود داده‌های رطوبت نسبی کمتر، موجب شده تا بیش برآورد تبخیر- تعرق گندم براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری باشد. در مورد ساعت آفتابی نیز همین مقایسه نشان می‌دهد در اینجا اختلاف بیشتر است و قدرمطلق اختلاف در ساعت آفتابی ۷/۷ ساعت است.

نتایج مقایسه داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری با داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد با پنج شاخص آماری نشان می‌دهد که عملکرد ایستگاه سامانه

هوشمند نسبت به ایستگاه سینوپتیک مشهد از نمره خوب (برای دمای حداکثر) تا ضعیف (دمای حداقل و ساعت آفتابی) ارزیابی می‌شود جدول (۵). مقادیر محاسبه شده برای NRMSE به ترتیب از ۱۶/۶ درصد برای دمای حداکثر تا ۱۱۲/۴ درصد برای ساعت آفتابی تغییر میکند. مقدار ضریب تبیین برای کلیه تیمارها بیش از ۰/۶۷ و قابل قبول به دست آمد. در مجموع می‌توان گفت حسگرهای ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری داده‌های دمای حداکثر را با درجه خوب، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر را با درجه متوسط و داده‌های دمای حداقل و ساعت آفتابی را با درجه ضعیف ثبت و گزارش کرده‌اند.

جدول ۵- شاخص‌های آماری ارزیابی مقایسه داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند با داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد

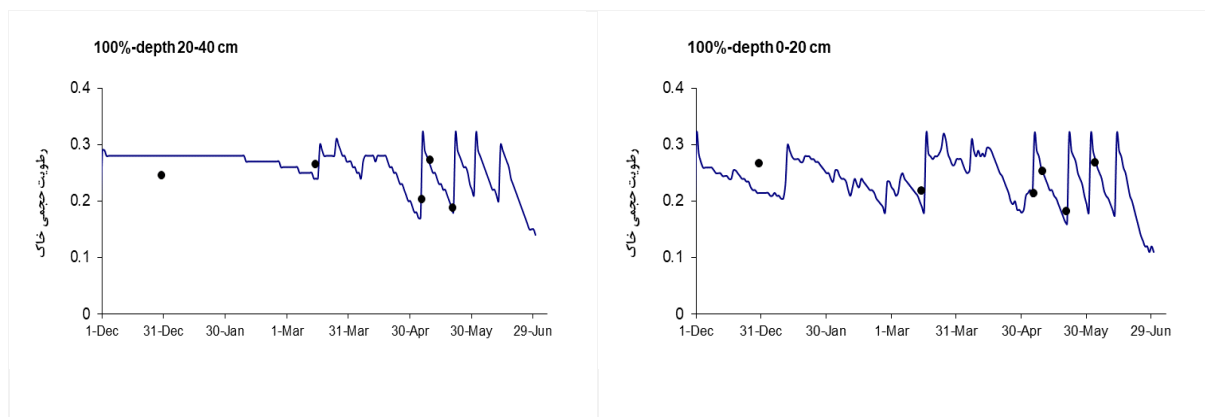
Table 5- Statistical evaluation indices for comparing data from the intelligent system with data from Mashhad meteorological station

شاخص آماری					تیمار
Statistical Index					Treatment
d	EF	NRMSE	RMSE	R ²	
۰/۸۷۶	۰/۳۴۸	۷۴/۳	۶/۰۲	۰/۹۲۸	دمای حداقل
۰/۹۶۹	۰/۸۷۹	۱۶/۶	۳/۴۰	۰/۸۹۶	دمای حداکثر
۰/۹۵۳	۰/۸۴۷	۲۳/۸	۹/۷۱	۰/۹۱۱	رطوبت حداقل
۰/۸۳۸	۰/۳۸۹	۲۹/۶	۲۰/۱	۰/۷۵۳	رطوبت حداکثر
۰/۳۸۰	-۲/۷۱۴	۱۱۲/۴	۸/۶۸	۰/۶۷۴	ساعت آفتابی

رطوبت خاک

داده‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک توسط مدل سامانه هوشمند ناچیز به نظر می‌رسد، شبیه سازی بر اساس بیلان رطوبت در خاک توسط سامانه صورت می‌گیرد. نتایج صحت‌سنجی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار سامانه هوشمند با داده‌های اندازه‌گیری شده از مزرعه برای سال اول در روش آبیاری سطحی در جدول (۶) نشان داده شده است.

رطوبت خاک در دوره آبیاری در دو عمق ۲۰-۰ و ۴۰-۲۰ سانتی‌متر با روش نمونه‌گیری با مته و خشک کردن در آون اندازه‌گیری شد. برای نمونه، در شکل (۲)، نتایج رطوبت‌سنجی خاک در دو عمق ۲۰-۰ و ۴۰-۲۰ سانتی‌متر در تیمار سامانه هوشمند در سال اول تحقیق در روش آبیاری سطحی نشان داده شده است. مطابق شکل (۲)، اختلاف داده‌های اندازه‌گیری‌شده رطوبت خاک در مزرعه با



شکل ۲- مقایسه رطوبت خاک اندازه گیری شده با شبیه سازی شده توسط نرم افزار سامانه هوشمند

Fig. 2- Comparison of measured soil moisture with simulated soil moisture by the intelligent system software

جدول ۶- شاخص های آماری ارزیابی مقایسه داده های اندازه گیری و شبیه سازی شده رطوبت خاک

Table 6- Statistical evaluation indices for comparing measured and simulated soil moisture data

شاخص آماری Statistical Index					تیمار Treatment
d	EF	NRMSE	RMSE	R ²	
۰/۷۹۶	۰/۲۳۱	۲۶/۱	۰/۰۵۱	۰/۵۵	۰-۲۰ (۸۰٪)
۰/۸۶۳	۰/۵۰۸	۲۳/۰	۰/۰۴۶	۰/۶۶	۲۰-۴۰ (۸۰٪)
۰/۶۰۹	-۱/۵۳۶	۲۱/۷	۰/۰۵۱	۰/۱۵	۰-۲۰ (۱۰۰٪)
۰/۵۱۱	-۱/۷۹۱	۲۴/۰	۰/۰۵۶	۰/۰۳	۲۰-۴۰ (۱۰۰٪)
۰/۹۵۱	۰/۷۹۵	۱۲/۰	۰/۰۲۸	۰/۸۵	۰-۲۰ (۱۲۰٪)
۰/۷۷۵	-۰/۲۲۳	۲۷/۲	۰/۰۶۲	۰/۴۴	۲۰-۴۰ (۱۲۰٪)

نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که بهره گیری از سامانه هوشمند مدیریت آبیاری «هوشاب» در کشت گندم در منطقه مشهد، اگرچه در مقایسه با برخی تیمارهای کاهش یافته آبیاری منجر به افزایش عملکرد دانه گردید، اما از منظر شاخص های بهره وری آب (شامل بهره وری فیزیکی و بهره وری کاربردی)، برتری معناداری نسبت به دیگر روش های مدیریت آبیاری نداشت. در برخی موارد، میزان آب مصرفی در تیمار مبتنی بر هوشاب به طور قابل توجهی بیش از مقدار مورد نیاز تخمین زده شده بود که این امر بیانگر ضرورت بازنگری و بهینه سازی الگوریتم های تخمین

نتایج جدول (۶) نشان می دهد که عملکرد سامانه براساس شاخص NRMSE از نمره خوب (۱۲ درصد در تیمار ۱۲۰ درصد در عمق ۰-۲۰) تا متوسط (بقیه تیمارها بین ۲۳ تا ۲۷/۲ درصد) ارزیابی می شود. مقادیر محاسبه شده برای RMSE به ترتیب از ۲/۸ تا ۶/۲ درصد حجمی در کلیه تیمارها تغییر می کند. مقدار ضریب تبیین، شاخص توافق ویلموت و ضریب کارایی نش ساتکلیف برای تیمار تامین ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ویژه در عمق ۲۰-۴۰ سانتی متر نمره ضعیف دارد. در مجموع می توان گفت سامانه هوشمند آبیاری (هوشاب)، مقدار رطوبت خاک را با درجه متوسط شبیه سازی می کند.

نیاز آبی گیاه در سامانه مذکور است. مقایسه برآوردهای هوشاب با داده‌های حاصل از ایستگاه هواشناسی محلی نیز نشان داد که در برخی موارد تخمین نیاز آبی توسط سامانه تا دو برابر مقدار واقعی است؛ این موضوع در شرایط بحرانی منابع آب می‌تواند منجر به برداشت و مصرف بی‌رویه آب و تشدید تنش آبی گردد.

از سوی دیگر، نتایج پژوهش به‌طور مشخص حاکی از آن بود که استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای، نسبت به روش آبیاری سطحی، در اغلب تیمارها منجر به افزایش معنادار شاخص بهره‌وری آب شده است. این امر، مؤید قابلیت بالای آبیاری قطره‌ای به‌عنوان راهکاری مؤثر در مدیریت بهینه منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور است. اعمال تیمارهایی با کاهش ۲۰ درصد در حجم آب آبیاری (مصرف معادل ۸۰ درصد نیاز آبی کامل)، در شرایط خاص اقلیمی و مدیریتی، بدون افت شدید عملکرد، موجب بهبود شاخص‌های بهره‌وری آب گردید؛ این اثر به‌ویژه در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به شکلی بارزتر مشاهده شد.

بر این اساس، با وجود ظرفیت بالای سامانه هوشاب در مکانیزه‌سازی فرآیند مدیریت آبیاری و تصمیم‌سازی در سطح مزرعه، تحقق هدف‌های مرتبط با بهینه‌سازی مصرف آب مستلزم بازنگری اساسی در مدل‌سازی نیاز آبی گیاه است، به‌ویژه تطبیق بهتر مدل‌های سامانه با داده‌های محلی، شرایط اقلیمی خاص منطقه و بهره‌گیری از داده‌های دقیق‌تر اقلیمی.

در نهایت، توسعه رابط کاربری ساده، کاربردی و قابل فهم برای بهره‌برداران، همراه با ارائه آموزش‌های میدانی و

عملی، می‌تواند به افزایش استقبال و اثربخشی سامانه هوشاب در مزارع منجر شود و گامی مؤثر در راستای استقرار کشاورزی هوشمند، پایدار و سازگار با اقلیم در مناطق خشک کشور فراهم آورد.

پیشنهادهایی برای بهبود سامانه هوشاب و تحقیقات آتی

- ارزیابی عملکرد سامانه هوشاب در مناطق اقلیمی متفاوت و روی محصولات زراعی مختلف پیشنهاد می‌شود. در این زمینه، تأکید بر کاربرد سامانه در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب شمال و غرب کشور که تنش آبی کمتری دارند، مهم است. همچنین انتظار می‌رود که اثربخشی سامانه برای محصولات بهاره با دوره رشد طولانی بیشتر باشد.
- توصیه می‌شود توسعه‌دهندگان سامانه هوشاب در طراحی نسل‌های آتی، بازنگری در نوع حسگرهای مورد استفاده را مدنظر قرار دهند و از حسگرهایی با دقت اندازه‌گیری بالاتر استفاده کنند. پیشنهاد می‌شود به‌جای تکیه بر ایستگاه‌های هواشناسی قابل حمل، از داده‌های برخط شبکه جهانی هواشناسی استفاده شود. این کار نه تنها موجب کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری خواهد شد، بلکه به دلیل سهولت بیشتر بهره‌برداری می‌تواند موجب استقبال گسترده‌تر بهره‌برداران و گسترش کاربرد سامانه در سطح کشور گردد.

مراجع

- Abbasi, N. & Abbasi, F. (2020). Overview of Water Resources and Consumption in Iran. Technical Report No. 57384, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Iran. (in Persian).
- Al-Ghobari, H. M. (2014). The assessment of automatic irrigation scheduling techniques on tomato yield and water productivity under a subsurface drip irrigation system in a hyper arid region. WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol. 185.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO.
- Aydin, Ö., Kandemir, C. A., Kiraç, U., & Dalkiliç, F. (2021). Development of a smart irrigation system based on artificial intelligence and IoT. *Sustainability*, 13(14), 7805.
- Bwambale, E., Abagale, F.K. & Anornu, G.K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, Volume 260, 107324.
- Çetin, O., Üzen, N., Temiz, M.G. & Altunten, H. (2021). Improving Cotton Yield, Water Use and Net Income in Different Drip Irrigation Systems Using Real-Time Crop Evapotranspiration. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 30, No. 5, 4463-4474.
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research*, 44(7). <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>
- FAO. (2012). ETo calculator, Land and water digital media series N° 36. FAO, Rome, Italy.
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J.F., Nieto-Garibay, A. & Porta-Gándara, M.A. (2015). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *Transaction on instrumentation and measurement*, Vol. 63, No. 1.
- Incrocci, L., Marzioletti, P., Incroccia, G., Di Vita, A., Balendonck, J., Bibbiani, C., Spagnole, S., & Pardossia, A. (2014). Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops. *Agricultural Water Management*, 131, 30-40.
- Jensen, M. E., & Allen, R. G. (2016). Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427-2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- Karar, M. E., Al-Rasheed, M. F., Al-Rasheed, A. F., & Reyad, O. (2020). Smart water pumping system using IoT and artificial neural networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(5), 5017-5024.
- Kehui, X., Deqin, X. & Xiwen, L. (2010). Smart water-saving irrigation system in precision agriculture based on wireless sensor network. *Transactions of the CSAE*, Vol.26, No.11.
- Khaleghi, N. (2015). Comparison of Effective Rainfall Estimation Methods in Agriculture. *Journal of Water and Sustainable Development*, Vol. 2, No. 2, pp. 51-58. (in Persian).
- Kiani, A. & Abbasi, F. (2021). *Barresi-ye tasir-e fanavari-haye novin dar kahnash-e masraf-e ab-e keshavarzi* [Investigating the impact of modern technologies on reducing agricultural water consumption]. *Ab va Tose'e-ye Paydar*, 2(2), 77-84. (in Persian).
- Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. (2003). Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement. CABI Publishing.
- Liakos, V., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31-48.
- Masseroni, D., Moller, P., Tyrell, R., Romani, R., Lasagna, A., Sali, G., Facchi, A. & Gandolfi, C. (2018). Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in Europe. *Agricultural water management*, 201, pp. 58-69.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Navarro-Hellin, H., Martinez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F. & Torres-Sanchez, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124 (1), pp. 121-131.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). FAO crop water productivity model to simulate yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66.
- Rogers, D. H., Alam, M., & Aguilar, J. (2015). Irrigation management for agricultural producers. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service.

- Shahrokhnia, M. A., Zare, A., & Dehghani Sanij, H. (2015). Comparison of Different Tools for Drip Irrigation Planning of Citrus in Medium and Heavy Soils. *Journal of Irrigation and Drainage of Iran*, 3(9): 448-458. (in Persian).
- Shekhar, Y., Dagur, E., & Mishra, S. (2017). Smart irrigation system using machine learning and IoT. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 6(7), 132-138.
- Smith, M., Muñoz, G., & van Wijk, M. T. (2010). *Water management for sustainable agriculture*. FAO Water Reports, 36.
- Vallejo-Gómez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (2023). A review of intelligent irrigation systems in agriculture: Technologies and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107616.
- Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Wang, Y., & Shao, L. (2019). Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. *Field Crops Research*, 234, 1-10.
- Zhang, X., Lin, X., & Luo, Y. (2019). Smart irrigation systems: A review of the latest technologies and their applications. *Agricultural Water Management*, 215, 48-62.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.001>
- Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. M. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton, and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115-133.

Research Article

Enhancing Farmers' Resilience in Participatory Water Resources Management under Water Scarcity Conditions in the Lake Urmia Basin Using Agent-Based Modeling

Somayeh Emami¹✉, Hossein Dehghanisani², Hojjat Emami³

1. PhD in Hydraulic Structures, Department of Water Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Alborz, Iran.
3. Associate Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Bonab, Bonab, Iran.

(✉ Corresponding Author: somayehemami70@gmail.com)

ARTICLE INFO

Received: 25 May 2025

Revised: 1 June 2025

Accepted: 17 July 2025

Available Online: 28 September 2025

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Emami, S., & Dehghanisani, H., & Emami, H., (2025). Enhancing Farmers Resilience in Participatory Water Resources Management under Water Scarcity Conditions in the Lake Urmia Basin Using Agent-Based Modeling. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. V.26, No.99. P: 55-74
<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369484.1619>

Introduction

In arid and semi-arid regions, pressures from climate change, including increasing temperatures, decreasing precipitation, and severe seasonal fluctuations, along with institutional constraints and weaknesses in resource management, have created fundamental challenges for farmers and hindered the realization of sustainable agriculture. The Lake Urmia basin, one of the most sensitive aquatic ecosystems in the country, provides a prime example of such critical conditions due to the significant decrease in water levels, increased salinity, and decline in the quality of water resources, which have resulted in widespread economic, social, and environmental consequences for local communities. Water scarcity not only reflects physical resource limitations but also generates complex interactions among economic, social, institutional, and environmental factors, directly influencing farmers' decision-making, irrigation technology choices, and the effectiveness of water resource management policies. In this context, socio-institutional resilience is a multidimensional and decisive factor, encompassing household economic capacities, flexibility and adaptability of agricultural technologies, active and stable social networks, and organizational and institutional skills, all of which can enhance the sustainability of agricultural systems in the face of environmental pressures and economic instabilities. However, previous studies have mostly analyzed economic, individual, or social indicators separately and have not comprehensively examined the complex interactions among individual, social, technological, and environmental factors. As a result, the ability to predict the agricultural system's response to various policies and climate shocks has been limited. Moreover, an integrated framework for optimal water resource management and for enhancing farmers' resilience has not yet been provided.

Methodology

This study was conducted using a mixed qualitative and quantitative approach combined with agent-based modeling (ABM) to accurately represent the complex interactions between farmers, social-institutional networks, and environmental pressures in the Miandoab Plain, south of Lake Urmia. The study population included 50 farmers, 10 agricultural Jihad experts, and 10 representatives of the

regional water organization. Data were collected through structured questionnaires, semi-structured interviews, and secondary sources. Six key indicators were defined in the model: economic resilience (ERI), technological flexibility (FTI), knowledge network strength (KNRI), innovation motivation in practice (MPI), environmental pressure (EPI), and irrigation technology level (IL). Farmers, as the main agents, interacted continuously with local knowledge networks and product markets, and their decision-making rules were shaped by individual motivations, environmental pressures, and the observed behavior of others. To examine the system's response under different conditions, four simulation scenarios were designed: fluctuations in agricultural product prices, introduction of new irrigation technologies at varying adoption rates, changes in the density of knowledge networks, and the occurrence of climate shocks and successive droughts. Quantitative data were analyzed using SPSS, and qualitative data were processed using open and axial coding in MAXQDA. Model validation was conducted by comparing outputs with historical data, consulting local experts, and performing sensitivity analyses to ensure the model accurately represents farmers' behavior and socio-institutional dynamics under various environmental pressures.

Results and Discussion

Simulation results showed that farmers' adoption of new technologies and changes in irrigation patterns are influenced by a combination of economic, individual, technological, social, and environmental factors. Farmers with higher economic resilience and denser social networks adopted new technologies faster, resulting in increased water productivity. Environmental pressures, particularly drought and water scarcity, were strong drivers for adoption, but their effects were sustainable only when combined with strong individual motivation and active knowledge networks. The technological flexibility index and innovation motivation were decisive in determining the speed and extent of technology adoption. Social networks and knowledge network strength enhanced collective learning and experience sharing, thereby creating synergistic effects with other indicators. The combination of low economic capacity and high environmental pressure highlighted the need for targeted support and guidance to help farmers adapt to new technologies. Analysis also showed that one-dimensional policies, such as simply providing subsidies or unsupervised training, have limited effectiveness and may even be counterproductive. In contrast, multidimensional policy packages, including targeted and continuous education, performance-based subsidies, strengthening local networks, and transparency in water allocation, create synergistic and sustainable impacts. International experiences indicate that farm schools, participatory local networks, and subsidy reforms can significantly increase farmer engagement and water productivity. Agent-based modeling also allows predicting farmers' responses to policies, testing different scenarios, and optimizing resource allocation before implementation.

Conclusions

The adoption of new irrigation technologies and sustainable water management results from complex interactions among economic, social, institutional, and environmental factors. Successful participatory policies require maintaining a minimum level of water resource sustainability, implementing multidimensional policy packages, strengthening social and institutional networks, and using agent-based modeling tools to assess policy effectiveness. This study demonstrated that the combination of economic indicators, innovation motivation, social networks, and environmental pressures can significantly determine the success or failure of policies. The proposed framework provides a practical and scientific roadmap for sustainable water management in areas affected by water crises.

Keywords: Water Resources Management, Participatory Modeling, Social Network, Agent-Based Modeling



نوع مقاله: پژوهشی

بهبود تاب‌آوری کشاورزان در مدیریت مشارکتی منابع آب تحت شرایط کم‌آبی در حوضه^۱ دریاچه^۲ ارومیه با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور

سمیه امامی^۱ , حسین دهقانی‌سانج^۲ , حجت امامی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک با توجه به افزایش فشارهای اقلیمی و نهادی بر منابع آب، گذار از مدیریت فنی به رویکردهای اجتماعی-نهادی ضروری است. در این راستا، در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی کیفی-کمی و مدل‌سازی عامل‌محور (ABM)، به بررسی رفتار کشاورزان در مدیریت مشارکتی منابع آب در دشت میاندوآب، یکی از کانون‌های بحرانی حوضه^۱ دریاچه^۲ ارومیه، پرداخته شده است. داده‌ها از طریق پرسشنامه، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و منابع ثانویه جمع‌آوری شد. در مدل ABM طراحی شده، کشاورزان به عنوان عاملان اصلی و شبکه‌های محلی و بازار محصولات به عنوان بازیگران مکمل در نظر گرفته و تصمیمات آبیاری بر اساس چهار شاخص کلیدی اقتصادی (ERI)، فناورانه (FTI, IL)، اجتماعی (KNRI)، فردی (MPI) و زیست‌محیطی (EPI) شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که تاب‌آوری اقتصادی، انعطاف‌پذیری فناوری، استحکام شبکه‌های اجتماعی و انگیزه نوآوری کشاورزان به طور هم‌افزا، سرعت پذیرش فناوری‌های نوین و بهره‌وری آب را افزایش می‌دهند. فشارهای محیطی شدید، در صورت همراهی با انگیزه نوآوری بالا، محرکی قوی برای تغییر رفتار آبیاری و پذیرش فناوری‌های نوین می‌باشند. در حالی که کشاورزان با تاب‌آوری اقتصادی پایین و شبکه‌های اجتماعی ضعیف، بیشترین آسیب‌پذیری را داشتند. یافته‌ها تأکید می‌کند که سیاست‌های مدیریت منابع آب باید فراتر از اقدامات فنی، شامل بسته‌های حمایتی چندبعدی اقتصادی، آموزشی و تقویت شبکه‌های اجتماعی طراحی شوند. همچنین کاربرد مدل‌های عامل‌محور بومی شده امکان پیش‌بینی اثر سیاست‌ها، بهینه‌سازی تخصیص منابع و بهبود مشارکت کشاورزان را فراهم می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان راهنمای عملیاتی برای بالا بردن تاب‌آوری، بهره‌وری آب و مدیریت مشارکتی منابع آب کشاورزی در مناطق بحرانی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت منابع آب، مدل‌سازی مشارکتی، شبکه اجتماعی، مدل‌سازی عامل‌محور

مقدمه

محدود دارند، حادث‌تر بوده و منجر به چالش‌های اساسی در

در چند دهه اخیر، بحران‌های آب و تغییرات اقلیمی، مدیریت منابع آب شده است (Wada et al., 2016; Lee et al., 2023). بحران‌های آب تنها محدودیت‌های فیزیکی منابع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، فشار قابل توجهی بر سیستم‌های کشاورزی وارد کرده‌اند. این فشارها به‌ویژه در حوضه‌های آبریز داخلی که وابستگی زیادی به منابع آب مؤلفه‌های اجتماعی، نهادی و زیست‌محیطی را نیز شامل

^۱ دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول: [Email: somayehemami70@gmail.com](mailto:somayehemami70@gmail.com))^۲ استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، البرز، ایران.^۳ دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران.

می‌شوند. این تعاملات شامل فرایندهای تصمیم‌گیری کشاورزان، سیاست‌های دولتی، ظرفیت نهادی برای تنظیم و پاسخ‌های اکوسیستم به فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی است. تاب‌آوری اجتماعی- نهادی که به‌عنوان ظرفیت برای تحمل و سازگاری با تغییر تعریف می‌شود، برای عملکرد پایدار سیستم‌های منابع آب بسیار حیاتی بوده و می‌تواند تفاوت میان موفقیت و شکست سیاست‌های مدیریت منابع آب را ایجاد کند (Pahl-Wostl, 2007). توانایی جوامع و نهادها در سازگاری با تغییرات محیطی و مقابله با بحران‌ها، نقش کلیدی در پایداری مدیریت منابع آب دارد. این مفهوم فراتر از ظرفیت فنی یا اقتصادی است و شامل مهارت‌های سازمانی، شبکه‌های اجتماعی فعال، اعتماد میان ذینفعان و انعطاف‌پذیری نهادی می‌شود (Pahl-Wostl, 2007). Salajegheh و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای نشان دادند که در مناطقی که ساختارهای نهادی ضعیف و شبکه‌های اجتماعی ناکارآمد دارند، سیاست‌های مدیریت منابع آب با محدودیت‌های جدی مواجه شده و اجرای راهبردهای پایدار با شکست روبه‌رو می‌شود. Tingley-Holyoak and Pisaniello (۲۰۱۷) تأکید کردند موفقیت سیاست‌های پایدار منابع آب تنها در صورتی ممکن است که تعامل میان رفتار کشاورزان، ساختارهای نهادی و فشارهای محیطی به‌صورت همزمان مورد توجه قرار گیرد. به عبارت دیگر، تاب‌آوری اجتماعی-نهادی نه تنها یک ظرفیت پیشگیرانه است، بلکه یک عامل تعیین‌کننده برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش انعطاف سیستم‌های کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی عمل می‌کند. سیاست‌های صرفاً فنی یا اقتصادی بدون درک و تقویت ابعاد نهادی و اجتماعی، نمی‌توانند پاسخگوی پیچیدگی‌های واقعی مدیریت منابع آب در شرایط بحران باشند. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند موانع اجتماعی مانند فقدان اعتماد به نهادهای دولتی و ضعف مشارکت مردمی، اجرای پروژه‌های سازگاری با

کم‌آبی را با چالش مواجه می‌کند و بر اهمیت تقویت نهادهای محلی و مشارکت اجتماعی تأکید دارد. این درک از پیچیدگی‌های اجتماعی و نهادی بحران‌های آب، اهمیت توجه به بستر محلی و شرایط خاص هر حوضه آبریز را روشن می‌کند. کاهش سطح آب، افزایش شوری و افت کیفیت منابع آبی در حوضه دریاچه ارومیه، در نتیجه ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی شامل تغییرات اقلیمی، برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی و تغییرات کاربری اراضی است. این شرایط به‌ویژه در دشت میاندوآب باعث کاهش چشمگیر تولیدات کشاورزی و تهدید معیشت کشاورزان شده است، به‌گونه‌ای که بسیاری از خانوارها با کاهش درآمد و کاهش امنیت غذایی مواجه‌اند. دولت برای کاهش این مشکلات اقداماتی مانند پرداخت یارانه، ارائه آموزش‌های کشاورزی و اعمال نظارت‌های محدود انجام داده است (Emami et al., 2024). با این حال، اثرهای این برنامه‌ها عمدتاً کوتاه‌مدت بوده و در بلندمدت، به دلیل عدم توجه کافی به ابعاد اجتماعی و نهادی، نتایج پایداری ایجاد نکرده‌اند. به عبارت دیگر، بدون در نظر گرفتن تعاملات پیچیده میان رفتار کشاورزان، ساختارهای نهادی و تغییرات محیطی، سیاست‌ها نمی‌توانند به هدف‌های پایداری دست یابند (Tingley-Holyoak and Pisaniello, 2017). این تجربه ملی نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب نمی‌تواند تنها به اقدامات فنی محدود شود و نیازمند رویکردی یکپارچه و چندبعدی است که ابعاد اجتماعی- نهادی و محیطی را همزمان در نظر گیرد. در این راستا، مدل‌سازی عامل محور (ABM)، به‌عنوان رویکردی نوین توجه پژوهشگران متعددی را به خود جلب کرده است، این مدل‌ها شبیه‌سازی تعاملات پیچیده میان عوامل انسانی، محیطی، بازنمایی رفتارهای ناهمگون کشاورزان، یادگیری اجتماعی و اثرهای شبکه‌ای تصمیمات را فراهم می‌آورند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ترکیب ABM با مدل‌های هیدرولوژیکی

دانش، انگیزه نوآوری در عمل، فشار محیطی و سطح فناوری آبیاری تعریف شد.

