

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)



جلد ۲۶، شماره ۹۸، بهار ۱۴۰۴



Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

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

پژوهشی

جلد ۲۶، شماره ۹۸، بهار ۱۴۰۴

Vol. 26, No. 98, Spring 2025

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

فهرست مقالات

- ۱ «بررسی پایداری انرژی ویژه در سرریزهای جانبی همگرا در حضور سازه‌های هدایت کننده
امیررضا شهریار، مهدی دریائی، سید محمود کاشفی‌پور، محمدرضا زایری
- ۱۹ «واکاوای پیشران‌های کلیدی مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان در مواجهه با کم‌آبی
(مطالعه موردی: استان زنجان)
مجتبی نوری، روح اله رضائی، محمدکاظم رحیمی
- ۴۳ «تحلیل ابعاد تاب‌آوری کشاورزان در برابر خشکسالی با استفاده از روش تحلیل محتوا
محمد مهدی قاسمی، جواد قاسمی
- ۶۷ «تخمین ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز لبه تیز مرکب مثلثی - مثلثی با استفاده از مدل‌های
هوش مصنوعی
ساسان نجاتی، مهدی مفتاح هلقی، عبدالرضا ظهیری، یونس امین‌پور
- ۸۵ «بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پیشروی بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه‌ای
رضا باوندپوری گیلان، رسول قبادیان، علی آرمان
- ۱۰۵ «پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان شهرستان البرز استان قزوین به روش دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی
حسین آتشگران، معصومه رستم‌آبادی، سعید کاظمی محسن‌آبادی

AERI

Contents

- 1 ► Investigation of specific energy stability in converging side weirs with guiding structures.
AmirReza Shahriari, Mehdi Daryaei, Seyed Mahmood Kashefipour, MohammadReza Zayeri
- 19 ► Exploring key drivers affecting the development of farmers' resilience capacity in the face of water scarcity.
Mojtaba Noori, Rohollah Rezaei, MohammadKazem Rahimi
- 43 ► Analysis of the dimensions of farmers' resilience to drought crisis using content analysis method
Mohammad Mehdi Ghasemi, Javad Ghasemi
- 67 ► Estimating scour hole dimensions downstream of triangular-triangular compounding sharp-crested weirs using
artificial intelligence models.
Sasan Nejati, Mehdi Meftah Halaghi, AbdolReza Zahiri, Younes Aminpour
- 85 ► Experimental and numerical investigation of the effect of blockage progression on scour downstream of
box culvert.
Reza Bavandpoori Gilan, Rasool Ghobadian, Ali Arman
- 105 ► Vulnerability zoning of the Alborz county of Qazvin province aquifer using DRASTIC method and GIS
Hosein Atashgaran, Massumeh Rostamabadi, Saeed Kazemi Mohsenabadi

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 ۹۸، بهار ۱۴۰۴
شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

فهرست مقالات

پژوهشی

بررسی پایداری انرژی ویژه در سرریزهای جانبی همگرا در حضور سازه‌های هدایت کننده

۱ امیررضا شهریار، مهدی دریائی، سید محمود کاشفی‌پور، محمدرضا زابری

واکاوی پیشران‌های کلیدی مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان در مواجهه با کم‌آبی (مطالعه موردی: استان زنجان)

۱۹ مجتبی نوری، روح اله رضائی، محمدکاظم رحیمی

تحلیل ابعاد تاب‌آوری کشاورزان در برابر خشکسالی با استفاده از روش تحلیل محتوا

۴۳ محمدمهدی قاسمی، جواد قاسمی

تخمین ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز لبه تیز مرکب مثلثی - مثلثی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی

۶۷ ساسان نجاتی، مهدی مفتاح‌هلقی، عبدالرضا ظهیری، یونس امین‌پور

بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر پیشروی بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه‌ای

۸۵ رضا باوندپوری گیلان، رسول قبادیان، علی آرمان

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان شهرستان البرز استان قزوین به روش دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی

۱۰۵ حسین آتشگران، معصومه رستم‌آبادی، سعید کاظمی محسن‌آبادی

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

سرمدیر: دکتر نادر عباسی

دستیار سرمدیر: 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:

- سمیه امامی	- سمیه سلطانی	- بابک لشکرآرا	- پیمان ورجاوند
- نادر حیدری	- محمدعلی شاهرخ‌نیا	- علی مختاران	- افشین یوسف گمرکچی
- رسول دانشفراز	- نادر عباسی	- شب‌نم مغیث‌پور	- حجت‌اله یونسی
- امید رجا	- جواد قاسمی	- حسین منتصری	
- روح‌اله رضایی	- بیژن کمایی عباسی	- یاسر مهری	

ویراستار علمی و ادبی: محمدرضا داهی

ویراستار انگلیسی: محمدرضا داهی

مدیر داخلی: افشین یوسف گمرکچی

صفحه‌آرا: شب‌نم جباری

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

تلفن: ۰۲۶-۳۲۷۰۵۳۲۰، 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 برگه‌بند عنوان مقاله، نام و نام خانوادگی و مرتبه علمی نگارنده (یا نگارندگان)، آدرس کامل، شماره تلفن، شماره دورنگار، آدرس پست الکترونیکی، و منبعی خواهد بود که مقاله از آن استخراج شده است (پایان نامه دانشجویی، طرح تحقیقاتی و مانند آن). برگه مشخصات مقاله باید به دو زبان فارسی و انگلیسی ارائه شود.

عنوان

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

چکیده فارسی

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

واژه‌های کلیدی

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

مقدمه

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

مواد و روش‌ها

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

نتایج و بحث

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

نتیجه‌گیری

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

قدردانی

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

مراجع

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

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

مثال: (Budiman *et al.*, 1999)

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

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

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

الف- تک نگارنده

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

ب- دو یا چند نگارنده

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

پ- کتاب

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

ت- فصلی از کتاب

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

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

ث- مجموعه مقاله‌ها

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

ج- دیسکت فشرده مجموعه مقاله‌ها (CD)

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

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

چ- پایان نامه، گزارش یا طرح تحقیقاتی

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

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

ه- مرجع بدون نویسنده مشخص

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

چکیده مبسوط به زبان انگلیسی

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

واژه‌های کلیدی به زبان انگلیسی

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

تذکر

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

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

تبصره

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

Research Article

Investigation of Specific Energy Stability in Converging Side Weirs with Guiding Structures

Amirreza Shahriari ¹  | Mehdi Daryaei ²   | Seyed Mahmood Kashefipour ³  |
Mohammadreza Zayeri ⁴ 

1,2,3,4- Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(✉- Corresponding Author: M.Daryaei@scu.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 15 March 2025
Revised: 16 April 2025
Accepted: 17 April 2025
Available Online: 26 April 2025

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Daryaei, M., Kshefipour, M., Shahriari, A., & Zayeri, M. (2025). Investigation of Specific Energy Stability in Converging Side Weirs with Guiding Structures. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. V.26, No.95, P:1-18.
<https://doi.org/10.22092/idser.2025.368890.1610>

Introduction

Side weirs are widely used hydraulic structures in irrigation, drainage, and flood control systems. These structures allow excess water to be diverted from the main channel, helping to manage flow capacity effectively. In converging channels, the presence of guiding structures, such as flow deflectors, can influence the hydraulic performance of side weirs. Recent studies have highlighted the potential of guiding structures to enhance discharge capacity. However, uncertainties persist regarding the impact of convergence and added structures on specific energy variations in the main channel. The classical assumption of spatially varied flow with lateral outflow suggests that specific energy remains constant along the weir. This study aims to evaluate the validity of this assumption in converging channels with guiding structures by investigating specific energy variations using numerical simulations.

Methodology

A three-dimensional numerical model was developed using FLOW-3D to simulate flow over a converging side weir. The experimental setup by Maranzoni *et al.*, (2017) was used as a reference for model validation. The numerical domain consisted of a converging channel with a side weir, and guiding structures were placed on the weir crest at three different longitudinal positions (upstream, middle, and downstream) with installation angles of 60°, 90°, and 120° relative to the horizontal.

The Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations were solved using the RNG k- ϵ turbulence model. Boundary conditions included a specified flow rate at the inlet, a pressure outlet at the downstream boundary, and wall conditions for the channel boundaries. Grid independence was ensured by testing different mesh resolutions, with the final model consisting of approximately 1.5 million cells. The numerical model was validated against experimental data, with a maximum simulation error of less than 4%.

Results and Discussion

The numerical results showed that guiding structures influenced specific energy variations along the weir. The middle position of the weir exhibited the least change in specific energy (0.8%) , making it the optimal location for installing guiding structures. In contrast, upstream and downstream placements resulted in greater energy variations, with mean differences of 1.17% and 1.37%, respectively.

The effect of installation angle on specific energy variations was negligible. Across different angles, the mean variation ranged from 1.03% to 1.22%, indicating that the angle of installation had little impact on energy conservation. The influence of the inflow Froude number was also examined. For Froude numbers below 0.3, specific energy variations remained under 0.5%. As the Froude number increased to 0.45, energy variations reached 1.6%, which is still within an acceptable range. These findings suggest that specific energy variations are more sensitive to the location of guiding structures than their installation angle.

The results confirm that the classical assumption of constant specific energy in spatially varied flow with lateral outflow holds even in converging channels with guiding structures. Although minor deviations were observed, they were within acceptable limits for practical applications.

Conclusions

In this study, by comparing the simulation results with experimental data, it was found that the model used for simulating flow over side weirs possesses high accuracy and reliably predicts the actual performance of these structures. One of the key aspects of this research is the accurate simulation of side weirs in converging channels. Despite numerous studies in this area, especially in recent years, certain aspects of the design and hydraulic behavior of these types of weirs still require more detailed investigation and numerical modeling.

The findings of this study demonstrated that the classical concept of specific energy stability in gradually varied flow with decreasing discharge remains valid even under converging conditions and in the presence of guiding structures. The average difference in specific energy between the upstream and downstream of the weir in all simulations was 1.24%. Additionally, the influence of the Froude number on the increase in specific energy variations was clearly observed. However, within the range of Froude numbers less than 0.5, which is typically dominant in irrigation and drainage channels, specific energy variations did not exceed 3%.

Finally, for future research, it is recommended to investigate the effects of factors such as the crest height of the side weir, the presence of orifices within the weir structure, and the influence of supercritical flow regimes on specific energy variations along side weirs, in order to develop a more comprehensive understanding of their hydraulic behavior.

Acknowledgement

We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support (GN: SCU.WH1402.31370).

Keywords: CFD, De Marchi, Spatially varied flow, Water structures



© 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.2025.368890.1610>

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی پایداری انرژی ویژه در سرریزهای جانبی همگرا در حضور سازه های هدایت کننده

امیررضا شهریار^۱ | مهدی دریانی^۲ | سید محمود کاشفی پور^۳ | محمدرضا زایری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

چکیده

این پژوهش به بررسی تغییرات انرژی ویژه در سرریزهای جانبی واقع در کانالهای همگرا در حضور سازه های هدایت کننده پرداخته است. با استفاده از نرم افزار FLOW-3D، جریان در سرریز جانبی همگرا شبیه سازی شد. سازه های هدایت کننده در سه موقعیت مختلف طولی و با زاویه های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نسبت به افق روی تاج سرریز قرار گرفتند. صحت سنجی مدل عددی با داده های آزمایشگاهی نشان داد که خطای شبیه سازی ها کمتر از ۴ درصد است. نتایج به دست آمده نشان داد موقعیت میانی سرریز با کمترین تغییرات انرژی ویژه (۰/۸ درصد)، بهترین محل برای نصب سازه های هدایت کننده است. تأثیر زاویه نصب بر تغییرات انرژی ویژه ناچیز بود و میانگین تغییرات برای زاویه های مختلف بین ۱/۰۳ تا ۱/۲۲ درصد متغیر بود. بررسی تأثیر عدد فرود جریان ورودی نشان داد که در محدوده اعداد فرود کمتر از ۰/۳، تغییرات انرژی ویژه کمتر از ۰/۵ درصد است. با افزایش عدد فرود تا ۰/۴۵، این تغییرات به ۱/۶ درصد می رسد که همچنان در محدوده قابل قبول است. نتایج این تحقیق نشان داد که فرض کلاسیک جریان های متغیر مکانی با خروجی جانبی مبنی بر ثابت بودن انرژی ویژه در طول سرریز، حتی در شرایط همگرایی کانال و حضور سازه های هدایت کننده، همچنان معتبر است.

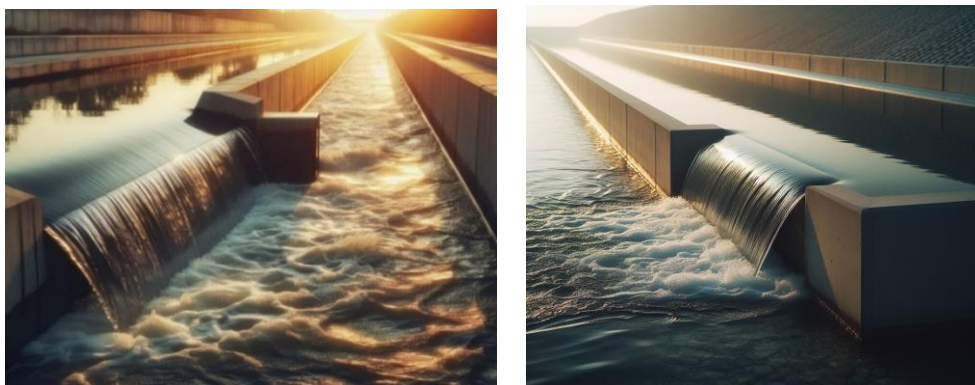
واژه های کلیدی: جریان متغیر مکانی، دی مارچی، دینامیک سیالات محاسباتی، سازه های آبی

مقدمه

سرریزهای جانبی یکی از انواع سازه های هیدرولیکی معمول در کانال های انتقال آب هستند. این سازه در یک سمت کانال اصلی ساخته می شود و تراز تاج آن از تراز برم کانال پایین تر است. هنگامی که تراز آب در کانال اصلی به تراز تاج سرریز جانبی برسد، آب از روی آن عبور می کند و بخشی از جریان کانال اصلی از آن طریق منحرف می شود. این سازه همچنین در شبکه های فاضلاب، تأسیسات نیروگاهی سدها و سیستم های کنترل و پخش سیلاب نیز کاربرد دارد (شکل ۱).

۱) و ۳) و ۴) - گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. (*نویسنده مسئول: Email: M.Daryaei@scu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.368890.1610>



شکل ۱- نمایی از سرریز جانبی (تصاویر با استفاده از ابزار Bing AI Image Creator تولید شده اند)

Fig. 1 – View of the side weir (Images generated using Bing AI Image Creator)

می دانند و معتقدند که با وجود ساده سازی های موجود، از دقت کافی برای کاربردهای عملی برخوردار است (Maranzoni et al., 2017; Paris et al., 2012; Subramanya & Awasthy, 1972). از سوی دیگر، برخی دیگر از محققان این فرض را غیر قابل قبول می دانند و بر این باورند که تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز نباید نادیده گرفته شود، زیرا می تواند به نتایج نادرست در تحلیل های هیدرولیکی منجر شود (El-Khashab & Smith, 1976; Venutelli, 2008). سیتیرینی (Citrini, 1942) به بررسی جریان های کانال جانبی با افزایش عرض کانال در امتداد سرریز جانبی پرداخت. در این مطالعه، یک ترم وابسته به افزایش عرض و عدد فرود به معادله پروفیل سطح آزاد افزوده شده است. نتیجه این پژوهش نشان می دهد که افزایش عرض کانال ناحیه تخلیه سرریز اثرهای نامطلوبی بر مشخصات جریان دارد.

در مقابل، بهره برداری از سرریز جانبی در کانال همگرا دارای مزایای قابل توجهی است که تعدادی از آن ها در اینجا بیان می شود. کانال همگرا با هدایت جریان به سمت سرریز باعث افزایش عمق آب و در نتیجه افزایش ظرفیت عبوری سرریز جانبی می شود (Maranzoni et al., 2017). با استفاده از سرریز همگرا، برای دستیابی به ظرفیت تخلیه مشخص، نیازی به سرریز طولانی نیست. این امر باعث صرفه جویی در فضا و هزینه می شود همچنین با کاهش ابعاد و عرض کانال

جریان عبوری از روی این سازه به دلیل آنکه دبی پیوسته در حال تغییر است و همچنین باتوجه به کاهش دبی کانال اصلی در طول سرریز جانبی، در دسته بندی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی قرار می گیرد. این طیف جریان در دسته بندی ماندگار ($\frac{dQ}{dt} = 0$) و غیریکنواخت ($\frac{dQ}{dx} \neq 0$) تعریف می گردد. دی مارچی (De Marchi, 1934) با در نظر گرفتن فرضیات ساده سازی شده، اولین محقق بود که معادله پویای حاکم بر جریان های متغیر مکانی با کاهش دبی را برای سرریز های جانبی حل کرد (معادله ۱). در این معادله φ_m تابع جریان متغیر دی مارچی، x فاصله از ابتدای سرریز در جهت جریان، K ثابت انتگرال، C_s ضریب دبی تخلیه شده توسط سرریز، B عرض کانال، W ارتفاع تاج سرریز از کف کانال است.

$$\frac{x C_s}{B} = \varphi_m + K \quad (1-الف)$$

$$\varphi_m = \frac{2E - 3W}{E - W} \sqrt{\frac{E - y}{y - W}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E - y}{E - W}} \quad (1-ب)$$

مهم ترین فرض این معادله ثابت بودن انرژی ویژه (E) در طول جریان در کانال اصلی است. رابطه انرژی (Bernoulli, 1738) به عنوان رابطه مبنا به شکل زیر نوشته می شود:

$$E = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (2)$$

با این حال، نظر محققان در مورد فرض دی مارچی متفاوت است. برخی از محققان این فرض را قابل قبول

استفاده از صفحات و سازه‌های هدایت کننده، که یکی از روش‌های کارآمد است، موجب افزایش راندمان تخلیه در سرریزهای جانبی می‌شود (Abbasi et al., 2021; Abdollahi et al., 2017). مطالعات اخیر نشان داده است که نصب سازه‌های هدایت کننده در تراز تاج سرریزهای جانبی می‌تواند به شکلی چشمگیر ظرفیت تخلیه جریان را افزایش دهد (Neysi et al., 2025; Shahriari et al., 2024). استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان در سرریزهای جانبی در پژوهش‌های متعددی مورد توجه قرار گرفته است (Bagheri Seyyed Shekari et al., 2018; Ghaderi et al., 2019; Kalateh & Aminvash, 2023).

با توجه به این یافته‌ها، هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار انرژی ویژه در طول سرریزهای جانبی همگرا با در نظر گرفتن تأثیر سازه‌های هدایت کننده است. اهمیت این موضوع در آن است که ارزیابی دقیق فرضیه دی‌مارچی، مبنی بر ثابت ماندن انرژی ویژه تحت شرایط هندسی مشخص، می‌تواند نقش مهمی در ارتقای دقت طراحی و بهبود فهم هیدرولیکی سرریزهای جانبی داشته باشد. از این رو، با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLOW-3D پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل سرعت و عمق در نقاط مختلف محدوده سرریز تحلیل گردید که به کمک آن می‌توان انرژی ویژه را محاسبه کرد. در بخش پایانی مقاله، دیدگاه‌ها و نتایج تحقیقات مختلف در باره فرضیه کلاسیک پایداری انرژی در سرریزهای جانبی مرور و جمع‌بندی شده است.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار FLOW-3D یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی دینامیک سیالات (CFD)¹ است که برای تحلیل جریان سیالات استفاده می‌شود. مدل FLOW-3D از روش حجم محدود² برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند. روش حجم محدود (VOF) روشی است عددی که برای تعیین موقعیت سطح جداکننده بین دو مایع مختلف (مانند

در پایین دست سرریز می‌توان در هزینه‌های ساخت کانال به میزان قابل توجهی صرفه‌جویی کرد (Ghorbannia & Eghbalzadeh, 2018). در مواردی که کف کانال جانبی بالاتر از کف کانال اصلی است، همگرایی کانال اصلی موجب پس‌زدگی آب می‌شود. سطح آب روی تاج بالا می‌آید و منجر به سهولت ورود جریان به کانال جانبی می‌شود (Saffar et al., 2022). تنگ‌شدگی در پایین دست به عنوان مانع عمل می‌کند و منجر به افزایش عمق آب روی تاج سرریز و در نتیجه افزایش دبی عبوری از روی آن می‌شود (Alahdadi & Shafai-Bajestan, 2020). مزایای ذکر شده در مورد بهره‌برداری از سرریز جانبی در کانال همگرا، نتیجه مطالعات گسترده و تحقیقات آزمایشگاهی و عددی متعددی است که محققان دیگر نیز بررسی و بیان کرده‌اند (Borghei & Parvaneh, 2011; Maranzoni & Tomirotti, 2021; Parsi et al., 2021; Saffar et al., 2023). یکی از مزایای عملی استفاده از سرریزهای جانبی در کانال‌های همگرا این است که با کاهش عرض کانال، در یک دبی تخلیه ثابت، سرعت جریان آب در پایین دست سرریز افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت می‌تواند جابه‌جایی ذرات رسوبی را تسهیل و از تجمع رسوبات در پایین دست کانال اصلی جلوگیری کند. به این ترتیب، ظرفیت انتقال رسوب کانال اصلی تا حد مطلوبی حفظ می‌شود که این امر نیاز به لایروبی مکرر را کاهش می‌دهد و به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان می‌انجامد. با تأکید بر مزایای این سازه‌ها، شبیه‌سازی عددی آنها نقش کلیدی در تسهیل طراحی و اجرای آنها برای مهندسان دارد. همان‌طور که مطرح شد، استفاده از سرریزهای جانبی با هندسه‌ای که به همگرایی میل می‌کند، دارای توجیه اقتصادی و هیدرولیکی است. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش دبی سیلاب‌ها، ضروری است ساختار سرریزها تغییر یابند تا تخلیه منظم و ایمن تضمین شود (Idrees & Al-, 2023).

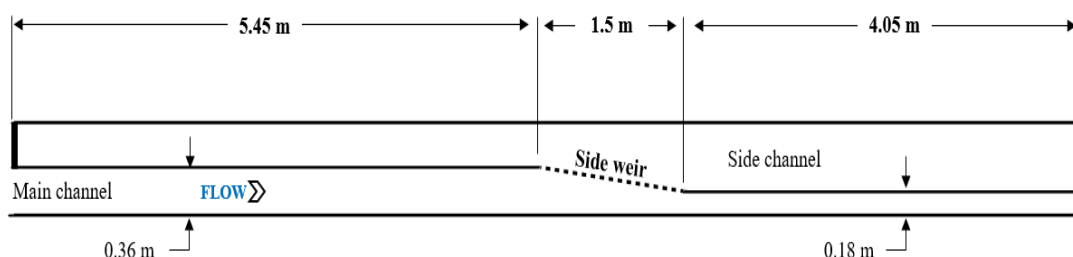
² Volume of Fluid - VOF

¹ Computational fluid dynamics

متر و ارتفاع ۰/۴ متر اجرا گردید. این فلوم با یک دیوار میانی به دو قسمت کانال اصلی و جانبی تقسیم شد. یک محدوده همگرا در فاصله ۵/۴۵ متر از ورودی ایجاد شد. عرض کانال اصلی در بالادست و پایین دست آن به ترتیب معادل ۳۶ و ۱۸ سانتی متر در نظر گرفته شد. طول قسمت همگرا ۱/۵ متر و یک سرریز جانبی با ارتفاع ۱۸/۳ سانتی متر در این محدوده نصب شد (شکل ۲). ضخامت تاج معادل ۵/۵ سانتی متر بود.

آب و هوا) به کار می رود (Hirt & Nichols, 1981). این نرم افزار حرکت جریان را با حل معادلات RANS (میانگین رینولدز ناویر استوکس) توصیف می کند که در مقالات متعددی این معادلات تشریح شده اند (Daryaei et al., 2025; Ahadiyan et al., 2016).

در این پژوهش، داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط مارانزونی و همکاران (Maranzoni et al., 2017) به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل عددی استفاده شد. در مطالعه مذکور، آزمایش ها در یک فلوم با طول ۱۱ متر، عرض ۰/۷



شکل ۲- پلان کلی فلوم آزمایشگاهی (Maranzoni et al. 2017)

Fig. 2 – General plan of the experimental flume by Maranzoni et al. (2017)

حل مدل آشفتگی RNG به صورت زیر هستند:

در مقاله حاضر مدل تلاطم RNG به منظور کالیبراسیون و صحت سنجی مدل عددی بررسی شد. معادله حاکم برای

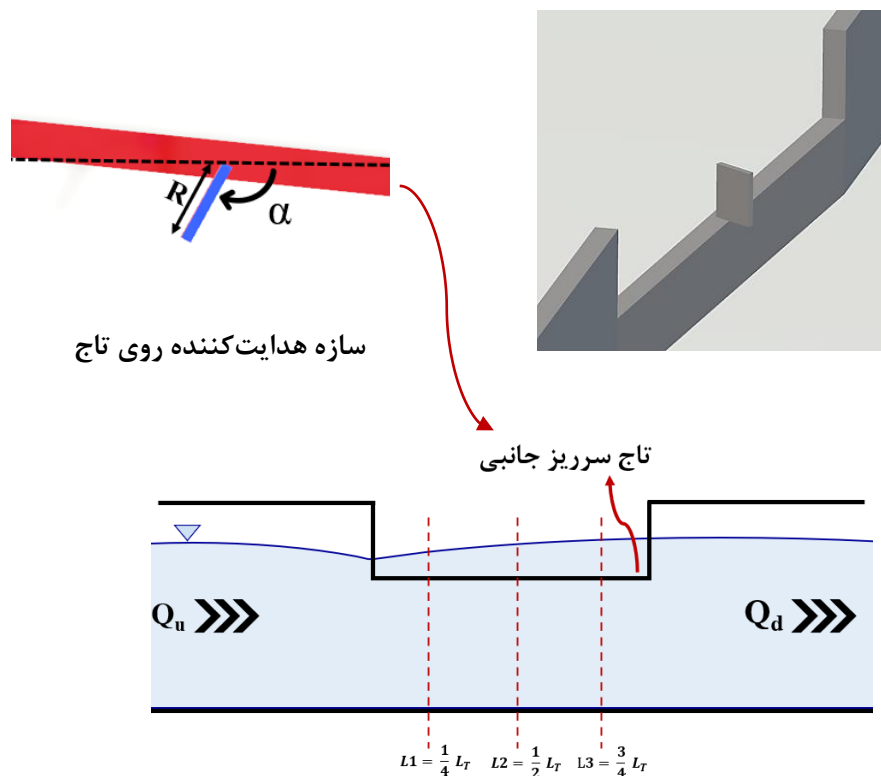
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho K U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_K - \rho \varepsilon \quad (3-الف)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} P_K - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (3-ب)$$

در این پژوهش، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D، تأثیر سازه های هدایت کننده بر ثبات انرژی ویژه در تاج سرریزهای جانبی همگرا بررسی شده است. هندسه سرریزهای مورد استفاده کاملاً مطابق با هندسه ارائه شده در مطالعات مارانزونی و همکاران (Maranzoni et al., 2017) تعریف شده است. در این شبیه سازی ها، یک سازه هدایت کننده روی تاج سرریز در سه موقعیت مختلف L1، L2 و L3 قرار داده شد (شکل ۳). هریک از این موقعیت ها نسبتی از طول کل سرریز ($L_T=1.51$ m) است.

در معادلات فوق انرژی جنبشی تلاطمی (TKE)، ε شدت اتلاف انرژی، ρ دانسیته، t زمان، X_i مختصات در راستای محور i ، μ ویسکوزیته دینامیکی، μ_t ویسکوزیته دینامیکی متلاطم، و P_K معادله انتقال انرژی جنبشی تلاطمی است. پارامترهای $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، σ_K ، σ_ε مقادیری ثابت و به ترتیب برابرند با ۰/۷۱۹۴، ۰/۷۱۹۴، ۱/۶۸ و ۱/۴۲ (Yakhov et al., 1992). پارامتر μ_t بر اساس معادله (۴) تعیین می شود. در این معادله پارامتر C_μ ثابت و معادل ۰/۰۸۴۵ است.

$$\mu_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (4)$$



شکل ۳- نمای از سرریز جانبی همگرا و سازه هدایت کننده روی تاج و پارامترهای آن

Fig. 3 – View of the converging side weir and the guiding structure on the crest along with its parameters

طول این سازه هدایت کننده (R) برابر با ۲۰ درصد عرض کانال بالادست (۷/۲ سانتی متر) انتخاب شد. طول سازه بی بعد انتخاب شد تا قابل تعمیم برای دیگر پژوهش‌ها باشد. سه زاویه نصب ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نسبت به افق برای سازه در نظر گرفته شد. ارتفاع سازه هدایت کننده به گونه‌ای تعیین شد که جریان عبوری از روی آن در حالت مستغرق نباشد. هدف از این جانمایی‌ها بررسی تأثیر موقعیت و زاویه نصب سازه هدایت کننده بر تغییرات انرژی ویژه در کانال اصلی بود. برای تمامی شبیه‌سازی‌ها در ابتدا دبی ثابت $Q_u = 45 \text{ Lit/s}$ به کار گرفته شد. برای ارزیابی تأثیر تغییر عدد فروود جریان ورودی (Fr_u)، حالتی که سازه هدایت کننده در زاویه ۱۲۰ درجه و موقعیت $L2$ قرار دارد، به عنوان حالتی انتخاب شد که بیشترین دبی انحرافی را ایجاد می‌کند. پس

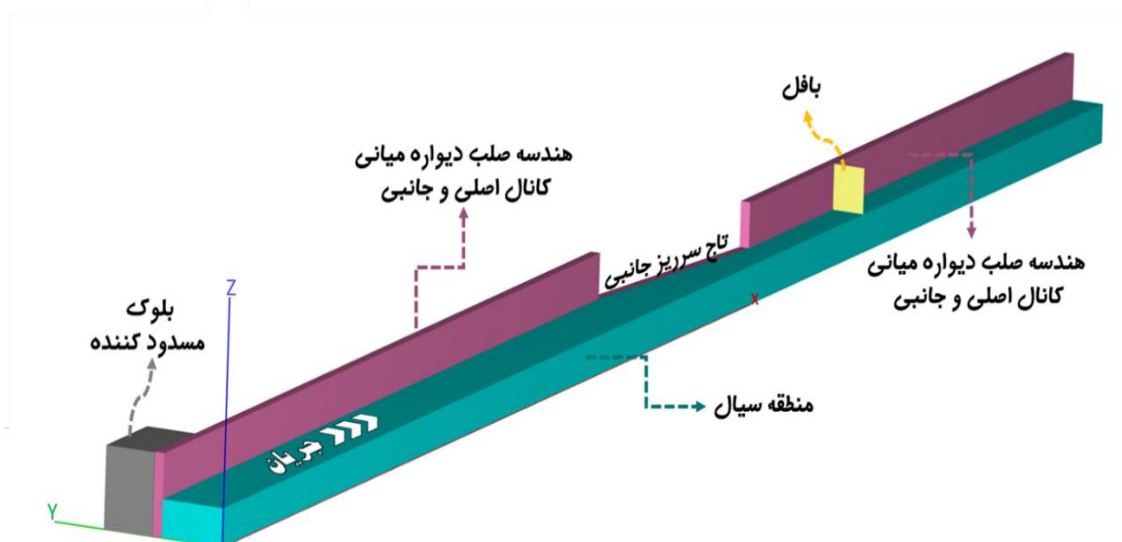
از آن دبی‌های ورودی مختلف ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ لیتر بر ثانیه نیز بررسی شدند. این سناریوها به منظور درک بهتر نقش سازه‌های هدایت کننده در تغییرات انرژی ویژه در شرایط همگرایی سرریزهای جانبی تعریف شدند. در شبیه‌سازی‌ها، آب به عنوان سیال مورد استفاده با دانسیته 1000 kg/m^3 و ویسکوزیته دینامیکی 0.001 kg/m.s در نظر گرفته شد. این فرضیات معمول برای شبیه‌سازی جریان‌های آبی در شرایط معمولی دما و فشار است و به دقت شبیه‌سازی کمک می‌کند. از آنجا که دانسیته آب در شرایط عادی تقریباً ثابت است، از مدل سیال تراکم‌ناپذیر^۱ در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. تنظیمات مربوط به ردیابی سطح آب به صورت سطح آزاد^۲ در نظر گرفته شد. این تنظیم به نرم‌افزار اجازه می‌دهد تا سطح آزاد بین آب‌وهوا را با دقت

² Free surface or sharp interface

¹ Incompressible

در پایین دست کانال اصلی یک بافل^۲ قرار داده شد تا میزان دبی انحرافی قابل سنجش باشد. این بافل یک متر پس از سرریز جانبی در کانال اصلی قرار داده شد. ارتفاع این بافل برابر با ارتفاع دیواره فلوم در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از ورود جریان به کانال جانبی قبل از سرریز، از یک بلوک مسدودکننده نیز در ابتدای کانال جانبی استفاده شد. جزئیات ذکر شده به خوبی در شکل (۴) نمایش داده شده اند.

بیشتری مدل سازی و تغییرات سطحی را به درستی تحلیل کند. در فیزیک شبیه سازی نیروی ثقل و مدل آشفستگی اعمال شدند. به منظور کاهش زمان شبیه سازی و بهینه سازی شرایط مدل سازی در کانال اصلی تا ارتفاع تاج سرریز، یک منطقه سیال^۱ با شرایط هیدرواستاتیک تعریف شد. سیال به گونه ای قرار داده شد که تنها در کانال اصلی و پایین تر از تراز تخلیه سرریز قرار گیرد تا در دبی خروجی تأثیری نداشته باشد و در کاهش زمان شبیه سازی مؤثر باشد. علاوه بر این،



شکل ۴- نمایی از هندسه، منطقه سیال و بافل تعریف شده برای مدل عددی

Fig. 4 – View of the geometry, fluid domain, and the defined baffle used in the numerical model

هندسه سازه به دلیل زاویه دار بودن به خوبی شناسایی شود. در مجموع، ۱/۵ میلیون مش برای کل هندسه تولید شد. تعداد نهایی مش بر اساس آزمون استقلال مش تعیین شد (شکل ۵). مفهوم نبود وابستگی به مش یا استقلال مش به حالتی اشاره دارد که نتایج شبیه سازی دیگر به ابعاد و تعداد سلول های شبکه وابسته نباشند. نتایج درصد خطای داده های مدل عددی نسبت به داده های آزمایشگاهی (Maranzoni et al., 2017) نشان می دهد که از مش ۱/۵ میلیون سلولی به بعد، وابستگی نتایج به ابعاد مش ناچیز است و می توان این تعداد مش را به عنوان حالت بهینه برای

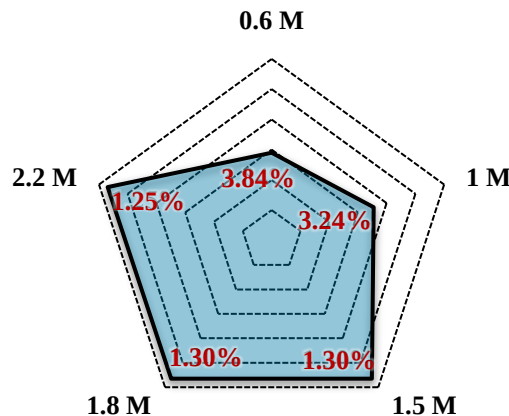
برای شبکه بندی مدل از مش های مربعی استفاده شد. به منظور مش بندی، هندسه مدل به چهار مش بلاک تقسیم شد. با توجه به اهمیت بالای محدوده سرریز جانبی در شبیه سازی، مش بلاک دوم در محدوده سرریز با ۹۵۰ هزار مش تعریف شده است. این تعداد به منظور افزایش دقت محاسباتی و ارائه نتایج دقیق تر در این ناحیه در نظر گرفته شد. مش بلاک اول با ۲۵۰ هزار و مش بلاک سوم با ۲۰۰ هزار مش به ترتیب در بالادست و پایین دست سرریز قرار گرفته اند. مش بلاک چهارم با ۱۰۰ هزار مش، درون مش بلاک دوم و در اطراف سازه هدایت کننده تعریف گردید تا