کشاورزان در مدل به‌صورت اپراتورهای اصلی آموزش دیده و تصمیمات آن‌ها در طول مدل به طور مداوم در تعامل با شبکه‌های محلی تبادل دانش و بازار محصولات شکل می‌گیرد، به طوری که انگیزه‌های فردی، فشارهای زیست‌محیطی و مشاهدات اجتماعی همزمان رفتار آن‌ها را تشکیل می‌دهند. برای ارزیابی پایداری سیستم، چهار سناریوی محوری در محیط NetLogo طراحی و شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی شامل میزان پذیرش فناوری‌های نوین، تغییر در الگوی مصرف آب، نوسانات درآمدی و سطح کلی تاب‌آوری سیستم استخراج و مقایسه گردید. برای اعتبارسنجی مدل، ابتدا خروجی‌های شبیه‌سازی با داده‌های واقعی سیستم مقایسه شدند، سپس ارزیابی توسط کارشناسان محلی و متخصصان حوزه مدیریت منابع آب انجام گرفت و در نهایت تحلیل حساسیت نسبت به تغییر پارامترهای کلیدی صورت گرفت. این چارچوب امکان ارائه درکی جامع و چندبعدی از تعاملات و پایداری سیستم‌های کشاورزی را فراهم کرده و پایه‌ای برای ارائه توصیه‌های سیاستی مبتنی بر شواهد جهت مدیریت منابع آب و تقویت شبکه‌های اجتماعی کشاورزان ایجاد می‌کند.

مواد و روش‌ها

دشت میاندوآب

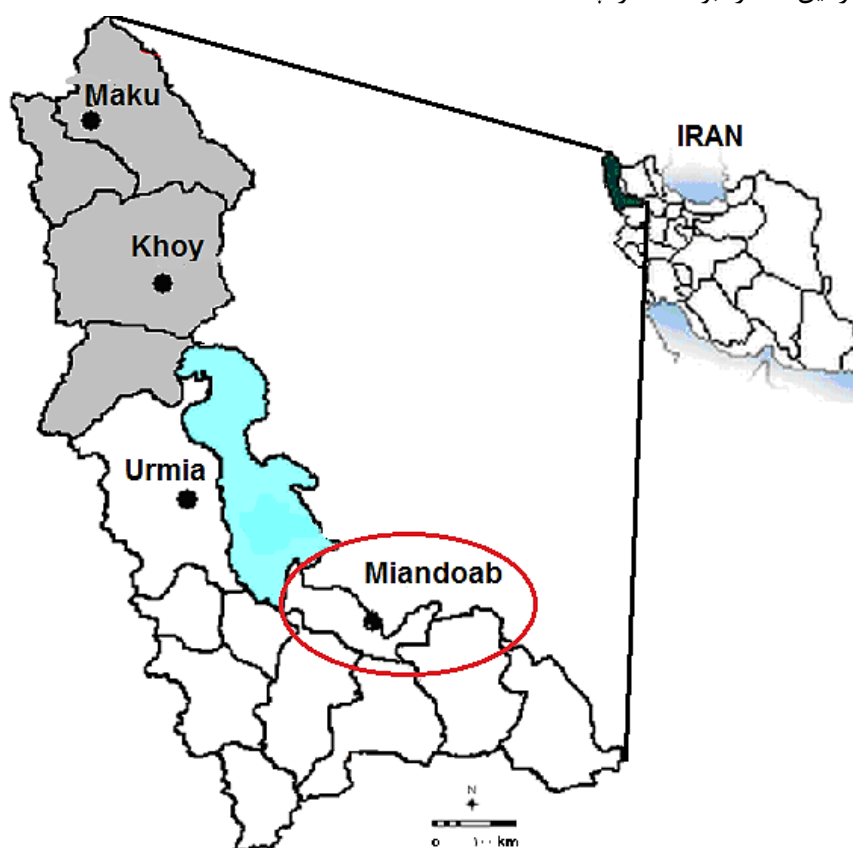
دشت میاندوآب در قسمت جنوبی دریاچه ارومیه و در استان آذربایجان غربی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی دشت مابین مدار ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی است (West Azerbaijan Regional Water Company, 2022). دشت میاندوآب از لحاظ توپوگرافی به صورت یکنواخت و هموار است و تنها تعدادی

می‌تواند تعاملات میان مصرف‌کنندگان آب و منابع زیرزمینی را دقیق‌تر شبیه‌سازی کرده و سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب را در شرایط عدم قطعیت بررسی کند (Cai and Xiong, 2017; Thissen et al., 2017). مطالعه‌ای در هند نشان داد که کشاورزان بر اساس درک ریسک‌های اقلیمی و ویژگی‌های اجتماعی خود، واکنش‌های متفاوتی به سیاست‌های مدیریت منابع آب نشان می‌دهند (Kumar et al., 2025).

با توجه به اهمیت درک رفتار کشاورزان، یکی دیگر از محورهای مهم، بررسی نحوه درک ریسک اقلیمی و تأثیر آن بر تصمیم‌گیری‌های کشاورزی است. مطالعات اخیر نشانگر آن است که دسترسی به اطلاعات، سطح تحصیلات و شبکه‌های اجتماعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در درک ریسک و پذیرش فناوری‌های نوین دارند. مطالعه‌ای در نواحی نیمه‌خشک برزیل نشان داد که کشاورزان با سطح تحصیلات و شبکه‌های اجتماعی قوی‌تر، تمایل بیشتری به پذیرش اقدامات سازگار با تغییرات اقلیمی دارند (Silva et al., 2021). سیاست‌های حمایتی مانند یارانه، آموزش و نظارت، گرچه در کوتاه‌مدت تأثیرات مثبتی دارند، اما بدون توجه به ابعاد اجتماعی و نهادی، اثرهای بلندمدت پایداری ایجاد نمی‌کنند (Mousavian et al., 2020). با وجود این یافته‌ها، پژوهش‌های گذشته هنوز به صورت جامع تعاملات پیچیده میان رفتار کشاورزان، شبکه‌های اجتماعی- نهادی و فشارهای محیطی را تحلیل نکرده و قادر به پیش‌بینی پاسخ سیستم به سیاست‌ها و شوک‌های اقلیمی در سطح محلی نبوده‌اند. این شکاف مطالعاتی نشان می‌دهد که برای طراحی سیاست‌های مؤثر و پایدار، نیاز به مدلی یکپارچه و کمی‌سازی شده است که بتواند ابعاد اجتماعی- نهادی و محیطی را همزمان در نظر گیرد. برای پاسخ به این نیاز، در این پژوهش، مدل عامل‌محور شامل، شش شاخص کلیدی تاب‌آوری اقتصادی، انعطاف‌پذیری فناوری، استحکام شبکه

تپه کوچک در قسمت مرکزی آن قرار گرفته است. در شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی دشت میاندوآب روی نقشه نشان داده شده است. متوسط ارتفاع دشت از سطح دریای آزاد ۱۲۹۲ متر است (West Azerbaijan Regional Water Company, 2022). میزان بارندگی در منطقه از دشت به سمت ارتفاعات افزایش می‌یابد. بر اساس آمار ۳۰ ساله (۱۳۶۷-۱۳۹۶)، میانگین بارندگی سالانه در محدوده مطالعاتی دشت میاندوآب حدود ۲۸۴ میلی‌متر است. همچنین، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر از تشتک به ترتیب برابر با ۷۴۲ و ۱۶۵۰ میلی‌متر در سال گزارش شده است (Ministry of Energy of Iran, 2022). بر اساس آخرین آماربرداری‌ها و بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت میاندوآب، میزان تغذیه سالانه آبخوان حدود ۳۴۳/۲۷ میلیون مترمکعب و میزان تخلیه آن ۳۴۴/۰۷ میلیون مترمکعب است که از این مقدار، برداشت از چاه‌ها ۲۸۰/۷۹

میلیون مترمکعب است (Iran Water Resources Management Company, 2023). بنابراین، آبخوان سالانه با کاهش ذخیره‌ای حدود ۰/۸ میلیون مترمکعب مواجه است. مجموع مصرف آب در محدوده مطالعاتی دشت میاندوآب حدود ۹۹۹/۷۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده که تقریباً ۹۶/۳۷ درصد آن برای مصارف کشاورزی، ۲/۰۲ درصد برای شرب و بقیه برای مصارف صنعتی استفاده می‌شود. حجم آب برگشتی از مصرف‌ها حدود ۲۷۹/۹۲ میلیون مترمکعب در سال تخمین زده می‌شود که بخشی از آن به تغذیه آبخوان آبرفتی کمک می‌کند و بقیه به صورت زهاب به جریان‌های سطحی وارد می‌شود. در نهایت، حجم کل مصرف خالص آب در این محدوده برابر با ۷۱۹/۸ میلیون مترمکعب در سال است (Ministry of Energy of Iran, 2022).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت میاندوآب

Fig. 1- Geographical location of the Miandoab Plain

چارچوب مفهومی

برای سنجش پایایی ابزار از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد که مقدار آن ۰/۸۲ به دست آمد و نشان‌دهنده انسجام درونی و قابلیت اعتماد بالای پرسشنامه بود. داده‌های کیفی به وسیله مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته گردآوری شدند. جامعه هدف این بخش شامل ۲۰ نفر از کشاورزان، کارشناسان جهاد کشاورزی و سازمان آب منطقه‌ای بود. پرسش‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که امکان واکاوی عمیق‌تر ابعاد اجتماعی و نهادی مدیریت منابع آب را فراهم کنند. محورهای اصلی این مصاحبه‌ها شامل، نقش شبکه‌های محلی در فرآیند تصمیم‌گیری آبیاری، تجربه افراد از دوره‌های خشکسالی و چگونگی مواجهه با آن و سطح اعتماد و تعامل بهره‌برداران با نهادهای رسمی و سیاست‌گذاران است. داده‌های حاصل با روش کدگذاری باز و محوری تحلیل و از نرم‌افزار MAXQDA برای سازمان‌دهی و ایجاد شبکه مفهومی استفاده شد. برای تکمیل داده‌های میدانی، اطلاعات ثانویه از منابع معتبر رسمی گردآوری شد. آمار مربوط به قیمت محصولات کشاورزی طی یک دوره ده‌ساله از سازمان جهاد کشاورزی استان دریافت گردید. داده‌های اقلیمی شامل میانگین بارش سالانه و تغییرات دما از پایگاه داده سازمان هواشناسی کشور استخراج شد. اطلاعات مربوط به سطح ایستابی و میزان برداشت از سفره‌های آبی از شرکت آب منطقه‌ای اخذ و برای سنجش فشارهای محیطی و تعریف شاخص‌های مرتبط با پایداری منابع آب مورد استفاده قرار گرفت. جامعه آماری این پژوهش به گونه‌ای انتخاب شد که تنوع بازیگران اصلی در فرآیند مدیریت منابع آب را بازتاب دهد. در مجموع، داده‌ها از ۵۰ کشاورز فعال در منطقه مورد مطالعه، ۱۰ کارشناس جهاد کشاورزی با تجربه مستقیم در آموزش و ترویج فناوری‌های نوین و ۱۰ نماینده سازمان آب منطقه‌ای گردآوری شد. انتخاب مشارکت‌کنندگان با روش

پژوهش حاضر با رویکرد ترکیبی کیفی- کمی و مبتنی بر مدل‌سازی عامل‌محور انجام شد. دلیل اصلی انتخاب این رویکرد، پیچیدگی‌های چندبعدی مدیریت منابع آب در سطح محلی بود. رفتار کشاورزان از یک‌سو به ویژگی‌های فردی و اقتصادی آنان وابسته است و از سوی دیگر تحت تأثیر تعاملات اجتماعی، فشارهای محیطی و نوسانات بازار قرار می‌گیرد. استفاده از ABM امکان بازنمایی تعاملات پویای میان این عوامل و شبیه‌سازی شرایط مختلف در بستر عدم قطعیت‌های اقلیمی و اقتصادی را فراهم ساخت. در مدل حاضر، کشاورزان به عنوان عامل اصلی در کنار شبکه‌های محلی تبادل دانش و بازار محصولات تعریف و قواعد تصمیم‌گیری آنان بر اساس ترکیب انگیزه‌های فردی، فشارهای زیست‌محیطی و مشاهده رفتار همتایان ایجاد شد.

گردآوری داده‌ها

به منظور افزایش دقت و اعتبار یافته‌ها از ترکیب داده‌های کمی، کیفی و ثانویه استفاده گردید. ابتدا، داده‌های کمی از طریق یک پرسشنامه ساختاریافته گردآوری شد. این ابزار شامل ۴۵ پرسش بسته و نیمه‌باز بود که چهار حوزه اصلی را شامل شد:

- ویژگی‌های اقتصادی کشاورزان مانند سطح درآمد سالانه
- هزینه‌های تولید و نوع محصول غالب
- وضعیت فناوریانه شامل نوع سیستم آبیاری موجود و تجربه تغییر فناوری
- انگیزه‌ها و گرایش‌های فردی از جمله میزان ریسک‌پذیری و نگرش نسبت به سیاست‌های حمایتی دولت و رفتار مدیریتی در شرایط کم‌آبی
- نحوه مشارکت در طرح‌های دولتی یا تعاونی.

نمونه‌گیری هدفمند صورت گرفت تا افرادی وارد مطالعه طیفی از سامانه‌های متداول تا نوین مورد استفاده قرار شوند که از نظر مکانی، نوع محصول کشت‌شده و میزان می‌گیرند. این طبقه‌بندی مبنای تعریف شاخص سطح مواجهه با بحران کم‌آبی نماینده طیف وسیعی از شرایط فناوری آبیاری در مدل عامل‌محور قرار گرفت. در جدول (۱)، وضعیت سامانه‌های آبیاری در منطقه مورد مطالعه ارائه شده باشند.

به‌منظور درک وضعیت واقعی فناوری‌های آبیاری در منطقه، داده‌های گردآوری‌شده از کشاورزان نشان داد که است.

جدول ۱- وضعیت سامانه‌های آبیاری در منطقه مورد مطالعه
Table 1- Status of irrigation systems in the study area

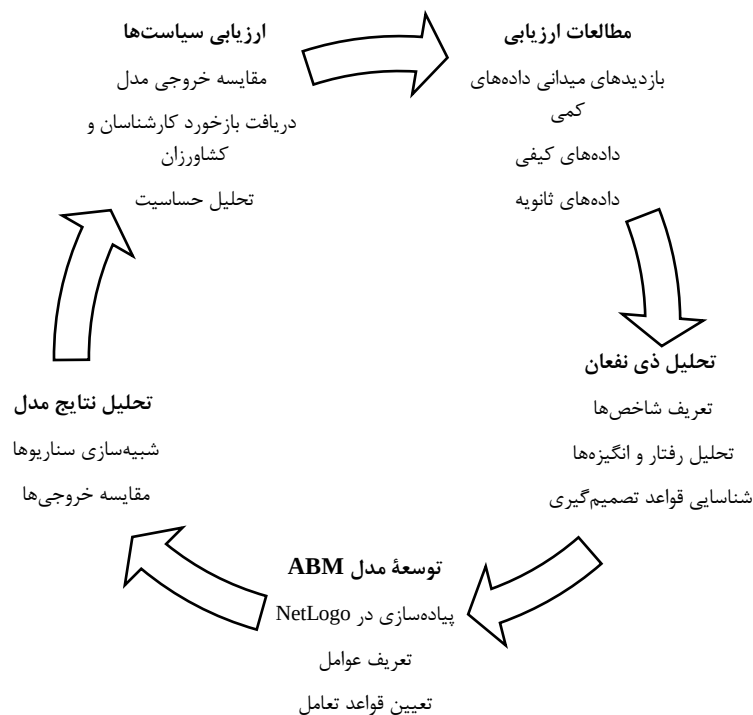
روش آبیاری	مقدار شاخص (irrstatus)
نواری / غرقابی	۱
جویچه‌ای	۲
بارانی	۳
قطره‌ای سطحی	۴
قطره‌ای سطحی (همراه با مدیریت زمان آبیاری)	۵
قطره‌ای زیرسطحی	۶

شاخص‌های مدل

بازتاب‌دهنده قدرت، تراکم و پایداری روابط میان کشاورزان، کارشناسان و سایر بازیگران محلی در تبادل اطلاعات و تجربه است. شاخص انگیزه نوآوری در عمل (MPI) انگیزه‌های فردی بهره‌برداران در جهت تغییر الگوی آبیاری، بهبود بهره‌وری آب و اتخاذ رفتارهای سازگارانه را ارزیابی می‌کند. شاخص فشار محیطی (EPI) شدت اثرهای خشکسالی، کاهش منابع آب زیرزمینی و محدودیت‌های اقلیمی و شاخص سطح فناوری آبیاری (IL) بیانگر مسیر تغییر فناوری و بهبود بهره‌وری سامانه‌های آبیاری است. ساختار مدل عامل‌محور و اجرای شبیه‌سازی، در شکل (۲) ارائه شده است.

بر اساس داده‌های کمی و کیفی گردآوری‌شده، شنش شاخص کلیدی به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل عامل‌محور تعریف شدند. شاخص تاب‌آوری اقتصادی (ERI) توانایی کشاورزان را در مواجهه با نوسانات درآمدی ناشی از تغییرات قیمت محصول، هزینه‌های تولید و کاهش عملکرد زراعی اندازه‌گیری می‌کند. شاخص انعطاف‌پذیری فناوری کشاورزی (FTI) میزان قابلیت تغییر، جایگزینی یا ترکیب فناوری‌های مختلف آبیاری در مزرعه را نشان می‌دهد و به‌عنوان محرکی کلیدی برای پذیرش نوآوری‌ها عمل می‌کند. شاخص استحکام شبکه دانش (KNRI)

بهبود تاب‌آوری کشاورزان در مدیریت مشارکتی منابع آب تحت شرایط کم‌آبی در حوضه دریاچه ارومیه...



شکل ۲- فلوجارت تحقیق توسعه مدل ABM

Fig. 2- Research Flowchart: Development Process of the ABM

به‌منظور تعریف ساختار مدل عامل‌محور، شاخص‌ها و پارامترهای کلیدی شبیه‌سازی در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

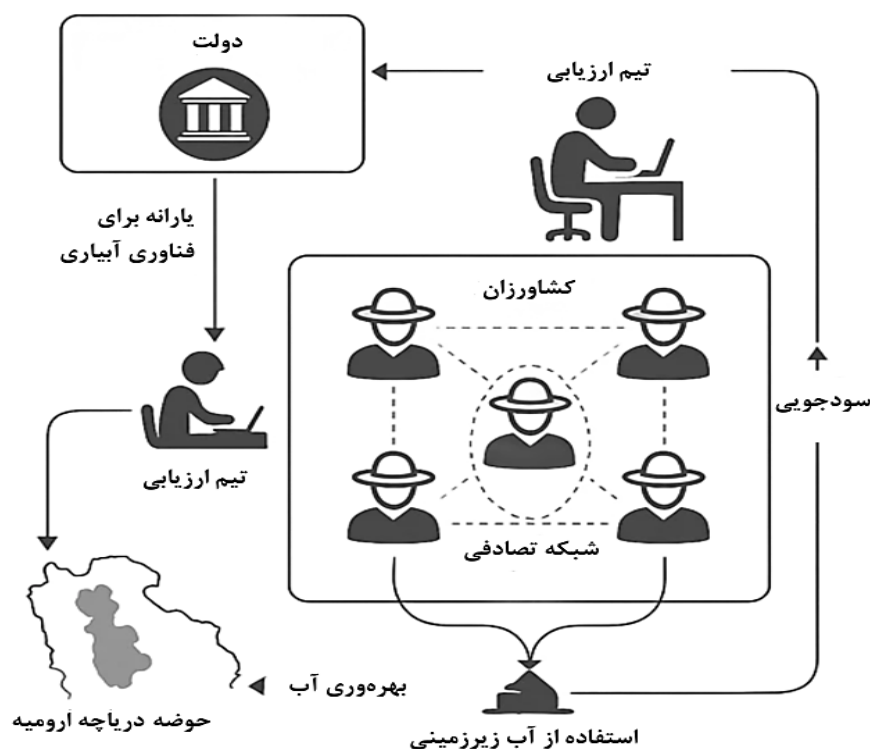
جدول ۲- پارامترهای مدل عامل‌محور
Table 2- Agent-based model parameters

پارامتر	توصیف	بازه	نقش در مدل
ERI	ترکیب درآمد سالانه، هزینه تولید و نوسانات قیمت محصول	متغیر پیوسته (بر اساس داده‌های پرسشنامه و آمار ثانویه)	ارزیابی توانایی کشاورزان در مواجهه با نوسانات درآمدی ناشی از تغییرات قیمت، هزینه تولید و کاهش عملکرد زراعی
FTI	انعطاف‌پذیری فناوری کشاورزی به‌عنوان محرک پذیرش نوآوری	0-1	ارزیابی قابلیت تغییر، جایگزینی یا ترکیب فناوری‌های مختلف آبیاری
KNRI	میزان استحکام شبکه دانش میان کشاورزان، کارشناسان و سایر بازیگران محلی	0-1	بیانگر قدرت، تراکم و پایداری روابط اجتماعی و نهادی در تبادل اطلاعات
MPI	نگرش فردی نسبت به نوآوری، سیاست‌های حمایتی و ریسک‌پذیری	0-1	ارزیابی انگیزه‌های فردی برای تغییر الگوی آبیاری و پذیرش نوآوری
EPI	شدت اثرهای خشکسالی، کاهش منابع آب زیرزمینی و محدودیت‌های اقلیمی	(کمبود شدید $<3000 \text{ m}^3/\text{year}$) متوسط $2000-3000 \text{ m}^3/\text{year}$ مطلوب $>2000 \text{ m}^3/\text{year}$	نشان‌دهنده فشارهای اقلیمی و محیطی بر بهره‌برداران
IL	میزان نوآوری در سامانه‌های آبیاری (سنتی تا پیشرفته)	1-6	بیانگر مسیر تغییر فناوری و بهبود بهره‌وری آب

ساختار مدل ABM

کمبود منابع آبی و تداوم خشکسالی بروز می‌کند و مشاهدات اجتماعی که شامل تأثیرپذیری از رفتار و تجربیات سایر کشاورزان است. تعاملات میان این عوامل عمدتاً از طریق دو سازوکار تبادل و انتشار دانش در شبکه‌های اجتماعی غیررسمی و اثرگذاری شرایط بازار بر سطح درآمد و به تبع آن بر تمایل به تغییر الگوی مدیریتی، نشان داده شدند شکل (۳).

در مدل طراحی شده، کشاورزان به عنوان عوامل اصلی در نظر گرفته شدند که تصمیمات آنها در تعامل مستمر با دو بازیگر مکمل یعنی شبکه‌های محلی تبادل دانش و بازار محصولات شکل می‌گیرد. قواعد تصمیم‌گیری مبتنی بر سه بعد اصلی، انگیزه‌های فردی که بر تمایل به پذیرش یا اجتناب از نوآوری اثر می‌گذارد، فشارهای محیطی که به صورت



شکل ۳- شماتیک مدل عامل محور برای مدیریت آبیاری در حوضه دریاچه ارومیه

Fig. 3- An Agent-based Model for Irrigation Management in the Lake Urmia basin

به منظور بررسی پایداری سیستم و ارزیابی واکنش کشاورزان به شرایط متغیر، چهار گروه سناریو طراحی و در محیط NetLogo شبیه‌سازی شدند. سناریوی اول بر نوسانات قیمت محصولات کشاورزی تمرکز داشت که در بازه $\pm 30\%$ درصد اعمال گردید تا اثرپذیری تصمیمات اقتصادی از بازار مشخص شود. سناریوی دوم به معرفی فناوری‌های نوین آبیاری با مقدارهای متفاوت انتشار پرداخته و چگونگی سرعت پذیرش و گسترش فناوری را بررسی می‌کند. سناریوی سوم تغییر در تراکم شبکه دانش را در دو حالت

متراکم و پراکنده شبیه‌سازی می‌کند تا اثر قدرت یا ضعف ارتباطات اجتماعی بر پایداری رفتارها بررسی شود. سناریوی چهارم وقوع شوک‌های اقلیمی، به ویژه خشکسالی‌های متوالی را شبیه‌سازی می‌کند تا سازوکارهای سازگاری در شرایط بحرانی تحلیل شود. تحلیل داده‌ها با رویکردی ترکیبی انجام گرفت. در بخش کمی، داده‌های پرسشنامه با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد پردازش قرار گرفته و روابط میان شاخص‌های اصلی از طریق آزمون‌های آماری توصیفی و استنباطی تحلیل شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل

شبهه‌سازی شده با واقعیت‌های آماری سال‌های اخیر انطباق بالایی دارد. این انطباق اطمینان بیشتری نسبت به قابلیت اتکای مدل در پاسخ رفتار واقعی کشاورزان ایجاد می‌کند. نتایج شبهه‌سازی مدل عامل‌محور بومی‌سازی شده برای حوضه بحرانی دریاچه ارومیه نشان داد که سناریوی نوسانات قیمت محصولات کشاورزی با دامنه $\pm 30\%$ تأثیر قابل توجهی بر رفتار کشاورزان دارد. کشاورزانی که شاخص تاب‌آوری اقتصادی بالایی دارند، کمتر تحت تأثیر کاهش درآمد قرار گرفته و سریع‌تر توانستند الگوی آبیاری خود را با شرایط جدید تطبیق دهند. همچنین کشاورزان با منابع مالی مناسب، دسترسی بهتر به اطلاعات و شبکه‌های اجتماعی قوی‌تر، قادر بودند به سرعت به تغییرات بازار واکنش نشان داده و فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های آبیاری نوین را در مزرعه خود پیاده کنند که منجر به افزایش بهره‌وری آب شد. در مقابل، کشاورزان با ERI پایین، به دلیل محدودیت‌های مالی و اطلاعاتی و شبکه‌های اجتماعی ضعیف، در مواجهه با کاهش قیمت محصول، به‌طور موقت روش‌های سنتی را استفاده کردند که منجر به کاهش و بهره‌وری آب شد شکل (۴).

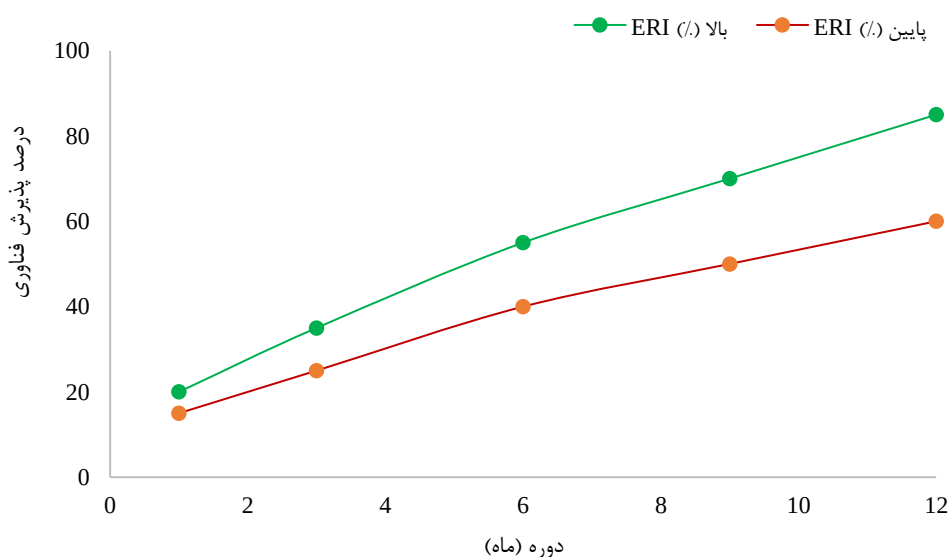
عامل‌محور شامل میزان پذیرش فناوری‌های نوین، تغییر در الگوی مصرف آب، نوسانات درآمدی و سطح کلی تاب‌آوری سیستم بود که در شرایط سناریویی مختلف استخراج و مقایسه شدند.

برای افزایش دقت و اطمینان از اعتبار نتایج، فرآیند اعتبارسنجی مدل در سه مرحله انجام شد. ابتدا، خروجی‌های شبهه‌سازی با داده‌های واقعی تاریخی مربوط به مصرف آب و تغییرات قیمت محصولات مقایسه گردید تا میزان انطباق مدل با واقعیت سنجیده شود. سپس، مدل توسط گروهی از خبرگان دانشگاهی و کارشناسان محلی در حوزه آب و کشاورزی ارزیابی و بازخورد آنها در بهبود ساختار مدل لحاظ شد. در نهایت، تحلیل حساسیت نسبت به تغییر پارامترهای کلیدی به‌ویژه شاخص فشار محیطی و استحکام شبکه دانش صورت گرفت تا پایداری نتایج و حساسیت سیستم به تغییر مقادیر ورودی بررسی شود.

نتایج و بحث

اثر سناریوهای اقتصادی بر پذیرش فناوری‌های نوین

مقایسه خروجی‌های مدل با داده‌های تاریخی مصرف آب و تغییرات قیمت محصولات نشان داد که روندهای



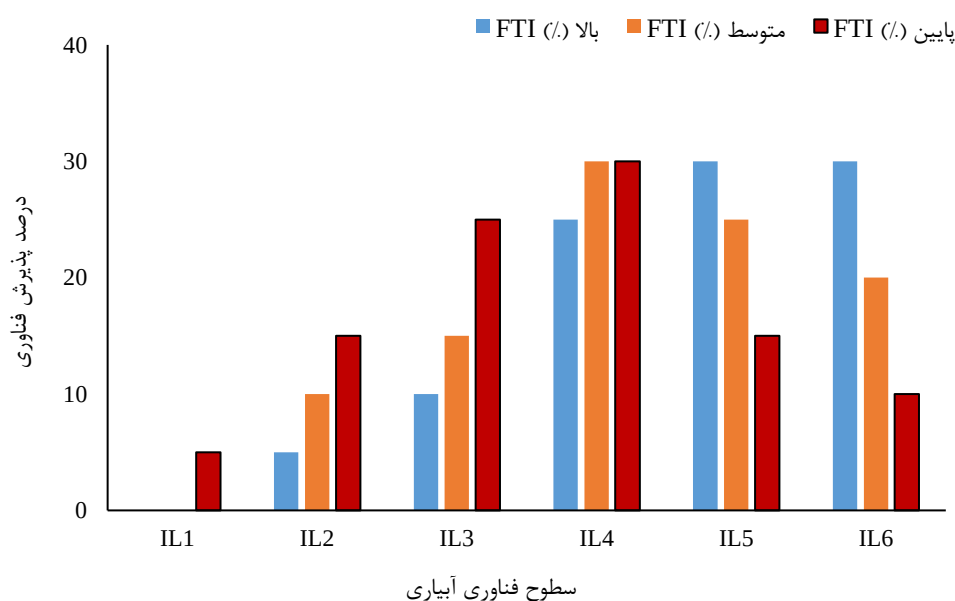
شکل ۴- اثر شاخص تاب‌آوری اقتصادی بر پذیرش فناوری‌های نوین

Fig. 4- The effect of the economic resilience index on the adoption of novel technologies

اثر نوآوری بر پذیرش فناوری‌های نوین

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شاخص انعطاف‌پذیری فناوری یکی از مهم‌ترین محرک‌های پذیرش فناوری‌های نوین در بین کشاورزان عمل می‌کند. کشاورزانی که FTI بالایی دارند، توانایی بیشتری در تغییر یا جایگزینی فناوری‌های آبیاری خود با سیستم‌های نوین (سطوح IL4 تا IL6) داشته و در نتیجه بهره‌وری آب آن‌ها به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. کشاورزان با FTI متوسط، به مرور زمان سیستم‌های نوین را پذیرفته و بهره‌وری آب را افزایش دادند، اما سرعت و میزان پذیرش فناوری در آن‌ها کمتر از گروه FTI بالا بود. در مقابل، کشاورزان با FTI پایین به دلیل محدودیت‌های فنی و مهارتی در به‌کارگیری فناوری‌های نوین، به استفاده از روش‌های آبیاری سنتی ادامه دادند، از این رو، بهره‌وری آب در این گروه افزایش نیافت (شکل ۵). مطالعه‌ای در هند نشان داد که انعطاف‌پذیری فناوری و مهارت‌های فنی کشاورزان به طور مستقیم بر سرعت پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری و بهبود بهره‌وری آب اثرگذار است. (Thakur and Uphoff, 2017)

مطالعه‌ای در چین نشان داد کشاورزانی که از فناوری‌های هوشمند در کشاورزی استفاده می‌کنند، تاب‌آوری اقتصادی بالاتری دارند و می‌توانند بهتر با نوسانات بازار و تغییرات اقلیمی سازگار شوند (Chang et al., 2024). دسترسی کشاورزان به اطلاعات به‌روز و شبکه‌های اجتماعی قوی‌تر در زیمبابوه، توانایی آن‌ها را برای مقابله با شوک‌های اقلیمی افزایش و بهره‌وری منابع آب را بهبود داد (Nkonya et al., 2023). علاوه بر این، بازخورد خبرگان دانشگاهی و کارشناسان محلی (در مرحله اعتبارسنجی)، موجب توصیف دقیق شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی و انگیزه نوآوری شد که منجر به نتایج معتبر برای شرایط واقعی حوضه آرومیه گردید. برای بهبود تاب‌آوری اقتصادی و افزایش پذیرش فناوری‌های نوین، سیاست‌های دولت می‌توانند شامل ارائه آموزش‌های فنی و مدیریتی، دسترسی به منابع مالی مناسب برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، تقویت شبکه‌های اجتماعی بین کشاورزان و سرمایه‌گذاری در توسعه برای معرفی فناوری‌های نوین باشد.



شکل ۵- اثر نوآوری بر پذیرش فناوری‌های نوین

Fig. 5- The effect of innovation on the adoption of new technologies

تجربیات هم‌تایان خود را به سرعت دریافت کنند و از روش‌های بهینه آبیاری و مدیریت منابع آب پیروی نمایند. در مقابل، کشاورزان عضو شبکه‌های پراکنده، با محدودیت در دسترسی به اطلاعات و مشاوره‌های تخصصی، سرعت پایین‌تری در اتخاذ تصمیم‌های بهینه داشتند و بهره‌وری آب آن‌ها نسبت به شبکه‌های متراکم کمتر بود.

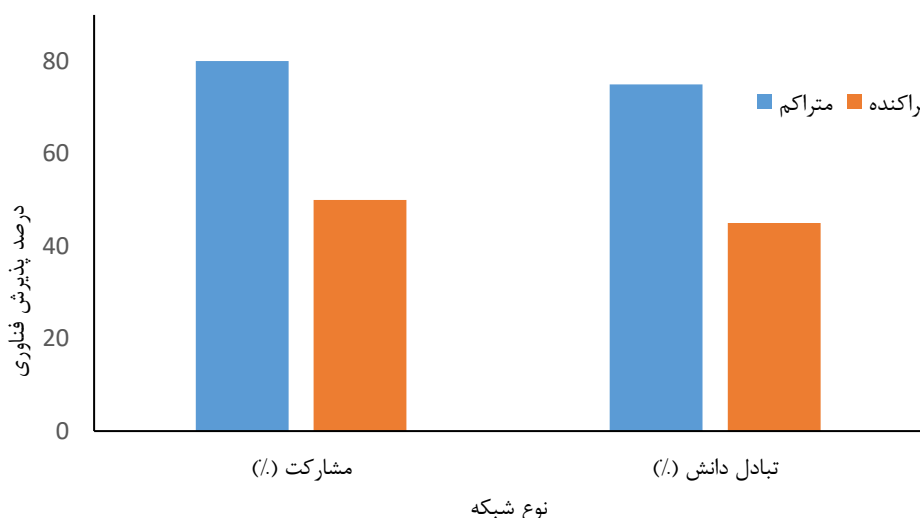
اثر فشارهای محیطی بر تغییر الگوی آبیاری کشاورزان

نتایج نشان داد شاخص فشار محیطی محرکی قدرتمند، در سرعت و میزان تغییر الگوی آبیاری کشاورزان نقش دارد. سناریوی خشکسالی‌های شدید و کمبود منابع آب نشان داد کشاورزانی که در معرض فشارهای محیطی شدید قرار داشتند، با انگیزه نوآوری بالا، سریع‌تر از سامانه‌های نوین آبیاری استفاده کردند. کشاورزانی با شاخص MPI متوسط، با وجود قرار گرفتن تحت فشارهای محیطی، سرعت تغییر الگوی آبیاری کمتری از گروه با MPI بالا داشتند. کشاورزان با MPI پایین، در شرایط کمبود شدید آب، تمایل محدودی به سیستم‌های نوین نشان دادند و الگوهای سنتی خود را حفظ کردند (شکل ۷). نتایج تأکید می‌کنند که ترکیب فشار محیطی و انگیزه فردی تأثیر هم‌افزایی بر پذیرش فناوری و مدیریت منابع آب دارد.

کشاورزانی که توانایی تغییر و تطبیق فناوری‌های آبیاری خود را دارند، بهتر می‌توانند با فشارهای محیطی و نوسانات بازار مقابله کنند و تولید و بهره‌وری منابع آبی را افزایش دهند (Oiganji et al., 2025). ایجاد ظرفیت‌های فنی و افزایش انعطاف‌پذیری فناوری در میان کشاورزان، یکی از راهکارهای کلیدی برای افزایش پذیرش فناوری‌های نوین و مدیریت بهینه منابع آب است. این یافته‌ها تأکید می‌کند که برنامه‌های آموزشی، دسترسی به تجهیزات پیشرفته و حمایت‌های فنی می‌تواند نقش مهمی در بالا بردن تاب‌آوری کشاورزان و بهره‌وری آب داشته باشد.

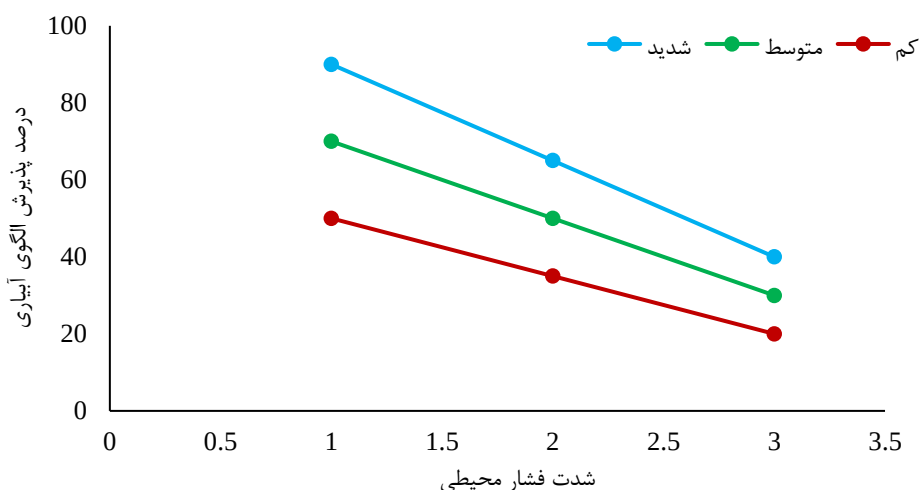
اثر شبکه‌های اجتماعی و دانش محلی بر پذیرش فناوری

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شاخص استحکام شبکه دانش تأثیر قابل توجهی بر توانایی کشاورزان در یادگیری و اتخاذ تصمیم‌های بهینه دارد. شبکه‌های اجتماعی متراکم، روابط مستحکم بین کشاورزان، کارشناسان محلی و نهادهای دولتی، ظرفیت یادگیری جمعی و تبادل تجربیات موفق را افزایش داده و بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد (شکل ۶). کشاورزانی که عضو شبکه‌های متراکم بودند، علاوه بر افزایش بهره‌وری آب، مشارکت بیشتری در پروژه‌های دولتی و طرح‌های مدیریت منابع آب نشان دادند. این گروه توانستند



شکل ۶- اثر شبکه‌های اجتماعی و دانش محلی بر پذیرش فناوری‌های نوین

Fig. 6- The effect of social networks and local knowledge



شکل ۷- رابطه شاخص فشار محیطی با سرعت و میزان تغییر الگوی آبیاری

Fig. 7- Relationship between environmental pressure index and speed and rate of change in irrigation pattern

نمی‌تواند تصویر کاملی از سیستم ارائه دهد. نتایج مدل ABM نشان داد که مشخص کرد که استفاده توأم از شاخص انگیزه نوآوری در عمل و استحکام شبکه دانش، بیشترین اثر را بر سرعت پذیرش فناوری‌های نوین دارد. کشاورزان بالاترین انگیزه نوآوری و شبکه‌های اجتماعی و نهادی متراکم، سریع‌تر سیستم‌های پیشرفته آبیاری را پذیرفتند و بهره‌وری آب در مزارع آن‌ها افزایش یافت. نتایج حاصل با دستاوردهای Shiferaw و همکاران (۲۰۰۹) که نشان داد که همزمانی انگیزه فردی و تعاملات اجتماعی در گروه‌های کشاورزی موجب تسریع پذیرش نوآوری‌ها و بهبود عملکرد بهره‌برداری از منابع طبیعی می‌شود، هم‌خوانی دارد.

ترکیب شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی صفر و فشار زیست‌محیطی بالا، فشار بالایی را به کشاورزان وارد می‌کند. این کشاورزان نیازمند پشتیبانی و حمایت هدفمند برای سازگاری با فناوری‌های جدید در مواجهه با خشکسالی و کاهش درآمد می‌باشند جدول (۳). Reidsma و همکاران (۲۰۱۵) نتیجه گرفتند که فشارهای اقتصادی و محیطی به‌عنوان بزرگترین موانع پذیرش فناوری‌های نوین در بخش کشاورزی هستند که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. تحلیل حساسیت مدل هم‌چنین نشان داد که شاخص

خشکسالی‌های متوالی در آلمان، نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر رفتار کشاورزان و پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری به ویژه زمانی که انگیزه و دانش فردی بالا است، دارند (Nhemachena and (Nordmeyer and Mußhoff, 2023) Hassan (2007) نتیجه گرفتند که فشارهای محیطی در آفریقای جنوبی، از جمله کاهش دسترسی به آب و تغییرات اقلیمی، به‌عنوان محرکی مهم برای اتخاذ استراتژی‌های سازگاری و نوآوری‌های کشاورزی عمل می‌کنند. یافته‌های پژوهش حاضر بر اهمیت طراحی سیاست‌های حمایتی و آموزشی تأکید دارد، به نحوی که کشاورزان تحت فشار محیطی، به ویژه کسانی که انگیزه نوآوری متوسط یا پایین دارند، بتوانند با بهره‌گیری از آموزش و پشتیبانی فنی، سریع‌تر به سیستم‌های نوین آبیاری روی آورند و تاب‌آوری کل سیستم آبیاری را افزایش دهند.

تحلیل ترکیبی شاخص‌ها

تحلیل ترکیبی شاخص‌ها در مدل بومی توسعه داده شده در پژوهش حاضر نشان داد که تأثیرات مختلف اقتصادی، فردی، فناورانه، اجتماعی و محیطی، به‌صورت هم‌افزا در رفتار کشاورزان و سرعت پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری عمل می‌کنند. بررسی هریک از شاخص‌ها به‌صورت جداگانه

شبکه‌های اجتماعی و تاب‌آوری اقتصادی از عوامل مؤثر بر پایداری سیستم و کشاورزان در مواجهه با نوسانات محیطی می‌باشند. در مطالعه‌ای مشابه، Ren و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که شبکه‌های اجتماعی و ظرفیت اقتصادی کشاورزان به عنوان عوامل اصلی تاب‌آوری و ظرفیت سازگاری

سیستم‌های کشاورزی هستند که با یافته‌های پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. پایداری سیستم‌های کشاورزی نتیجه درک جامع از ارتباطات بین سیستم‌های اجتماعی- اقتصادی و محیطی است (Hariram et al., 2023).

جدول ۳- اثر ترکیبی شاخص‌ها بر سرعت پذیرش فناوری و پایداری سیستم

Table 3- The combined effect of indicators on the speed of technology adoption and system sustainability			
ترکیب شاخص‌ها	اثر بر سرعت پذیرش فناوری	اثر بر پایداری سیستم	حمایت سیاستی
MPI بالا + KNRI بالا	بسیار زیاد	بالا	کم
MPI متوسط + KNRI بالا	متوسط	متوسط	متوسط
MPI پایین + KNRI پایین	کم	پایین	زیاد
ERI پایین + EPI بالا	کم	پایین	بسیار زیاد

پیامدهای سیاست‌گذاری و مدیریتی ناشی از مدل بومی

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی عامل‌محور در این پژوهش، چندین شاخص نهادی، مدیریتی و اجتماعی به عنوان عوامل کلیدی و معنادار در شکل‌گیری رفتار کشاورزان شناسایی شدند. این شاخص‌ها به طور مستقیم بر تمایل به مشارکت در فناوری‌های نوین آبیاری، افزایش بهره‌وری آب و تخصیص اثربخش یارانه‌ها اثرگذار بودند. نتایج مدل‌سازی نشان دادند که عواملی مانند تأمین آب پایدار، نظارت و آموزش دولت و سیاست‌های هدفمند یارانه‌ای، بیشترین سهم را در افزایش مشارکت و بهبود عملکرد کشاورزی دارند. در مقابل، مداخلات صرفاً فنی بدون حمایت نهادی مناسب، به ویژه در غیاب برنامه‌های نظارتی و آموزشی مؤثر، اثربخشی محدودی دارند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب باید از رویکردهای صرفاً تکنیکی فراتر رفته و ابعاد اجتماعی- نهادی را به طور کامل در بر گیرد.

تجارب بین‌المللی نشان داده‌اند که بهره‌گیری از ابزارهایی همچون مدارس مزرعه‌ای کشاورزان (Farmer Field Schools)، طراحی یارانه‌های هوشمند، تقویت نهادهای

محلی مشارکتی و شفاف‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری می‌تواند به پذیرش بهتر فناوری‌ها و افزایش بهره‌وری کمک کند (Rusike et al., 2005; Reichelt and Nettle; Das et al., 2022). برای نمونه، در زیمبابوه و پاکستان، مدارس مزرعه‌ای منجر به افزایش دانش و پذیرش فناوری‌های مدیریت آب در مناطق خشک شده‌اند (Rusike et al., 2005; Dahwa et al., 2023). همچنین در چین، آموزش‌های فنی به طور معناداری میزان پذیرش فناوری‌های آبیاری کم‌مصرف را افزایش داده‌اند (Li et al., 2022; Shi et al., 2024). این تجربه‌ها نشان می‌دهند که سرمایه‌گذاری در آموزش و ترویج، به ویژه با مشارکت مستقیم کشاورزان، نه تنها دانش فنی را افزایش می‌دهد، بلکه سطح اعتماد اجتماعی و مشارکت داوطلبانه را نیز بهبود می‌دهد (Kiptot and Franzel, 2014; Prajapati et al., 2025).

در همین راستا، بازنگری در نظام یارانه‌ای ضروری است. حذف یارانه‌های غیرهدفمند و تخصیص آن به تجهیزاتی مانند آبیاری قطره‌ای هوشمند یا حمایت از کشت محصولات کم‌آب‌بر می‌تواند ساختار انگیزشی بهتری در سطح مزرعه ایجاد کند (Fang, 2023; Alawode, 2025). تجربه هند در

شبیه‌سازی نشان دادند که این ابعاد می‌توانند مسیر موفقیت یا شکست سیاست‌ها را به‌طور معناداری تغییر دهند. در عین حال، پیشنهادهایی مانند آموزش هدفمند، پرداخت مشروط یارانه، و نقش شبکه‌های محلی ممکن است به‌صورت مفهومی شناخته‌شده باشند، اما پژوهش حاضر اثربخشی این سیاست‌ها را به‌صورت کمی و مبتنی بر شبیه‌سازی عامل‌محور ارزیابی کرده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که سیاست‌هایی مانند آموزش بدون نظارت یا یارانه‌های غیرمشروط می‌توانند حتی اثر معکوس داشته باشند. این یافته، اگرچه از حیث مضمون ممکن است بدیهی به نظر برسد، اما ارائه آن در قالب یک چارچوب دینامیک و رفتارپایه، از نوآوری‌های اصلی پژوهش به شمار می‌رود.

افزون بر این، پژوهش حاضر به بررسی عوامل کمتر پرداخته شده‌ای مانند ترکیب ویژگی‌های اجتماعی افراد آغازگر شبکه، تأثیر ساختار جمعیت اولیه، و نقش شبکه‌های تعاملی در پذیرش سیاست‌ها پرداخته است. این ابعاد، که در سیاست‌گذاری منابع آب در ایران عمدتاً مغفول مانده‌اند، در قالب مدل‌سازی عامل‌محور به‌صورت کمی و شبیه‌سازی شده تحلیل شده‌اند. در نهایت، کاربرد مدل‌های عامل‌محور بومی شده در طراحی و ارزیابی سیاست‌های منابع آب، به‌ویژه در مناطق بحران‌زده‌ای مانند حوضه دریاچه ارومیه، امکان شبیه‌سازی رفتار ذینفعان، آزمون سیاست‌ها قبل از اجرا و کاهش هزینه‌های تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند. بر اساس یافته‌های این پژوهش و اهمیت ابعاد نهادی، اجتماعی و مدیریتی در موفقیت سیاست‌های آبیاری نوین، نقشه راهی عملیاتی برای مدیریت مشارکتی منابع آب کشاورزی پیشنهاد می‌شود که شامل چند بخش کلیدی است.

ابتدا باید هدف کلان تعیین شود. این هدف عبارت است از بالا بردن بهره‌وری منابع آب و مشارکت کشاورزان در فناوری‌های نوین آبیاری از طریق اصلاح نظام یارانه‌ها و تقویت نهادهای محلی. در گام‌های اجرایی، توسعه برنامه‌های آموزشی مبتنی بر مدرسه مزرعه‌ای با مشارکت فعال

اصلاح یارانه‌های انرژی و ایالات متحده در سرمایه‌گذاری در سامانه‌های نوین آبیاری نشان داده‌اند که چنین سیاست‌هایی می‌توانند منجر به صرفه‌جویی چشم‌گیر در مصرف آب شوند و هم‌زمان، بهره‌وری را نیز افزایش دهند. همچنین، شکل‌گیری نهادهای محلی همچون انجمن‌های آب یا کمیته‌های محلی مدیریت آبیاری که در چین، پاکستان و کشورهای اروپایی موفق بوده‌اند، می‌تواند در هماهنگی، کنترل مصرف و توزیع عادلانه منابع آب نقش‌آفرین باشد (Cremers *et al.*, 2005; Franzén *et al.*, 2015; Chai and Schoon, 2016; Nagrah *et al.*, 2016; Gany *et al.*, 2019). این نهادها با بهره‌گیری از مدل‌های تخصیص مبتنی بر ABM، مانند اولویت‌دهی به مزارع کم‌آب‌بر یا تخصیص دینامیک براساس عملکرد سابق، می‌توانند کارایی و عدالت را در کنار هم تأمین کنند. اعتماد اجتماعی نیز به‌عنوان یک زیرساخت نرم، نقشی اساسی در موفقیت سیاست‌های مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. نتایج پژوهش نشان داد که شاخص‌های اعتماد نهادی و ارتباط دوسویه با کشاورزان، تأثیر مستقیمی بر پذیرش فناوری دارند (Slavova and Karanasios, 2018; Chen *et al.*, 2024).

هرچند مفاهیمی مانند آموزش هدفمند، یارانه مشروط یا نقش شبکه‌های محلی در سیاست‌گذاری آب شناخته‌شده‌اند، اما نوآوری این پژوهش در آن است که اثربخشی این سیاست‌ها را به‌طور کمی و در قالب مدل‌سازی عامل‌محور بررسی کرده است. نتایج نشان دادند که برخی سیاست‌ها در صورت اجرا به‌صورت ناقص، مانند آموزش بدون نظارت یا یارانه‌های غیرمشروط، می‌توانند حتی اثر معکوس داشته باشند. این یافته اهمیت طراحی بسته‌های سیاستی چندبعدی و مکمل را برجسته می‌سازد. از دیگر نوآوری‌های پژوهش، بررسی عواملی است که کمتر در سیاست‌گذاری‌های منابع آب ایران مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله، نقش ترکیب ویژگی‌های اجتماعی افراد آغازگر شبکه‌های محلی، ساختار جمعیت اولیه کشاورزان، و تعاملات شبکه‌ای در سرعت و پایداری پذیرش فناوری‌ها. تحلیل‌های

کشاورزان، هدفمند کردن یارانه‌ها به ویژه برای فناوری‌های کم‌مصرف مانند آبیاری قطره‌ای هوشمند، تشکیل و پشتیبانی از انجمن‌های کاربران آب و کمیته‌های محلی مدیریت منابع آب، افزایش شفافیت از طریق انتشار داده‌های تخصیص آب و برگزاری جلسات مشارکتی برای تقویت اعتماد اجتماعی و در نهایت استفاده از مدل‌های عامل‌محور برای پیش‌بینی اثر سیاست‌ها و بهینه‌سازی تخصیص منابع از جمله اقدامات اساسی هستند. این اقدامات باید با تعیین بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت و مشخص کردن نهادهای مسئول اجرا و نظارت همراه باشند تا اثربخشی آن‌ها تضمین شود. همچنین تأمین منابع مالی،

انسانی و فناوری لازم و بهره‌گیری از تجربیات بین‌المللی نقش مهمی در موفقیت این چارچوب ایفا می‌کند. اجرای این رویکرد جامع می‌تواند ضمن تحقق هدف‌های پایداری، عدالت و مشارکت اجتماعی در مدیریت منابع آب کشاورزی، سیاست‌گذاران را در تدوین برنامه‌های عملیاتی یاری دهد و مسیر را برای مدیریت بهینه و مشارکتی منابع آب هموار سازد.

برای عملیاتی‌سازی این یافته‌ها، مجموعه‌ای از پیشنهاد‌های سیاستی استخراج شده که در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

جدول ۴- پیشنهاد‌های سیاستی مبتنی بر یافته‌های تجربی پژوهش

Table 4- Policy suggestions based on empirical research findings

ایجاد و تقویت واحدهای ترویج محلی، طراحی دوره‌های آموزشی هدفمند، و استقرار سیستم‌های نظارت مستمر بر نحوه استفاده از فناوری‌های آبیاری در مزرعه	آموزش و نظارت بالاترین اثر را بر تمایل و رفتار کشاورزان دارد.
توسعه زیرساخت‌های انتقال و ذخیره‌سازی آب، بازچرخانی منابع، و اعلام شفاف منابع قابل تأمین برای برنامه‌ریزی بهتر کشاورزان	تأمین آب پایدار مهم‌ترین عامل انگیزشی برای مشارکت کشاورزان است.
طراحی سازوکارهای پرداخت مشروط به نتایج (مانند عملکرد مصرف یا صرفه‌جویی آب)، پیوند یارانه با تعهد کشاورزان به استانداردهای مصرف و گزارش‌دهی	یارانه‌های بدون نظارت اثربخشی محدودی دارند و ممکن است منجر به سوءاستفاده شوند.
حمایت از ایجاد و تقویت تشکلهای کشاورزی محلی (مانند انجمن‌های آبیاری)، استفاده از رهبران محلی به‌عنوان واسطه در اجرای سیاست‌ها و آموزش	تعاملات شبکه‌ای و اعتماد نهادی، عامل تقویت‌کننده صداقت و مشارکت کشاورزان هستند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی کیفی-کمی و طراحی یک مدل عامل‌محور مبتنی بر داده‌های میدانی، نهادی و اجتماعی، تصویری واقع‌بینانه‌ای از رفتار کشاورزان در مدیریت منابع آب در حوضه بحرانی دریاچه ارومیه ارائه داد. نتایج نشان دادند که پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری توسط کشاورزان و مدیریت پایدار منابع آب، تنها نتیجه ویژگی‌های فردی کشاورزان نیست، بلکه نتیجه تعامل پیچیده‌ای از عوامل اقتصادی-اجتماعی، نهادی و محیطی است. شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی و سرمایه اجتماعی نقش کلیدی در شکل‌گیری رفتار مشارکتی و پایداری

بلندمدت ایفا کردند. کشاورزانی که از توان مالی مناسب و شبکه‌های اجتماعی قوی برخوردار بودند، فناوری‌های نوین آبیاری را بهتر پذیرفتند و پاسخ‌های تطبیقی و پایدار در برابر فشارهای محیطی ارائه دادند. در مقابل، در وضعیتی که سطح تاب‌آوری اقتصادی پایین و فشار محیطی بالا باشد، حتی ارائه سیاست‌های حمایتی مالی نیز اثرگذاری محدودی داشته و تغییرات رفتاری عمدتاً موقت بودند. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد که ترکیب سیاست‌های یارانه هدفمند و برنامه‌های آموزشی و نظارتی، دارای اثر افزایشی است که فراتر از مجموع اثر هر سیاست به‌صورت مستقل است. سیاست‌های تک‌بعدی به‌تنهایی کارایی محدودی دارند و تنها

با طراحی بسته‌های سیاستی یکپارچه می‌توان پایداری و اثربخشی را تضمین کرد. علاوه بر این، سرمایه اجتماعی و توانایی درک ریسک‌های تغییرات اقلیمی می‌تواند به صورت تقویت‌کننده‌های تغییر رفتار عمل کنند، به نحوی که در جوامع با سرمایه اجتماعی بالا، پاسخ به شوک‌های اقلیمی سریع‌تر و پایدارتر بود. این در حالی است که در جوامع با سرمایه اجتماعی پایین، حتی با وجود سیاست‌های حمایتی، تغییر رفتار ناپایدار مشاهده شد. این امر دلیلی برای شناخت عوامل شناختی و اجتماعی است که باید در مدیریت منابع آب لحاظ شوند. از طرف دیگر، تأمین آب پایدار یک متغیر کلیدی در مدل شناسایی شد که می‌تواند مسیر تغییر رفتار کشاورزان را مشخص نماید. در مجموع، پژوهش حاضر نشان داد که موفقیت سیاست مدیریت منابع آب تنها به ابزارهای اقتصادی و فنی وابسته نیست، بلکه به طور قابل توجهی تابع عوامل نهادی، اجتماعی و رفتاری نیز است. مدل‌های عامل محور می‌توانند مشابه یک ابزار آزمایشگاهی برای برآورد هزینه‌های سیاست‌ها و تصمیم‌گیری به صورت پیشین عمل کنند و طراحی سیاست‌های چند سطحی یکپارچه و پایدار

را بهبود بخشند. با وجود دستاوردهای قابل توجه، محدودیت‌هایی مانند ساده‌سازی برخی روابط اجتماعی و فقدان داده در برخی بخش‌ها وجود داشت که می‌تواند در مطالعات آتی با استفاده از داده‌های رفتاری دقیق‌تر و اعتبارسنجی بین‌منطقه‌ای حل شود. هم‌چنین چارچوب بومی پیشنهادی مبتنی بر مدل عامل‌محور می‌تواند نقشه راهی برای فرموله کردن سیاست‌های پایدار و بهینه در حوضه‌های بحرانی کشور فراهم کند. بر پایه یافته‌های پژوهش حاضر، می‌توان تأکید کرد که طراحی سیاست‌های آبی در مدیریت منابع آب باید بر سه محور هم‌زمان توسعه زیرساخت‌های پایدار تأمین و بازچرخانی آب، ترکیب یارانه‌ها و حمایت‌های مالی با آموزش و نظارت میدانی و تقویت سرمایه اجتماعی و نهادهای محلی برای بهبود همکاری جمعی متمرکز باشد. چنین رویکردی می‌تواند ضمن افزایش اثربخشی سیاست‌ها، پیوند میان ابزارهای اقتصادی-اجتماعی و فنی را برقرار کرده و زمینه‌ساز پایداری بلندمدت مدیریت منابع آب در شرایط تغییرات اقلیمی باشد.