² Baffle

¹ Fluid region

ادامه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفت. در این پژوهش، برای مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی از شاخص آماری درصد خطا^۱ استفاده شد. در شبیه‌سازی نتایج

$$\%Error = \frac{|D_{EXP} - D_{NUM}|}{D_{EXP}} \times 100 \quad (5)$$



شکل ۵- بررسی وابستگی نتایج به تعداد سلول مش براساس درصد خطای عمق آب در پایین دست سرریز جانبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی (Maranzoni et al. 2017)

Fig. 5 – Mesh sensitivity analysis based on the percentage error of downstream water depth compared to the experimental results (Maranzoni et al., 2017)

برای ورودی کانال که در اولین بلوک مدل قرار دارد، دبی ثابت و معینی^۲ در نظر گرفته شد. دیواره‌های جانبی و بستر کانال به عنوان مرزهای صلب^۳ مدلسازی شده‌اند تا تحرک پذیری دیواره‌ها را محدود کنند، درحالی که دیگر مرزهای مدل به صورت متقارن^۴ در نظر گرفته شده‌اند تا اثرهای نامحدود بودن فضا را شبیه‌سازی کنند. سرانجام،

جدول ۱- شرایط مرزی میدان حل

Table 1 – Boundary conditions of the solution domain

Mesh No.	X min	X max	Y min	Y max	Z min	Z max
۱	دبی ورودی	متقارن	دیواره	دیواره	دیواره	متقارن
۲	متقارن	متقارن	دیواره	دیواره	دیواره	متقارن
۳	متقارن	خروجی	دیواره	دیواره	دیواره	متقارن
۴	متقارن	متقارن	متقارن	متقارن	متقارن	متقارن

^۴ Symmetric

^۵ Outflow

^۱ Error

^۲ Volume flow rate

^۳ Wall

نتایج و بحث

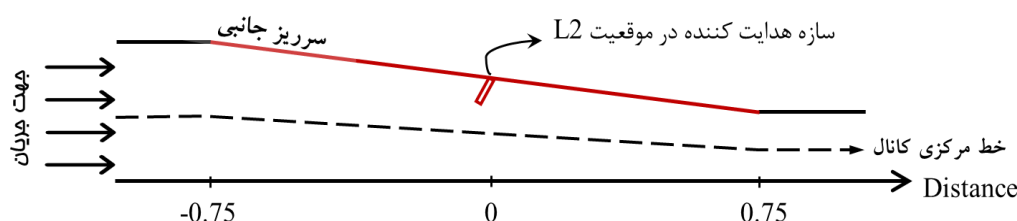
(2017) به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شد. پروفیل جریان در

خط مرکزی کانال که در شکل (۶) نمایش داده شده است،

صحت سنجی مدل عددی

به منظور بررسی صحت و دقت مدل عددی مورداستفاده

در این تحقیق، نتایج آزمایشگاهی (Maranzoni et al.,



شکل ۶- نمایش مقطع برداشت پروفیل طولی جریان

Fig. 6 – Illustration of the cross-section used for extracting the longitudinal flow profile

مقادیر عددی و آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده اند. در بازه های پایین دست نشان می دهد که مدل عددی با فاصله

مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی خطای کمتر از ۴ گرفتن از نقطه شروع جریان، عملکرد باثبات تری در تخمین

درصد را نشان می دهد که این امر نشان دهنده تطابق و دقت عمق جریان از خود نشان می دهد.

بالای شبیه سازی عددی است. علاوه بر این، روند کاهش خطا

جدول ۲- مقایسه عمق آب آزمایشگاهی و مدل عددی در خط مرکزی کانال اصلی

Table 2 – Comparison of experimental and numerical water depths along the centerline of the main channel

Distance	Water Depth (cm)		Error (%)
	Maranzoni et al., (2017)	FLOW-3D Model	
-0.75	21.44	20.73	3.31
-0.60	21.44	20.73	3.31
-0.45	21.44	20.68	3.54
-0.30	21.46	20.75	3.31
-0.15	21.49	20.80	3.21
0.00	21.54	20.82	3.34
0.15	21.56	20.82	3.43
0.30	21.62	20.88	3.42
0.45	21.64	21.08	2.58
0.60	21.61	21.33	1.30
0.75	21.67	21.38	1.34

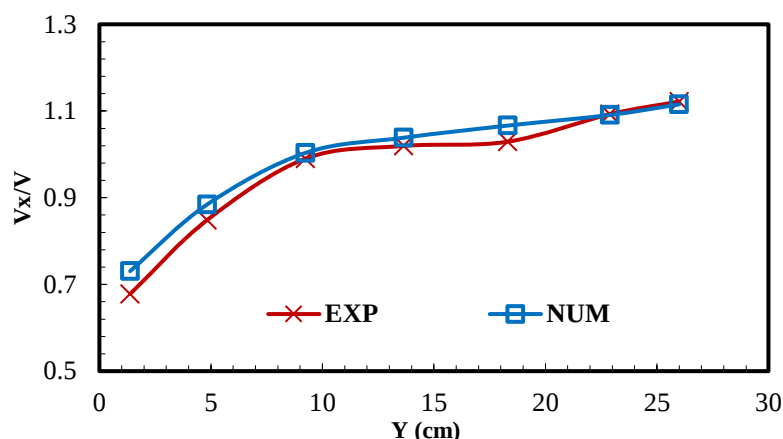
در راستای صحت سنجی مدل عددی و بررسی دقت آن سرریز جانبی در ارتفاع ۲۰ سانتی متری از کف کانال

در شبیه سازی رفتار هیدرولیکی جریان در مجاورت سرریز استخراج گردید و با داده های آزمایشگاهی (Maranzoni et

al., 2017) مقایسه شد (شکل ۷). مطابق شکل، تطابق قابل

قبولی بین نتایج مدل عددی و داده های تجربی مشاهده

سرعت عددی و آزمایشگاهی. به این منظور، نسبت بی بعد سرعت طولی به سرعت متوسط عمقی ($\frac{V_x}{V}$) در مقطع میانی



شکل ۷- مقایسه داده های آزمایشگاهی نسبت بدون بعد سرعت با نتایج شبیه سازی شده توسط مدل عددی
Fig. 7 – Comparison of experimental and numerical model results for the dimensionless velocity ratio

عمق آب روی تاج سرریز جانبی

بر اساس توصیه نوواک و همکاران (Novak *et al.*, 2018)، عمق آب روی تاج سرریز باید بیشتر از ۳ سانتی متر باشد تا بتوان اثر کشش سطحی را نادیده گرفت. کشش سطحی پدیده‌ای ناشی از نیروهای بین مولکولی در سطح مایعات است و باعث ایجاد تنش در سطح سیال می‌شود (Spurk & Aksel, 2019). در پژوهش حاضر، برای حصول اطمینان بیشتر و حذف کامل اثرهای کشش سطحی، شرایط اجرای مدل به نحوی در نظر گرفته شد تا عمق آب روی تاج بیش از ۴ سانتی متر باشد. برای دستیابی به این هدف، مدل با دبی‌های مختلفی از ۲۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه اجرا و عمق آب روی تاج سرریز برای هر دبی اندازه گیری شد. نتایج در شکل (۸) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که از دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه به بعد، عمق آب روی تاج سرریز از ۴ سانتی متر بیشتر است.

تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز

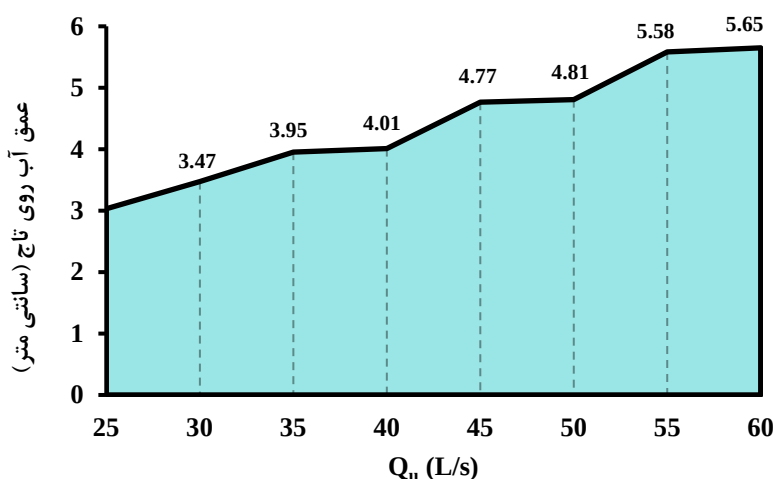
به منظور صحت سنجی این فرض، داده‌های مربوط به انرژی ویژه جریان در نقاط مختلف سرریز برای همه آزمایش‌ها جمع‌آوری گردید. میانگین اختلاف انرژی ویژه بین بالادست و پایین دست سرریز (ΔE %) مطابق رابطه زیر محاسبه گردید.

$$\% \Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad (6)$$

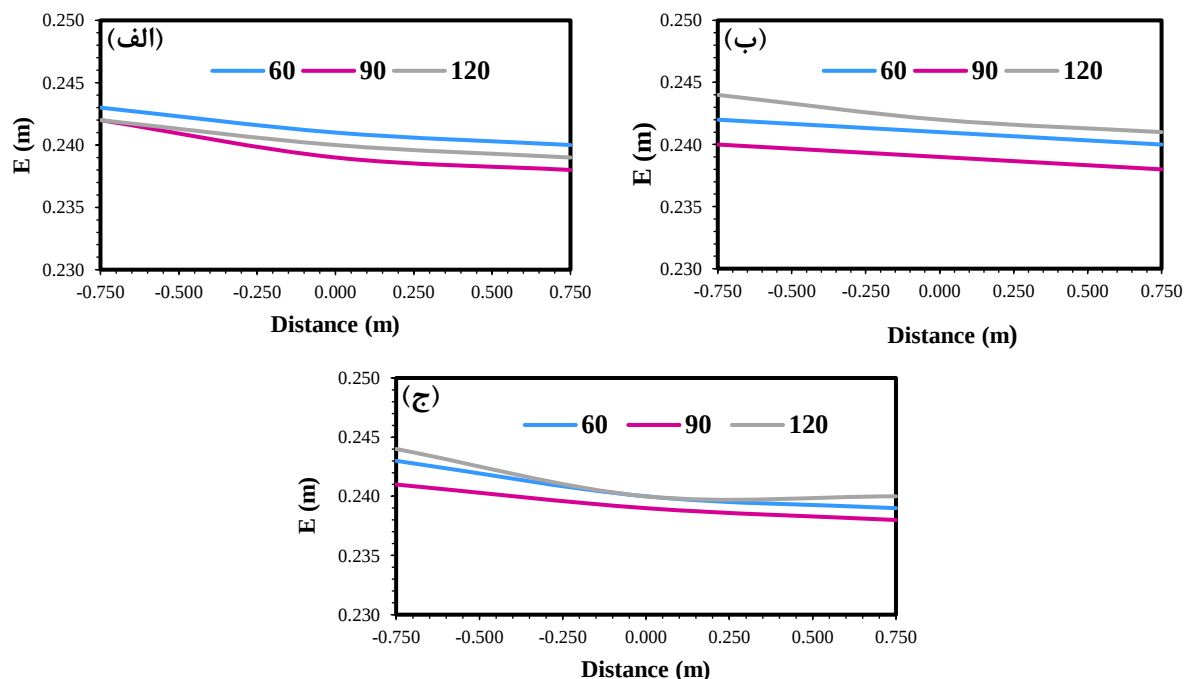
مطابق شکل (۷)، علاوه بر تطابق مناسب در شبیه سازی عمق آب، نتایج مدل عددی در بازتولید پروفیل‌های سرعت نیز هماهنگی قابل قبولی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که این امر دقت مدل را در شبیه سازی رفتار هیدرولیکی جریان تأیید می‌کند. در این پژوهش، از مدل آشفتگی RNG برای شبیه سازی جریان در کانال‌های همگرا با سرریز جانبی استفاده شد. انتخاب این مدل بر اساس بررسی‌ها در مطالعات پیشین بوده است. برای مثال، تحقیقات مشابهی که توسط صفار و همکاران (Saffar *et al.*, 2024) و نیسی و همکاران (Neysi *et al.*, 2025) صورت گرفته نشان داده‌اند که مدل RNG در پیش‌بینی رفتار جریان‌های آشفته در سرریزهای جانبی همگرا عملکرد بسیار مناسبی دارد و نتایجی با دقت بالا ارائه می‌دهد. بر اساس این شواهد، در این مطالعه از بررسی دیگر مدل‌های آشفتگی صرف نظر شد و تمرکز روی مدل RNG شد. تحقیقات متعدد دیگر (Azimi *et al.*, 2018; Bagherifar *et al.*, 2019; Hussein & Jalil, 2024) نیز کارایی این مدل را برای شبیه سازی سرریزهای جانبی تأیید کرده‌اند. لازم است گفته شود محدود کردن بررسی‌ها به این مدل آشفتگی، به منظور کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی است. نتایج حاصل از این پژوهش نیز تأییدکننده عملکرد قابل قبول این مدل در شبیه سازی هیدرولیک جریان‌های آشفته است.

در این رابطه: E_1 انرژی ویژه بالادست و E_2 انرژی ویژه پایین دست سرریز در کانال اصلی است. برای همه شبیه سازی های این تحقیق میانگین اختلاف انرژی بین بالادست و پایین دست کمتر از ۱/۵ درصد بوده است.

برای بررسی دقیق تر، شبیه سازی هایی در حضور سازه هدایت کننده در سه موقعیت و سه زاویه نصب به اجرا درآمد. با استفاده از مدل FLOW-3D انرژی ویژه جریان در طول سرریز برداشت شد (شکل ۹). همه این شبیه سازی ها در دبی ورودی ثابت ۴۵ لیتر بر ثانیه بوده است.



شکل ۸- بررسی عمق آب روی تاج سرریز جانبی در دبی های ورودی مختلف
Fig. 8 – Analysis of water depth over the side weir crest at different inlet discharges



شکل ۹- تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز جانبی در حضور سازه هدایت کننده در سه زاویه و سه موقعیت: (الف) L1، (ب) L2، (ج) L3
Fig. 9 – Variations of specific energy along the side weir in the presence of the guiding structure at three angles and three positions: (a) L1, (b) L2, (c) L3

نظر گرفته می‌شود اما این موضوع نشان می‌دهد موقعیت L2 (وسط سرریز جانبی)، بهترین موقعیت برای نصب سازه‌های هدایت کننده جریان است از این نظر که کمترین تاثیر را بر انرژی ویژه جریان دارد. در شکل (۱۰)، نمایی از جت خروجی از سرریز جانبی در حضور سازه هدایت کننده در زاویه ۱۲۰ درجه و در وسط سرریز جانبی نشان داده شده است.

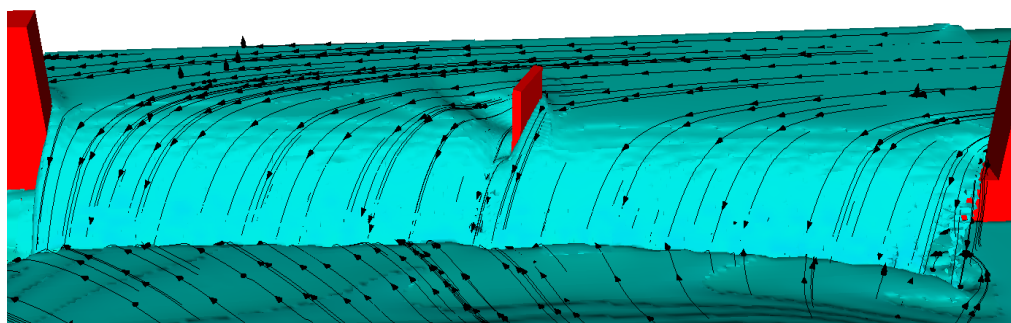
از نظر زاویه نصب سازه هدایت کننده، تاثیر آن بر اختلاط جریان و تغییرات در انرژی ویژه در مقایسه با دیگر عوامل تاثیرگذار بسیار کم است. میانگین تغییرات انرژی ویژه برای زاویه ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ به ترتیب معادل ۱/۰۳، ۱/۰۴ و ۱/۲۲ درصد است. این مقادیر نشان‌دهنده تفاوت‌های اندک در اختلاف انرژی ویژه در طول سرریز جانبی با تغییر زاویه نصب سازه هدایت کننده است.

شبیه‌سازی‌ها در مراحل ابتدایی تحقیق برای بررسی عمق آب روی تاج، از نظر انرژی ویژه در مقابل عدد فرود تحلیل شدند.

($Fr_u = 0.22, 0.26, 0.30, 0.34, 0.36, 0.40, 0.42, 0.45$)

در تمامی حالات، روند تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز جانبی کاهشی است. این کاهش عمدتاً ناشی از افت تدریجی دبی در طول سرریز به دلیل انحراف جریان به خارج از کانال اصلی است. با افزایش طول سرریز و کاهش پیوسته دبی عبوری، انرژی ویژه نیز کاهش می‌یابد. این روند با شرایط فیزیکی جریان در سرریزهای جانبی سازگار است و نشان‌دهنده رفتار طبیعی این نوع سازه‌ها در انتقال تدریجی جریان به خارج از کانال اصلی است. تغییر زاویه نصب سازه هدایت کننده منجر به ایجاد افت‌های موضعی در جریان می‌شود، اما تاثیر این تغییر زاویه بر انرژی ویژه در بالادست و پایین‌دست سرریز معنادار نیست.