مراجع

- Ahmadi, A., Keshavarz, M., & Ejlali, F. (2025). Resilience to climate change in agricultural water-scarce areas: The major obstacles and adaptive strategies. *Water Resources Management*, 39(3), 1195-1214.
- Alawode, A. (2025). Evaluating agricultural subsidy reforms and their effects on smallholder farmer income and efficiency. *International Journal of Advance Research Publication and Reviews*, 2(5), 180-201.
- Cai, Y., & Xiong, W. (2017). An agent-based simulation of cooperation in the use of irrigation systems. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 5(9).
- Chai, Y., & Schoon, M. (2016). Institutions and government efficiency: decentralized irrigation management in China. *International Journal of the Commons*, 10(1).
- Chang, J., Jiang, H., Liu, J., & Li, M. (2024). How the digital economy enhances the grain supply chain resilience in China: exploring the moderating effects of government innovation-driven. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1439593.
- Chen, T., Yang, F., Li, Y., & Zhang, Z. (2024). Two-Way FDI assists agricultural sustainable development: Based on digitalization and greening perspectives. *Plos One*, 19(2), e0296896.
- Cremers, L., Ooijevaar, M., & Boelens, R. (2005). Institutional reform in the Andean irrigation sector: Enabling policies for strengthening local rights and water management. *Natural Resources Forum*, 29(1), 37-50.

- Das, U., Ansari, M. A., & Ghosh, S. (2022). Effectiveness and upscaling potential of climate smart agriculture interventions: Farmers' participatory prioritization and livelihood indicators as its determinants. *Agricultural Systems*, 203, 103515.
- Dahwa, E., Mudzengi, C. P., Mubvuma, M., Maravanyika, T., Chapungu, L., & Chikodza, E. (2022). Optimizing productivity in semi-arid dryland agriculture for developing countries: Insights from Zimbabwe. In *Climate change adaptations in dryland agriculture in semi-arid areas* (pp. 233-249). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Emami, S., & Dehghanisani, H. (2024). Fault Tree Analysis of Trade-Offs between Environmental Flows and Agricultural Water Productivity in the Lake Urmia Sub-Basin Using Agent-Based Modeling. *Water*, 16(6), 844.
- Fang, H. (2023). Actionable science for irrigation. In *Actionable science of global environment change: From big data to practical research* (pp. 203-228). Cham: Springer International Publishing.
- Franzén, F., Hammer, M., & Balfors, B. (2015). Institutional development for stakeholder participation in local water management—An analysis of two Swedish catchments. *Land Use Policy*, 43, 217-227.
- Gany, A. H. A., Sharma, P., & Singh, S. (2019). Global review of institutional reforms in the irrigation sector for sustainable agricultural water management, including water users' associations. *Irrigation and Drainage*, 68(1), 84-97.
- Hariram, N. P., Mekha, K. B., Suganthan, V., & Sudhakar, K. (2023). Sustainalism: An integrated socio-economic-environmental model to address sustainable development and sustainability. *Sustainability*, 15(13), 10682.
- Hassaniyan, A. (2024). Iran's water policy: environmental injustice and peripheral marginalisation. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 48(3), 420-437.
- Iran Water Resources Management Company. (2023). Water balance report of groundwater resources in the Miandoab plain. Tehran: Office for Protection and Utilization of Water Resources.
- Kiptot, E., & Franzel, S. (2014). Voluntarism as an investment in human, social and financial capital: evidence from a farmer-to-farmer extension program in Kenya. *Agriculture and Human Values*, 31(2), 231-243.
- Kumar, A., Devi, J. P., Bhaskar, D., Shekhar, S., Chatterjee, U., & Mohanasundari, T. (2025). Perceptions and impacts of climate change in Central India: A study of tribal communities. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(8), 1-21.
- Kumar, R., & Singh, P. (2021). Energy subsidies and sustainable irrigation in India: Policy reform for resource efficiency. *Energy Policy*, 150, 112014.
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., & Zommers, Z. (2023). Climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Li, C., Li, X., & Jia, W. (2022). Non-farm employment experience, risk preferences, and low-carbon agricultural technology adoption: Evidence from 1843 grain farmers in 14 provinces in China. *Agriculture*, 13(1), 24.
- Ministry of Energy of Iran. (2022). Water Resources Statistical Yearbook – Water Year 2021–2022. Tehran: Office of Basic Water Resources Studies.
- Mousavian, H. M., Shakouri, G. H., Mashayekhi, A. N., & Kazemi, A. (2020). Does the short-term boost of renewable energies guarantee their stable long-term growth? Assessment of the dynamics of feed-in tariff policy. *Renewable Energy*, 159, 1252-1268.
- Nagrah, A., Chaudhry, A. M., & Giordano, M. (2016). Collective action in decentralized irrigation systems: Evidence from Pakistan. *World Development*, 84, 282-298.
- Nhemachena, C., & Hassan, R. (2007). Micro-level analysis of farmer's adaption to climate change in Southern Africa. *Intl Food Policy Res Inst*.
- Nkonya, E., Kato, E., Msimanga, M., & Nyathi, N. (2023). Climate shock response and resilience of smallholder farmers in the drylands of south-eastern Zimbabwe. *Frontiers in Climate*, 5, 890465.

- Nordmeyer, E. F., & Mußhoff, O. (2023). Understanding German farmers' intention to adopt drought insurance. *Journal of Environmental Management*, 345, 118866.
- Oiganji, E., Igbadun, H., Amaza, P. S., & Lenka, R. Z. (2025). Innovative technologies for improved water productivity and climate change mitigation, adaptation, and resilience: a review. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 29(1), 123-136.
- Pahl-Wostl, C., Craps, M., Dewulf, A., Mostert, E., Tabara, D., & Taillieu, T. (2007). Social learning and water resources management. *Ecology and Society*, 12(2).
- Prajapati, C. S., Priya, N. K., Bishnoi, S., Vishwakarma, S. K., Buvanewari, K., Shastri, S., ... & Jadhav, A. (2025). The role of participatory approaches in modern agricultural extension: bridging knowledge gaps for sustainable farming practices. *Journal of Experimental Agriculture International*, 47(2), 204-222.
- Reichelt, N., & Nettle, R. (2023). Practice insights for the responsible adoption of smart farming technologies using a participatory technology assessment approach: The case of virtual herding technology in Australia. *Agricultural Systems*, 206, 103592.
- Reidsma, P., Bakker, M. M., Kanellopoulos, A., Alam, S. J., Paas, W., Kros, J., & de Vries, W. (2015). Sustainable agricultural development in a rural area in the Netherlands? Assessing impacts of climate and socio-economic change at farm and landscape level. *Agricultural Systems*, 141, 160-173.
- Ren, Z., Fu, Z., & Zhong, K. (2022). The influence of social capital on farmers' green control technology adoption behavior. *Frontiers in Psychology*, 13, 1001442.
- Rusike, E. L. I. J. A. H. (2005). Exploring food and farming futures in Zimbabwe: A citizens' jury and scenario workshop experiment (pp. 249-255). London: Zed Books.
- Salajegheh, S., Jafari, H. R., & Pourebrahim, S. (2020). Modeling the impact of social network measures on institutional adaptive capacity needed for sustainable governance of water resources. *Natural Resource Modeling*, 33(4), e12277.
- Shiferaw, B. A., Okello, J., & Reddy, R. V. (2009). Adoption and adaptation of natural resource management innovations in smallholder agriculture: reflections on key lessons and best practices. *Environment, Development and Sustainability*, 11(3), 601-619.
- Shi, H., Zhang, Y., Bian, M., & Zhang, J. (2024). Influence of energy poverty on agricultural water efficiency using a panel data study in China. *Scientific Reports*, 14(1), 2064.
- Silva, T. A., Ferreira, J., Calijuri, M. L., dos Santos, V. J., do Carmo Alves, S., & de Siqueira Castro, J. (2021). Efficiency of technologies to live with drought in agricultural development in Brazil's semi-arid regions. *Journal of Arid Environments*, 192, 104538.
- Slavova, M., & Karanasios, S. (2018). When institutional logics meet information and communication technologies: examining hybrid information practices in Ghana's agriculture. *Journal of the Association for Information Systems*, 19(9), 4.
- Tingey-Holyoak, J. L., & Pisaniello, J. D. (2017). Strategic responses to resource management pressures in agriculture: Institutional, gender and location effects. *Journal of Business Ethics*, 144(2), 381-400.
- Thakur, A. K., & Uphoff, N. T. (2017). How the system of rice intensification can contribute to climate-smart agriculture? *Agronomy Journal*, 109(4), 1163-1182.
- Thissen, W., Kwakkel, J., Mens, M., van der Sluijs, J., Stemmerger, S., Wardekker, A., & Wildschut, D. (2017). Dealing with uncertainties in fresh water supply: Experiences in the Netherlands. *Water Resources Management*, 31(2), 703-725.
- Wada, Y., de Graaf, I. E., & van Beek, L. P. (2016). High-resolution modeling of human and climate impacts on global water resources. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(2), 735-763.
- West Azerbaijan Regional Water Company. (2022). Descriptive report of the Miandoab plain. Urmia: Deputy for Basic Water Resources Studies.

Research Article**Study of Flow and Sediment in the labyrinth Channel of Pressure Compensating emitters Using Computational Fluid Dynamics (CFD)****Hossein Parvizi**^{1✉} | **Zohre Rafiei**² | **Hadis Hatami**³ | **Ali Momenpour**⁴

1. Corresponding Author, Department of Irrigation and Soil Physics, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran.
2. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.
3. Department of Soil Chemistry and Plant Nutrition, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran.
4. Department of Agronomy and Horticulture Department, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Yazd, Iran.

(✉ Corresponding Author: H.parvizi@areeo.ac.ir)**ARTICLE INFO****Received:** 18 May 2025**Revised:** 19 August 2025**Accepted:** 3 September 2025**Available Online:****HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Parvizi, H., Rafiei, Z., Hatami, H., Momenpour, A., (2025). Study of Flow and Sediment in the Labyrinth Channel of Pressure Compensating emitters Using Computational Fluid Dynamics (CFD). (In Persian with English abstract). Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research.V.26, No.99, P: 75-94

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369512.1620>

Extended Abstract**Introduction**

Drip irrigation systems play a crucial role in water-efficient agricultural practices. However, clogging in emitters, particularly in labyrinth channels, significantly affects performance and longevity. The deposition of suspended particles within the flow path leads to reduced efficiency, necessitating precise analysis of flow behavior under different operating pressures and salinity conditions. While empirical studies provide valuable insights, computational fluid dynamics (CFD) has emerged as a powerful tool for simulating fluid flow and sedimentation in complex geometries, enabling cost-effective optimization of emitter designs.

Methodology

In this study, flow behavior and sediment deposition in pressure-compensating emitters with labyrinth channels were examined under various salinity and operating pressure conditions. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed using COMSOL software, and the results were compared with experimental data. Moreover, in our study the pressure-compensating emitters of three different brands - Netafim (8 and 25 L/h), Eurodrip (8 and 24 L/h), and Peresi Zalvan (8 and 24 L/h)- were examined under three operating pressures (0.5, 1.5, and 2.5 bar) and two water salinity levels (5 and 12 dS/m). The COMSOL software was used for CFD simulations, focusing on flow velocity distribution, pressure dissipation, and sediment deposition within the labyrinth channels. Moreover, Experimental validation was conducted at the National Salinity Research Center in Yazd, Iran to compare simulated sediment deposition with actual results obtained from emitter degradation tests.

Results and Discussion

The analysis of velocity and pressure variations demonstrated that spiral channels, due to their serrated edges, increase flow velocity up to 2.8 m/s, effectively preventing particle deposition. However, in vortex regions and corners, the flow velocity approaches zero, increasing the risk of sediment accumulation. The pressure dissipation analysis revealed that multiple serrations reduce flow pressure in different emitters by 57% to 87%. Furthermore, the comparison between simulated and experimental sediment variations

exhibited a high degree of correlation ($R^2 = 0.98$). The findings indicate that increasing the inlet water pressure to approximately 2.5 bar and the water salinity to 12 dS/m leads to a 50% and 114% increase in the average sediment volume, respectively. Emitters featuring a pre-settlement zone before the spiral channel demonstrate superior anti-clogging performance. Additionally, increasing the number of flow outlets reduces particle residence time within the channel, thereby lowering the risk of clogging. The findings demonstrated that increasing operating pressure up to 2.5 bar and water salinity resulted in higher sediment levels. In alignment with the simulated results, the laboratory study conducted by Parvizi *et al.* (2025) on the same emitters demonstrated that applying high pressures leads to an increased influx of particles into the labyrinth channels, thereby heightening the risk of clogging. Additionally, Li *et al.* (2024) stated that increasing the operating pressure within a specific range can improve the anti-clogging performance of emitters with a star-shaped channel. However, this operating pressure should not exceed the typical working pressure for this type of emitter, which is approximately 1 bar. Among the tested models, Netafim 25 L/h demonstrated anti-clogging capabilities, attributed to its settling zone preceding the primary labyrinth channel. This structure allowed larger suspended particles to settle before entering finer flow paths, reducing clogging potential. Additionally, multi-exit flow designs, such as Netafim's triple-channel configuration, can effectively minimize particle retention time, lowering obstruction risks. Increasing pressure up to 2.5 bar and salinity led to higher sediment accumulation, confirming that higher pressures exacerbate clogging risks. These findings align with prior research (Yang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2022), which demonstrated that modifying channel curvature and increasing exit pathways enhances clogging resistance. Studies have further confirmed that increasing flow velocity in labyrinth channels optimizes sediment transport mechanisms (Wei *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2018).

Conclusion

This research demonstrates that CFD simulation is a reliable tool for predicting and optimizing flow behavior and sediment deposition in pressure-compensating emitters. Overall, higher salinity and an increase in inlet flow pressure up to 2.5 bar led to greater sediment accumulation, which can raise the risk of clogging. The findings of this study demonstrated that the geometry of the spiral channel in drip emitters has a direct impact on flow patterns and clogging behavior. While the serrations in the spiral channel enhance flow velocity and reduce sediment accumulation, flow velocity decreases in vortex regions and corners, increasing the likelihood of particle deposition and clogging risks. Furthermore, it is recommended to reduce the risk of clogging by using emitters with modified curved edges instead of sharp ones. Manufacturers should also consider improving and refining sharp corner structures to enhance performance. Additionally, pressure dissipation is better achieved in emitters with multiple serrations, which likely improves their resistance to clogging. Moreover, this study suggests that CFD enables cost-effective and rapid assessment of pressure and salinity management strategies for pressurized irrigation systems. Moreover, findings from this study can be applied to future product development and efficiency enhancements in drip irrigation systems under varying environmental conditions.

Keywords: Labyrinth channel, Operating pressure, Salinity, Sediment, Comsol



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369512.1620>

نوع مقاله: پژوهشی

مطالعه جریان و رسوب در مجرای ماریچ قطرچکان‌های تنظیم‌کننده فشار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

حسین پرویزی^{۱✉} | زهره رفیعی^۲ | حدیث حاتمی^۳ | علی مومن پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

چکیده

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزاری است مناسب به منظور مطالعه رفتار جریان در مجرای قطرچکان‌ها و می‌تواند شرایط مختلف مدیریتی و محیطی منجر به تغییر در عملکرد آن‌ها را با صرف هزینه پایین و در مدت زمان بسیار کوتاه شبیه‌سازی کند. در این پژوهش، رفتار جریان و میزان رسوب‌گذاری در قطرچکان‌های تنظیم‌کننده فشار با مجراهای ماریچ در شرایط مختلف از نظر شوری و فشار آب بررسی گردید. برای این منظور، از نرم‌افزار COMSOL برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد و نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. بررسی تغییرات سرعت و فشار نشان داد که مجراهای ماریچ به دلیل داشتن دندانه‌ها باعث افزایش سرعت جریان تا ۲/۸ متر بر ثانیه می‌شوند و از رسوب‌گذاری ذرات جلوگیری می‌کنند. با این حال، در نواحی گردابی و گوشه‌ها، سرعت جریان به صفر نزدیک می‌شود و خطر تجمع رسوبات افزایش می‌یابد. تحلیل استهلاک فشار نشان داد که دندانه‌های متعدد، فشار جریان را در قطرچکان‌های مختلف از ۵۷ تا ۸۷ درصد کاهش می‌دهند. مقایسه تغییرات رسوب شبیه‌سازی‌شده و آزمایشگاهی نیز تطابق بالایی ($R^2=0.98$) را نشان داد. نتایج بررسی‌ها حاکی است افزایش فشار آب ورودی تا حدود ۲/۵ بار و شوری آب تا ۱۲ دسی زیمنس بر متر موجب افزایش میانگین حجمی رسوبات به ترتیب به میزان ۵۰ و ۱۱۴ درصد می‌شود و قطرچکان‌هایی که دارای ناحیه ته‌نشینی اولیه پیش از مجرای ماریچ هستند، عملکرد ضد گرفتگی بهتری دارند. همچنین افزایش تعداد خروجی‌های جریان منجر به کاهش زمان ماند ذرات درون مجرا و کاهش خطر گرفتگی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رسوب، شوری، فشار جریان، مجرای ماریچ، COMSOL

مقدمه

قطرچکان بر اساس معیارها و استانداردهای مربوط ساخته

نقش قطرچکان‌ها با توجه به تغییرات گسترده‌ای که از نظر مشخصات و ویژگی‌های فنی و کیفیت ساخت دارند در افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری قطرچه ای انکارناپذیر است. امروزه تقریباً تمامی مدل‌های معروف و در دسترس می‌شوند، اما تغییر شرایط و عوامل متعدد می‌تواند کارایی آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد و در عمل و کاربرد ممکن است نتایج دیگری را نشان دهند. امروزه مدل‌های پیشرفته ریاضی قادر به شبیه‌سازی جریان سیالات و عوامل موثر بر آن در

^۱ بخش آبیاری و فیزیک خاک، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

(✉ نویسنده مسئول: H.parvizi@areeo.ac.ir)

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

^۳ بخش شیمی خاک و تغذیه گیاه، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

^۴ بخش تحقیقات زراعت و باغبانی، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

شبیه‌سازی رفتار جریان در این قطره‌چکان‌هاست. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که می‌توان با اصلاح ساختار مسیرهای مارپیچ از زاویه‌های تند به انحنای دوار نسبت گرفتگی را در قطره‌چکان‌ها کاهش داد. در روشی مشابه با پژوهش گفته‌شده، یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) نشان دادند که با تغییر ساختار مجرای مارپیچ به گونه‌ای که مساحت ناحیه جریان اصلی و انرژی جنبشی جریان متلاطم در ناحیه کم سرعت افزایش یابد، شدت انتقال ذرات را افزایش و فاصله انتقال و مدت زمان ماند آن‌ها را کاهش می‌دهد و در نتیجه احتمال گرفتگی کاهش می‌یابد. افزون بر این، عملکرد CFD در مقایسه میزان جریان خروجی در چهار مجرای مارپیچ مختلف در قطره‌چکان‌های درون خط توسط بقیل و همکاران (Baghel et al., 2021) بررسی شده است. بر این اساس، کمترین میزان اتلاف فشار برای مارپیچ‌های مستطیل شکل حاصل گردیده‌است. پژوهش‌های مشابه دیگری نیز در این زمینه که نشان دهنده استفاده گسترده از CFD است توسط یو و همکاران (Yu et al., 2018)، دمیر و همکاران (Demir et al., 2020) و ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) اجرا شده است. بررسی نحوه رسوب گذاری یا تاثیرات فشار بر میزان گرفتگی در قطره‌چکان‌های دارای مجرای مارپیچ نیز در پژوهش‌های مختلفی (Li et al., 2006; Wei et al., 2006; Ramachandrala and Kasa, 2020; Li et al., 2024; De Marchis et al., 2025) بررسی شده است.

بر اساس آنچه گفته شد، پژوهش حاضر به صورت آزمایشگاهی اجرا و پس از آن از مدل‌های ریاضی با هدف بررسی و مدل‌سازی رفتار جریان در اثر تغییر شوری و فشار در قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار بهره‌گیری شده است. در واقع در این پژوهش مسئله شوری بالای آب آبیاری در ترکیب با فشار بالا به عنوان عاملی بررسی شده است که در پژوهش‌های پیشین مد نظر قرار نگرفته‌اند. افزون بر این، سعی شده است تا با مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج واقعی

مجاری مختلف مانند لوله‌ها و قطره‌چکان‌ها هستند و با استفاده از آن‌ها می‌توان شرایط مختلف مدیریتی و محیطی منجر به تغییر در عملکرد قطره‌چکان‌ها را با صرف هزینه پایین و در مدت زمان بسیار کم بررسی کرد. از ابزارهای مناسبی که می‌تواند برای مطالعه رفتار جریان حین عبور از مجرای قطره‌چکان‌ها استفاده شود، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. CFD به دلیل پایین بودن هزینه، بالابودن سرعت و در اختیار قرار دادن اطلاعات کامل می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کمک به مطالعه هیدرولیک جریان باشد (Delghandi et al., 2010; Delghandi et al., 2013).

کمرگو و همکاران (Camargo et al., 2020) می‌گویند CFD می‌تواند روشی دقیق، سریع و قابل اجرا برای بررسی پارامترهای جریان در لوله‌های آبیاری، اتصالات، قطره‌چکان‌ها و لوازم جانبی باشد و در طراحی محصولات جدید و بهبود محصولات موجود و بهینه‌سازی آن‌ها مفید واقع شود. در خصوص استفاده از CFD تاکنون پژوهش‌های مختلفی در جهان شده است که از آن جمله می‌توان به ارزیابی گرفتگی قطره‌چکان‌ها توسط وی و همکاران (Wei et al., 2008) اشاره کرد؛ تحقیقات این محققان روی سه نوع قطره‌چکان با مجاری متفاوت اجرا شده است و نتایج آن نشان دهنده دقت مناسب روش CFD در شبیه سازی محل تجمع رسوبات و گرفتگی در قطره‌چکان‌های مختلف است. پژوهشگران دیگری نیز از CFD به منظور طراحی قطره‌چکان‌های جدید بهره برده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که قطره‌چکان‌های با زاویه‌های انحنای مجاری بیشتر، خطر گرفتگی کمتری دارند، آن‌ها می‌افزایند این روش باعث کاهش هزینه‌ها و تسریع در ساخت قطره‌چکان‌های جدید می‌شود (Celik et al., 2011; Fan et al., 2014). وی و همکاران (Wei et al., 2012) به بررسی و تحلیل جریان در قطره‌چکان‌های طولانی‌مسیر با مسیرهای مارپیچ مستطیلی و زیگزاگ در نمونه آزمایشگاهی پرداختند و نتایج حاصل را با CFD مقایسه و بیان کردند که CFD به خوبی قادر به

که از تخریب نمونه‌های قطره‌چکان پس از آزمایش‌ها به‌دست آمده است، زمینه برای اجرای پژوهش‌های تکمیلی کم هزینه و سریع در زمینه قطره‌چکان‌ها و شرایط مدیریتی متنوع مانند کاربرد آب شور آماده شود.

روش پژوهش

مکان و نحوه اجرای آزمایش

پژوهش حاضر در مرکز ملی تحقیقات شوری واقع در

است.

جدول ۱- مشخصات قطره‌چکان و تیمارهای کاربردی فشار و شوری در پژوهش

Table 1- Specifications of the drip emitter and applied pressure and salinity treatments in the study

نوع قطره‌چکان	آبدهی اسمی (لیتر در ساعت)	فشار آب ارزیابی (بار)	سطوح شوری (دسی زیمنس بر متر)
تتافیم (خارجی)	۸	۰/۵ و ۱/۵ و ۲/۵	۵ و ۱۲
	۲۵		
یورودریپ (خارجی)	۸		
	۲۴		
پرسی زالوان (ایرانی)	۸		
	۲۴		

جدول ۲- ویژگی‌های کیفی آب مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 2- Qualitative properties of the water used in the experiments

EC (dS/m)	pH	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ⁺²	Ca ⁺²	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻²	RSC	LSI
۵/۲۴	۷/۹۱	۰	۳/۰۳	۴۰/۳	۷/۶	۵/۳۷	۳۶/۶	۰/۳۷	۷/۴	-۹/۹	۰/۲۵
۱۲/۱۱	۷/۹۴	۰	۲/۸۹	۱۰۵/۵	۱۵/۹	۶/۵۵	۱۰۱/۵	۰/۴۲	۱۳/۱	-۱۹/۱	۰/۱۳

* پارامترهای LSI، RSC، pH و EC به ترتیب نشان دهنده نمایه اشباع لائزیر، باقی‌مانده کربنات سدیم، اسیدیته و شوری آب هستند.

*The LSI, RSC, pH, and EC parameters indicate the Langelier Saturation Index, Residual Sodium Carbonate, acidity, and salinity of the water, respectively.

در مسائل مهندسی است. علاوه بر این، توانایی محاسبات موازی و شبکه‌سازی آن و نیز اجرای تحلیل‌های عددی سنگین روی پردازنده‌های چند هسته‌ای را تسهیل می‌کند. برای شروع کار با COMSOL، ابتدا باید هندسه مدل موردنظر را با ابزارهای داخلی نرم‌افزار طراحی کرد. پس از آن فیزیک‌های مرتبط انتخاب و معادلات حاکم و شرایط مرزی تعیین می‌شود تا رفتار سیستم مشخص شود. مرحله بعد شامل تولید شبکه عددی (Mesh Generation) است که برای حل دقیق معادلات ضروری است. پس از آن، روش‌های حل و تنظیم پارامترهای موردنیاز برای تحلیل عددی انتخاب می‌شوند. COMSOL بر پایه حل

شبیه‌سازی جریان در قطره‌چکان‌ها

نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

نرم‌افزار COMSOL Multiphysics پلتفرمی قدرتمند برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی و چندفیزیکی است. این نرم‌افزار با قابلیت مدل‌سازی چندفیزیکی امکان تحلیل هم‌زمان مکانیک جامدات، انتقال حرارت، دینامیک سیالات، الکترومغناطیس و واکنش‌های شیمیایی را فراهم می‌کند. COMSOL به MATLAB و دیگر پلتفرم‌ها متصل می‌شود و امکان تحلیل پارامتری و بهینه‌سازی را فراهم می‌آورد که شامل بررسی حساسیت پارامترها و یافتن تنظیمات بهینه

است. در واقع در استفاده از CFD در تجزیه و تحلیل جریان در تمامی قسمت‌های قطره‌چکان‌های تنظیم کننده فشار به دلیل ساختار پیچیده‌ای که دارند با محدودیت روبه‌رو است. این امر به دلیل تعامل بین دیافراگم و آب در رفتار واقعی است که نتیجه آن تغییرات بسیار در شکل حوزه‌های جریانی است (Seo et al., 2024). بنابراین، در این پژوهش نیز به‌رغم استفاده از نمونه‌های تنظیم کننده فشار، تنها مجرای ماریچ بررسی شده است. مدل شبکه‌بندی برای این پژوهش مش‌های Hexahedral با اندازه درشت است.

شرایط مرزی و مولفه‌های ورودی

در نظر گرفتن شرایط مرزی از دیگر مولفه‌های مهم در حل معادلات است که باید وارد مدل شود. در این پژوهش فشار خروجی معادل فشار اتمسفر برای قطره‌چکان‌ها و سرعت صفر در جداره‌ها از جمله این شرایط بود. علاوه بر این، فشار ورودی ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ بار بود. از آنجا که شبیه سازی همزمان اثرهای جابه‌جایی دیافراگم ناشی از تغییر فشار و اثر آن بر آبدی و شبیه سازی رسوب ذرات عملاً امکان پذیر نیست، بنابراین، با وارد کردن مقدار سرعت در خروجی هر قطره‌چکان به عنوان یک شرط مرزی با توجه به مساحت سطح مقطع و آبدی اسمی قطره‌چکان‌های مختلف میزان آبدی خروجی مطابق با آبدی اسمی قطره‌چکان‌ها تنظیم گردید. به‌علاوه، ویژگی‌های سیال که همان آب است از طریق موارد پیش فرض موجود در نرم افزار انتخاب گردید. در این پژوهش، همچنین ویژگی‌های ذرات جامد با در نظر گرفتن کربنات کلسیم (CaCO₃) به عنوان ذره اصلی هسته رسوب تعیین شد. بدین منظور چگالی ذرات جامد ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. قطر ذرات نیز با توجه به مش فیلتر مورد استفاده در آزمایش‌ها، که برابر با ۱۳۰ میکرون بود، به طور میانگین ۶۵ میکرون در نظر گرفته شد (Wei et al., 2008).