به‌طور کلی، برای همه حالات نصب سازه هدایت کننده تاثیر تغییر زاویه بر انرژی ویژه ناچیز است. به‌ویژه هنگامی که سازه در موقعیت L2 قرار دارد تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز به کمتر از ۰/۸ درصد می‌رسد. اما در موقعیت L1 و L3 تاثیر کمتری بر کاهش انرژی ویژه می‌گذارد. میانگین تغییرات انرژی ویژه برای این موقعیت‌ها به ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۳۷ درصد است. هرچند همه این تغییرات قابل قبول در

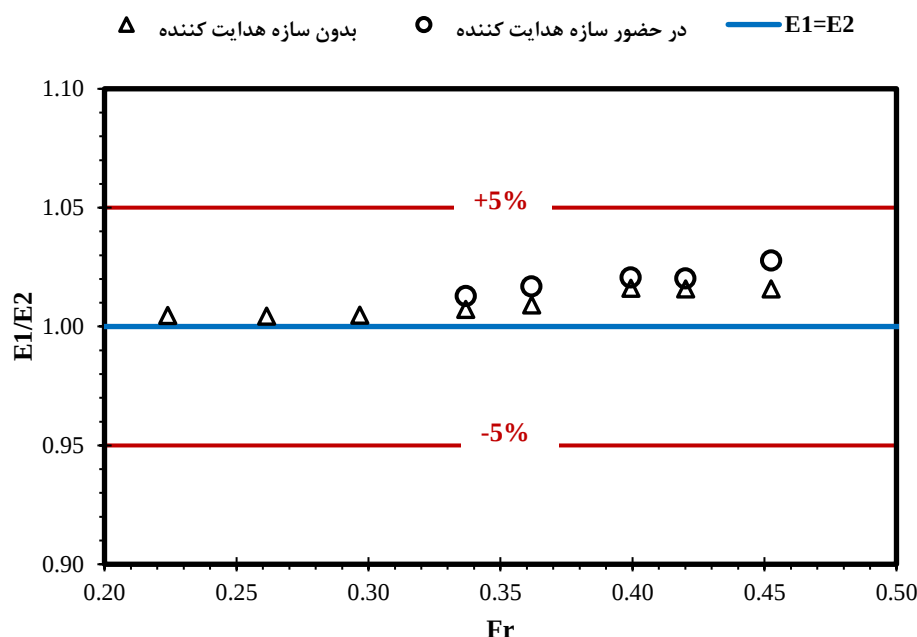


شکل ۱۰- نمایی از جت خروجی سرریز در حضور سازه هدایت کننده در زاویه نصب ۱۲۰ و موقعیت L2

Fig. 10 – View of the side weir outflow jet in the presence of the guiding structure installed at a 120° angle and position L2

شد (شکل ۱۱). لازم است یادآوری شود یکی از دلایل محدود شدن ارزیابی‌ها به این حالت خاص، محدودیت در تعداد شبیه‌سازی‌های قابل اجرا بود، زیرا بررسی تمامی حالات جایگذاری و زاویه‌های نصب سازه هدایت کننده در دبی‌های مختلف نیازمند شبیه‌سازی‌های بسیار زیادی بود.

علاوه بر این، حالتی که سازه هدایت کننده در موقعیت L2 و زاویه ۱۲۰ درجه قرار داشت، که از نظر عملکرد تخلیه بهترین حالت مطابق با پژوهش شهریاری و همکاران (Shahriari et al., 2024) شناخته شده است، در دبی‌های ورودی ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ لیتر بر ثانیه با عدد فرود معادل به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۳۶، ۰/۴۰، ۰/۴۲ و ۰/۴۵ بررسی



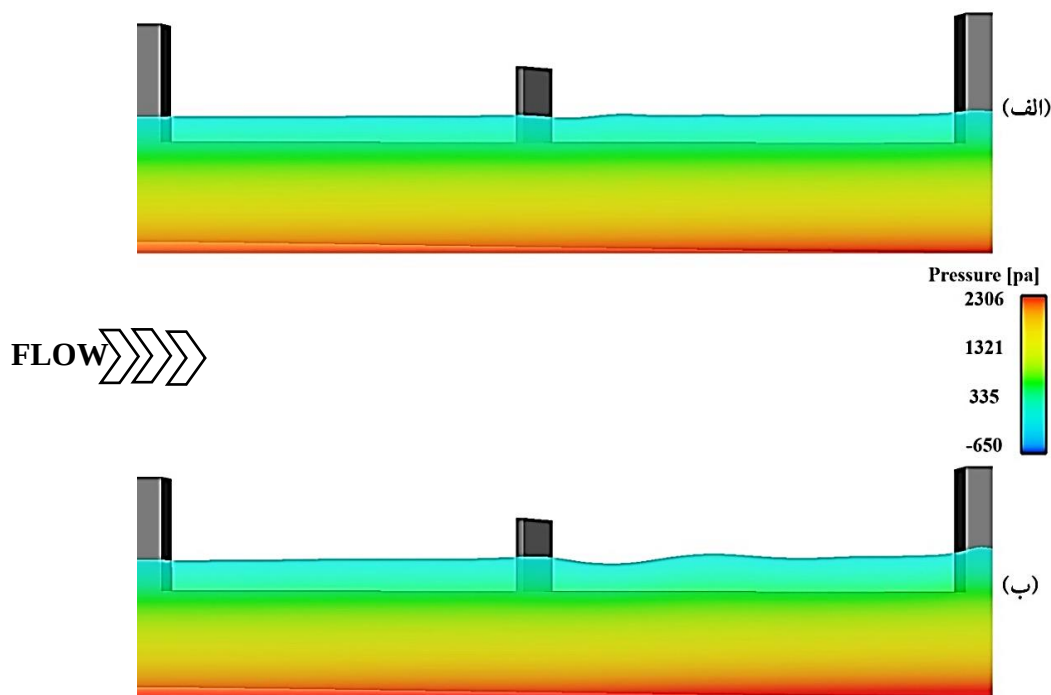
شکل ۱۱- بررسی اثر افزایش عدد فرود بالادست بر تغییرات انرژی ویژه در طول کانال اصلی

Fig. 11 – Analysis of the effect of increasing upstream Froude number on specific energy variations along the main channel

تقریباً بر هم منطبق هستند اما در عدد فرود ۰/۴۵ این تغییر کمی مشهود است. شکل (۱۲)، روند تغییرات سطح آب و توزیع فشار را در خط مرکزی کانال اصلی برای دبی ورودی ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه (عدد فرود های ۰/۳۴ و ۰/۴۵) با حضور سازه هدایت کننده نشان می دهد. پروفیل طولی عمق جریان در عدد فرود کمتر یکنواخت تر و همگن تر است.

در محدوده پس از سازه هدایت کننده در عدد فرود بیشتر، به ویژه، تلاطم و تغییرات سطحی جریان مشهود است. علاوه بر این، در دبی های بالا افت های موضعی ناشی از برخورد جریان با سطوح مختلف سرریز و سازه هدایت کننده افزایش می یابد. از سوی دیگر، توزیع فشار نیز دستخوش تغییر شده است. در حالت با عدد فرود پایین تر (شکل الف)، فشار در ناحیه زیرین جریان یکنواخت تر است و مقادیر بالاتری دارد. در مقابل، در عدد فرود بالاتر (شکل ب)، نوسان های فشار در طول کانال بیشتر و دامنه تغییرات آن نیز گسترده تر است. این موضوع به افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش گرادیان فشار در کانال مرتبط است.

با توجه به شکل (۱۱)، مقدار تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز با افزایش عدد فرود به طور معناداری افزایش می یابد. در شرایط همگرایی کانال در اعداد فرود بالادست کمتر از ۰/۳ تغییرات انرژی ویژه بسیار ناچیز است و مقدار آن از ۰/۵ درصد کمتر است. با افزایش عدد فرود تغییرات انرژی ویژه بیشتر می شود و در فرود ۰/۴۵ به ۱/۶ درصد می رسد. باید گفت به لحاظ اجرایی به ندرت محدوده عدد فرود در کانال های آبیاری و زهکشی از ۰/۵ بیشتر می شود. این موضوع نشان می دهد در بهره برداری از سرریز جانبی در کانال همگرا شرط کلاسیک جریان متغیر مکانی با دبی کاهشی مبنی بر ثبات انرژی در طول سرریز حتی در حضور سازه های هدایت کننده برقرار است. حضور سازه های هدایت کننده منجر به افزایش تغییرات انرژی شده است و افزایش عدد فرود این تاثیر را افزایش می دهد اما در بیشترین عدد فرود بررسی شده هم میزان کاهش انرژی ویژه به ۳ درصد نمی رسد. اختلاف بین تغییرات انرژی در حالت حضور و بدون حضور سازه تا عدد فرود ۰/۴۲ معنی دار نیست و



شکل ۱۲- پروفیل طولی آب در خط مرکزی کانال اصلی برای عدد فرود ورودی: (الف) ۰/۳۴ و (ب) ۰/۴۵

Fig. 12 – Analysis of the effect of increasing upstream Froude number on specific energy variations along the main channel

نتایج پژوهش‌های دیگر محققان

می‌گویند فرض ثابت بودن انرژی، که معمولاً در مدل‌سازی جریان‌های سرریز جانبی به کار گرفته می‌شود، برای جریان‌های سرریز جانبی در کانال‌های همگرا نیز قابل قبول است، به‌ویژه برای مقادیر کمتر عدد فرود ($Fr_0 < 0.35$) میانگین اختلاف نسبی مطلق مشاهده‌شده بین انرژی مخصوص بالادست و پایین‌دست سرریز جانبی ۰/۵ درصد است. قدسیان (Ghodsian, 2004) میانگین اختلاف انرژی ویژه بین بالادست و پایین‌دست سرریز جانبی لبه‌تیز مثلثی را برای زاویه‌های رأس ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۵۵، ۰/۷۲ و ۰/۹۴ درصد گزارش کرد. نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد فرض پایداری انرژی حتی در شرایط بسترهای غیرصلب و پیکره‌های شیب‌دار نیز دارای اعتبار است و تغییرات انرژی ویژه در شرایط گفته شده کمتر از ۵ درصد اندازه گیری شده است (Bacco & Scorzini, 2020). علاوه بر این، راه حل‌های تحلیلی دیگری بر اساس

محققانی که فرض پایداری انرژی یا به عبارتی ناچیز بودن کاهش انرژی ویژه را رد کردند اغلب برای جریان‌های فوق‌بحرانی آن را غیرقابل قبول در نظر گرفته‌اند. از جمله پژوهش‌هایی که به این مورد اشاره کرده‌اند می‌توان به Venutelli (2008) و Balmforth & Sarginson (1983) اشاره کرد. این محققان و نیز برخی دیگر، برای جریان‌های فوق‌بحرانی یا جریان‌هایی که نمی‌توان فرض پایداری انرژی را درباره آن‌ها پذیرفت، استفاده از رابطه مومنتم را دقیق‌تر می‌دانند (Hager, 1987; Robinson & McGhee, 1993). گرچه برخی محققان، به‌ویژه در جریان‌های فوق‌بحرانی، استفاده از معادله مومنتم را ترجیح داده‌اند، اما شواهد عددی و آزمایشگاهی تحقیقات دیگر نشان می‌دهد که فرض پایداری انرژی تحت شرایط جریان زیربحرانی همچنان معتبر است. مارانزونی و همکاران (Maranzoni et al., 2017)

پژوهش نشان داد که ایده کلاسیک ثبات انرژی ویژه جریان متغیر مکانی با کاهش دبی، حتی در شرایط همگرایی و حضور سازه های هدایت کننده، همچنان قابل قبول است. میانگین اختلاف انرژی ویژه بین سرآب و پایاب سرریز در تمام شبیه سازی ها برابر با ۱/۲۴ درصد بود. نصب سازه هدایت کننده در موقعیت میانی سرریز جانبی، کمترین میزان استهلاک انرژی را به همراه داشت. اثر زاویه نصب سازه ها بر تغییرات انرژی ویژه معنادار نیست.

علاوه بر این، تأثیر عدد فرود بالادست در افزایش تغییرات انرژی ویژه به وضوح مشاهده شد، اما در محدوده عدد فرود کمتر از ۰/۵ که معمولاً در کانال های آبیاری و زهکشی حاکم است، تغییرات انرژی ویژه از ۳ درصد فراتر نرفت. سرانجام، برای تکمیل مطالعات در این زمینه، پیشنهاد می شود در مطالعات آتی تأثیر عواملی مانند ارتفاع تاج سرریز جانبی، وجود روزنه در ساختار سرریز و همچنین محدوده عدد فرود فوق بحرانی بر تغییرات انرژی ویژه در طول سرریز های جانبی بررسی شود تا دیدگاه جامع تری از رفتار هیدرولیکی این نوع سرریزها ارائه شود.

اصل پایداری انرژی برای سرریزهای جانبی در کانال های سهموی، مثلی و دوزنقه ای ارائه شده است (Vatankhah, 2012a, 2012b, 2013) این موضوع از آن رو مهم است که استفاده از کانال های مذکور، به ویژه کانال های دوزنقه ای، در طراحی شبکه های آبیاری و زهکشی بسیار رایج است.

نتیجه گیری

در این تحقیق، با مقایسه نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی، مشخص شد که مدل مورد استفاده در شبیه سازی جریان در سرریزهای جانبی دقت بالایی دارد و عملکرد واقعی این سازه ها را به خوبی پیش بینی می کند. یکی از جنبه های کلیدی این پژوهش، شبیه سازی مطلوب سرریزهای جانبی در کانال های همگرا است. با وجود مطالعات متعدد در این زمینه، به ویژه در سال های اخیر، برخی از جنبه های طراحی و رفتار هیدرولیکی این نوع سرریزها همچنان نیازمند بررسی دقیق تر و مدل سازی عددی است. از این رو، در متن مقاله تلاش شده است فرآیند شبیه سازی با دقت و جزئیات کافی تشریح شود تا درک بهتری از عملکرد این سازه ها ارائه گردد. یافته های این

قدردانی

از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز برای حمایت های مالی شان در قالب پژوهانه (GN: SCU.WH1402.31370) و در به ثمر رسیدن این تحقیق قدردانی می شود.

مراجع

- Abbasi, S., Fatemi, S., Ghaderi, A., & Di Francesco, S. (2020). The effect of geometric parameters of the antivortex on a triangular labyrinth side weir. *Water*, 13(1), 14.
- Abdollahi, A., Kabiri-Samani, A., Asghari, K., Atoof, H., & Bagheri, S. (2017). Numerical modeling of flow field around the labyrinth side-weirs in the presence of guide vanes. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(1), pp.71-79
- Ahadiyan, J., Pipelzadeh, S., & Omidvarinia, M. (2016). Hydraulic Simulation of Sewage Discharge in an Irrigation and Drainage System by Changing the Vertical Angle of the Bottom Circular Buoyant Jet. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 16(65), pp.1-18 (In Persian)
- Alahdadi, K., & Shafai-Bajestan, M. (2020). The flow discharge over side weirs in rectangular channels with a decreasing width downstream of the weir. *18th Iranian Hydraulics Conference*, University of Tehran. Iran. (In Persian)

- Azimi, H., Shabanlou, S., & Kardar, S. (2018). Turbulent Flow in the Vicinity of Side Weirs in Subcritical Conditions. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 10(6), pp.784-797
- Bacco, M. D., & Scorzini, A. R. (2020). Experimental analysis on sediment transport phenomena in channels equipped with inclined side weirs. *8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures ISHS2020*, Santiago, Chile.
- Bagheri Seyyed Shekari, N., Eghbalzadeh, A., Javan, M. (2018). 'The Effect of Downstream Water Depth on Hydraulic Jump Characteristics Along Side Weir', *Water and Soil Science*, 28(3), pp. 195-208 (In Persian)
- Bagherifar, M., Emdadi, A., Azimi, H., Sanahmadi, B., & Shabanlou, S. (2019). Numerical evaluation of turbulent flow in a circular conduit along a side weir. *Applied Water Science*, 10(1).
- Balmforth, D. J., & Sarginson, E. J. (1983). The effects of curvature in supercritical side weir flow. *Journal of Hydraulic Research*, 21(5), pp.333-343
- Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica, sive, De viribus et motibus fluidorum commentarii*. Sumptibus Johannis Reinholdi Dulseckeri, typis Joh. Henr. Deckeri, Typographi Basiliensis.
- Borghei, S. M., & Parvaneh, A. (2011). Discharge characteristics of a modified oblique side weir in subcritical flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5), pp.370-376
- Citrini, D. (1942). *Canali rettangolari con portata e larghezza gradualmente variabili*. Società Editrice Riviste Industrie Elettriche.
- Daryaei, M., Sharifi, S. M., Shahriari, A., Kashefipour, S., & Zayeri, M. (2025). Numerical Modeling of the Effect of Orifices in Stepped Spillways on Flow Energy Dissipation Using the FLOW-3D Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. (In Persian)
- De Marchi, G. (1934). Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali (Theoretical knowledge on the functioning of sideweirs). *L'Energia Elettrica*, 11(11), pp.849-860
- El-Khashab, A., & Smith, K. V. H. (1976). Experimental Investigation of Flow Over Side Weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(9), pp.1255-1268
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Abbasi, S., & Abraham, J. (2019). Investigation of trapezoidal sharp-crested side weir discharge coefficients under subcritical flow regimes using CFD. *Applied Water Science*, 10(1).
- Ghodsian, M. (2004). Flow over Triangular Side Weir. *Scientia Iranica*, 11(1).
- Ghorbannia, D., & Eghbalzadeh, A. (2018). Numerical study of the effect of length change on the flow pattern around a side weir in a converging channel. *Acta Mechanica*, 229(10), pp.4101-4111
- Hager, W. H. (1987). Lateral outflow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4), pp.491-504
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), pp.201-225
- Hussein, B. S., & Jalil, S. A. (2024). Hydrodynamic Behavior Simulation of Flow Performance over Labyrinth Side Weir. *Polish Journal of Environmental Studies*, 33(2), pp.1159-1171
- Idrees, A. K., & Al-Ameri, R. (2023). Investigating a new approach to enhance the discharge capacity of labyrinth weirs. *Journal of Hydroinformatics*, 25(2), pp.300-317
- Kalateh, F., Aminvash, E. (2023). Numerical Simulation of the Effect of Channel bed Slope on the Hydraulic Performance of Sharp-Crested Rectangular Side Weir with Subcritical and Supercritical Regimes, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(1), pp. 67-84 (In Persian)
- Maranzoni, A., & Tomirotti, M. (2021). 3D CFD analysis of the performance of oblique and composite side weirs in converging channels. *Journal of Hydraulic Research*, 59(4), pp.586-604
- Maranzoni, A., Pilotti, M., & Tomirotti, M. (2017). Experimental and Numerical Analysis of Side Weir Flows in a Converging Channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7).
- Neyssi, K., Daryaei, M., Kashefipour, S. M., Shahriari, A., & Zayeri, M. (2025). Improving Water Diversion Efficiency in Converging Side Weirs through Side Vane Installation: a numerical simulation. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 47(4), pp.93-104

- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. (2018). *Hydraulic modelling: An introduction: Principles, methods and applications*. CRC Press .
- Paris, E., Solari, L., & Bechi, G. (2012). Applicability of the De Marchi Hypothesis for Side Weir Flow in the Case of Movable Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(7), pp.653-656
- Parsi, E., Allahdadi, K., Bahrebar, A. and Farhadi, R. 2021. Effect of downstream contraction on side weirs discharge. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15, pp.455-466 (In Persian)
- Robinson, D. I., & McGhee, T. J. (1993). Computer Modeling of Side-Flow Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(6), pp.989-1005
- Saffar, S. , Solimani Babarsad, M. , Mahmoodian Shooshtari, M. , Poormohammadi, M. H. and Riazi, R. (2022). Experimental study of flow converging section side weir hydraulics. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(3), pp.23-32 (In Persian)
- Saffar, S., Safaei, A., Aghaee Daneshvar, F., & Solimani Babarsad, M. (2024). Flow-3D numerical modeling of converged side Weir. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(1), pp.431-440
- Shahriari, A., Daryaei, M., Kashefipour, S., & Zayeri, M. (2024). Numerical Simulation of the Effect of Single Guide Vane Installation on the Hydraulic Performance of Side Weirs in Converging Channels. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, pp.1-11
- Spurk, J. H., & Aksel, N. (2019). *Fluid Mechanics*. Springer International Publishing.
- Subramanya, K., & Awasthy, S. C. (1972). Spatially Varied Flow over Side-Weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(1), pp.1-10
- Vatankhah, A. R. (2012a). Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 23(1), pp.76-79
- Vatankhah, A. R. (2012b). Briefing: Water surface profile over side weir in a trapezoidal channel. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 165(5), pp.247-252
- Vatankhah, A. R. (2013). Water surface profile along a side weir in a parabolic channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 32, pp.90-95
- Venutelli, M. (2008). Method of solution of nonuniform flow with the presence of rectangular side weir. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(6), pp.840-846
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T., & Speziale, C. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), pp.1510-1520

Research Article

Exploring Key Drivers Affecting the Development of Farmers' Resilience Capacity in the Face of Water Scarcity

Mojtaba Noori ^{1✉} | Rohollah Rezaei ² | Mohammad Kazem Rahimi ³

1. PhD Student, Natural Resources and Sustainable Agricultural Extension, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Professor of Extension, Communication and Rural Development Department of Zanjan University, Zanjan, Iran.