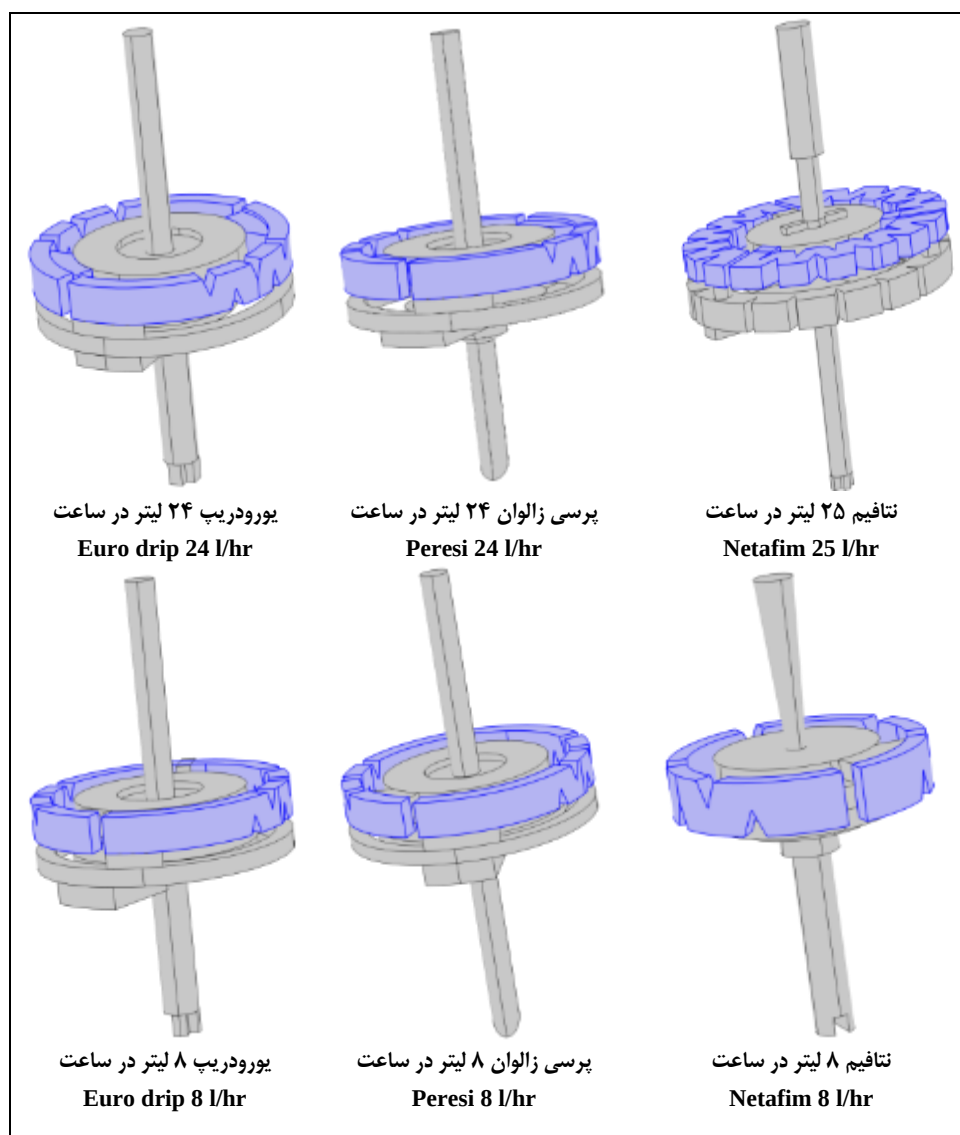
معادلات دیفرانسیل جزئی (PDEs) عمل می‌کند و شامل معادلاتی مانند لاپلاس، ناویر-استوکس، انتقال حرارت و الکترومغناطیس است که برای مدل سازی پدیده‌های مختلف استفاده می‌شوند. معادله پایه مورد استفاده برای این پژوهش همان فرم کلی معادله ناویر-استوکس برای سیال تراکم‌ناپذیر است که در زیر ارائه شده است.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F \quad (1)$$

که در آن: ρ چگالی سیال، u بردار سرعت، t زمان، p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی، ∇ لاپلاسی (نشان دهنده پخشیدگی ویسکوزیته)، f نیروهای حجمی خارجی (مانند گرانش) است. این نرم‌افزار از روش عددی المان محدود (FEM) برای تقریب‌های عددی و تحلیل سیستم‌های پیچیده بهره می‌برد. مدل‌های فیزیکی پیشرفته‌ای مانند دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، واکنش‌های شیمیایی، انتقال جرم و حرارت، و سیستم‌های ترمودینامیکی را پشتیبانی می‌کند. با اجرای شبیه‌سازی در این نرم افزار، سیستم معادلات حل خواهد شد و نتایج عددی ارائه می‌شوند. پس از دستیابی به نتایج اولیه، داده‌ها تحلیل می‌شوند تا تأثیر تغییرات پارامترها بررسی گردد. سرانجام، تنظیمات سیستم بهینه‌سازی می‌شود تا عملکرد مدل دقیق‌تر و کارآمدتر باشد، که منجر به بهبود کیفیت شبیه‌سازی و افزایش دقت محاسبات خواهد شد.

ترسیم هندسه

در گام اول باید هندسه ناحیه محاسباتی که همان مسیر عبور سیال از قطره‌چکان است رسم و شبکه بندی شود. بدین منظور، ابتدا هر یک از قطره‌چکان‌های مورد استفاده با نشان تجاری و آبدی مختلف با استفاده از نرم افزار COMSOL 6.1 به صورت سه بعدی طراحی گردید (شکل ۱). لازم است گفته شود این تصاویر سه بعدی همان مجراهای عبور آب هستند و در واقع فضاهای خالی و محل عبور آب را در قطره‌چکان‌ها نشان می‌دهند و قسمت‌های جامد و بدنه آن‌ها به دلیل آنکه نیاز نبوده است رسم نشده



شکل ۱- ترسیم مجرای عبور آب در قطره‌چکان‌های مختلف به منظور شبیه سازی جریان در آن‌ها. مجراهای ماریچ با رنگ آبی نشان داده شده‌اند. مقیاس رسم شکل‌ها یکسان نیست.

Fig. 1- The depiction of water flow channels in different emitters for flow simulation. The labyrinth channels are shown in blue and the scaling of the illustrations is not uniform.

در این مدل، فاز پیوسته (آب) و فاز پراکنده (ذرات جامد)

هستند. سه فرض زیر برای حل این مدل در COMSOL در نظر گرفته شده است:

- چگالی هر فاز تقریباً ثابت است.
- هر دو فاز میدان فشار یکسانی دارند.
- زمان استراحت ذرات در مقایسه با زمان جریان کوتاه است.

حل عددی

در گام دوم با در نظر گرفتن پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی حاکم بر سیال، معادلات مربوط استخراج و مدل مناسب با حل آن‌ها در نرم افزار انتخاب شد و شبیه سازی به اجرا درآمد. در این پژوهش، هدف شبیه سازی رسوب و گرفتگی احتمالی قطره‌چکان‌هاست بنابراین ذرات جامد در فاز مایع پراکنده شده است و نیاز به شبیه سازی جریان به صورت دو فاز خواهد بود که توسط مدل مختلط اجرا گردید.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_d) + j \cdot \nabla \phi_d + \nabla \cdot (j_{slip}) \quad (9)$$

$$= \nabla \cdot (D_{md} \nabla \phi_d) - \frac{m_{dc} \rho}{\rho_d \rho_c}$$

که در آن D_{md} ضریب پخشیدگی آشفته‌گی است. کسر حجمی فاز پیوسته یا مایع از تفاوت کسر حجمی فاز جامد و عدد ۱ حاصل می‌گردد. با توجه به اینکه جریان درون قطره‌چکان‌ها آشفته است (Wei et al., 2006)، تاثیر اغتشاش در جریان از مدل استاندارد اغتشاشی $K-\epsilon$ به شرح زیر به دست آمد:

$$\rho(j \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right) \nabla k \right] + pk - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\rho(j \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} pk - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K} \rho \quad (11)$$

$$pk = \mu_T \left[\nabla j : (\nabla j + (\nabla j)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot j)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot j \quad (12)$$

در این معادلات، $C_{\epsilon 1} = 1/44$ ، $C_{\epsilon 2} = 1/92$ و $\sigma_T = 0.35$

ضریب‌های تصحیح و ثابت هستند که مقادیر آن‌ها به پیشنهاد لندر و اسپالدینگ (Lauder & Spalding, 1983) انتخاب شدند. در این مسئله، با توجه به کم بودن تاثیر وزن آب در مقایسه با تاثیر فشار آب، از تاثیر وزن آب و کشش سطحی آب صرف نظر شد. علاوه بر این، با توجه به اینکه کسر حجمی ذرات جامد درون سیال (نسبت حجم ذرات به حجم واحد آب) به عنوان مقدار اولیه ورودی برای اجرای محاسبات بر اساس میزان شوری آب متغیر بود، این کسر با استفاده از مجموع مقادیر کربنات کلسیم و مواد جامد انحلال‌ناپذیر اندازه‌گیری شده آب در هر شوری و با استفاده از معادله چگالی تعیین گردید. در واقع کربنات کلسیم و مواد جامد انحلال‌ناپذیر تشکیل دهنده ذرات جامد هستند و مقادیر جرم کربنات کلسیم از طریق آزمایش تجزیه آب در هر شوری بر حسب میلی گرم در لیتر و مقادیر جرم مواد جامد انحلال‌ناپذیر نیز به روش عبور حجم مشخص آب از کاغذ صافی استاندارد و توزین مواد باقی‌مانده تعیین شد. پس از محاسبه جرم مواد جامد کل در هر شوری با داشتن چگالی ذرات، این جرم به حجم تبدیل شد و در نهایت با توجه به اینکه حجم محاسبه شده مربوط به ذرات درون حجم مشخص سیال بود (یک لیتر)، نشان دهنده کسر حجمی

بنابراین، چگالی (ρ)، فلاکس حجمی (j)، کسر حجمی (ϕ)، ویسکوزیته (μ) و بردار سرعت (u) جریان مخلوط طبق معادلات زیر از مجموع هر پارامتر در فاز پیوسته یا مایع با اندیس c و فاز پراکنده یا جامد با اندیس d به دست می‌آید. تمامی واحدها بر حسب سیستم استاندارد SI هستند.

$$\rho = \rho_c \phi_c + \rho_d \phi_d \quad (2)$$

$$j = j_c + j_d = u_c \phi_c + u_d \phi_d \quad (3)$$

$$u = \frac{\rho_c u_c \phi_c + \rho_d u_d \phi_d}{\rho} \quad (4)$$

بنابراین معادله پیوستگی عبارت است از:

$$\nabla \cdot j = m_{dc} \left(\frac{1}{\rho_c} - \frac{1}{\rho_d} \right) \quad (5)$$

که در آن m_{dc} شدت انتقال جرم از فاز پراکنده به پیوسته است. معادله مومنتم نیز عبارت است از:

$$\rho j_t + \rho (\nabla \cdot j) j + \rho_c \epsilon (j_{slip} \cdot \nabla) j = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau_{Gm} + \rho g \quad (6)$$

که در آن، اندیس slip مقدار نسبی هر پارامتر بین دو فاز مختلف، ϵ تفاوت چگالی کاهش یافته، τ_{Gm} مجموع تنش‌های اغتشاشی و چسبندگی و g شتاب گرانش است. مقدار برخی از این پارامترها طبق معادلات زیر حاصل می‌شود.

$$\tau_{Gm} = (\mu + \mu_T) [\nabla j + \nabla j^T] - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\nabla \cdot j) I - \frac{2}{3} \rho k I \quad (7)$$

که در آن، k و μ_T به ترتیب انرژی جنبشی و ویسکوزیته آشفته‌گی و μ ویسکوزیته مخلوط است.

$$\epsilon = \frac{\rho_d - \rho_c}{\rho_c}, \quad j_{slip} = \phi_c \phi_d u_{slip} \quad (8)$$

در این معادله، u_{slip} نشان دهنده سرعت نسبی بین دو فاز است که به دلیل وجود نیروی شناوری ایجاد شده است که از سمت سیال به ذرات وارد می‌شود و باید توسط معادلاتی لحاظ گردد که در این پژوهش از مدل شیلر-نیومن استفاده گردید. کسر حجمی ذرات جامد معلق و ذرات منجر به رسوب (فاز پراکنده) در آب در هر نقطه از هندسه با استفاده از معادله انتقال و توسط معادله زیر به دست می‌آید.

این مکان‌ها مستعد ته نشینی ذرات‌اند. در نتیجه، رسوب‌گذاری و انسداد مجرا می‌تواند در این قسمت‌ها رخ دهد. بنابراین، یکی از راه‌های جلوگیری از تجمع و رسوب ذرات، افزایش سرعت در نواحی گوشه‌ای از طریق تغییر در شکل یا ساختار گوشه‌هاست. یانگ و همکاران (Yang et al., 2020) نشان دادند که با بهبود و تغییر ساختار گوشه‌های کانال جریان، مساحت منطقه جریان اصلی و ناحیه کم‌سرعت در قطره‌چکان افزایش می‌یابد. انرژی آشفتگی در ناحیه کم‌سرعت نیز بین ۵۲ تا ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد و آهنگ انتقال ذرات بیشتر می‌شود و فاصله جابه‌جایی و زمان ماندگاری ذرات کاهش می‌یابد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تغییر ساختار گوشه‌ها به گونه‌ای که قسمت‌های تیز آن به شکل منحنی اصلاح شود منجر به کاهش تجمع ذرات رسوبی تا ۶۰ درصد بدون اثر منفی بر ویژگی‌های جریان می‌شود (Qin et al., 2022). در باره تفاوت بین پروفایل‌های سرعت در نمونه‌های مختلف، با توجه به اینکه نمونه ایرانی پرسی زالوان کاملاً شبیه نمونه خارجی یورودریپ در هر دو آبدی است بنابراین شباهت آن‌ها قابل انتظار بود. حداکثر میزان سرعت جریان در نمونه‌های با آبدی ۲۴ لیتر در ساعت از این دو نشان تجاری به ترتیب ۲/۸۳ و ۲/۶۷ متر در ساعت برای یورودریپ و پرسی زالوان بود. برای همین نشان‌های تجاری و در مقایسه با آبدی ۲۴ لیتر در ساعت، مقادیر سرعت در آبدی ۸ لیتر در ساعت کمتر و به ترتیب برابر با ۲/۰۶ و ۲/۲۶ متر بر ساعت بود. برای نشان تجاری نتافیم، شکل و مجرای ماریچ در آبدی پایین و بالا کاملاً با یکدیگر متفاوت بود. بنابراین، توزیع سرعت نیز کاملاً متفاوت بود. در نمونه ۸ لیتر در ساعت، حداکثر سرعت در برخی مقاطع تا ۲/۳۵ متر بر ساعت نیز رسید. در حالی که برای آبدی ۲۵ لیتر در ساعت حداکثر سرعت برابر با ۱/۶۹ متر در هر ساعت بود. در واقع، برای نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت، سرعت پایین‌تر جریان در مقایسه با دیگر نمونه‌ها در هر دو آبدی به دلیل افقی بودن مجرای

ذرات درون سیال (آب) است به گونه‌ای که برای شوری‌های ۵ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر این کسر به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱۴۸ و ۰/۰۰۳۳۳ بود.

حل همزمان معادلات به صورت دستی کاری بسیار سخت و زمان‌بر است و برای ساده‌سازی باید از فرض‌های ساده‌شونده استفاده کنیم که دقت کار را پایین می‌آورد. نرم افزار COMSOL با گسسته‌سازی، این معادلات را به معادلات جبری تبدیل می‌کند و پس از آن با روش المان‌های محدود به حل معادلات می‌پردازد. نکته قابل توجه در این خصوص مسئله وابستگی به زمان است. در واقع با توجه به اینکه فرآیند رسوب‌گذاری در قطره‌چکان‌ها با گذشت زمان تکرار می‌شود نیاز بود تا مسائل به صورت وابسته به زمان حل شوند. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با واقعیت، علاوه بر تصویربرداری از مجرای عبور آب در قطره‌چکان‌های مختلف و مقایسه تصاویر واقعی تجمع رسوب با شبیه‌سازی شده نسبت به اندازه‌گیری جرم واقعی رسوب نیز اقدام گردید. بنابراین، ابتدا مجرای ماریچ سه عدد قطره‌چکان از هر نوع با ترازوی دقیق وزن گردید. پس از آن، قطره‌چکان‌ها با کمک اسید سولفوریک و سرکه کاملاً شسته و خشک گردید و مجدداً وزن گردید و مقادیر واقعی رسوب از اختلاف این دو وزن به دست آمد. مقادیر جرم رسوب شبیه‌سازی شده نیز از معادله چگالی محاسبه گردید.

نتایج و بحث

توزیع سرعت و فشار در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌ها

شکل (۲) تغییرات سرعت جریان و خطوط جریان را در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌های مختلف در شرایط کاربرد شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر و فشار ۰/۵ بار به عنوان نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود دندان‌ها در ساختار دوزنقه‌ای شکل در تمام نمونه‌ها باعث افزایش سرعت جریان و مانع از رسوب ذرات جامد می‌شود. با این حال، در گوشه‌ها سرعت جریان تقریباً صفر هستند و

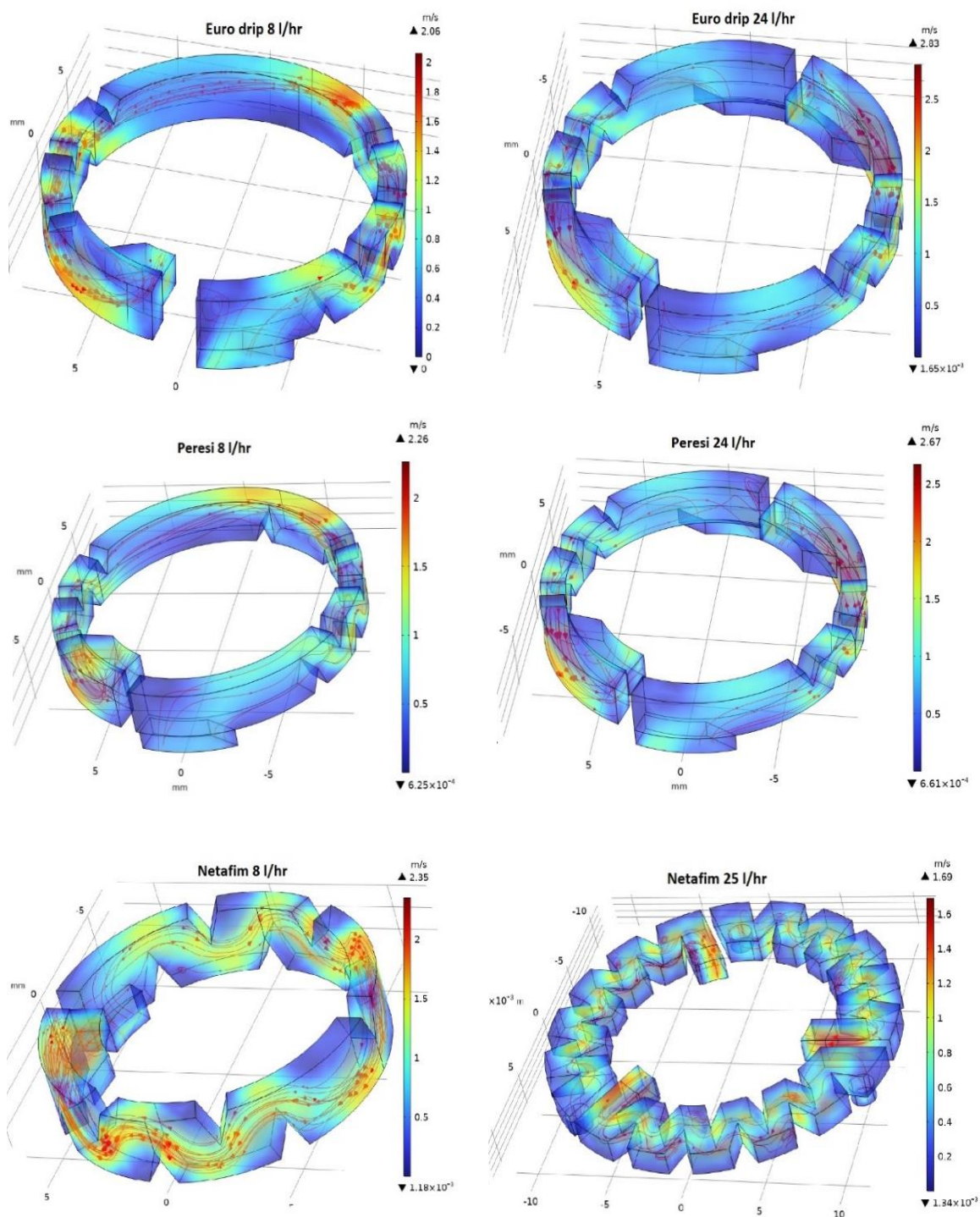
در مسیر کوتاهی رخ داده است. با این حال، میزان فشار مستهلک شده پس از آخرین دندانه و تا پیش از مجرای خروج در نمونه‌های مختلف متفاوت است. برای قطره‌چکان‌های یورودریپ و پرسی زالوان در آبدهی ۸ لیتر در ساعت، ۸۷ درصد فشار توسط دندانه‌ها مستهلک شده است. میزان استهلاک توسط دندانه‌ها در نمونه‌های ۲۴ لیتر در ساعت کمتر و برابر با ۵۸ درصد است. علاوه بر این، میزان استهلاک فشار توسط دندانه‌ها در قطره‌چکان‌های نتافیم ۸ و ۲۵ لیتر در ساعت به ترتیب ۷۱ و ۵۷ درصد است. تعداد دندانه‌ها، فاصله آن‌ها از یکدیگر و طول مسیر جریان از جمله دلایل تفاوت بین توانایی قطره‌چکان‌ها در مستهلک کردن فشار است. دژوانگ و همکاران (Dazhuang et al., 2007) می‌گویند کاهش مقادیر فشار در طول مسیر مجرای ماریچج نتیجه مستقیم مستهلک شدن انرژی جریان در اثر نوع ساختار ماریچج در قطره‌چکان‌های مختلف است.

این پژوهشگران همچنین نشان دادند که شکل و ساختار دندانه‌ها از نظر ارتفاع دندانه، فاصله آن‌ها از یکدیگر (عرض مسیر جریان) و زاویه آن‌ها بر مکانیزم استهلاک انرژی و فشار در طول مسیر اثر گذار است و نحوه توزیع سرعت را نیز متفاوت می‌کند و اگر نسبت ارتفاع دندانه‌ها به عرض جریان یک باشد، بهترین ویژگی‌های هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. لازم است گفته شود برای این پژوهش اگر چه چنین وضعیتی در تمامی نمونه‌ها برقرار بود و نسبت ارتفاع دندانه‌ها به عرض جریان برابر یک بود، اما بزرگ‌ترین عرض جریان و به میزان ۲ میلی متر مربوط به نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت بود. بنابراین، مقادیر حداکثر سرعت برای این نمونه بسیار کمتر از دیگر قطره‌چکان‌ها است. در خصوص اثر تغییرات فشار و توانایی مجراهای مختلف در مستهلک کردن فشار، اگر چه شکل‌های مرتبط با آن در اینجا ارائه نشده است اما برای یک نوع مجرای خاص، میزان فشار مستهلک شده در هر سه فشار آب ۰/۵ بار به ۱/۵ و سپس ۲/۵ بار با یکدیگر برابر است.

ماریچج بود. دلیل این امر نیز پهن بودن عرض مجرای جریان است که منجر به بزرگ‌تر شدن مقطع عبور آب و در نتیجه کاهش سرعت جریان می‌شود. مشابه با نتایج این پژوهش، اوآریچی و همکاران (Ouarriche et al., 2023) نشان دادند که در مجرای دوزنقه‌ای قطره‌چکان تنظیم کننده فشار، میزان سرعت پس از عبور از روی دندانه‌ها و در پایین دست به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و در مقابل میزان سرعت به طور قابل توجهی در ناحیه گردابی کاهش می‌یابد و نهایتاً در محل گوشه‌ها یا همان ناحیه مرگ به صفر می‌رسد. به عبارتی، ذرات از جریان غالبی که با خروج سیال شکل گرفته است پیروی نمی‌کنند و در مناطق چرخشی یا مرده به دام می‌افتند. این پدیده که باعث گرفتگی قطره‌چکان‌ها می‌شود به دلیل قرارگیری ذرات درون سیال تحت نیروهای اینرسی عرضی حاصل از شتاب آن‌هاست (Yu et al., 2018). این نیروهای اینرسی مسئول انحراف تدریجی ذرات هستند که آن‌ها را به مناطق چرخشی و مرده هدایت می‌کند. علاوه بر تأثیر اینرسی، تعاملات هیدرودینامیکی بین ذرات به تشکیل کلونیدها در مناطق مرده کمک می‌کند که منجر به باریک شدن کانال جریان می‌شود. همه این عوامل تأیید می‌کنند که مناطق گردابی و سرعت پایین، اصلی‌ترین دلایل گرفتگی قطره‌چکان هستند (Ouarriche et al., 2023).

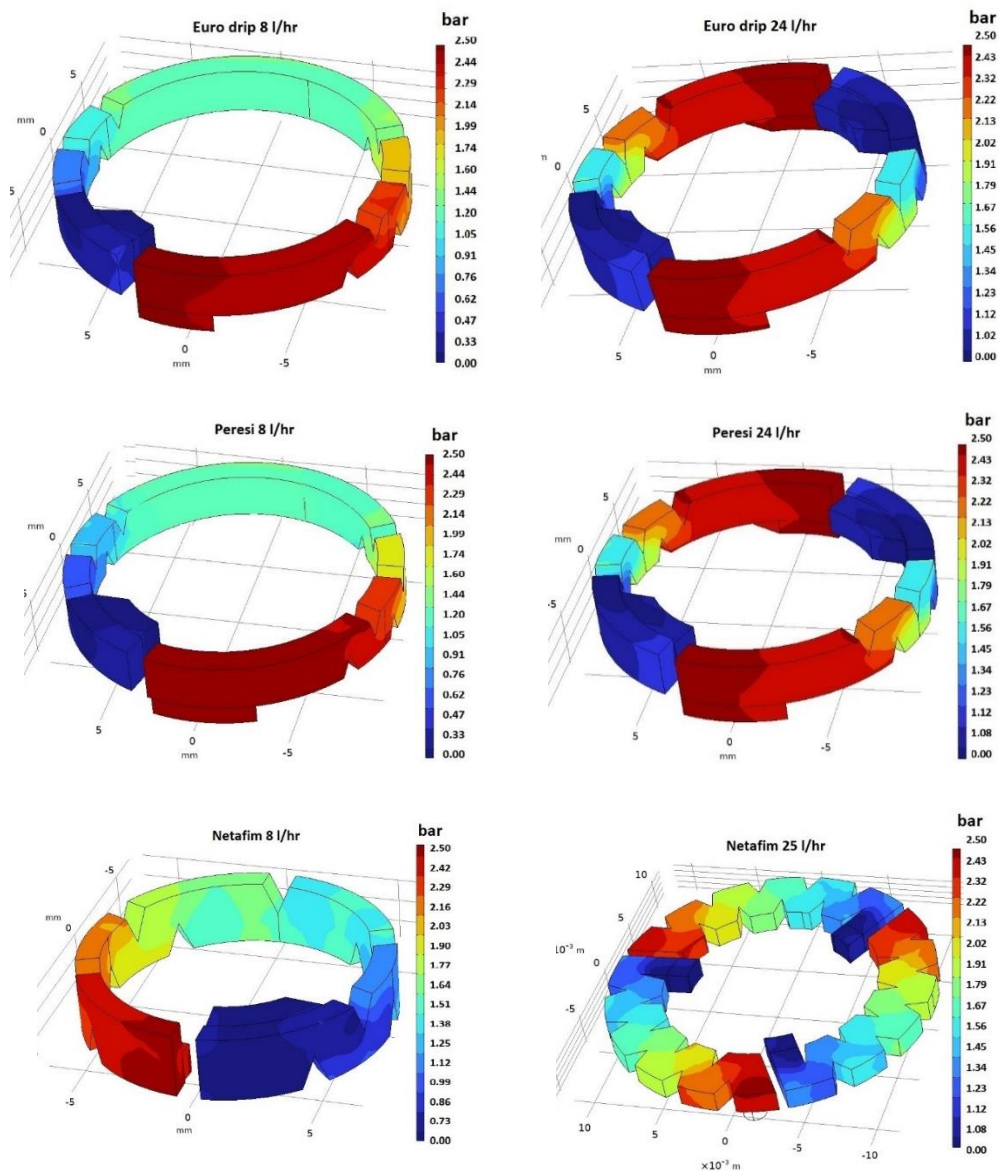
شکل (۳) چگونگی استهلاک فشار ۲/۵ بار را در مجرای ماریچج قطره‌چکان‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فشار جریان پس از ورود به مجرا و با رسیدن به هر یک از دندانه‌ها مستهلک می‌شود و کاهش می‌یابد و در نهایت در محل خروج به صفر یا همان فشار اتمسفر می‌رسد. مقایسه مجراهای مختلف نیز نشان دهنده استهلاک فشار در محل دندانه‌ها یا به اصطلاح همان ساختار ماریچج است. برای مثال، در نمونه ۸ لیتر در ساعت یورودریپ که در بخش قابل توجهی از آن دندانه‌ای وجود ندارد، فشاری نیز مستهلک نشده است. در مقابل، اما در نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت، به دلیل تعداد زیاد دندانه‌ها استهلاک فشار قابل توجه ۲/۵ بار

مطالعه جریان و رسوب در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار ...



شکل ۲- نتایج شبیه سازی شده توزیع سرعت جریان و خطوط جریان در مجرای ماریچ قطره‌چکان‌های مختلف با نرم افزار COMSOL.

Fig. 2- Simulated flow velocity distribution and streamlines in the labyrinth channel of different emitters using COMSOL software.



شکل ۳- نتایج شبیه سازی شده استهلاک فشار ۲/۵ بار در مجرای مارپیچ قطره‌چکان‌های مختلف توسط نرم افزار COMSOL

Fig. 3- Simulated results of 2.5 bar pressure dissipation in the labyrinth channel of different emitters using COMSOL software.

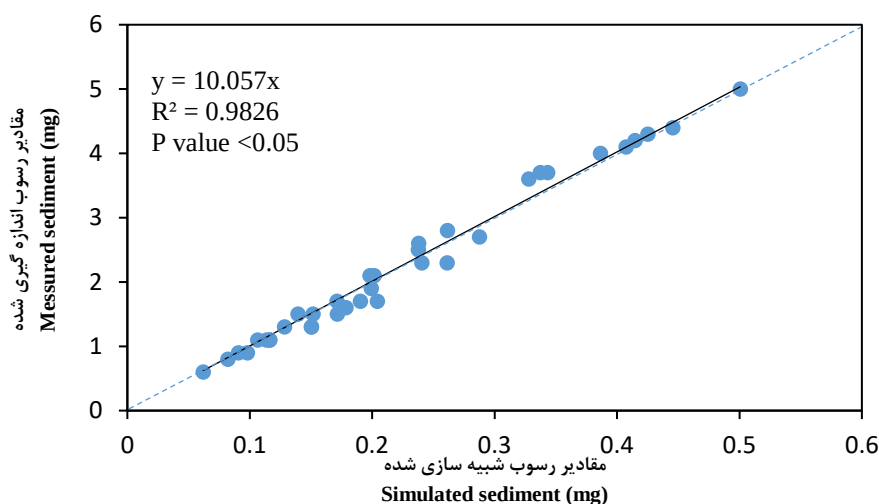
شبیه سازی میزان رسوب در قطره‌چکان‌ها

است. شیب معادله از نظر آماری معنی دار است و تطابق آن با خط یک به یک نشان می‌دهد مقادیر رسوب با دقت بالا پیش بینی شده‌اند. به‌رغم دقت بالای مدل در پیش بینی میزان تغییرات رسوب در قطره‌چکان‌های مختلف منطبق با این تغییرات در واقعیت، کم برآورد قابل توجهی (۱۰ برابر) توسط مدل در شبیه سازی جرم رسوبات مشاهده شد. دلیل این تفاوت فاحش را می‌توان مربوط به مسئله تجمع رسوبات در طول زمان در واقعیت دانست. به عبارتی این قطره‌چکان‌ها

شکل (۴) نتایج مقایسه میزان رسوب واقعی و شبیه سازی شده در مجرای مارپیچ قطره‌چکان‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس، تطابق بالایی بین مقادیر رسوب شبیه سازی شده و اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود و میزان پراکندگی نیز بسیار پایین است ($R^2=0.983$). علاوه بر این، بررسی شیب و عرض از مبدا معادله برازشی نشان می‌دهد که عرض از مبدا از نظر آماری معنی داری نیست و قابل حذف شدن

برای کمک به طراحی قطره چکان های با مجاری ماریچ باشد و با کاهش تعداد قالب های آزمایشی، هزینه تولید قطره چکان ها کاهش می یابد. در تحلیلی بر اندازه کوچک و ساختار پیچیده کانال های ماریچی سه نوع قطره چکان با ساختارهای متفاوت، شامل مثلثی، مستطیلی و دوزنقه ای توسط وی و همکاران (Wei et al., 2006) این گونه بیان گردید که داده های شبیه سازی شده کانال های ماریچی به طور دقیق با داده های تجربی مطابقت دارند.

بیش از یک سال و طی ۶۵ رویداد آبیاری با فاصله یک هفته ای در شرایط آزمایشی قرار داشتند (Parvizi et al., 2025). بنابراین، میزان رسوبات طی رویدادهای مختلف آبیاری روی یکدیگر انباشته شده است، در حالی که نتایج شبیه سازی ها مربوط به یک بار شبیه سازی و مستقل از زمان است. دلغندی و همکاران (Delghandi et al., 2010) نشان دادند که داده های به دست آمده از شبیه سازی به وسیله CFD مطابقت بسیار خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد و دینامیک سیالات محاسباتی می تواند ابزار بسیار مناسبی



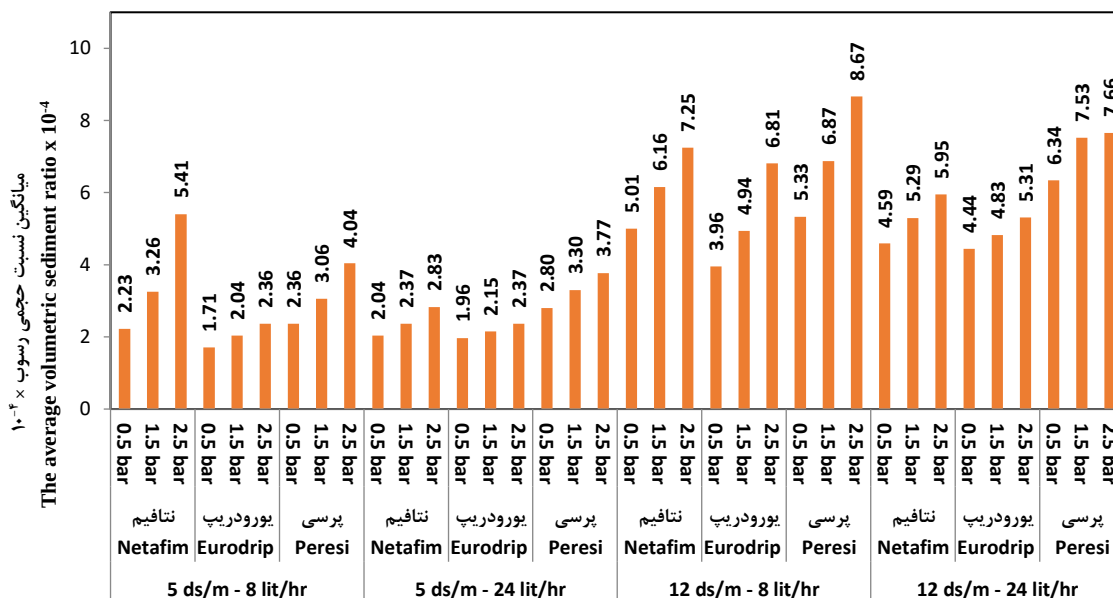
شکل ۴- مقایسه میزان رسوب اندازه گیری و شبیه سازی شده توسط نرم افزار COMSOL در مجرای ماریچ قطرچکان ها.

Fig. 4- Comparison of the measured and simulated sediment values using COMSOL software in the labyrinth channel of emitters.

در ساعت، مدل های یورودریپ، پرسی زالوان و نتافیم به ترتیب مقادیر کمتری از نسبت حجمی رسوب را داشته اند و بنابراین ریسک گرفتگی در مدل یورودریپ کمتر است. بطور کلی و بر اساس شکل، در آبدی بالا قطره چکان های پرسی بیشترین میزان نسبت رسوب را در حجم سیال نشان داده اند. در حالی که نتافیم دارای حداقل مقادیر نسبت حجمی رسوب بود. نتایج تحقیقات ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) نشان می دهد توانایی ضد گرفتگی قطره چکان به ساختار، جنس و فناوری پردازش آن بستگی دارد و عوامل خارجی مانند تفاوت در کیفیت آب اثر یکسانی بر انواع قطره چکان دارند. بنابراین، در تطابق با این یافته می توان دلیل نتایج این پژوهش را با توجه به تفاوت

با توجه به دقت بالای شبیه سازی ها، می توان نتایج حاصل از آن را به منظور مقایسه اثر تیمارهای مختلف بر میزان رسوب در قطره چکان های مختلف به کاربرد. شکل (۵) مقادیر میانگین نسبت حجمی رسوب شبیه سازی شده توسط نرم افزار COMSOL در مجراهای ماریچ قطرچکان های مختلف در شرایط متفاوت را نشان می دهد. بر این اساس و برای تمامی نمونه ها و در هر دو شوری، با افزایش فشار آب ورودی از ۰/۵ تا ۲/۵ بار نسبت حجمی رسوب در حجم سیال به طور متوسط بیش از ۵۰ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، افزایش شوری از ۵ به ۱۲ دسی زیمنس بر متر نیز منجر به افزایش ۱۱۴ درصد نسبت حجمی رسوب به طور میانگین گردید. نتایج همچنین نشان داد که در بین نمونه های ۸ لیتر

ساختار قطره‌چکان پرسی و نتافیم بررسی کرد. نتایج جنبشی بینجامد، این افزایش انرژی از تجمع ذرات رسوبی و پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد اگر بهینه سازی ساختار ورود آب به گونه ای باشد که به افزایش سرعت و انرژی گرفتگی را کاهش می‌دهد (Yang et al., 2024).



شکل ۵- مقادیر میانگین نسبت حجمی رسوب شبیه سازی شده توسط نرم افزار COMSOL در مجراهای مارپیچ قطره‌چکان‌های مختلف.
Fig. 5- The average volumetric sediment ratio simulated using COMSOL software in Labyrinth Channels of various emitters.

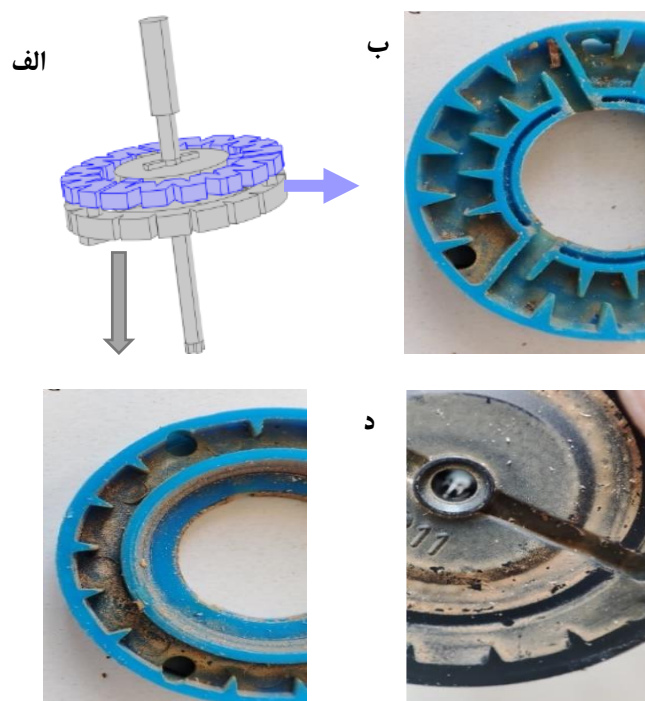
در مورد نشان تجاری پرسی، پرویزی و همکاران (Parvizi et al., 2025) نشان دادند که ساختار ورودی در نشان تجاری پرسی، نسبت به یورودریپ و نتافیم، سطح مقطع بیشتری دارد و بنابراین ورود جریان به آن با سرعت کمتری رخ خواهد داد و ریسک ته نشینی ذرات و در نتیجه گرفتگی آن افزایش می‌یابد.

در خصوص قطره‌چکان نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت، مجرای مارپیچ به گونه ای بود که ناحیه ته نشینی در زیر آن و پیش از ورود آب به مجرای مارپیچ اصلی وجود دارد. بنابراین مقادیر قابل توجهی از ذرات معلق موجود در سیال در این ناحیه ته نشین می‌شوند و به مجرای مارپیچ اصلی و ثانویه وارد نمی‌شوند. شکل (۶) ساختار ناحیه ته نشینی اولیه و تجمع رسوبات در این ناحیه را در این نوع قطره‌چکان نشان می‌دهد. در تطابق با این نتایج، وی و همکاران (Wei et al., 2008) در مقایسه توانایی سه قطره‌چکان مختلف در مواجهه با گرفتگی به این نتیجه رسیدند که قطره‌چکانی که دارای

مطالعه جریان و رسوب در مجرای مارپیچ قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار ...

مطرح شود این است که افزایش تعداد خروجی‌ها بر کاهش فشار و جریان اثر منفی ندارد، زیرا در محل خروج جریان همواره فشار با فشار اتمسفر برابر است، علاوه بر این حتی در صورت کاهش فشار به دلیل تعدد مجراها، در قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار میزان فشار ورودی توسط دیافراگم ارتجاعی پیش از ورود به مجرای مارپیچ همواره تنظیم و ثابت باقی می‌ماند.

مورد نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت مربوط به تعداد خروجی‌هاست که دارای سه خروجی جریان (مجرای مارپیچ سه تکه) در مقایسه با یورودیپ و پرسی با دو خروجی است. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که افزایش تعداد خروجی‌ها می‌تواند زمان ماندگاری ذرات جامد درون سیستم را در یک آبدهی مشخص به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و از این طریق از ته نشینی و در نتیجه از انسداد مجرا جلوگیری کند (Kasa & Ramachandru, 2023). نکته‌ای که در اینجا لازم است



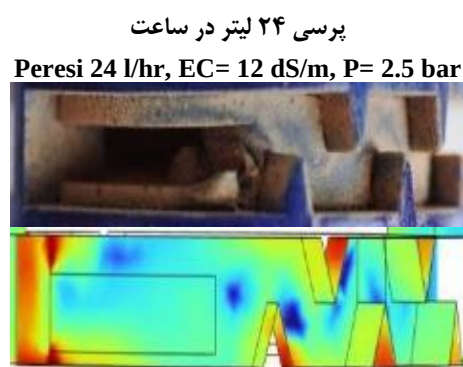
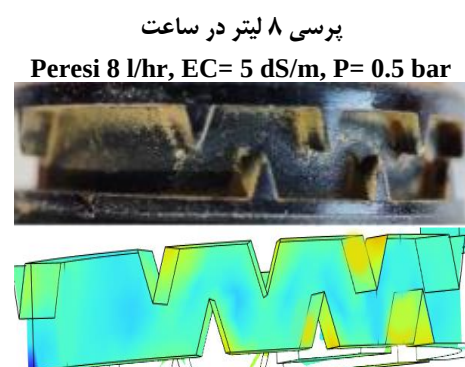
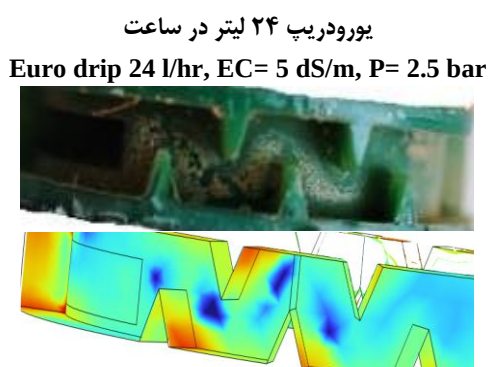
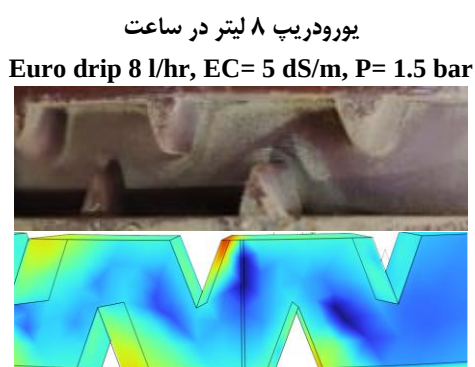
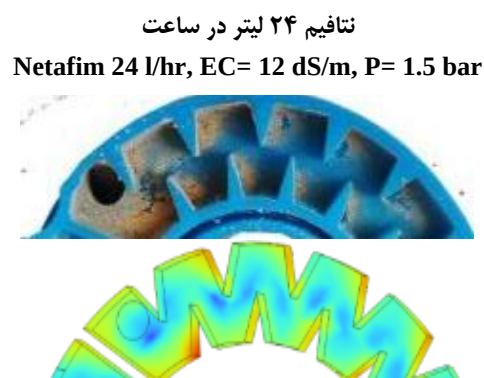
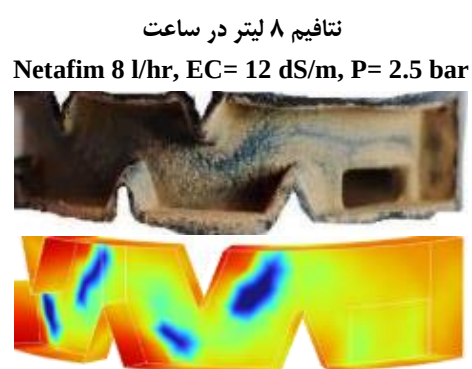
شکل ۶- ساختار نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت (الف) شامل ناحیه ته نشینی (ج) در زیر ناحیه مارپیچ (ب) و رسوب ذرات در زیر این ناحیه (د).

Fig. 6 - The structure of the Netafim 25 L/h emitter includes a settling zone (bottom left) located below the labyrinth zone (top right), with particle deposition occurring beneath this area (bottom right).

بطور کلی و مطابق انتظار، مقادیر رسوب بیشتر در و همکاران (Parvizi et al., 2025) که مربوط به همین قطره‌چکان‌هاست، نشان داد کاربرد فشارهای بالا منجر به افزایش ورود ذرات به درون مجراهای مارپیچ می‌شود و خطر انسداد را افزایش می‌دهد. لی و همکاران (Li et al., 2024) می‌گویند افزایش فشار کاری در محدوده‌ای مشخص می‌تواند عملکرد ضد گرفتگی قطره‌چکان پلاک‌دار با مجرای ستاره‌ای را بهبود بخشد. اما این فشار کاری نباید از فشار کارکرد معمول برای این نوع قطره‌چکان‌ها که حدود ۱ بار است، بیشتر باشد. فشار کارکرد قطره‌چکان‌های مورد بررسی در

پژوهش حاضر بین ۰/۵ تا ۴ بار است، اما مقایسه نتایج مدلسازی با پژوهش ذکر شده نشان می‌دهد افزایش فشار آب ورودی تا ۱/۵ بار منجر به افزایش ۲۰ درصد در میانگین حجم رسوبات می‌شود و افزایش این فشار تا ۲/۵ بار میانگین حجم رسوبات را تا ۴۶ درصد افزایش می‌دهد. شکل (۷) نتایج مربوط به شبیه‌سازی رسوب ذرات با روش CFD و

مقایسه آن با تصاویر واقعی در مجرای مارپیچ برخی از قطره‌چکان‌ها را نشان می‌دهد. این مجراها مهمترین بخش از قطره‌چکان‌ها می‌باشند و عبور آب از آن‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین گرفتگی قطره‌چکان‌ها نیز معمولاً به دلیل رسوب ذرات در این مجراها رخ می‌دهد.



شکل ۷- میزان رسوب در مجرای مارپیچ در حالت شبیه‌سازی شده (چپ) و واقعی حاصل از تخریب قطره‌چکان‌های مختلف (راست) در شرایط متفاوت آزمایش. مقیاس رنگ‌ها برای نتایج شبیه‌سازی متفاوت هستند و نمی‌توان از آن برای مقایسه قطره‌چکان‌ها با یکدیگر استفاده کرد.

Fig. 7- The amounts of sediment deposition in the labyrinth channel in the simulated state (left) and the actual state resulting from the deterioration of various emitters (right) under different experimental conditions. The color scales for the simulation results differ and cannot be used to compare emitters with each other.

نتیجه‌گیری

خطر رسوب‌گذاری را افزایش می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد برای کاهش ریسک گرفتگی، از قطره‌چکان‌هایی استفاده شود که دارای گوشه‌های اصلاح شده به شکل منحنی، به جای تیز، هستند. بهبود و اصلاح ساختارهای گوشه‌ای تیز می‌تواند توسط سازندگان مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر، استهلاک فشار در قطره‌چکان‌های دارای دندانه‌های متعدد بهتر پیش می‌رود و احتمالاً عملکرد آن‌ها در برابر گرفتگی مطلوب‌تر است. به علاوه، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از CFD، بررسی مدیریت‌های مختلف فشار جریان و شوری در سامانه‌های آبیاری تحت فشار با سرعت و هزینه پایین امکان‌پذیر است و CFD می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای مدلسازی جریان سیال و طراحی بهینه قطره‌چکان‌های جدید که منجر به کاهش خطر انسداد و در نتیجه بهبود عملکرد آن‌ها در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌شود، استفاده شود و به کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و تولید کمک کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای پژوهش‌های آینده برای بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در شرایط متنوع محیطی باشد.

در این پژوهش، تغییرات رسوب شبیه‌سازی شده توسط مدل و رسوب واقعی در قطره‌چکان‌های مختلف تطابق بالایی را نشان داد، اما مدل در تخمین نتایج واقعی دارای کم‌برآورد قابل توجه و به میزان ده برابر کمتر بود که ناشی از تجمع رسوبات طی زمان در واقعیت است. مشاهده شد که قطره‌چکان‌هایی که دارای ناحیه ته‌نشینی اولیه هستند، عملکرد ضدگرفتگی بهتری دارند زیرا بخش قابل توجهی از ذرات معلق پیش از ورود به مجرای ماریچ ته‌نشین می‌شوند. افزایش تعداد خروجی‌های جریان منجر به کاهش زمان ماند ذرات درون مجرا و کاهش خطر گرفتگی می‌شود. به طور کلی شوری بالاتر و افزایش فشار جریان ورودی موجب افزایش تجمع رسوبات می‌شود که می‌تواند ریسک گرفتگی را افزایش دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که هندسه مجرای ماریچ قطره‌چکان‌ها تأثیری مستقیم بر الگوی جریان و گرفتگی دارد. دندانه‌های مجرای ماریچ موجب افزایش سرعت و کاهش تجمع رسوبات می‌شوند، اما در گوشه‌ها و مناطق گردابی سرعت جریان کاهش می‌یابد که این موضوع

منابع

- Baghel, Y. K., Kumar, J., & Patel, V. K. (2021). CFD analysis of the flow characteristics of in-line drip emitter with different labyrinth channels. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 102, 111-119.
- Camargo, A. P. D., Muniz, G. L., Cano, N. D., Ait-Mouheb, N., Tomas, S., Pereira, D.J.D.S., Lavanholi, R., Frizzzone, J.A. and Molle, B. (2020). Applications of computational fluid dynamics in irrigation engineering. *Revista Ciência Agronômica*, 51(spe), e20207700.
- Celik, H. K., Karayel, D., Caglayan, N., Rennie, A. E., & Akinci, I. (2011). Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: case study for a sample in-line drip emitter: the paper is to study CFD and RP application samples on the design issues associated with agricultural irrigation equipment. *Virtual and Physical Prototyping*, 6(1), 47-56.
- Dazhuang, Y., Peiling, Y., Shumei, R., Yunkai, L., & Tingwu, X. (2007). Numerical study on flow property in dentate path of drip emitters. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50(5), 705-712.
- Delghandi, M., Behzad, M. and Broomandnasab, S. (2010). Analysis of hydraulic flow characteristics in small emitter channels by using FLUENT software. *Water and Soil*, 24(4), -. doi: 0.22067/jsw.v0i0.3891(in Persian)

- Delghandi, M., Saghi, H., & Broomandnasab, S. (2013). Performance computational fluid dynamics software tools in determination emitters outflow. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 6(4), 245-253 (in Persian).
- De Marchis, M., Bruno, F., Saccone, D., & Napoli, E. (2025). Performance of Emitters in Drip Irrigation Systems Using Computational Fluid Dynamic Analysis. *Water*, 17(5), 689.
- Demir, V., Yürdem, H., Yazgı, A., & Günhan, T. (2020). Determination of the hydraulic properties of a flat type drip emitter using computational fluid dynamics. *Journal of Agricultural Sciences*, 26(2), 226-235.
- Fan, J., Jiajie, O., Yijun, W., & Zhongmin, X. (2014). Research Article Emitter Design and Numerical Simulation Based on the Extenics Theory. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 6(5), 568-573.
- Kasa, R. R., & Ramachandrula, V. R. (2023). Hydraulic and Anti-clogging Performance Evaluation of a Novel Cylindrical Drip Emitter using CFD Techniques. *CVR Journal of Science and Technology*, 24(1), 1-6.
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion* (pp. 96-116). Pergamon.
- Li G.Y., Wang G.D., Alam M., Zhao Y.F. 2006. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance. *ASAE*. 49(3): 637-643.
- Li, Y., Feng, X., Han, X., Sun, Y., & Li, H. (2024). Analysis of anti-clogging performance and particle transport characteristics of a stellate irrigation emitter. *Biosystems Engineering*, 242, 50-66.
- Qin, C., Zhang, J., Wang, Z., Lyu, D., Liu, N., Xing, S., & Wang, F. (2022). Anti-Clogging Performance Optimization for Shunt-Hedging Drip Irrigation Emitters Based on Water–Sand Motion Characteristics. *Water*, 14(23), 3901.
- Ouarriche, H., El Bouhali, M., Bouisfi, F., Bouziane, A., Zouine, A., Assoudi, R., & Chaoui, M. (2023). Numerical simulation of clogging of two types of emitters with similar properties. *World Water Policy*, 9(4), 729-736.
- Parvizi, H., Hatami, H., Parnian, A., Rahimian, M. H. and Beyrami, H. (2025). Effect of Increasing Operating Pressure and Water Salinity on the Performance of Some Common Pressure Compensating Emitters. *Journal of Water Research in Agriculture*, 38(4), 375-395. doi: 10.22092/jwra.2024.366784.1052
- Seo, B. H., Lee, S., Lee, J. H., Kim, D. S., Seo, Y. J., Kim, D. W., & Choi, W. (2024). Efficient two-way fluid–structure interaction simulation for performance prediction of pressure-compensating emitter. *Biosystems Engineering*, 244, 53-66.
- Wei, Q., Shi, Y., Dong, W., Lu, G., & Huang, S. (2006). Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. *Agricultural Water Management*, 84(1-2), 130-136.
- Wei, Q. S., Gang, L., Jie, L., Yusheng, S., Wenchu, D., & Shuhuai, H. (2008). Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 294-303.
- Wei, Z., Cao, M., Liu, X., Tang, Y., & Lu, B. (2012). Flow behavior analysis and experimental investigation for emitter micro-channels. *Chinese journal of mechanical engineering*, 25(4), 729-737.
- Yang, B., Wang, J., Zhang, Y., Wang, H., Ma, X., & Mo, Y. (2020). Anti-clogging performance optimization for dentiform labyrinth emitters. *Irrigation Science*, 38, 275-285.
- Yang, B., Wang, F., Wang, J., Wang, C., & Qiu, X. (2024). Numerical simulation and optimization of the inlet structure of dentiform emitters in drip-irrigation systems. *Biosystems Engineering*, 246, 183-190.

- Yu, L., Li, N., Long, J., Liu, X., & Yang, Q. (2018). The mechanism of emitter clogging analyzed by CFD–DEM simulation and PTV experiment. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(1), 1687814017743025.
- Zhang, W., Wang, Z., Cheng, S., Dong, A., Zhang, E., & Niu, W. (2022). Anti-clogging ability of the labyrinth emitter and its evaluation method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(6), 80-90.

Research Article

Comparison of In-situ ‘Cylindrical Chamber’ Test Results with British Standard Method and Case Study on the Permeability of the Water Supply Canal

Ali Saberi Varzaneh^{✉1}, Mahmood Naderi²

1. Postdoc researcher, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Professor, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(✉) Corresponding Author: ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFO	HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Received: 3 June 2025	Saberi Varzaneh, A., Naderi, M., (2025). Comparison of In-situ ‘Cylindrical Chamber’ Test Results with British Standard Method and Case Study on the Permeability of the Water Supply Canal. V.26, No.99, P: 95-110
Revised: 20 September 2025	https://doi.org/10.22092/idser.2025.369716.1623
Accepted: 26 September 2025	
Available Online: 18 October 2025	

Extended Abstract

Introduction

This study aimed to evaluate the permeability of a water supply canal and to quantify water losses arising from the inefficiency of the concrete lining. The “cylindrical chamber” test was proposed and implemented as an in-situ, non-destructive method. A total of 54 concrete specimens—27 water-cured and 27 cured under ambient conditions—were tested using the cylindrical chamber method under a constant pressure of 5 bar for 5 hours. To validate the results, the BS EN 12390-8 standard test was also performed on the same specimens, and regression analysis was conducted between the two methods. The results showed a correlation coefficient of 0.98, indicating high accuracy of the in-situ test. For field applications, direct measurement of penetration depth is impractical, as it is inherently destructive and requires core extraction from the structural element. To overcome this limitation, one of the key advantages of the cylindrical chamber method was employed—its ability to measure the total volume of water infiltrating the concrete surface over a fixed time under a constant hydraulic head. Statistical analysis of the differences between this study and reference data, using mean absolute percentage error (MAPE) and linear correlation coefficient (R^2), showed that the mean infiltration volume differed by less than 10%, with $R^2 = 0.97$. These results confirm the low deviation and strong correlation, indicating the accuracy and reliability of the cylindrical chamber test for classifying concrete permeability. In-situ measurements at 11 selected points along the Varzaneh city water supply canal revealed infiltration volumes exceeding 25 mL at all locations, falling within the high-permeability range and signifying substantial water losses. Mercury intrusion porosimetry and SEM imaging further showed that the absence of curing increased porosity and total pore volume by 7% and 69.4%, respectively.