3. Former PhD Student, Agricultural Extension and Education, Tarbiyat Modares University, Tehran, Iran.

(✉ Corresponding Author: noori.zanjan@gmail.com)

ARTICLE INFO

Received: 12 March 2025

Revised: 16 April 2025

Accepted: 17 April 2025

Available Online: 28 April 2025

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Noori, M., Rezaei, R., & Rahimi, M.K., (2025). Exploring Key Drivers Affecting the Development of Farmers Resilience Capacity in the Face of Water Scarcity. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*.V.26, No.98, P:19-42
<https://doi.org/10.22092/idser.2025.368874.1609>

Introduction

Water scarcity can result from drought, a decline in water resources, or a combination of both factors. Under these conditions, the term "crisis" aptly describes the situation. The global water crisis is among the most significant threats facing humanity; it is estimated that approximately 3.5 billion people will experience water shortages by 2025, with global water demand projected to rise by 30% by 2050. To mitigate farmers' vulnerability and mitigate the impacts of water scarcity, the concept of resilience has gained attention. Resilience reflects the capacity of an individual or system to adapt effectively during critical situations and identify rational strategies to overcome crises. Today, resilience serves not only as a tool for crisis management but also as a preventive and predictive measure aimed at maintaining orderly continuity under various conditions. Notably, the agricultural sector faces earlier and more severe consequences of water scarcity than other sectors due to the direct threats it poses to farmers' livelihoods and national food security. Given this critical importance, the objective of this study is to identify and analyze key drivers that influence the development of farmers' resilience against water scarcity crises.

Materials and Methods

Given that "capacity development" pertains to future-oriented activities, this study utilized the critical uncertainty approach and the cross-effects matrix, common methods in futures research, to identify relevant drivers. Initially, a comprehensive review of existing literature was conducted to identify significant issues related to resilience against water scarcity. After summarizing, consolidating, and eliminating redundant or overlapping concepts, these factors were compiled into questionnaires and presented during semi-structured interviews with experts, specialists, and key informants.

Participants rated each factor based on "importance" and "uncertainty" for the horizon of 1413 using a five-point Likert scale (very low, low, medium, high, very high). Subsequently, experts weighted and ranked these factors according to their perceived importance and uncertainty. Interaction analysis was then performed to examine interrelationships among key factors, assessing their mutual influence. This method, implemented through specialized futures research software MICMAC, is particularly suitable for analyzing variable interdependencies and compiling expert insights. MICMAC employs a matrix-based approach to elucidate the relationships among influential factors in qualitative research.

Results

Using the critical uncertainty approach, factors identified as both highly important and uncertain were deemed key drivers. Average weights assigned to each factor were plotted onto an importance-uncertainty matrix, allowing the selection of critical factors. Identified factors included: (1) reforming policies that incentivize the production of water-intensive crops; (2) acceptance of the severity of the crisis within the agricultural community; (3) systemic governance of agricultural water resources; (4) promoting optimal water-use practices among farmers; (5) controlling excessive agricultural water extraction; (6) reforming regional cropping patterns; and (7) promoting sustainable livelihoods independent of water-intensive practices.

Results demonstrated that policy reforms targeting water-intensive crop production, enhancing water-use culture among farmers, and adjusting regional cropping patterns significantly impact farmers' resilience to water scarcity. Additionally, key-dependent factors highly influenced by others were the agricultural community's acknowledgement of crisis severity, systemic governance of agricultural water resources, and regulation of excessive water withdrawals.

Conclusions

This study identified three primary drivers crucial to developing farmers' resilience in Zanjan province: recognizing the severity of the water crisis, adopting systemic governance approaches to water resources, and regulating excessive agricultural water withdrawals. These drivers are interconnected, implying that changes in one factor will inevitably influence the others. Effective management of these drivers is thus essential for advancing resilience among farmers facing water scarcity. Given the critical status of water resources in Zanjan, where five out of seven plains are classified as prohibited or critical zones, provincial administrators and planners, along with the broader agricultural community, must acknowledge the depth of this crisis. By adopting systemic approaches and managing water consumption responsibly, significant strides can be made towards building resilience to the ongoing water scarcity crisis.

Keywords: Resilience, Water Crisis, Zanjan Province, Interaction Analysis, Futures Studies.



نوع مقاله: پژوهشی

واکاوی پیشران های کلیدی مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب آوری کشاورزان در مواجهه با کم آبی (مطالعه موردی: استان زنجان)

مجتبی نوری^۱ | روح اله رضائی^۲ | محمد کاظم رحیمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

چکیده

با توجه به روند نزولی بارندگی و پدیده کم آبی طی دهه های گذشته در استان زنجان که به چالش هایی مانند تخلیه برخی روستاها و کاهش تاب آوری جوامع محلی انجامیده است و با در نظر گرفتن تهدید جدی این بحران برای امنیت معیشتی کشاورزان و امنیت غذایی منطقه، این پژوهش با هدف شناسایی و واکاوی پیشران های کلیدی اثرگذار بر توسعه ظرفیت تاب آوری کشاورزان استان زنجان در مواجهه با کم آبی به اجرا درآمد. برای این منظور، از رویکرد آینده پژوهی شامل عدم قطعیت بحرانی و تحلیل اثرهای متقاطع و قضاوت ۱۸ متخصص منتخب استان استفاده گردید. به منظور کسب اطمینان از اعتبار علمی تحقیق، روایی عوامل از طریق مرور جامع ادبیات و اعتبارسنجی توسط پانل متخصصان (با نمونه گیری هدفمند و دستیابی به اشباع نظری) تأمین شد. پایایی تحلیل ساختاری با آزمون پایداری MICMAC سنجیده شد که نتایج به دست آمده پایداری کامل تحلیل و قابلیت اطمینان بالای یافته ها را تأیید کرد. پس از ارزیابی اهمیت و عدم قطعیت عوامل توسط خبرگان، که نشان داد عامل «پذیرش عمق بحران» با میانگین رتبه ۱۸/۴۲ بالاترین اهمیت و عامل «تفکر سیستمی در حکمرانی» با میانگین رتبه ۱۸/۴۹ بالاترین عدم قطعیت را دارند، تحلیل نهایی MICMAC روی ۷ عامل کلیدی (با اهمیت و عدم قطعیت بالا) اجرا شد. بر اساس نتایج این تحلیل ساختاری مبتنی بر داده های خبرگان، سه عامل پذیرش عمق بحران، تفکر سیستمی در حکمرانی و کنترل برداشت های مازاد به عنوان پیشران های کلیدی محوری شناسایی شدند؛ تحلیل ها نشان داد این عوامل نقشی حیاتی و پیوندی (اثرگذاری و اثرپذیری بالا) در سیستم تاب آوری آینده استان زنجان دارند. یافته کلیدی این تحلیل، لزوم توجه و اقدام یکپارچه روی این سه پیشران به هم پیوسته است برای آنکه تاب آوری کشاورزان در برابر بحران آب به شکلی پایدار افزایش یابد.

واژه های کلیدی: تاب آوری، بحران آب، تحلیل اثرهای متقابل، آینده پژوهی، استان زنجان

مقدمه

شرایطی برای کاهش آسیب پذیری کشاورزان و پیامدهای ناشی از کم آبی مفهوم تاب آوری مطرح شده است (Khodamoradi et al., 2021). که یکی از مهمترین، رایج ترین و جدیدترین رویکردهای مواجهه با بحران های طبیعی به شمار می آید (Jamshidi & Anabestani, 2022). تاب آوری را می توان این گونه در نظر گرفت: ظرفیت سیستم های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی برای مقابله

امروزه بخش کشاورزی به شدت متأثر از تغییرات آب و هوایی است و با چالش های عمده ای از جمله کمبود منابع آب مواجه شده است (Finke, 2024). اهمیت این مسئله، با در نظر گرفتن ماهیت بخش کشاورزی، دوچندان است زیرا این بخش بیش از دیگر بخش های اقتصادی وابستگی مستقیم به منابع آب دارد (Jafari et al., 2024). در چنین

۱ دانشجوی دکتری ترویج کشاورزی پایدار و منابع طبیعی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. (تویسنده مسئول: Email: noori.zanjan@gmail.com)

۲ استاد گروه ترویج، ارتباطات و توسعه روستایی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۳ دانش آموخته دکتری، ترویج و آموزش کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

قالب این کارگروه در سطح استان های مختلف کشور صورت گرفته است که از جمله آنها می توان به انسداد چاه های غیرمجاز، جلوگیری از اضافه برداشت، اصلاح و تعدیل پروانه های بهره برداری، نصب کنتور حجمی و هوشمند، توسعه سیستم های آبیاری تحت فشار و دیگر موارد اشاره کرد (Ardakaniyan, 2021). اما همانطور که دیده می شود بیشتر این تلاش ها ماهیت سخت افزاری دارند و اقدامات نرم افزاری و مدیریتی مانند ترویج کاشت گیاهان کم آب بر به جای گیاهان با مصرف آب بالا، آموزش کشاورزان و ترویج روش های آبیاری بهره ور و دیگر موارد چندان مورد توجه قرار نگرفته است. به بیان دقیق تر، رد پای رویکردهای جدید مدیریت بحران در بخش کشاورزی به ویژه ظرفیت سازی و بالابردن تاب آوری کشاورزان بسیار محدود است. در همین زمینه، بررسی شواهد حاکی از آن است که پاسخ ها به بحران کمبود آب در کشور اغلب واکنشی است تا پیشگیرانه و به جای مدیریت ریسک بر مدیریت بحران متمرکز شده است (Sadeghloo et al., 2022). بر این اساس، به نظر می رسد که برای به حداقل رساندن اثرهای بحران آب باید با هدف کاهش خطر، الگویی جدید برای مدیریت آب در پیش گرفت. بدون تردید این امر مستلزم شناسایی و اتخاذ مجموعه ای از مداخلات باز یابی و تاب آوری محلی است که طیف گسترده ای از اقدامات و برنامه ها، از مدیریت آب تا توسعه ظرفیت را در بر می گیرد (Chikwanha et al., 2021). با توجه به اهمیت موضوع، در سال های اخیر پژوهش های مختلفی در داخل و خارج از کشور برای بررسی ابعاد تاب آوری و مؤلفه های اثرگذار بر آن در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه به طور خلاصه نتایج برخی از مهم ترین آنها مرور شده است. هدف از این بررسی منابع، نخست آشنایی با ابعاد گوناگون تاب آوری (اقتصادی، اجتماعی، نهادی و غیره) و شناسایی مهم ترین مؤلفه ها، عوامل و پیشران هایی است که در تحقیقات معتبر داخلی و خارجی معرفی شده اند. دوم، این

یا سازش با رویداد، روند یا برهم ریختگی خطرناک و بازسازماندهی و پاسخ به آن رخداد به نحوی که عملکرد، هویت و ساختار سیستم حفظ شود و در عین حال ظرفیت سازگاری، یادگیری و تحول آن نیز بهبود پیدا کند (IPCC¹ 2014). در واقع، تاب آوری راهبردی کلیدی برای جلوگیری از فروپاشی سیستم هاست (Seyed Akhlaghi & Taleshi, 2018). زیرا این مفهوم نه تنها به منزله ابزار مدیریت بحران بلکه به مثابه رویکردی پیشگیرانه و پیش بینی کننده به کار می رود که هدف آن تداوم منظم سیستم در هر شرایطی است (Kuntke et al., 2022).

بر اساس پیش بینی مؤسسه منابع جهانی (World Resources Institute, 2021)، ایران در سال ۲۰۴۰ از پرتنش ترین مناطق دنیا با تنش آبی بالای ۸۰ درصد خواهد بود. هم اکنون نیز ایران با بحران عمیق آب روبه روست که این بحران به دلیل تغییرات آب و هوایی و تنش آبی منطقه تشدید شده است (Moradi & Azami, 2024). آنچه مسلم است، پیامدهای بحران آب در ایران احتمالاً فراتر از موضوع صرف امنیت غذایی خواهد بود؛ کمبود شدید آب بالقوه می تواند دلیل ناآرامی های مدنی در ایران باشد، به ویژه هنگامی که با عوامل دیگری مانند میزان بالای بیکاری و درک نابرابری همراه باشد (Mesgaran & Azadi, 2018). این بحران به ویژه در بخش کشاورزی زودتر از دیگر بخش ها بروز می کند، زیرا بخش کشاورزی آسیب پذیرترین بخش از لحاظ تغییرات اقلیمی و کم آبی و در عین حال بزرگترین بخش مصرف کننده آب در کشور نیز محسوب می شود (Alibakhshi et al., 2020). با در نظر گرفتن به این مسئله، در سال های اخیر توجه مدیران و برنامه ریزان به شناسایی بهتر بحران، پیش بینی آینده و ارائه راهکارهایی برای مقابله و سازگاری با آن جلب شده است که یکی از نمودهای آن تشکیل کارگروه سازگاری با کم آبی (در سطح ملی و استانی) است. با برنامه ریزی های صورت گرفته، تلاش های مختلفی در

خشکسالی به این نتیجه رسیدند که تاب‌آوری جوامع محلی باید با این سلسله اقدام‌ها مورد توجه برنامه‌ریزان مرتبط با خشکسالی قرار گیرد: تنوع‌بخشی به منابع معیشتی، کاهش وابستگی روستاییان به معیشت کشاورزی، تقویت نظام ترویج و آموزش فنون نوین کشاورزی، صرفه‌جویی آب به کمک فناوری، استفاده از ارقام پربازده، اصلاح الگوی کشت و اصلاح سیاست‌ها برای کاستن از مهاجرت نیروهای مولد روستایی.

هاس و همکاران (Haas *et al.*, 2021) در پژوهشی با بررسی نقش تاب‌آوری جامعه و ارزیابی ریسک در سازگاری با تغییرات اقلیمی نشان دادند تاب‌آوری جامعه با پنج بُعد اصلی اعتماد، دلبستگی به مکان، اثربخشی جمعی، شبکه‌های اجتماعی و حمایت اجتماعی ارزیابی می‌شود و تمام این ابعاد بر اقدامات سازگاری جامعه اثر مثبت و معنی‌داری دارند. نیکلاس و همکاران (Nicholas *et al.*, 2021) در مطالعه‌ای شواهد ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان را در پنج سیستم مختلف کشاورزی اروپایی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که پاسخ‌های تاب‌آوری مختلف (استقامت، سازگاری و تحول) بسته به ظرفیت‌های فردی، منابع مزرعه و محیط کلی متفاوت‌اند. چایمی و همکاران (Chimi *et al.*, 2024) در پژوهشی با عنوان عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری برای بالابردن تاب‌آوری مزارع خرده‌ملک مرکز کامرون در برابر تغییرات اقلیمی به این نتیجه رسیدند که درآمد سالانه، دسترسی به نهاده‌های کشاورزی، دسترسی به ماشین‌آلات کشاورزی و عضویت در سازمان کشاورزان از عوامل مؤثر بر بالابردن تاب‌آوری کشاورزان این منطقه هستند. نتایج پژوهش‌های پرات بینهامو و همکاران (Benhamou *et al.*, 2024) نشان داد که تاب‌آوری درک‌شده کشاورزان در مزرعه متأثر از ویژگی‌های شخصیتی کشاورزان، تنوع مزارع، انعطاف در بازخوردها و توانایی پاسخ به چالش‌های مختلف در گذشته است.

مرور به شناخت رویکردها و روش‌های به کار رفته در مطالعات پیشین کمک می‌کند و در نهایت، زمینه را برای تبیین دقیق‌تر خلأ پژوهشی موجود و ضرورت پرداختن به پژوهش حاضر در استان زنجان فراهم می‌آورد.

باقری و همکاران (Bagheri *et al.*, 2021) در تحقیقی به تحلیل مؤلفه‌های اثرگذار بر تاب‌آوری جوامع محلی در مواجهه با نوسان‌های اقلیمی در حوضه آبخیز ندوشن یزد پرداخته‌اند. آنها متغیرهای اثرگذار بر تاب‌آوری را در قالب این ده مؤلفه طبقه‌بندی کردند: اعتماد به دولت، شبکه محلی، تعامل و روابط متقابل، تلاش و زمان، مالی و زیرساختی، ابتکار و نوآوری، مدیریت سازگار، ریسک‌پذیری، حکمرانی، و اطلاعات و آگاهی. رمضانی و خدایانه (Razmazani & Khodapanah, 2020) در پژوهش‌های خود یازده پیشران کلیدی مؤثر بر تاب‌آوری روستایی در شهرستان بناب را شناسایی کردند که عبارت‌اند از: کارآفرینی در روستا، انسجام اجتماعی، مشارکت اجتماعی، تعلق مکانی به روستا، مسئولیت اجتماعی، درک خطر خشکسالی، اصلاح الگوی کشت، شیوه‌های نوین آبیاری، شکل‌گیری و فعالیت سازمان‌های غیردولتی، مقاوم‌سازی مساکن، و رعایت ضوابط فنی و ساخت و ساز. جمشیدی و عنابستانی (Jamshidi & Anabestani, 2022) در بررسی عوامل مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری روستاییان منطقه غرب دریاچه ارومیه در برابر خشکسالی دریافتند که بخش وسیعی از متغیرهای کلیدی تأثیرگذار بر توسعه تاب‌آوری روستاییان در طبقه ظرفیت‌های اقتصادی قرار دارد که شامل این موارد است: وجود فرصت‌های شغلی متنوع، سطح درآمد، وضعیت اشتغال، نوع کسب‌وکار منطقه، داشتن پس‌انداز، وجود درآمدهای غیرکشاورزی، ارائه تسهیلات مالی ویژه، تنوع‌بخشی به اقتصاد خانوار و تنوع‌بخشی درآمد. در پژوهشی دیگر، سید اخلاقی و طالشی (Seyed Akhlaghi & Taleshi, 2018) در بررسی بالابردن تاب‌آوری جوامع محلی راهبرد آینده برای مقابله با

در مجموع، مرور مطالعات پیشین به روشنی نشان می‌دهد که تاب‌آوری کشاورزان در برابر کم‌آبی و خشکسالی مفهومی است چندبعدی و پیچیده که تحت تأثیر شبکه‌ای از عوامل در سطوح مختلف قرار دارد. این عوامل شامل ظرفیت‌های اقتصادی (مانند تنوع معیشت و درآمد، دسترسی به منابع مالی و نهاده‌ها)، سرمایه اجتماعی (مانند اعتماد، شبکه‌ها، مشارکت، انسجام)، ویژگی‌های حکمرانی و نهادی (مانند سیاست‌ها، قوانین، مدیریت سازگار)، جنبه‌های زیرساختی و فناوری و حتی ویژگی‌های فردی کشاورز و مزرعه می‌شود. این گستردگی عوامل و نتایج متنوع در بسترهای مختلف لزوم اتخاذ رویکردهای جامع و سیستمی را برای تحلیل تاب‌آوری و شناسایی مؤثرترین راهکارها در هر منطقه، با توجه به شرایط خاص آن، برجسته می‌سازد و نیاز به تحلیل‌هایی را تأیید می‌کند که روابط متقابل بین این عوامل متعدد را در نظر بگیرند.

بر اساس آمارهای رسمی کشور، در استان زنجان در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ سطح زیرکشت محصولات آبی اعم از زراعت و باغبانی ۱۵۸ هزار هکتار بوده است که از این مقدار حدود ۹۵ هزار هکتار به محصولات زراعی و حدود ۶۳ هزار هکتار به محصولات باغبانی و گلخانه اختصاص داشته است. مهم‌ترین محصولات زراعی آبی استان شامل گندم، جو، سیب‌زمینی، پیاز و یونجه و اصلی‌ترین محصولات باغی آن زیتون، سیب، گردو و زردآلوست (Agricultural Statistics, 2024). با وجود اهمیت و ظرفیت بخش کشاورزی در استان زنجان، این بخش با مسائل و چالش‌های عمده‌ای به ویژه در حوزه منابع آب مواجه است که اگر آینده‌نگری و برنامه‌ریزی درست برای رفع آنها نشود می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به پیکره بخش کشاورزی وارد آورد. شواهد حاکی از آن است که سطح آب‌های زیرزمینی در استان زنجان به طور متوسط سالانه در حدود دو متر افت پیدا می‌کند

(Zanjan Regional Water Company, 2022). این امر ناشی از برداشت بی‌رویه و غیراصولی از سفره‌های آب زیرزمینی است که خشکسالی‌های شدید و پی در پی نیز سبب تشدید روند افت در مناطق مختلف استان زنجان شده است. برای نمونه، بررسی مقادیر شاخص بارش استاندارد (SPI^1) در مقیاس‌های مختلف زمانی و همچنین میانگین متحرک ۵ و ۷ ساله بارندگی در منطقه ماهنشان، یکی از شهرستان‌های استان زنجان، نشان‌دهنده کاهش قابل توجه بارش در ۲۰ سال گذشته است (Bagheri et al., 2024). چنین وضعیتی کمابیش در دیگر مناطق استان زنجان نیز حاکم است به نحوی که بر اساس آمار و اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان زنجان (۱۴۰۱)، درصد بارندگی در استان زنجان نسبت به میانگین بلندمدت آن در حدود ۳۹ درصد کاهش داشته است که این مسئله به نوبه خود سبب شده است تا بیشتر شهرستان‌های استان در حال تجربه وضعیت خشکسالی خفیف، متوسط و بعضاً شدید باشند (Mohammadloo et al., 2024). بروز این شرایط باعث شده است تا بسیاری از دشت‌های استان با بیلان منفی آب زیرزمینی روبه‌رو شوند به نحوی که پنج دشت از هفت دشت استان، دشت‌های ممنوعه اعلام شده‌اند (Sarmasti, 2021). از آنجا که تغییر اقلیم و خشکسالی و به تبع آن بحران آب، در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و غیره اثرهای بسیار زیان‌باری دارند، ضروری است در راستای کاهش آسیب‌پذیری روستاییان و به ویژه کشاورزان، ابعاد مختلف مرتبط با تاب‌آوری آنها بررسی شود تا با در نظر داشتن شرایط موجود برنامه‌ریزی‌های مناسب به‌منظور ایجاد پایداری در مناطق روستایی استان صورت پذیرد (Mohammadloo et al., 2024). بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، هنوز مطالعاتی منسجم، جامع و دقیقی در زمینه رویکردهای جدید مقابله با بحران آب و مدیریت، از جمله تاب‌آوری کشاورزان در استان زنجان

در مجموع، مرور مطالعات پیشین به روشنی نشان می‌دهد که تاب‌آوری کشاورزان در برابر کم‌آبی و خشکسالی مفهومی است چندبعدی و پیچیده که تحت تأثیر شبکه‌ای از عوامل در سطوح مختلف قرار دارد. این عوامل شامل ظرفیت‌های اقتصادی (مانند تنوع معیشت و درآمد، دسترسی به منابع مالی و نهاده‌ها)، سرمایه اجتماعی (مانند اعتماد، شبکه‌ها، مشارکت، انسجام)، ویژگی‌های حکمرانی و نهادی (مانند سیاست‌ها، قوانین، مدیریت سازگار)، جنبه‌های زیرساختی و فناوری و حتی ویژگی‌های فردی کشاورز و مزرعه می‌شود. این گستردگی عوامل و نتایج متنوع در بسترهای مختلف لزوم اتخاذ رویکردهای جامع و سیستمی را برای تحلیل تاب‌آوری و شناسایی مؤثرترین راهکارها در هر منطقه، با توجه به شرایط خاص آن، برجسته می‌سازد و نیاز به تحلیل‌هایی را تأیید می‌کند که روابط متقابل بین این عوامل متعدد را در نظر بگیرند.

بر اساس آمارهای رسمی کشور، در استان زنجان در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ سطح زیرکشت محصولات آبی اعم از زراعت و باغبانی ۱۵۸ هزار هکتار بوده است که از این مقدار حدود ۹۵ هزار هکتار به محصولات زراعی و حدود ۶۳ هزار هکتار به محصولات باغبانی و گلخانه اختصاص داشته است. مهم‌ترین محصولات زراعی آبی استان شامل گندم، جو، سیب‌زمینی، پیاز و یونجه و اصلی‌ترین محصولات باغی آن زیتون، سیب، گردو و زردآلوست (Agricultural Statistics, 2024). با وجود اهمیت و ظرفیت بخش کشاورزی در استان زنجان، این بخش با مسائل و چالش‌های عمده‌ای به ویژه در حوزه منابع آب مواجه است که اگر آینده‌نگری و برنامه‌ریزی درست برای رفع آنها نشود می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به پیکره بخش کشاورزی وارد آورد. شواهد حاکی از آن است که سطح آب‌های زیرزمینی در استان زنجان به طور متوسط سالانه در حدود دو متر افت پیدا می‌کند

جامعه آماری این پژوهش متخصصان، مطلعان کلیدی، و خبرگان موضوعی در حوزه آب، آبخیزداری و کشاورزی استان زنجان اعم از اعضای هیئت علمی دانشگاه زنجان و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، کارشناسان و مدیران مرتبط در سازمان جهاد کشاورزی و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و کارشناسان و مدیران اداره آب منطقه‌ای و مسئولان مرتبط با آب در سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان هستند. گفتنی است با آنکه جامعه هدف نهایی در این پژوهش کشاورزان هستند، اما هدف پژوهش تمرکز بر شناسایی و تحلیل عوامل ساختاری و کلان مؤثر بر ظرفیت‌سازی تاب‌آوری کشاورزی است. از این‌رو، انتخاب روش‌های آینده‌پژوهی همچون تحلیل اثرهای متقابل و تحلیل عدم قطعیت بحرانی، که مستلزم بهره‌گیری از دیدگاه‌های سیستم‌نگر و سیاست‌محور است، مستلزم مشارکت خبرگان دارای تجربه و دانش میان‌رشته‌ای در حوزه‌های کشاورزی، منابع طبیعی، سیاست‌گذاری، مدیریت بحران و توسعه روستایی است (Godet & Durance, 2011; Amer et al., 2013). بر این اساس، در این مرحله به دلیل ماهیت کلان عوامل مورد بررسی و پیچیدگی روش‌های تحلیلی مورد استفاده، مشارکت مستقیم کشاورزان مد نظر قرار نگرفت. برای تکمیل عوامل اولیه استخراجی از منابع علمی، با متخصصان مطلعان کلیدی مصاحبه شد که به روش نمونه‌گیری هدفمند^۱ و با روش گلوله برفی^۲ انتخاب شدند. مصاحبه‌ها تا اشباع نظری ادامه یافت به طوری که در مصاحبه‌های آخر، مؤلفه و داده‌ای جدید به داده‌های به دست آمده اضافه نشد و تمام عوامل مورد اشاره در آنها، تکرار شد. قابل ذکر است پس از ۱۸ مصاحبه، اشباع نظری به دست آمد. نحوه توزیع گروه‌های مشارکت‌کننده در مصاحبه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

گزارش نشده است. در مجموع، با توجه به مطالب اشاره شده در باره وضعیت بحرانی منابع آب در استان زنجان، اهمیت اقتصادی و اجتماعی بخش کشاورزی آن و همچنین کمبود پژوهش‌های راهبردی و آینده‌نگر در زمینه تاب‌آوری کشاورزان این منطقه، می‌توان به ضرورت اجرای پژوهشی علمی و ساختاریافته برای شناسایی دقیق عوامل تعیین‌کننده و نقاط اهرمی مؤثر بر آینده تاب‌آوری کشاورزان در این استان پی برد. بدون تردید، پر کردن این خلأ دانشی می‌تواند به تصمیم‌سازی‌های آگاهانه‌تر و برنامه‌ریزی‌های مؤثرتر برای سازگاری با کم‌آبی و حفظ پایداری منطقه کمک کند. این پژوهش با هدف اصلی «شناسایی و واکاوی پیشران‌های کلیدی مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان استان زنجان در مواجهه با کم‌آبی» با استفاده از رویکرد آینده‌پژوهی اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمره پژوهش‌های کاربردی و از نظر ماهیت روش، از نوع پژوهش‌های توصیفی است. یکی از مسایل مهم در بسیاری از حوزه‌های دانش، گمانه‌زنی در مورد مسیرهای رشد و توسعه آن‌ها در آینده است (Yeganegi & Babaei, 2022). از آنجا که اصطلاح "توسعه ظرفیت تاب‌آوری" ناظر بر فعالیت‌های آینده است، بنابراین برای تعیین این پیشران‌ها، از روش‌های مرسوم آینده‌پژوهی استفاده شد تا بتوان به‌طور نظام‌مند مؤلفه‌ها و پیشران‌های کلیدی مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان را در برابر بحران کم‌آبی شناسایی و واکاوی کرد. ضروری است گفته شود این پژوهش، ضمن بهره‌گیری از دانش موجود در زمینه مؤلفه‌های تاب‌آوری، مشخصاً بر شناسایی و تحلیل پیشران‌های کلیدی مؤثر بر توسعه ظرفیت آینده تاب‌آوری با استفاده از رویکرد آینده‌پژوهی تمرکز دارد و به دنبال ارائه مدل جامع مؤلفه‌ها و نماگرهای سنجش تاب‌آوری کنونی نیست.

جدول ۱- توزیع فراوانی متخصصان و خبرگان موضوعی شرکت کننده در پژوهش

شماره	متخصصان و خبرگان موضوعی و مطلعان کلیدی	فراوانی
Number	Subject matter experts, specialists, and key informants	Frequency
۱	اعضای هیئت علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان	۲
۲	اعضای هیئت علمی و محققان مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان	۵
۳	کارشناسان و مدیران سازمان جهاد کشاورزی استان زنجان	۵
۴	کارشناسان و مدیران اداره آب منطقه ای و امور منابع آب استان زنجان	۴
۵	کارشناس ارشد و معاون آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری	۱
۶	کارشناس ارشد سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان زنجان	۱
	مجموع	۱۸

منابع در این مرحله، تمرکز مستقیم آنها بر شناسایی، تحلیل یا ارائه راهکارهایی برای عوامل مؤثر بر تاب آوری یا سازگاری در بخش کشاورزی یا جوامع روستایی در زمینه تنش های آبی بود. از این منابع منتخب، کلیه عوامل، شاخص ها، پیشران ها و راهبردهای مرتبط که به صورت نظری یا تجربی در مطالعات پیشین مطرح شده بودند، به صورت نظام مند استخراج و در یک فهرست جامع اولیه دسته بندی و کدگذاری گردید. در مرحله بعد، این فهرست جامع اولیه تحت تحلیل و پالایش دقیق قرار گرفت؛ با هدف تمرکز بر عوامل کلان، راهبردی و قابل سیاست گذاری که بر توسعه ظرفیت تاب آوری در سطح استانی تأثیرگذار هستند، عوامل استخراج شده تلخیص شدند. مواردی که بیش از حد خرد (مانند ویژگی های روانشناختی فردی خاص) یا بسیار عمومی و غیرقابل مداخله بودند، کنار گذاشته شدند. مفاهیم مشابه یا دارای همپوشانی معنایی از طریق فرآیند ادغام موارد موازی، تحت عناوین جامع تر و عملیاتی تر دسته بندی شدند. خروجی این مرحله، فهرست اولیه عوامل (شامل ۲۴ عامل نهایی) بود که مبنای اصلی طراحی پرسشنامه نیمه ساختاریافته برای مرحله بعد قرار گرفت. پرسشنامه پژوهش از دو بخش اصلی تشکیل شده بود. بخش اول مربوط به ارزیابی مرحله عدم قطعیت بحرانی شامل فهرست ۲۴ عامل

در این پژوهش، علاوه بر گردآوری و تحلیل داده ها از طریق مطالعه پیشینه پژوهش و مصاحبه نیمه ساختارمند، از رویکرد عدم قطعیت بحرانی و تحلیل اثر متقابل نیز استفاده شده است. به طور مشخص، در راستای شناسایی جامع عوامل اولیه مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب آوری کشاورزان در برابر کم آبی، در گام نخست از روش تحقیق اسنادی مبتنی بر مرور گسترده و نظام مند ادبیات موضوع استفاده شد. این فرآیند شامل این موارد بود: جستجوی هدفمند و ساختاریافته در پایگاه های اطلاعاتی علمی معتبر ملی و بین المللی (SID, Magiran, Scopus, Web of Science, Google Scholar)؛ بررسی منابع تکمیلی مانند کتاب های تخصصی، دانشنامه ها، پایان نامه های مرتبط در دانشگاه های کشور؛ گزارش های نهایی طرح های تحقیقاتی سازمان های مرتبط (مانند وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نیرو، مراکز تحقیقاتی استانی)؛ و اسناد بالادستی و سیاستی مرتبط با مدیریت منابع آب، کشاورزی پایدار و سازگاری با تغییر اقلیم. جستجو با استفاده از مجموعه ای از کلیدواژه های دقیق و ترکیبی فارسی و انگلیسی انجام گرفت که مهم ترین آنها عبارت بودند از: تاب آوری کشاورزان^۱، ظرفیت سازی تاب آوری^۲، سازگاری با کم آبی/خشکسالی^۳، بحران آب^۴، مدیریت منابع آب کشاورزی^۵ و آینده پژوهی آب^۶. معیار ورود

4-Water crisis
5-Agricultural water management
6-Water futures studies

1-Farmer resilience
2-Resilience capacity building
3-Adaptation to water scarcity/drought

اولیه مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری. در مقابل هر عامل، دو ستون برای امتیازدهی توسط ۱۸ متخصص در نظر گرفته شده بود؛ ستون اول برای سنجش میزان اهمیت آن عامل در توسعه تاب‌آوری آینده و ستون دوم برای سنجش میزان عدم قطعیت وضعیت آن عامل در افق ۱۴۱۳. امتیازدهی بر اساس طیف پنج درجه‌ای لیکرت (از ۱ = خیلی کم تا ۵ = خیلی زیاد) صورت می‌گرفت. به همین ترتیب، بخش دوم پرسشنامه نیز مربوط به مرحله تحلیل اثرهای متقابل بود. برای این منظور، پس از شناسایی ۷ عامل کلیدی (بر اساس نتایج بخش اول)، این بخش از ابزار تحقیق شامل ماتریس اثرهای متقابل این ۷ عامل بود به نحوی که از خبرگان خواسته شد تا میزان تأثیر مستقیم هر عامل (عامل سطر) را بر هر یک از عوامل دیگر (عامل ستونی) بر اساس مقیاس صفر (بدون تأثیر)، ۱ (تأثیر ضعیف)، ۲ (تأثیر متوسط)، ۳ (تأثیر زیاد) و ۴ (تأثیر احتمالی) تعیین کنند. این اطلاعات از طریق مصاحبه یا جلسات گروهی گردآوری و به عنوان ورودی نرم‌افزار MICMAC¹ استفاده شد. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها، در گام نهایی، برای شناسایی روابط متقابل عوامل کلیدی منتخب و نحوه اثرگذاری و اثرپذیری آن‌ها بر یکدیگر، از روش تحلیل اثرهای متقابل و نرم‌افزار MICMAC بهره گرفته شد.