Methodology

The cylindrical chamber method is a precise and versatile technique for quantifying the permeability of concrete and similar construction materials under laboratory or field conditions. The testing procedure comprised the following steps:

1. **Surface preparation:** The concrete surface was dried to a constant mass, and all surface contaminants were removed to ensure proper adhesion.
2. **Fixture installation:** A steel annular ring was bonded to the prepared concrete surface using epoxy adhesive. After full curing of the adhesive, the cylindrical chamber was mounted securely on the metal fixture.
3. **Water pressurization:** The chamber was filled with de-aired water, and the internal pressure was applied using a calibrated hand-operated lever. The imposed water pressure—**5 bar (0.5 MPa)**—was continuously maintained and monitored via the gauge installed on the apparatus.

4. **Testing duration:** Pressure was sustained for **5 hours** on the exposed concrete surface. This method allows quantification of water infiltration without sample extraction, thereby preserving the structural integrity of the tested element.

Results and Discussion

Selected outcomes of the in-situ cylindrical chamber tests on the Varzaneh canal are summarized in Table 6. While numerous measurements were performed along the entire length of the canal, representative results are reported here to illustrate key trends. The findings confirm that the concrete lining of the Varzaneh water supply canal exhibits very high hydraulic permeability, significantly exceeding recommended thresholds. In the evaluated sections, the infiltration volumes surpassed 25 mL, classifying them in the high-permeability range per the adopted criteria. Such elevated permeability is directly associated with excessive seepage losses, contributing to increased water demand and reduced delivery efficiency. These observations strongly suggest that the measured reduction in outflow is not the result of unauthorized water extraction along the canal's route. Rather, the dominant factor is the inadequate impermeability of the concrete lining, which permits substantial leakage through the canal body.

Conclusions

The proposed cylindrical chamber method showed a strong linear correlation ($R^2 = 0.98$) with the British standard, enabling accurate in-situ permeability measurement without core extraction. Field tests on the Varzaneh water channel indicated predominantly high permeability (>25 mL), causing considerable water loss despite adequate inflow. An inverse relationship between compressive strength and water penetration depth was observed, with curing greatly reducing porosity and total pore volume. The method eliminates destructive testing, though its applicability should be validated under different climates, materials, and structural conditions.

Keywords: Permeability, flow reduction, concrete, in-situ test.



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369716.1623>

نوع مقاله: پژوهشی

مقایسه نتایج آزمون درجای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی

علی صابری ورزنه^۱، محمود نادری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی نفوذپذیری یک کانال آبرسانی و شناسایی میزان تلفات آب ناشی از ناکارایی بتن بدنه به اجرا در آمده است. آزمون "محفظه استوانه‌ای" نیز به صورت درجا و غیرمخرب پیشنهاد و اجرا شده است. در مجموع ۵۴ نمونه بتنی شامل ۲۷ نمونه عمل‌آوری شده در آب و ۲۷ نمونه عمل‌آوری شده در شرایط محیطی، تحت آزمون "محفظه استوانه‌ای" با فشار ثابت ۵ بار به مدت ۵ ساعت قرار گرفتند. برای صحت‌سنجی نتایج، آزمون استاندارد BS EN 12390-8 نیز روی همان نمونه‌ها و تحلیل رگرسیونی دو روش اجرا شد. نتایج تحقیق نشان داد ضریب همبستگی بین دو روش برابر ۰/۹۸ است که نشان از دقت مناسب نتایج آزمون درجا. برای کاربردهای میدانی، اندازه‌گیری مستقیم عمق نفوذ امکان‌پذیر نیست، زیرا اندازه‌گیری مستقیم ذاتاً روشی است مخرب و نیازمند مغزه‌گیری از عضو سازه‌ای است. به منظور رفع این محدودیت، از یکی از مزایای کلیدی روش محفظه استوانه‌ای استفاده شد: قابلیت اندازه‌گیری حجم کل آب نفوذ کرده به سطح بتن در بازه زمانی مشخص تحت هد هیدرولیکی ثابت. تحلیل آماری اختلاف نتایج با استفاده از شاخص‌های میانگین درصد خطا و ضریب همبستگی خطی نشان داد که اختلاف میانگین حجم نفوذ بین آنچه از این مطالعه به دست آمده است و داده‌های مرجع کمتر از ۱۰ درصد است و ضریب همبستگی معادل ۰/۹۷ به دست آمد. این نتایج اختلاف کم و همبستگی بالای داده‌ها را تأیید می‌کند و بیانگر دقت و اعتبار روش آزمون محفظه استوانه‌ای در تعیین رده‌بندی نفوذپذیری بتن است. اندازه‌گیری درجا روی ۱۱ نقطه منتخب از کانال آب شهر ورزنه نشان داد که نفوذپذیری در تمام نقاط بیش از ۲۵ میلی‌لیتر است و در محدوده نفوذپذیری بالا قرار دارد. این مقادیر بیانگر هدررفت قابل توجه آب است. با آزمون جیوه و عکسبرداری SEM مشاهده شد که عمل‌آوری نشدن باعث افزایش تخلخل و حجم کلی منافذ موجود در بتن به ترتیب برابر ۷ و ۶۹/۴ درصد است.

واژه‌های کلیدی: نفوذپذیری، کاهش دبی، بتن، آزمون درجا

مقدمه

فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی نامطلوب را فعال کند و نفوذپذیری بتن یکی از پارامترهای کلیدی تعیین‌کننده عملکرد مکانیکی و دوام آن محسوب می‌شود. مسیرهای ورود عوامل تخریب‌زا اغلب به صورت ترک و ریزشکاف‌های موجود در شبکه ماتریس سیمانی شکل می‌گیرد که این امر می‌تواند موجب تغییرات عمقی در ساختار داخلی بتن شود (Yildirim & ÖZHAN, 2023). از دیدگاه مکانیک محیط‌های متخلخل، نفوذپذیری بیانگر حرکت سیال (مایع یا گاز) درون حفره و مجاری بتن تحت اثر گرادیان فشار

^۱ پژوهشگر پسادکتر، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
([✉]نویسنده مسئول: Email: ali.saberi@edu.ikiu.ac.)

^۲ پروفیسور، گروه عمران، دانشکده دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

علاوه بر سنجش عمق نفوذ، قابلیت اندازه‌گیری حجم کل سیال نفوذ کرده به بتن را نیز فراهم می‌سازد (Naderi, & Kaboudan, 2021a). ویژگی شاخص این روش آن است که نمونه نیازی به تخریب یا برش ندارد و آزمون مستقیماً روی سطح سازه یا نمونه موجود در محل اجرا می‌گردد. این سیستم شامل یک محفظه استوانه‌ای آب‌بند است که روی سطح مورد آزمون نصب می‌شود و جریان آب تحت فشار کنترل‌شده در مدت معین به داخل بافت بتن هدایت می‌گردد؛ پس از آن با استفاده از اندازه‌گیری دقیق حجم آب نفوذ کرده به داخل بتن، میزان نفوذپذیری ارزیابی می‌شود. توضیحات فنی و جزییات اجرایی کامل این آزمون در بخش "آزمون‌های آزمایشگاهی" ارائه خواهد شد. مطالعات پیشین که فقط به صورت آزمایشگاهی بوده‌اند نشان داده‌اند که نتایج این آزمون با روش استاندارد برای بتن‌های حاوی افزودنی و فاقد آن دارای ضریب همبستگی حدود ۹۶ درصد هستند که نشان از دقت مناسب آزمون فوق است (Naderi & Kaboudan, 2020). با استفاده از این روش مشخص گردید که استفاده از پوزولان‌ها موجب کاهش محسوس نفوذپذیری در بتن می‌شود (Naderi et al., 2021).

تا پیش از این پژوهش، مطالعه‌ای جامع در خصوص ارزیابی دوام و نفوذپذیری کانال آبرسانی ورزنه صورت نگرفته بود که علت اصلی آن محدودیت تجهیزات میدانی برای سنجش برجا و بدون تخریب بتن بوده است. در این مطالعه، ابتدا نمونه‌های بتنی با سه رده مقاومتی C25، C35 و C45 تهیه شدند. پس از آن نمونه‌ها در دو حالت متمایز عمل‌آوری قرار گرفتند: گروه نخست در حوضچه‌های حاوی آب با کنترل دمایی مشخص برای عمل‌آوری مرطوب، و گروه دوم در محیط آزاد به‌منظور شبیه‌سازی قرارگیری در معرض عوامل جوی طبیعی. از این رو با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نسبت به بررسی عمل‌آوری مناسب بر نفوذپذیری بتن اقدام کرد. به‌منظور تحلیل ساختار داخلی و ویژگی‌های تخلخل، بخشی از نمونه‌ها با استفاده از آزمون نفوذ جیوه ارزیابی شدند. برای بررسی تاثیر عمل‌آوری بر نفوذپذیری

خارجی است. بر اساس تعریف ارائه‌شده توسط «مؤسسه بتن آمریکا»، این ویژگی معیاری از توانایی بتن برای عبور دادن سیال یا گاز در حجم خود به‌شمار می‌آید (ACI, 2018). شرایط محیطی یا دمایی شدید مانند چرخه‌های انجماد و ذوب مکرر (Zeng et al., 2023a)، حمله یون‌های سولفات و کلرید (Zhang et al., 2024a; Zeng et al., 2023b)، اعمال فشارهای هیدرواستاتیکی بالا (Zhang et al., 2024b) و قرارگیری در دماهای بسیار زیاد (Shen et al., 2024) می‌تواند منجر به کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری مصالح شود. اهمیت این شاخص در سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها و مخازن ذخیره آب که تحت فشار داخلی زیاد قرار دارند دوچندان است. در چنین محیط‌هایی، نوسان‌های حرارتی سالیانه می‌تواند موجب افزایش تراکم، تعداد و عرض ترک‌ها و منافذ گردد و به‌دنبال آن نفوذپذیری افزایش و ظرفیت بتن برای تحمل بارهای وارده کاهش یابد (Kou & Poon, 2014).

برای سنجش نفوذپذیری بتن، روش‌های متعددی وجود دارد که از میان آن‌ها می‌توان به اندازه‌گیری عمق نفوذ آب و روش دبی ثابت اشاره کرد. در استانداردهای BS EN 12390-8 و DIN 1048-5، عمق نفوذ به عنوان معیاری کمی برای ارزیابی قابلیت عبور آب از بتن معرفی شده است، در حالی که روش دبی ثابت بیشتر در مورد بتن‌هایی با تراوایی بالا کاربرد دارد (Chandruppa & Biligiri, 2016). اجرای این استانداردها مستلزم استفاده از تجهیزات گوناگون و صرف زمان قابل توجه است که می‌تواند هزینه آزمایش‌ها را افزایش دهد. به علاوه، این روش‌ها عمدتاً محدود به محیط‌های آزمایشگاهی است و امکان سنجش برجا را فراهم نمی‌سازند. مطابق استاندارد بریتانیا، نمونه‌های بتنی تحت فشار آب معادل ۵ بار قرار می‌گیرند و با دستگاه جک بتن‌شکن گسیخته می‌شوند تا بیشینه عمق نفوذ اندازه‌گیری و به عنوان شاخص نفوذپذیری استفاده گردد.

در این تحقیق، به جای روش‌های مذکور از آزمون "محفظه استوانه‌ای" (Naderi, 2010) استفاده شده است که

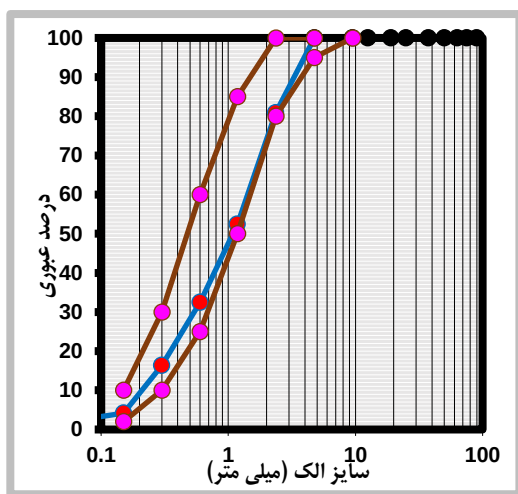
برابر با ۲۵۱۰ و ۲۳۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و میزان جذب آب آن‌ها نیز به ترتیب ۲/۶ و ۳/۲ درصد اندازه‌گیری گردید (ASTM C127, 2015; ASTM C128, 2015). شکل (۱) الگوی توزیع اندازه ذرات مصالح را نمایش می‌دهد؛ در این نمودار، خط آبی معرف منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های به‌کاررفته در این تحقیق است و محدوده‌های مجاز مندرج در استاندارد مربوط با خطوط قرمز رنگ مشخص شده است. به‌منظور آب‌بندی محل آزمون در روش "محفظه استوانه‌ای"، از چسب رزین اپوکسی استفاده شد. این ماده دارای مقاومت فشاری و برشی معادل ۷۰ و ۱۵ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته برابر با ۱۲۷۵۰ مگاپاسکال است که پایداری مکانیکی و چسبندگی بالایی را در شرایط آزمایشگاهی و میدانی تأمین می‌کند.

بتن، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت گرفت. در این فرآیند، با استفاده از دستگاه مخصوص، تصویرها با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت در شرایط خلا تهیه گردید تا جزئیات ساختار شکنی سطحی و ترک‌های ریز آشکار شود. پس از تأیید صحت عملکرد روش «محفظه استوانه‌ای» برای سنجش نفوذپذیری بتن در محل، از این روش برای ارزیابی میدانی دوام کانال آبرسانی استفاده شد.

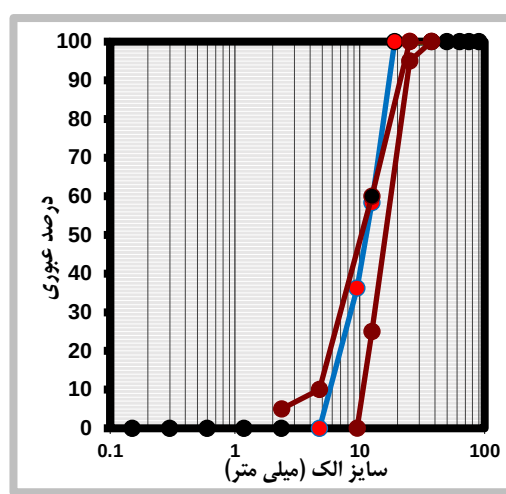
مواد و روش‌ها

مصالح مصرفی

در ساخت نمونه‌های بتنی این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ ۲ و آب شرب مطابق الزام کیفی استفاده گردید. اساس دانه‌بندی مصالح سنگی دستورالعمل استاندارد ASTM C136 بود. نتایج تعیین ویژگی‌های فیزیکی نشان داد که چگالی اشباع با سطح خشک شدن و ماسه به ترتیب



ب) سنگدانه‌های ریز
(b) Fine Aggregates



الف) سنگدانه‌های درشت
(a) Coarse Aggregates

شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی

Fig. 1. Gradation curve of aggregate materials

است که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در مطالعه ساختار داخلی خمیر سیمان هیدراته، ملات و بتن به کار گرفته شده است (Wei et al., 2023). در این پژوهش، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۲۰ میلی‌متر تهیه شد و در معرض آزمون MIP قرار گرفتند. فرایند آزمون با اعمال فشار جیوه از مقدار اولیه ۰/۱۴ مگاپاسکال تا حداکثر ۲۲۸ مگاپاسکال دنبال شد.

تحلیل ساختار تخلخل از طریق آزمون نفوذ تحت فشار جیوه

ریزساختار بتن، شامل اندازه و توزیع منافذ و میزان تخلخل تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر رفتار فیزیکی و مکانیکی آن دارد. تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه (MIP) یکی از روش‌های معتبر برای بررسی ویژگی‌های شبکه منافذ در مواد سیمانی

دستگاه MIP به صورت خودکار داده‌ها را ثبت و محاسبه می‌کند که مهم‌ترین خروجی‌های آن عبارت‌اند از: حجم کل حفره‌ها، سطح ویژه، درصد تخلخل کلی و توزیع اندازه منافذ (شکل ۲).

فشار پایین امکان ورود جیوه را به منافذ بزرگتر فراهم می‌سازد، در حالی که نفوذ به منافذ بسیار ریز تنها در فشارهای بالا میسر است. این بازه فشار، گستره‌ای از اندازه منافذ را از حدود ۱۴۰ میکرومتر تا تقریباً ۱۰ نانومتر پوشش می‌دهد که شامل اکثر اندازه حفره‌های متداول در بتن است.



شکل ۲- دستگاه مورد استفاده برای آزمون تخلخل‌سنجی جیوه

Fig. 2. Apparatus used for the mercury intrusion porosimetry test

مدت ۵ ساعت روی سطح نمونه‌ها اعمال گردید؛ این مدت زمان پیش‌تر به عنوان شرایط مناسب برای تعیین نفوذپذیری بتن با استفاده از این روش معرفی شده است (Naderi, & Kaboudan, 2021b).

ویژگی شاخص این آزمون، امکان اندازه‌گیری حجم کل سیال نفوذ کرده به بتن، بدون نیاز به شکستن نمونه است. برای این منظور، میکرومتر نصب‌شده در بخش بالایی دستگاه کاهش ارتفاع ستون آب داخل محفظه را با دقت بر حسب میلی‌متر ثبت می‌کند. لازم است تأکید شود مقدار ثبت‌شده با نماد h در رابطه (۱) بیانگر «افت ارتفاع آب در مخزن تحت فشار» است. حجم آب نفوذ کرده (V) با ضرب کردن این مقدار در سطح مقطع اعمال فشار (A) محاسبه می‌شود:

$$V = h \times A \quad (1)$$

که در آن:

- V : حجم آب نفوذ کرده به نمونه (میلی‌متر مکعب).
- h : کاهش ارتفاع ستون آب در محفظه (میلی‌متر).
- A : سطح مقطع ناحیه تحت فشار (میلی‌متر مربع).

ارزیابی ویژگی‌های نفوذپذیری با استفاده از محفظه استوانه‌ای

آزمون «محفظه استوانه‌ای» یکی از روش‌های دقیق و کاربردی برای تعیین نفوذپذیری بتن و دیگر مصالح ساختمانی است که قابلیت اجرا را در محیط آزمایشگاهی و نیز به صورت برجا دارد. نمای کلی این دستگاه در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. اجرای آزمون مستلزم آماده‌سازی کامل سطح آزمون است؛ بدین منظور، ابتدا سطح بتن خشک و از هرگونه گرد و غبار یا آلودگی پاک می‌شود. پس از آن یک رینگ فلزی با استفاده از چسب اپوکسی به سطح بتن چسبانده می‌شود (شکل ۳-ب). پس از حصول اطمینان از سخت شدن کامل چسب، واحد اصلی دستگاه محفظه استوانه‌ای روی صفحه فلزی متصل به رینگ نصب می‌گردد (شکل ۳-ج). مخزن دستگاه، پس از نصب شدن، با آب پرخواهد شد و فشار موردنظر با اهرم دستی اعمال می‌شود. میزان فشار به کمک گیج تعبیه‌شده روی بدنه دستگاه پایش می‌شود. در این پژوهش، فشار ثابت ۵ بار به

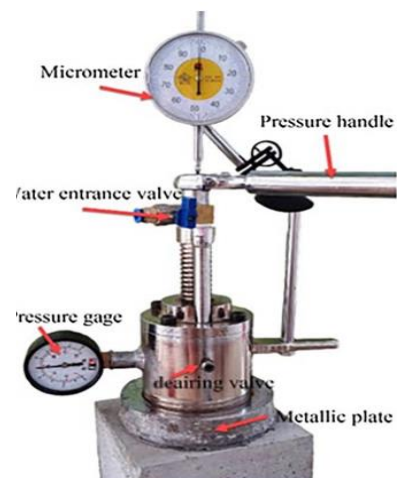
مقایسه نتایج آزمون در جای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی



ج) استقرار دستگاه روی صفحه فلزی
(c) Positioning the apparatus on the metal plate



ب) اتصال رینگ فلزی به سطح نمونه
(b) Attachment of the metal ring to the specimen surface



الف) نمای کلی
(a) General view

شکل ۳- مراحل آماده‌سازی و اجرای آزمون محفظه استوانه‌ای

Fig. 3. Steps of preparation and execution of the cylindrical chamber test

بارگذاری، طبق فرآیند نشان داده شده در شکل (۴-ب)، نمونه به وسیله جک شکست بتن گسیخته می‌شود و سپس حداکثر عمق نفوذ آب در مقطع شکسته شده با ابزار اندازه‌گیری دقیق ثبت می‌گردد.

نسبت‌های اختلاط و فرآیند اجرای آزمون‌ها ترکیب طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

اندازه‌گیری نفوذپذیری بر اساس استاندارد بریتانیا (BS EN 12390-8)

در شکل (۴-الف)، نمای کلی دستگاه آزمون نفوذپذیری منطبق با استاندارد بریتانیا و نحوه جایگذاری نمونه بتنی در قالب آن قابل مشاهده است. در این روش، نمونه استوانه‌ای یا منشوری بتن داخل محفظه آزمون قرار می‌گیرد و فشار هیدرواستاتیکی ثابت معادل ۵ بار به مدت ۷۲ ساعت بر سطح نمونه اعمال می‌شود. پس از اتمام دوره



ب) سنجش عمق نفوذ آب پس از شکست نمونه
(b) Measurement of water penetration depth after specimen failure



الف) نمای کلی دستگاه استاندارد بریتانیا
(a) General view of the British standard apparatus

شکل ۴- مراحل اجرای آزمون نفوذپذیری بر مبنای استاندارد BS EN 12390-8

Fig. 4. Steps for performing the permeability test based on BS EN 12390-8 standard

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

Table 1. Mix design of concrete specimens

شماره طرح Mix design number	آب Water ($\frac{Kg}{m^3}$)	سیمان Cement ($\frac{Kg}{m^3}$)	نسبت آب به سیمان W/C	ماسه Sand ($\frac{Kg}{m^3}$)	شن Gravel ($\frac{Kg}{m^3}$)
C25	۲۱۱	۳۸۱	۰/۵۵	۸۷۹	۶۹۹
C35	۱۹۸	۴۴۰	۰/۴۵	۸۶۲	۶۸۶
C45	۱۹۱	۵۱۶	۰/۳۷	۸۳۸	۶۶۷

تحلیل و بررسی نتایج

آزمایشگاهی و نیز سازه‌های موجود، مقایسه‌ای میان نتایج این آزمون و روش استاندارد بریتانیا صورت گرفته است. در ابتدای این بخش، جدول (۲) به‌طور خلاصه مزایای «محفظة استوانه‌ای» و روش «محفظة استوانه‌ای» در مقایسه با روش استاندارد بریتانیا برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در نمونه‌های

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌ها و کاربردهای روش محفظة استوانه‌ای و آزمون نفوذپذیری بر اساس استاندارد بریتانیا

Table 2. Comparison of the characteristics and applications of the cylindrical chamber method and the permeability test based on the British standard

توضیحات برای آزمون BS EN 12390-8 Description of BS EN 12390-8 test	روش BS BS method	روش "محفظة استوانه‌ای" Cylindrical chamber method	مزیت‌ها Advantages
تجهیزات آزمون BS بسیار بزرگ است.	×	✓	قابلیت اجرای درجای آزمایش
آزمون BS دارای تجهیزات گرانی است.	×	✓	هزینه اندک دستگاه
در آزمون BS نمونه شکسته می‌شود و دیگر قابلیت تکرار شدن آزمون وجود ندارد.	×	✓	قابلیت تکرار شدن آزمون
تجهیزات آزمون BS قابل حمل نیستند.	×	✓	سبک بودن و قابل حمل بودن
نمونه باید شکسته شود تا عمق نفوذ بر اساس آزمون BS اندازه‌گیری گردد.	×	✓	آزمونی غیر مخرب
در آزمون BS به حداقل ۷۲ ساعت زمان نیاز است.	×	✓	دسترسی به نتایج در مدت کوتاه
آزمون BS فقط در آزمایشگاه قابل اجرا خواهد بود.	×	✓	قابلیت اجرای آزمون در مکان‌هایی که نمونه‌گیری ممکن نیست
با توجه به تجهیزات، آزمون BS فقط روی نمونه‌هایی با ابعاد خاص قابل اجراست.	×	✓	قابلیت اجرای آزمون روی هر سطح شیب‌دار

در ادامه، مقادیر عمق نفوذ حاصل از دو روش آزمون فوق با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جدول (۳) میانگین عمق نفوذ آب را در بتن‌های دارای رده‌های مقاومتی متفاوت نمایش می‌دهد که با استفاده از آزمون‌های «محفظة استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا به دست آمده‌اند. هر عدد ارائه‌شده در

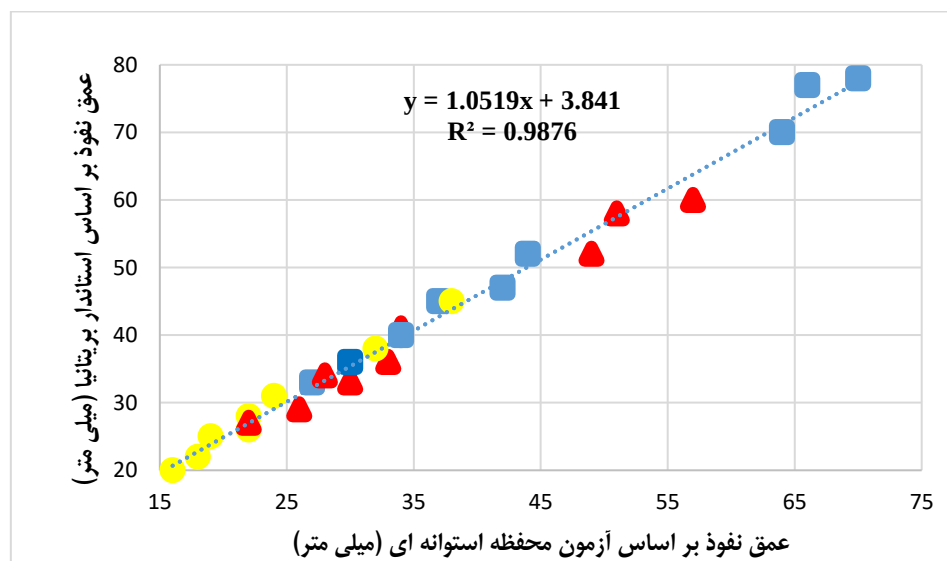
مقایسه نتایج آزمون در جای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی

جدول ۳- مقادیر عمق نفوذ آب در بتن حاصل از آزمون‌های «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا

Table 3. Water penetration depths in concrete obtained from the cylindrical chamber test and the British standard test

رده مقاومتی Strength class	عمل‌آوری Curing	سن بتن (روز) Concrete age (days)	عمق نفوذ بر اساس آزمون "محفظه استوانه‌ای" (میلی متر) Water penetration depth according to cylindrical chamber test (mm)	عمق نفوذ بر اساس استاندارد بریتانیا (میلی متر) Water penetration depth according to British standard (mm)
C25	آب	۲۸	۴۱	۴۸
		۹۰	۳۰	۳۶
C35	آب	۲۸	۳۲	۳۷
		۹۰	۲۵	۲۹
C45	آب	۲۸	۲۲	۲۸
		۹۰	۱۹	۲۱
C25	فضای آزاد	۲۸	۶۶	۷۵
C35	فضای آزاد	۲۸	۵۳	۵۸
C45	فضای آزاد	۲۸	۳۷	۴۱

همان‌گونه که از داده‌های ارائه شده در جدول (۳) بررسی ارتباط بین نتایج دو آزمون و تعیین ضریب همبستگی برمی‌آید، مقادیر عمق نفوذ آب به دست آمده از دو روش آزمون، یعنی "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا، به یکدیگر نزدیک هستند. با این حال، نتایج به دست آمده از استاندارد بریتانیا اندکی بالاتر از مقادیر ثبت شده در آزمون «محفظه استوانه‌ای» است؛ این اختلاف را می‌توان به تفاوت در شرایط بارگذاری نسبت داد، زیرا در استاندارد بریتانیا نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار آب قرار می‌گیرند، در حالی که حداکثر مدت آزمون محفظه استوانه‌ای حدود ۵ ساعت است (Naderi & Kaboudan, 2021). به منظور



شکل ۵- همبستگی بین روش "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا

Fig. 5. Correlation between the cylindrical chamber method and the British standard

آب و عمق نفوذ آب در بتن می‌توان مقدار نفوذپذیری بتن سازه‌های موجود را بدون نیاز به تخریب بتن اندازه‌گیری کرد. در استاندارد BS EN 12390-8، دسته‌بندی خاصی به‌منظور ارزیابی نفوذپذیری بتن‌ها وجود ندارد. اما در استاندارد DIN 1048-5 محدوده‌ای خاص مطابق جدول (۴) برای ارزیابی نفوذپذیری بتن ارائه شده است. طبق استاندارد DIN 1048-5، نمونه‌های مکعبی بتن با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر مربع آزمایش می‌شوند. در این روش، یکی از وجوه نمونه که قرار است در معرض فشار آب قرار گیرد هموار و تمیز می‌شود و پس از آن نمونه به‌گونه‌ای در محفظه آزمون نصب می‌گردد که تماس آب صرفاً با این وجه برقرار شود. فشار هیدرواستاتیک ثابت معادل ۵ بار به مدت ۷۲ ساعت بر سطح نمونه اعمال می‌شود، در حالی که دیگر وجوه توسط آب‌بند و واشرهای مقاوم از تماس با آب محافظت شده‌اند. در پایان زمان آزمایش، نمونه‌ها از محفظه خارج و شکسته می‌شوند و سطح مقطع به‌دست آمده بررسی می‌گردد. محدوده مرطوب‌شده در بافت بتن تشخیص داده می‌شود و عمق نفوذ آب ثبت می‌گردد.