روش تحلیل اثرهای متقابل را گوردون و هلمر (Gorden & Helmer) اولین بار در سال ۱۹۶۶ ابداع کردند (Delangizan et al., 2017) که در آن اصول و روش‌های ریاضی برای کمی‌سازی ذهنیت، قضاوت‌های عقلانی و نگرش‌های خبرگان به کار گرفته می‌شود (Rafiei, 2021). این روش از جمله روش‌هایی است که برای مطالعه روابط بین متغیرها، شناسایی میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آنها کاربرد دارد و یکی از مناسب‌ترین روش‌های شناسایی و تحلیل پیشران‌های کلیدی با استفاده از نرم افزار تخصصی

آینده‌پژوهی MICMAC است که توانایی لازم را برای تحلیل مؤلفه‌ها دارد و وسیله‌ای برای تجمیع نظرهای خبرگان است که در بررسی ارتباط بین مؤلفه‌های مؤثر در پژوهش‌های کیفی کاربرد دارد (Saei et al., 2024). خروجی‌های نرم‌افزار MICMAC به صورت جدول‌ها و نمودارها می‌تواند سهم بسزایی در درک ابعاد و روابط سیستمی و چگونگی عمل سیستم در آینده داشته باشد. در این پژوهش، عوامل دارای اهمیت و عدم قطعیت بالا که در مرحله قبل انتخاب شده بودند در ماتریس اثرهای متقابل وارد شد و طی مصاحبه و تشکیل جلسات گروهی، نمره‌های توافق شده در هر خانه ماتریس در نرم‌افزار MICMAC وارد و تجزیه و تحلیل شدند. در خروجی نرم افزار عوامل دارای اثرگذاری و اثرپذیری بالا به همراه وزن روابط مستقیم و غیرمستقیم مشخص می‌شود. باید گفت تحلیل اثرهای متقابل، با تمرکز بر تحلیل ساختاری و درک تأثیرات متقابل و بازخوردهای بین مجموعه‌ای از متغیرها در یک سیستم پیچیده، با تحلیل‌های آماری رایج که متغیرها را به مستقل و وابسته تفکیک می‌کنند متفاوت است. بر این اساس، متغیرها در این روش نه صرفاً به عنوان علت یا معلول، بلکه بر اساس موقعیت و نقش‌شان در شبکه کلی اثرگذاری^۲ و اثرپذیری^۳ طبقه‌بندی می‌شوند. خروجی این تحلیل معمولاً متغیرها را در چهار دسته اصلی جای می‌دهد: ۱- متغیرهای تأثیرگذار یا پیشران^۴، با اثرگذاری بالا و اثرپذیری پایین که مشابه متغیرهای مستقل عمل می‌کنند؛ ۲- متغیرهای تأثیرپذیر یا نتیجه^۵، با اثرگذاری پایین و اثرپذیری بالا که مشابه متغیرهای وابسته هستند؛ ۳- متغیرهای دوجبه‌ی یا پیوندی^۶، با اثرگذاری و اثرپذیری بالا که نقش کلیدی در پویایی و اتصال سیستم دارند؛ و ۴- متغیرهای مستقل یا خودگردان^۷، با اثرگذاری و اثرپذیری پایین. این طبقه‌بندی به درک عمیق‌تری از دینامیک‌های سیستمی و شناسایی نقاط اهرمی کلیدی کمک می‌کند.

4-Driving
5-Dependent
6-Linkage
7- Autonomous

1-Matrix of Crossed Impact Multiplications Applied to a Classification
2-Influence
3- Dependence

شناسایی شدند. نتایج این ماتریس در جدول (۲) و شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق این جدول و نمودار، از نظر میزان اهمیت عوامل توسعه ظرفیت تاب آوری کشاورزان در مواجهه با بحران کم آبی، به ترتیب عوامل پذیرش عمق بحران و اصلاح الگوی کشت بالاترین رتبه و عوامل بومی سازی قوانین و مقررات مرتبط با آب کشاورزی و تغییر دیدگاه کشاورزان پایین ترین رتبه را دارند. نتیجه مطالعات آستانه و همکاران (Astaneh *et al.*, 2019) و اسدپوریان و همکاران (Asadpourian *et al.*, 2022) همخوانی دارد. ظرفیت سازی اجتماعی و تقویت ادراک کشاورزان از نوع، شدت و عمق بحران و جامعه پذیری بحران در تحقیقات پیشین از عوامل با اهمیت در توسعه ظرفیت تاب آوری شناخته شده است. از نظر میزان عدم قطعیت، عوامل تفکر سیستمی در حکمرانی منابع آب کشاورزی و تغییرات اقلیمی بالاترین رتبه و اعمال محدودیت برای پروانه های برداشت آب زیرزمینی و تغییر دیدگاه کشاورزان پایین ترین رتبه را کسب کردند. مطالعات پوراسدالله و رحیمی زاده (Pourasadollah & Rhimizadeh, 2018) عدم قطعیت متغیرهای مربوط به تغییرات اقلیمی و مطالعات بهبودی و قربانی (Behboudi & Ghorbani, 2023) عدم قطعیت در حکمرانی منابع آب را تایید کرده اند که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. امروزه چالش های پیش روی بشر، که از عدم قطعیت و شرایط پیش بینی پذیری پایین نشئت می گیرند، موجب شده تا ضرورت حکمرانی آب بیش از پیش احساس شود. مقابله با تنش آبی حاصل از این تغییرات مستلزم اتخاذ سیاست های حکمرانی آب با رویکرد تفکر سیستمی برای بهبود ظرفیت تاب آوری است.

به منظور اعتبارسنجی یافته های این پژوهش شیوه های مختلفی در راستای تقویت روایی و پایایی، متناسب با روش شناسی کیفی و آینده پژوهی، به کار گرفته شد. روایی محتوایی از طریق استناد اولیه به ادبیات پژوهشی معتبر در شناسایی عوامل و روایی صوری با ارزیابی و امتیازدهی عوامل توسط پانل خبرگان متخصص تقویت گردید. کفایت داده های کیفی گردآوری شده نیز با دستیابی به اشباع نظری در مصاحبه ها مورد تأیید قرار گرفت. در زمینه پایایی و قابلیت اطمینان تحلیل ها، همانطور که در ادامه نیز شرح داده شده است، شاخص اصلی عبارت بود از نتیجه آزمون پایداری ساختاری ماتریس در نرم افزار MICMAC. این آزمون نشان داد آن تحلیل ثبات بسیار بالایی دارد، به طوری که پس از چهار تکرار، پایداری ۱۰۰ درصد در رتبه بندی متغیرها به دست آمد (جدول ۴). این یافته، اعتبار و استحکام شناسایی پیشران های کلیدی پژوهش را به میزان قابل توجهی تأیید می کند.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج پژوهش در دو بخش کلی، یکی نتایج مرتبط با رتبه بندی میزان اهمیت و عدم قطعیت و دیگری نتایج مرتبط با ماتریس اثرهای متقاطع ارائه شده است.

نتایج مرتبط با رتبه بندی میزان اهمیت و عدم قطعیت

در رویکرد عدم قطعیت بحرانی عواملی که دارای اهمیت بالا و عدم قطعیت بالا هستند، به عنوان عوامل کلیدی شناخته می شوند که در این پژوهش با تشکیل ماتریس موقعیت عوامل بر اساس اهمیت و عدم قطعیت این عوامل

واکاوی پیشران‌های کلیدی مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان... (مطالعه موردی: استان زنجان)

جدول ۲- نتایج مرتبط با رتبه‌بندی میزان اهمیت و عدم قطعیت عوامل مؤثر بر توسعه ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان براساس میانگین رتبه‌ای فریدمن

Table 2 - Results related to ranking the importance and uncertainty of factors affecting the development of farmers' resilience capacity based on Friedman's rank average

نماد متغیر Variable symbol	عوامل مؤثر در توسعه ظرفیت تاب‌آوری Factors influencing the development of resilience capacity	اهمیت Importance		عدم قطعیت uncertainty	
		رتبه Rank	میانگین* Average	رتبه Rank	میانگین* Average
X1	تغییرات اقلیمی	۱۴	۱۲/۳۵	۴	۱۷/۴۲
X2	اصلاح سیاست‌های مشوق تولید محصولات آب‌بر	۷	۱۶/۶۹	۳	۱۴/۵
X3	پذیرش عمق بحران در جامعه کشاورزی (اعم از مسئولان و مردم)	۱	۱۸/۴۲	۲	۱۶/۶۳
X4	تحلیل هزینه- فایده مصرف آب در تولید محصولات آبی	۱۹	۹/۷۳	۲۳	۱۲/۷۴
X5	قیمت‌گذاری واقعی آب	۱۲	۱۲/۵۸	۱۵	۹/۸۲
X6	تقویت نهادهای ناظر بر برداشت آب کشاورزی	۱۸	۱۰/۰۵	۱۶	۹/۷۲
X7	اعمال محدودیت برای پروانه‌های برداشت آب زیرزمینی	۲۰	۹/۶۹	۲۲	۷/۸
X8	تفکر سیستمی در حکمرانی منابع آب کشاورزی	۵	۱۵/۳۵	۱	۱۸/۴۹
X9	بومی‌سازی قوانین و مقررات مربوط به استفاده از آب‌های سطحی و زیرزمینی	۲۳	۸/۸	۶	۱۲/۵۴
X10	فرهنگ‌سازی مصرف بهینه آب در بین کشاورزان	۳	۱۷/۵	۵	۶۳/۱۶
X11	بهبود مشارکت کشاورزان در فرایندهای تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت منابع آب	۱۵	۱۲/۱۲	۱۲	۱۰/۴۲
X12	ایجاد و تقویت تشکلهای گروهی کشاورزان در حوزه مدیریت منابع آب کشاورزی	۱۶	۱۱/۲۳	۱۴	۱۴/۱۴
X13	بهبود و تقویت سرمایه اجتماعی کشاورزان	۱۳	۱۲/۵۴	۱۷	۱۴/۵۴
X14	تغییر دیدگاه کشاورزان از جبرگرایی به اختیار انسان در تغییر قدر الهی	۲۴	۷/۴	۲۴	۶/۱۲
X15	توسعه روش‌های سازه‌ای در سطح عموم کشاورزان	۲۲	۸/۹۶	۱۱	۱۰/۸
X16	توسعه فناوری‌ها و شیوه‌های نوین آبیاری	۲۱	۹/۵	۱۳	۸/۸۲
X17	کنترل آب‌های سطحی با اجرای فعالیتهای آبخوان‌داری و آبخیزداری	۱۰	۱۲/۱۲	۷	۱۲/۵
X18	تخصیص اعتبار مناسب به‌منظور ایجاد زیرساخت‌های لازم برای افزایش بهره‌وری آب	۱۱	۱۲/۸۱	۱۹	۱۵/۵۵
X19	جایگزینی کشتهای گلخانه‌ای با کشت در فضای باز	۸	۱۲/۸۸	۲۰	۱۲/۱۹
X20	کنترل برداشت‌های مازاد از آب کشاورزی	۴	۱۵/۵۸	۹	۱۶/۲۷
X21	اجرای برنامه‌های ترویجی در جهت توسعه روش‌های غیرسازه‌ای در بین کشاورزان	۶	۱۲/۹۲	۱۰	۱۵/۸۵
X22	اصلاح الگوی کشت در منطقه	۲	۱۷/۸	۱۸	۱۲/۱۵
X23	معرفی ارقام پربازده و مقاوم به کم‌آبی	۱۷	۱۱/۱۵	۲۱	۹/۵۸
X24	ترویج معیشت‌های پایدار غیر وابسته به آب	۹	۱۶/۴۶	۸	۱۶/۴۴

* میانگین رتبه‌ای مبتنی بر آزمون رتبه‌بندی فریدمن

به دلیل حجم زیاد داده‌ها و تکیه پژوهش بر متغیرهای مهم و با نمره بالا و بر اساس پراکنش متغیرها، متغیرهایی که در محدوده اهمیت و عدم قطعیت زیاد و خیلی‌زیاد قرار گرفتند به منزله مسائل نهایی مشخص و برگزیده شدند. برای تعیین این محدوده و گروه‌بندی عوامل بر حسب سطح اهمیت و عدم قطعیت، از فرمول تفاوت انحراف معیار از میانگین یا معیار (ISDM) استفاده شد. به این صورت که کرانه بالا و پایین اهمیت (کمینه ۷/۴، بیشینه ۱۸/۴۲) و عدم قطعیت (کمینه ۶/۱۲، بیشینه ۱۸/۴۹) تعیین شد و سپس متغیرها مطابق جدول (۳) به پنج گروه (دارای اهمیت و عدم قطعیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم شدند. پس از آن دو گروه دارای اهمیت و عدم قطعیت "زیاد" و "خیلی‌زیاد" به عنوان عوامل برگزیده انتخاب شدند (جدول ۳).

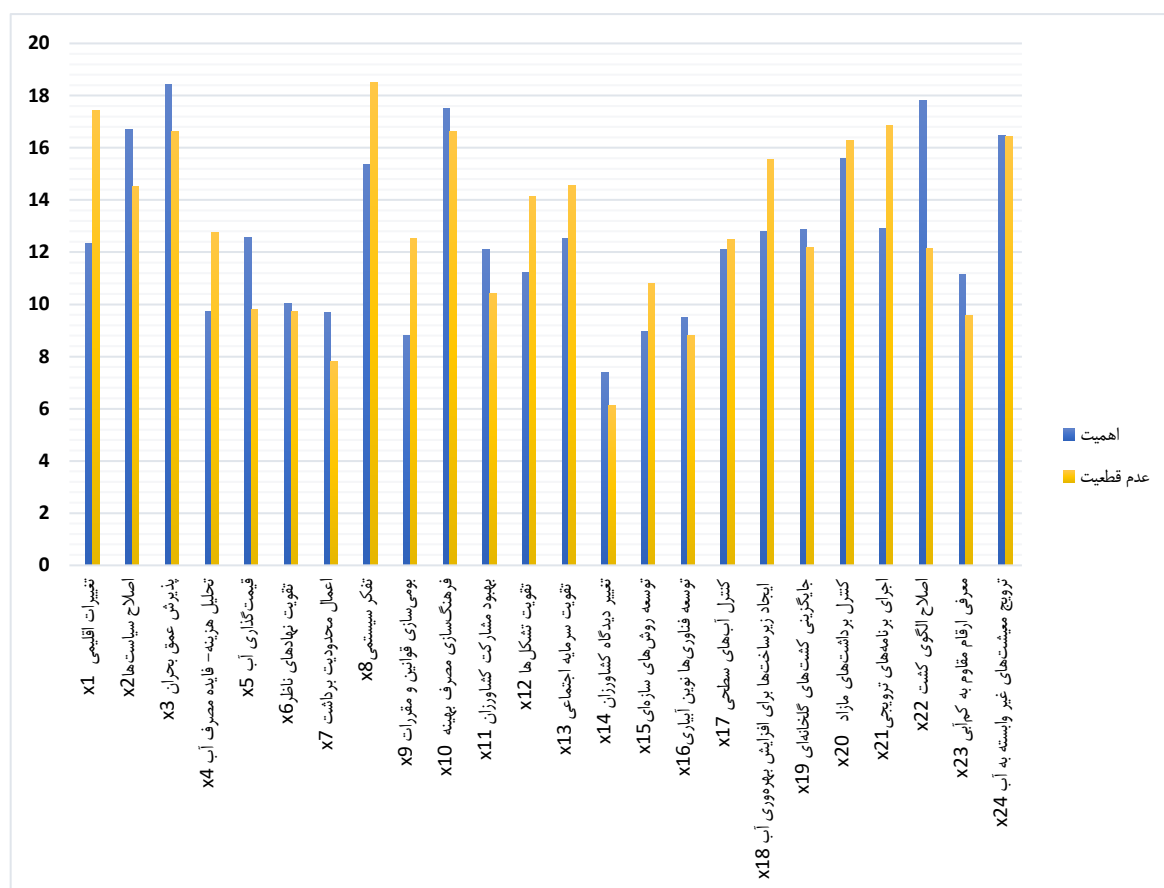
جدول ۳- سطح بندی و گروه بندی عوامل از لحاظ میزان اهمیت و عدم قطعیت

Table 3 - Leveling and grouping of factors in terms of importance and uncertainty

بازه عدم قطعیت Uncertainty Interval	بازه اهمیت Significance Interval	سطح اهمیت و عدم قطعیت Level of significance and uncertainty
کمتر از ۷	کمتر از ۹	خیلی کم
۷-۱۰	۹-۱۱	کم
۱۰-۱۲	۱۱-۱۳	متوسط
۱۲-۱۵	۱۳-۱۵	زیاد
بالاتر از ۱۵	بالاتر از ۱۵	خیلی زیاد

شکل ۱- میانگین اهمیت و عدم قطعیت عوامل مؤثر بر تاب آوری کشاورزان در مواجهه با کم آبی