بر اساس نتایج تحلیل رگرسیونی ارائه‌شده در شکل (۵)، رابطه‌ای خطی مشخص بین مقادیر به‌دست‌آمده از آزمون «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا مشاهده می‌شود که دارای ضریب همبستگی ۹۸ درصد است. این مقدار بالا نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی میان دو روش است و دلالت بر آن دارد که آزمون «محفظه استوانه‌ای» برای برآورد عمق نفوذپذیری بتن دقت قابل توجهی دارد. بنابراین، می‌توان این روش را به‌عنوان ابزاری کارآمد نه‌تنها در ارزیابی نمونه‌های آزمایشگاهی، بلکه برای سنجش نفوذپذیری بتن در شرایط درجا و روی سازه‌های بتنی موجود نیز به‌کار گرفت.

ارزیابی میدانی نفوذپذیری در کانال آب

همانگونه که گفته شد، آزمون محفظه استوانه‌ای قابلیت اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن را بدون شکستن نمونه‌ها دارد. اما ابتدا باید رابطه بین حجم نفوذ آب و عمق نفوذ آب در بتن تعیین گردد. زیرا برای اندازه‌گیری مقدار نفوذپذیری سازه‌های بتنی موجود به‌صورت درجا، نیاز به بررسی حجم نفوذ آب در بتن خواهد بود. با داشتن رابطه بین حجم نفوذ

جدول ۴- محدوده مجاز نفوذپذیری آب در بتن بر اساس استاندارد DIN 1048-5

Table 4. Permissible range of water permeability in concrete according to DIN 1048-5 standard

نفوذپذیری	کم	متوسط	زیاد
Permeability	Low	Medium	High
عمق نفوذ (mm)	کمتر از ۳۰ میلی‌متر	۳۰ - ۶۰ میلی‌متر	بیشتر از ۶۰ میلی‌متر

می‌شود، بتن‌هایی با حجم نفوذ آب کمتر از ۱۲ میلی‌لیتر در رده کم‌نفوذپذیر، حجم بین ۱۲ تا ۲۵ میلی‌لیتر در رده نفوذپذیری متوسط و حجم بیش از ۲۵ میلی‌لیتر در رده پرنفوذ طبقه‌بندی شده‌اند. به‌منظور ارزیابی کمی صحت این طبقه‌بندی، مقادیر به‌دست‌آمده در این مطالعه با داده‌های منتشرشده از تحقیقات پیشین روی بتن‌های معمولی (Naderi & Kaboudan, 2021a; Naderi & Kaboudan, 2020) مقایسه گردید.

همان‌گونه که در جدول (۴) نشان داده شده است، استاندارد DIN 1048-5 محدوده‌های نفوذپذیری بتن را بر اساس عمق نفوذ آب در نمونه تعیین می‌کند. بر این اساس، در این بخش معادل حجمی آب نفوذ کرده به بتن بر مبنای طبقه‌بندی ارائه‌شده در جدول (۴) محاسبه و گزارش شده است. جدول (۵) مقادیر اندازه‌گیری‌شده عمق نفوذ و حجم متناظر آب نفوذی را برای نمونه‌های بتنی با مقاومت‌های فشاری مختلف، سنین گوناگون، و شرایط متفاوت عمل‌آوری ارائه می‌دهد. همان‌طور که از داده‌های جدول (۵) استنباط

مقایسه نتایج آزمون در جای "محفظه استوانه‌ای" و استاندارد بریتانیا و مطالعه موردی نفوذپذیری کانال آبرسانی

جدول ۵- ارتباط عمق و حجم نفوذ آب در بتن سازه‌های بتنی اجراشده درجا

Table 5. Relationship between water penetration depth and volume in cast-in-place concrete structures

کم Low		متوسط Medium		زیاد High	
عمق نفوذ (mm) Penetration depth (mm)	حجم نفوذ (ml) Penetration volume (mL)	عمق نفوذ (mm) Penetration depth (mm)	حجم نفوذ (ml) Penetration volume (mL)	عمق نفوذ (mm) Penetration depth (mm)	حجم نفوذ (ml) Penetration volume (mL)
۱۶	۷/۱	۳۰	۱۲	۶۱	۲۵/۲
۱۸	۷/۷	۳۳	۱۲/۴	۶۴	۲۷/۳
۱۹	۷/۷	۳۴	۱۲/۶	۶۶	۲۹/۲
۲۲	۷/۹	۳۷	۱۶/۷	۶۶	۲۹/۶
۲۳	۸/۲	۴۲	۱۷/۲	۷۰	۳۱/۷
۲۴	۱۰/۲	۴۴	۱۷/۵	۷۳	۳۰/۸
۲۴	۱۰/۹	۴۷	۱۸	۷۷	۳۵/۵
۲۵	۱۱/۶	۴۹	۲۰/۲	۷۹	۳۶/۲
۲۶	۸/۶	۵۱	۲۰/۸	۸۴	۳۶/۹
۲۷	۱۱/۱	۵۷	۲۲	۸۸	۴۲/۴
۲۸	۱۱/۹	۵۹	۲۴/۴	۹۲	۴۳
کمتر از ۳۰ میلی متر		۳۰ - ۶۰ میلی متر	۱۲ - ۲۵ میلی لیتر	بیشتر از ۶۰ میلی متر	بیشتر از ۲۵ میلی لیتر

می‌دهد. نفوذپذیری نقاط مختلف کانال آبرسانی ورزنه بالای ۲۵ میلی‌لیتر است که طبق نتایج به‌دست آمده در محدوده نفوذپذیری بالا قرار دارد. به عبارتی، دبی آب ورودی به کانال آبرسانی ورزنه احتمالاً مناسب بوده است و هیچ فردی در میانه راه از آب کانال سوء استفاده نمی‌کرده است. اما این مناسب نبودن بدنه بتنی کانال آبرسانی است که باعث هدر رفتن مقدار زیادی آب می‌شده و از این رو آب رسیده به شهر ورزنه بسیار کمتر از آب ورودی به کانال بوده است. روباز بودن کانال و بخار شدن آب نیز تاثیر قابل توجهی داشته است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که امکان داشت با اصلاح بدنه بتنی کانال آب از هدر رفت زیاد آب جلوگیری کرد و اعتراض‌ها در شهر ورزنه به دلیل کمبود آب بسیار کمتر دیده می‌شد. تا پیش از این تحقیق باید برای اندازه‌گیری نفوذپذیری سازه‌ها یا المان‌های بتنی موجود، ابتدا مغزه‌ای استاندارد از بتن جدا و در آزمایشگاه از لحاظ نفوذپذیری آزمایش می‌شد که این امر باعث آسیب‌دیدگی سازه می‌گردید. اما اکنون می‌توان با به‌دست آوردن مقدار حجم آب نفوذ کرده به داخل بتن، مقدار نفوذپذیر بتن را با دقت بالایی اندازه‌گیری کرد.

تحلیل آماری اختلاف نتایج با استفاده از شاخص‌های میانگین درصد خطا و ضریب همبستگی خطی (R^2) نشان می‌دهد که اختلاف میانگین حجم نفوذ بین این مطالعه و داده‌های مرجع کمتر از ۱۰ درصد است و ضریب همبستگی معادل ۰/۹۷ به‌دست آمد. این نتایج اختلاف کم و همبستگی بالای داده‌ها را تأیید می‌کند و بیانگر دقت و اعتبار روش آزمون محفظه استوانه‌ای در تعیین رده‌بندی نفوذپذیری بتن است.

با بهره‌گیری از رابطه بین حجم و عمق نفوذ آب، که از آزمون «محفظه استوانه‌ای» به‌دست آمده است، نفوذپذیری کانال آبرسانی موجود شهر ورزنه به‌صورت درجا ارزیابی گردید. نمونه‌هایی از آزمایش‌های میدانی روی این کانال در شکل (۶) نمایش داده شده است.

نتایج حاصل از اجرای آزمون "محفظه استوانه‌ای" روی سازه‌های بتنی موجود در جدول (۶) ارائه شده است. آزمایش‌های فراوانی به‌صورت درجا اجرا اما در این تحقیق تعداد محدودی از نتایج ارائه گردیده است. همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، کانال آب ورزنه نفوذپذیری بسیار زیادی دارد که مناسب نیست. نفوذپذیری بالای کانال آب باعث هدر رفتن آب می‌شود و مصرف آب را افزایش



شکل ۶- اجرای آزمون درجای "محفظه استوانه‌ای" روی سازه‌های بتنی موجود

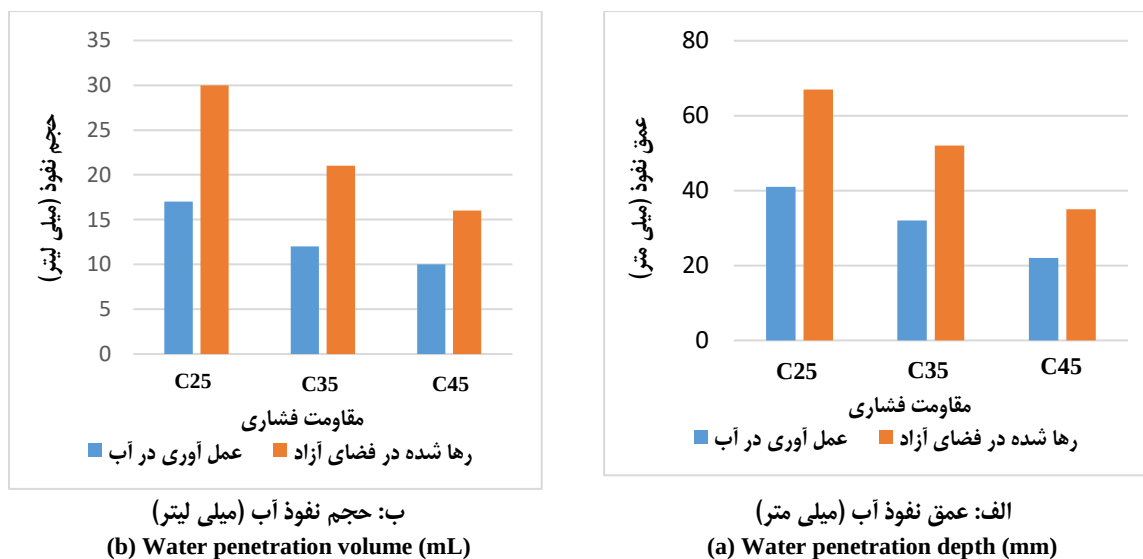
Fig. 6. Performing the in-situ cylindrical chamber test on existing concrete structures

جدول ۶- نفوذپذیری سازه‌های بتنی موجود به صورت درجا

Table 6. Permeability of existing concrete structures measured in-situ

حجم نفوذ آب (میلی لیتر)	گستره نفوذپذیری
Water penetration volume (mL)	Permeability range
۲۸	زیاد
۲۸/۶	زیاد
۲۹/۱	زیاد
۳۲/۵	زیاد
۳۲/۷	زیاد
۳۴/۱	زیاد
۳۸/۴	زیاد
۳۸/۹	زیاد
۴۱/۶	زیاد
۴۲/۲	زیاد
۴۲/۶	زیاد

تأثیر عمل‌آوری و مقاومت بر مشخصات مرتبط با نفوذپذیری
 آب در بتن و حجم آب نفوذ در بتن است. از این رو در این قسمت مقدار عمق نفوذ و حجم نفوذ آب در بتن با رده‌های همان‌طور که پیش از این گفته شد، یکی از مزیت‌های آزمون "محفظه استوانه‌ای" اندازه‌گیری همزمان عمق نفوذ شده است شکل (۷).



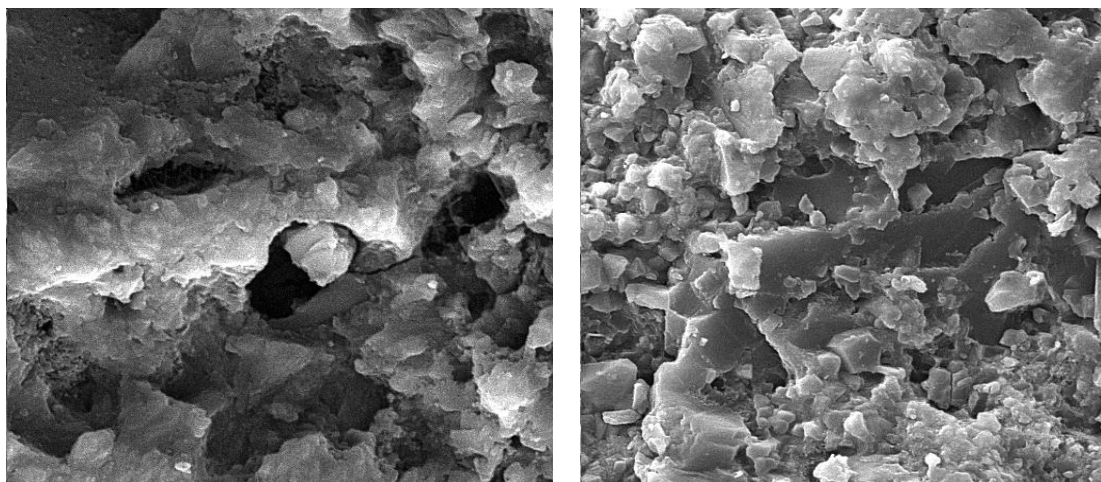
شکل ۷- تاثیر مقاومت و عمل آوری بر حجم نفوذ آب
Fig. 7. Effect of strength and curing on water penetration volume

در شکل (۷-الف) مقدار عمق نفوذ آب در بتن با رده‌های مقاومتی مختلف و تحت شرایط مختلف عمل آوری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت فشاری، مقدار عمق نفوذ آب در بتن کاهش داشته است. عمق نفوذ آب در بتن عمل آوری شده در آب با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب برابر ۴۱، ۳۲ و ۲۲ میلی‌متر است به سخی دیگر عمق نفوذ در بتن با رده مقاومتی C25 حدود ۱/۸۶ برابر عمق نفوذ در بتن با رده مقاومتی C45 است. در مقایسه بتن‌های عمل آوری شده در آب و بتن‌های رها شده در فضای آزاد مشاهده می‌شود که عمق نفوذ آب در بتن‌های رها شده در فضای آزاد با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب ۶۳/۴، ۶۲/۵ و ۵۹/۱ درصد افزایش داشته است.

کاهش مقدار عمق نفوذ در مقاومت‌های بالاتر نشانگر پیشرفت و توسعه بیشتر محصولات هیدراسیون است که منجر به ساختاری متراکم‌تر می‌شود. افزایش مقاومت فشاری به حجم و نوع محصولات هیدراسیون تشکیل شده وابسته است و از این رو به واکنش‌های میان ترکیبات جامد و مایع برمی‌گردد (Teriqet et al., 2019). توسعه روند هیدراسیون سیمان باعث پر شدن منافذ و فضاهای خالی داخلی بتن توسط محصولات هیدراسیون می‌شود. روند سخت شدگی و متراکم شدن بتن بلافاصله پس از ریختن بتن در قالب آغاز و طی این روند، هیدراسیون باعث به هم چسبیدن

سنگدانه‌های بتن می‌شود (Taylor, 1997). نبودن رطوبت کافی در سطح بتن، موجب خشک شدن بتن و افزایش منافذ ریز می‌شود که در نتیجه، باعث هیدراسیون ناقص و کاهش مقدار مقاومت فشاری و افزایش عمق نفوذ می‌شود (Kosmatka et al., 2002; Siddiqui et al., 2013). نداشتن رطوبت کافی همچنین باعث باقی ماندن ناحیه مرزی متخلخل در بتن و سرانجام موجب کاهش مقاومت در برابر حملات شیمیایی و دیگر آسیب دیدگی‌های مشابه می‌گردد (Springenschmid, 2007; Alexander et al., 2017).

مانند آنچه برای عمق نفوذ آب در بتن رخ داد، برای حجم نفوذ آب در بتن نیز اتفاق افتاده است. مطابق شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود که حجم نفوذ آب در بتن عمل آوری شده در آب با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب برابر ۱۷، ۱۲ و ۱۰ میلی‌لیتر است به عبارتی، حجم نفوذ در بتن با رده مقاومتی C25 حدود ۱/۷ برابر حجم نفوذ در بتن با رده مقاومتی C45 است. در مقایسه بتن‌های عمل آوری شده در آب و بتن‌های رها شده در فضای آزاد مشاهده می‌شود که حجم نفوذ آب در بتن‌های رها شده در فضای آزاد با رده‌های C25، C35 و C45 به ترتیب ۷۶/۵، ۷۵ و ۶۰ درصد افزایش داشته است. در اینجا نتایج حاصل از عکسبرداری SEM قابل مشاهده است شکل (۸).



الف: بتن عمل‌آوری شده در آب
(a) Water-cured concrete
ب: بتن رها شده در فضای آزاد
(b) Air-exposed concrete

شکل ۸- تاثیر شرایط حاد یخ و ذوب یخ بر تخلخل با استفاده از عکسبرداری SEM

Fig. 8. Effect of severe freeze-thaw conditions on porosity using SEM imaging

نمونه‌های بتنی تحت عمل‌آوری در آب و رها شده در فضای آزاد مقایسه شده‌اند. در شکل (۸) تاثیر شرایط مختلف عمل‌آوری بر تخلخل بتن نشان داده شده است. در شکل (۸-الف) مشاهده می‌شود که بتن دارای یکپارچگی و نظم خاصی است و تخلخل زیادی در آن مشاهده نمی‌شود. اما در شکل (۸-ب) مشاهده می‌گردد که نمونه ارائه شده به دلیل عمل‌آوری ناکافی، باعث ایجاد شبکه‌های گسترده‌ای از منافذ ریز در ریزساختار بتن شده‌اند. منافذ مذکور که در تصویر قابل مشاهده‌اند، تأثیرات زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی بتن می‌گذارند. این تأثیرات به‌ویژه باعث افزایش قطر منافذ و افزایش نفوذپذیری در بتن می‌شود.

در ادامه برای بررسی بیشتر اثرهای منفی عمل‌آوری نشدن بر حجم منافذ و تخلخل بتن، نتایج حاصل از آزمون جیوه بررسی شده است. با استفاده از آزمایش جیوه می‌توان

مشخصه‌های زیادی از ساختار منافذ را به‌دست آورد، مانند تخلخل و حجم کلی منافذ. در جدول (۷)، مشخصات مذکور برای بتن C45 قابل مشاهده است. با توجه به جدول (۷)، مشاهده می‌شود که تخلخل و حجم کلی منافذ با رعایت نکردن عمل‌آوری، افزایش داشته است. مقدار تخلخل برای بتن C45 در شرایط عمل‌آوری در آب برابر ۱۱/۲ درصد است در صورتی که همین مشخصه در بتن بدون عمل‌آوری برابر ۱۸/۲ درصد شده است. به عبارتی، تخلخل بتن C45 بدون عمل‌آوری حدود ۷ درصد افزایش داشته است. عمل‌آوری نشدن باعث افزایش مقدار حجم کلی منافذ بتن C45 مقدار ۶۹/۴ درصد شده است. افزایش منافذ و تخلخل در بتن یکی از دلایل اصلی نفوذپذیری بتن است که در این بخش بررسی شده است.

جدول ۷- مشخصات منافذ در شرایط مختلف

Table 7. Pore characteristics under different conditions

شرایط عمل‌آوری Curing conditions	حجم کلی منافذ (mm ³ /gr) Total pore volume	تخلخل (%) Porosity
آب	۴۹	۱۱/۲
فضای آزاد	۸۳	۱۸/۲

نتیجه‌گیری

عمل‌آوری‌شده با رده‌های مقاومتی C25، C35 و C45 به ترتیب برابر ۳۲، ۴۱ و ۲۲ میلی‌متر بوده و عمق نفوذ در بتن C25 حدود ۱۰۸۶ برابر بتن C45 است. آزمون‌های MIP و عکسبرداری SEM نیز نشان دادند که عدم عمل‌آوری باعث افزایش تخلخل و حجم کلی منافذ به ترتیب به میزان ۷ و ۴/۶۹ درصد می‌شود. شاخص‌سازی نفوذپذیری بر مبنای حجم آب، علاوه بر حذف نیاز به استخراج مغزه و تخریب سازه، امکان ارزیابی سریع و دقیق بتن را فراهم می‌آورد. با این حال، این مطالعه محدود به سازه‌های آبی موجود در شرایط اقلیمی مشابه ورزنه و ترکیب مصالح مورد استفاده بوده و تعمیم نتایج به سازه‌های با ترکیبات یا شرایط محیطی متفاوت نیازمند مطالعات تکمیلی است. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به بررسی اثرات چرخه‌های شدید یخ‌زدگی ذوب، تغییرات دمایی و ترکیب‌های سیمانی مختلف بر نفوذپذیری بتن، و همچنین توسعه مدل‌های پیش‌بینی نفوذپذیری در مقیاس سازه‌های بزرگ، بپردازد.

بر اساس نتایج تحلیل رگرسیون، بین روش «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا رابطه‌ای خطی با ضریب همبستگی ۹۸ درصد مشاهده شد که بیانگر دقت بالای روش پیشنهادی در اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن بدون نیاز به تخریب سازه است. با استفاده از این روش، نفوذپذیری کانال آبرسانی ورزنه به صورت درجای ارزیابی شد و مشخص گردید که در اغلب نقاط، حجم آب نفوذ کرده بیش از ۲۵ میلی‌لیتر و در محدوده نفوذپذیری بالا قرار دارد. این امر حاکی از آن است که هرچند دبی آب ورودی به کانال مناسب بوده، ضعف کیفی بدنه بتنی موجب هدررفت قابل توجه آب شده و میزان آب ورودی به شهر کمتر از مقدار اولیه بوده است. طبقه‌بندی نفوذپذیری بر اساس حجم آب نفوذی نشان داد که کمتر از ۱۲ میلی‌لیتر نشانگر بتن کم‌نفوذ، ۱۲ تا ۲۵ میلی‌لیتر بتن با نفوذپذیری متوسط و بیش از ۲۵ میلی‌لیتر بتن با نفوذپذیری بالا است. همچنین ارتباط معکوسی بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ آب مشاهده شد؛ به‌طوری‌که عمق نفوذ در بتن‌های

تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۰۴۰۹ به‌انجام رسیده است. This work is based upon research funded by Iran National Science foundation (INSF) under project No. 4030409.

مراجع

- ACI, ACI (2018); Concrete Terminology, ACI CT-18. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Alexander, M., Bentur, A., & Mindess, S. (2017). Durability of concrete: design and construction (Vol. 20). CRC Press.
- ASTM C127-15 (2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C128-15 (2015); Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C136-19 (2019); Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- BS EN 12390-8; (2019). Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure. British Standards Institution London, UK .
- Chandrappa, A.K. & Biligiri, K.P. (2016). Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach, Construction and Building Materials, 123, 627-637.
- DIN 1048-5, (1991). In Testing concrete: testing of hardened concrete (specimens prepared in mould). German standard.

- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. (2002). Design and control of concrete mixtures Skokie, IL: Portland Cement Association. Vol. 5420. 60077-1083.
- Kou, S.C. & Poon, M. (2014). Etxeberria, Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 53, 73-82.
- Naderi, M. Kaboudan, A. and Kargarfard, K. (2022). Studying the compressive strength, permeability and reinforcement corrosion of concrete samples containing silica fume, fly ash and zeolite. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), 25-43.
- Naderi, M., & Kaboudan, A. (2020). Cylindrical Chamber: A New In Situ Method for Measuring Permeability of Concrete with and without Admixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3), 2225-2241.
- Naderi, M., & Kaboudan, A. (2021). Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37, 1-11.
- Naderi, M., & Kaboudan, A. (2021). Investigating the effect of strength, time and amount of water pressure, and direction on concrete permeability. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 52(9), 2379-2398.
- Naderi, M., (2010). Determine of concrete, stone, mortar, brick, and other construction materials permeability with cylindrical chamber method, C.a.i.p. office, Editor. Iran.
- Shen, L., Zhang, L., Yang, X., Di Luzio, G., Xu, L., Wang, H., & Cao, M. (2024). Multiscale cracking pattern-based homogenization model of water permeability in hybrid fiber-reinforced concrete after high-temperature exposure. *Journal of Building Engineering*, 84, 108643.
- Siddiqui, M. S., Nyberg, W., Smith, W., Blackwell, B., & Riding, K. A. (2013). Effect of curing water availability and composition on cement hydration. *ACI Materials Journal*, 110(3), 315-322.
- Springenschmid, R. (2007). *Betontechnologie für die Praxis*, 1st ed.; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany.
- Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* London: Thomas Telford. Book. (Vol. 2, p. 459).
- Teriqet, A., Mohammadi, M., & Medras Y. (2019). Thermodynamic investigation of hydration and chemical shrinkage of cement containing slag. *Sharif. J. of Civil Eng*, 34(4), 82-57.
- Wei, J., Chen, Z., Liu, J., Liang, J., & Shi, C. (2023). Review on the characteristics and multi-factor model between pore structures with compressive strength of coral aggregate. *Construction and Building Materials*, 370, 130326.
- Yildirim, M., & ÖZHAN, H. B. (2023). Effect of permeability-reducing admixtures on concrete properties at different cement dosages. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 7(1), 48-59.
- Zeng, W., Wang, W., Pan, J., & Liu, G. (2023). Effect of steel fiber on the permeability of freeze-thaw damaged concrete under splitting tensile and compressive loads. *Journal of Building Engineering*, 80, 108086.
- Zeng, W., Zhao, X., Zou, B., & Chen, C. (2023). Topographical characterization and permeability correlation of steel fiber reinforced concrete surface under freeze-thaw cycles and NaCl solution immersion. *Journal of Building Engineering*, 80, 108042.
- Zhang, G., Zheng, H., Wei, X., Li, Z., Yan, Z., & Chen, X. (2024). Concrete mechanical properties and pore structure influenced by high permeability water pressure. *Developments in the Built Environment*, 100385.
- Zhang, J., Zhou, L., Nie, Q., Wu, H., & Wu, L. (2024). Effects of calcium sulfate whiskers and basalt fiber on gas permeability and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*, 411, 134369.



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. 26, No. 99, Spring 2025

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

Contents

Research Paper

Comparative Analysis of Pricing Methods for Treated Wastewater in Agricultural Applications in Guilan Province.

Afshin Ashrafzadeh, Jaber Salehpour Laghani 1

Flow Measurement in Canals Using 90 Degree Triangular Sharp Crested Weir With the Vertex at the Same Level to the Botton of the Canal.

Ebrahim Valizadegan, Farzad Jalili 21

Performance Evaluation of a Smart Irrigation System for Efficient Wheat Water Management in the Mashhad Region

Abolghasem Haghayeghi Moghaddam, Majid Keramati, Ardalan Zolfagharan 37

Enhancing Farmer's Resilience in Participatory Water Resources Management undr Water Scarcity Conditions in the Lake Urmia Basin Using Agent – Based Modiling

Somayeh Emami, Hossein Dehghanisanij, Hojjat Emami 55

Study of Flow and Sediment in the labyrinth Channel of Pressure Compensating emitters Using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Hossein Parvizi, Zohre Rafiei, Hadis Hatami, Ali Momenpour 75

Comparison of In-situ 'Cylindrical Chamber' Test Results with British Standard Method and Case Study on the Permeability of the Water Supply Canal

Ali Saberi Varzaneh, Mahmood Naderi 95

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

Vol. 26 No. 99 2025

Published by: Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Executive Director: Dr. H. Dehghani-sani, Professor

Editor in Chief: Dr. N. Abbasi, Professor
Assistant Editor: Dr. 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:

- H. Ojaghloo	- F. Taran	- R. Alimohammadi Nafchi	- Sh. Veysi
- K. Akhavan	- S. Jannat Rostami	- J. Ghasemi	- A. Uossef Gomrokchi
- M. Akbari	- O. Raja	- M. Ghotbizade	
- S. Emami	- F. Abbasi	- B. Kamayi Abbasi	
- A. Parvareshrizi	- N. Abbasi	- A. Kiani	

AERI Site: www.aeri.ir

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

E-mail: aridsej@areeo.ac.ir