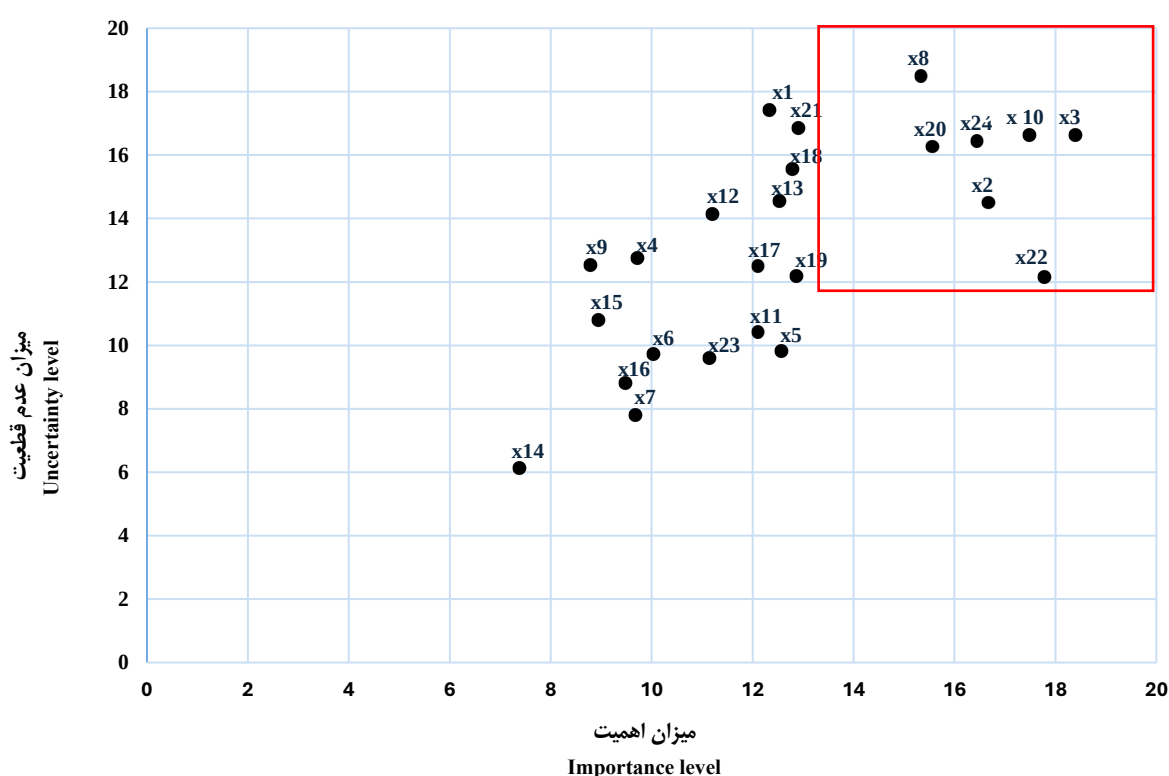
Fig. 1 - Average importance and uncertainty of factors affecting farmers' resilience in the face of water scarcity. JFi



میانگین وزن های داده شده به هر یک از عوامل در ماتریس (نمودار) متقاطع اهمیت- عدم قطعیت وارد شد و عواملی که در محدوده زیاد و خیلی زیاد (در شکل ۲ مشخص شده) قرار گرفتند، به عنوان عوامل برگزیده انتخاب شدند. این عوامل شامل اصلاح سیاست های مشوق تولید محصولات آب بر (X2)، پذیرش عمق بحران در جامعه کشاورزی (X3)، تفکر سیستمی در حکمرانی منابع آب کشاورزی (X8)، فرهنگ سازی مصرف بهینه آب در بین کشاورزان (X10)، کنترل برداشت های مازاد از آب کشاورزی (X20)، الگوی کشت در منطقه (X22) و ترویج معیشت های پایدار غیر وابسته به آب (X24)، بودند. این یافته ها با نتایج مطالعات بهبودی و قربانی (Behboudi & Ghorbani, 2023) و تافولا

و همکاران (Tafula *et al.*, 2015) همخوانی دارد که تفکر سیستمی، اصلاح الگوی کشت، بهره‌وری آب و مداخلات چند وجهی را عوامل مؤثر در تاب‌آوری کشاورزان دانسته‌اند. از آنجایی که مسائل مرتبط با حوزه آب از مسائل پیچیده محسوب می‌شود و مسائل پیچیده ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی، سیاسی و غیره دارد، مطابق تجربه‌ها و مطالعات پیشین مهم‌ترین سازوکار حل بحران کم‌آبی ریشه در تفکر سیستمی دارد که این عامل در توسعه

ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان نیز نقش خود را نشان داد. نتایج این مطالعه، از جمله پذیرش عمق بحران، تفکر سیستمی و فرهنگ‌سازی مصرف بهینه که در حوزه سرمایه انسانی قرار می‌گیرند با نتایج مطالعات بطحائی و همکاران (Bathaiy *et al.*, 2024) همخوانی دارد که توسعه سرمایه انسانی را از عوامل تعیین‌کننده رفتار تاب‌آورانه کشاورزان به دست آورده‌اند.



شکل ۲- ماتریس موقعیت عوامل مؤثر بر تاب‌آوری کشاورزان بر اساس اهمیت و عدم قطعیت

Fig. 2 - Position matrix of factors affecting farmers' resilience based on importance and uncertainty

پس از شناسایی عوامل برگزیده با روش ماتریس شوارتز، نحوه و میزان تأثیرگذاری هر عامل بر عوامل دیگر و نحوه و میزان تأثیرپذیری عوامل از یکدیگر نیز بررسی و تحلیل شد تا موقعیت و وضعیت عوامل به لحاظ تأثیرگذاری و تأثیرپذیری مشخص شود، نتایج این تحلیل‌ها که با روش تحلیل اثرهای متقابل صورت گرفت در ادامه آورده شده است.

نتایج مرتبط با ماتریس اثرهای متقابل ماتریس اثرهای متقابل عوامل برگزیده تشکیل شد تا پیشران‌های کلیدی استخراج شده ضمن دارا بودن شاخص‌های اهمیت و عدم قطعیت بالا، شاخص‌های اثرگذاری و اثرپذیری بالا را نیز داشته باشند. بنابراین، عوامل گفته شده قابلیت استفاده به عنوان پیشران را در تهیه برنامه عملیاتی خواهند داشت. لازم است یادآوری شود پرکردن ماتریس اثرهای متقابل فرایندی کیفی است که برای هر

جفت متغیر/عامل این پرسش مطرح است: آیا رابطه‌ای از نوع تأثیر مستقیم بین متغیر/عامل اول و متغیر/عامل دوم وجود دارد؟ اگر پاسخ منفی باشد عدد صفر و اگر پاسخ مثبت باشد عددی از یک تا سه به تناسب شدت تأثیر در سلول قرار می‌گیرد و اگر از وجود رابطه اطمینانی نیست یعنی احتمال داده شود که ممکن است رابطه‌ای وجود داشته باشد، حرف P در سلول وارد می‌شود (Godet, 2008). نتایج تحلیل‌های ماتریس با استفاده از نرم‌افزار MICMAC در ادامه آورده شده است.

روایی و پایداری ماتریس

بر اساس شاخص‌های آماری ماتریس با چهار بار چرخش داده‌ای از روایی و پایداری ۱۰۰ درصد برخوردار شد که نشان از روایی و پایداری مناسب ماتریس است. این چرخش برای عوامل اثرگذار پس از چرخش چهارم ۱۰۰ درصد و برای

عوامل اثرپذیر در چرخش اول ۱۰۰ درصد به دست آمد (جدول ۴).

درجهٔ پرشدگی ماتریس

درجهٔ پرشدگی ماتریس اثرهای متقابل ۷۹/۵۹ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد عوامل انتخاب شده در بیش از ۷۹ درصد بر یکدیگر تأثیر دارند. مشخصات ماتریس تشکیل و تکمیل شده به شرح جدول (۵) بود.

لازم است گفته شود در ماتریس اثرهای متقابل مجموع عددهای هر سطر نشان دهندهٔ تأثیرگذاری عامل بر دیگر عامل‌ها و مجموع عددهای هر ستون نشان‌دهنده تأثیرپذیری آن عامل از دیگر عوامل است (Sepahvand et al., 2023). نتایج مجموع سطر و ستون هر عامل در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۴- پایداری ماتریس اثرهای متقاطع

Table 4- Stability of the interaction matrix

تکرار (چرخش)	متغیرهای اثرگذار	متغیرهای اثرپذیر
Rotation	Impact variables	Influence variables
۱	۸۶	۱۰۰
۲	۸۸	۱۰۰
۳	۱۱۴	۱۰۰
۴	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۵- مشخصات ماتریس و آماره‌های آن

Table 5- Matrix specifications and its statistics

شاخص	ابعاد ماتریس	تعداد تکرار	بی تأثیر	تأثیر ضعیف	تأثیر متوسط	تأثیر زیاد	احتمال رابطه	جمع	درجهٔ پرشدگی
Index	Matrix Dimensions	Number of Repetitions	No (صفر)	Weak Effect (one)	Medium Effect (two)	High effect (three)	Probability of Relationship (P)	Sum	Degree of filling
مقدار	۷×۷	۴	۱۰	۸	۲۲	۸	۱	۳۹	۷۹/۵۹٪

جدول ۶- نتایج مجموع اثرگذاری (سطر) و اثرپذیری (ستون) هر عامل

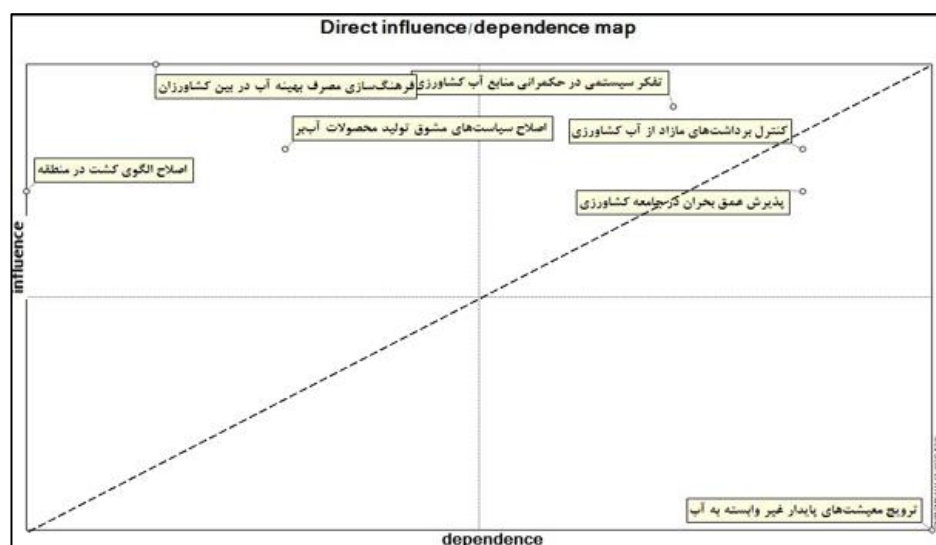
Table 6 - Results of the total impact (row) and influence (column) of each factor

ردیف	عوامل	جمع سطر	جمع ستون	مجموع سطر و ستون
Row	Factors	Sum of Row	Sum of Column	Sum of Row and Column
۱	تفکر سیستمی در حکمرانی منابع آب کشاورزی	۱۳	۱۲	۲۵
۲	اصلاح سیاست‌های مشوق تولید محصولات آب‌بر	۱۲	۹	۲۱
۳	پذیرش عمق بحران در جامعه کشاورزی	۱۱	۱۳	۲۴
۴	اصلاح الگوی کشت در منطقه	۱۱	۷	۱۸
۵	فرهنگ‌سازی مصرف بهینه آب در بین کشاورزان	۱۴	۸	۲۲
۶	کنترل برداشت‌های مازاد از آب کشاورزی	۱۲	۱۳	۲۵
۷	ترویج معیشت‌های پایدار غیروابسته به آب	۳	۱۴	۱۷
	مجموع	۷۶	۷۶	۱۵۲

پایداری سیستم

به روشنی قابل ارائه است. در مقابل، در سیستم‌های ناپایدار شناسایی و تحلیل متغیرهای کلیدی تأثیرگذار هر سیستمی نیازمند شناخت و تحلیل وضعیت پایداری یا ناپایداری آن سیستم است. در نرم افزار MICMAC نحوه پراکنش متغیرها در محیط سیستم تعیین کننده پایداری یا ناپایداری آن است، عوامل اگر در کل محیط سیستم پراکنده شوند، سیستم ناپایدار است و اگر به صورت حرف انگلیسی L در محیط سیستم قرار گیرند، سیستم پایدار است (Karimi & Sepahvand, 2019). در سیستم‌های پایدار، جایگاه هر یک از متغیرها کاملاً مشخص و نقش هر یک نیز

به روشنی قابل ارائه است. در مقابل، در سیستم‌های ناپایدار وضعیت پیچیده‌تر از سیستم‌های پایدار است (Godet, 2009). در این تحقیق توزیع و پراکنش عوامل در محیط اثرگذاری و اثرپذیری نشان داد وضعیت این سیستم ناپایدار است (شکل ۳). در سیستم‌های ناپایدار، متغیرهای اثرگذار دیگری هم وجود دارند که پایداری سیستم را تهدید می‌کنند (Rahbar et al., 2015). به‌علاوه، در سیستم‌های ناپایدار شناسایی متغیرهای کلیدی اندکی با مشکل و تضاد روبه‌روست (Jamshidi & Anabestani, 2022).

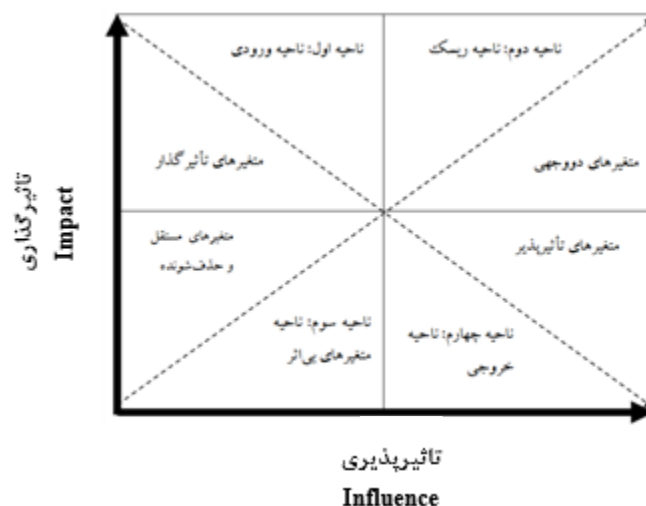


شکل ۳- نقشه پراکندگی عوامل و جایگاه آنها در محور تأثیرگذاری- تأثیرپذیری در خروجی مستقیم سیستم

Fig. 3- Scatter map of factors and their position on the impact-influence in the direct output of the system

تعیین پیشران های کلیدی

مختصات تحلیل اثرهای متقابل عوامل بر یکدیگر چهار ناحیه دارد که هریک میزان اثرگذاری و اثرپذیری عوامل را بر یکدیگر نشان می دهد. عوامل به تناسب مکان قرارگیری در گروه هایی با عنوان عوامل تأثیرگذار، عوامل دووجهی، عوامل تأثیرپذیر و عوامل مستقل دسته بندی می شوند (Abdolshahnejad et al., 2022) (شکل ۴). در ادامه، نوع متغیرها و توزیع عوامل تحقیق در مختصات اثرگذاری - اثرپذیری آورده شده است.



شکل ۴- مختصات تحلیل تأثیر متقابل متغیرها (رهبر و همکاران، ۱۳۹۷)

Fig. 4- Coordinates of the analysis of the interaction of variables

الف- عوامل تأثیرگذار

غیرقانونی آب باید به صورت مداخله دولتی پیش رود که این موضوع مهم می تواند با کاهش جذابیت محصولات آبربر از طریق حمایت نشدن از سوی دولت و ارائه الگوی کشت منطقه ای با قید مصرف کم و همچنین فرهنگ سازی مصرف بهینه فراهم آید.

ب- عوامل دو وجهی

در ماتریس اثرهای متقاطع، این عوامل دو ویژگی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بالا بر عوامل دیگر را دارا هستند و معمولاً به دو دسته عوامل ریسک (حول قطر ناحیه دوم) و عوامل هدف (پایین قطر ناحیه دوم) تقسیم می شوند. عوامل ریسک ظرفیت بالایی برای تبدیل شدن به بازیگران کلیدی سیستم دارند که در این پژوهش عامل کنترل برداشت های مازاد از آب کشاورزی جزو این دسته قرار گرفت. عوامل هدف نمایانگر هدف های ممکن در سیستم و در واقع نتایج تکاملی سیستم هستند؛ به این عوامل، عوامل نتیجه نیز گفته

این متغیرها (عوامل) بحرانی ترین متغیرها هستند زیرا تغییرات سیستم وابسته به آنها و میزان کنترل بر این متغیرها بسیار مهم است (Nazari et al., 2019). در واقع میزان تأثیرگذاری این عوامل به مراتب بالاتر از میزان تأثیرپذیری آنها در آینده است. نتایج این پژوهش نشان داد عوامل اصلاح سیاست های مشوق تولید محصولات آبربر، فرهنگ سازی مصرف بهینه آب در بین کشاورزان و اصلاح الگوی کشت در منطقه دارای اثرگذاری بالا بر ظرفیت تاب آوری کشاورزان در برابر بحران کم آبی هستند. این نتیجه با نتایج مطالعات تافولا و همکاران (Tafula et al., 2015) همخوانی دارد. تولید محصولات آبربر و پرسود برای کشاورزان جذابیت فراوانی دارد و اطرافیان با وجود نارضایتی از مصرف بی رویه و غیرقانونی آب توسط برخی کشاورزان، توان مقابله با آنها را ندارند. بنابراین، منع مصرف بی رویه و

نگاه به ارتقا و توسعه تاب‌آوری، باید عواملی مانند اصلاح سیاست‌های مشوق تولید محصولات آب‌بر، فرهنگ‌سازی مصرف بهینه آب در بین کشاورزان، اصلاح الگوی کشت در منطقه پذیرش عمق بحران در جامعه کشاورزی، تفکر سیستمی در حکمرانی منابع آب کشاورزی، و کنترل برداشت‌های مازاد از آب کشاورزی مورد نظر برنامه‌ریزان قرار گیرد.

نحوه اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم عوامل بر یکدیگر
نحوه اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم عوامل بر یکدیگر را می‌توان با نمودار متناظر آن نمایش داد که در آن نمودار جهت اثرگذاری هر عامل بر دیگری توسط «پیکان‌ها» و میزان اثرگذاری به‌صورت عددی، در بالای پیکان نمایش داده می‌شوند. بر اساس توپولوژی عوامل، این نرم افزار قادر است عوامل کلیدی را استخراج و رتبه‌بندی کند (Rahbar et al., 2015). همانطور که شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهند، پیکان‌های خارج شده از عامل فرهنگ‌سازی مصرف بهینه آب بیش از پیکان‌های خارج شده از دیگر عوامل است که نشان از تأثیرگذاری زیاد این عامل دارد و پیکان‌های وارد شده به ترویج معیشت‌های غیروابسته به آب بیش از پیکان‌های وارد شده از دیگر عوامل است که نشان از تأثیرپذیری مستقیم و غیرمستقیم این عامل دارد. باید گفت اعداد نمایش داده شده روی پیکان‌های روابط مستقیم همان اعداد به اجماع رسیده (مد داده‌ها) است که در نرم‌افزار وارد و نتایج آن ارائه شده است و اعداد روی پیکان‌های روابط غیرمستقیم (شکل ۶) پس از به توان رسیدن چند باره اعداد توسط نرم افزار هستند.

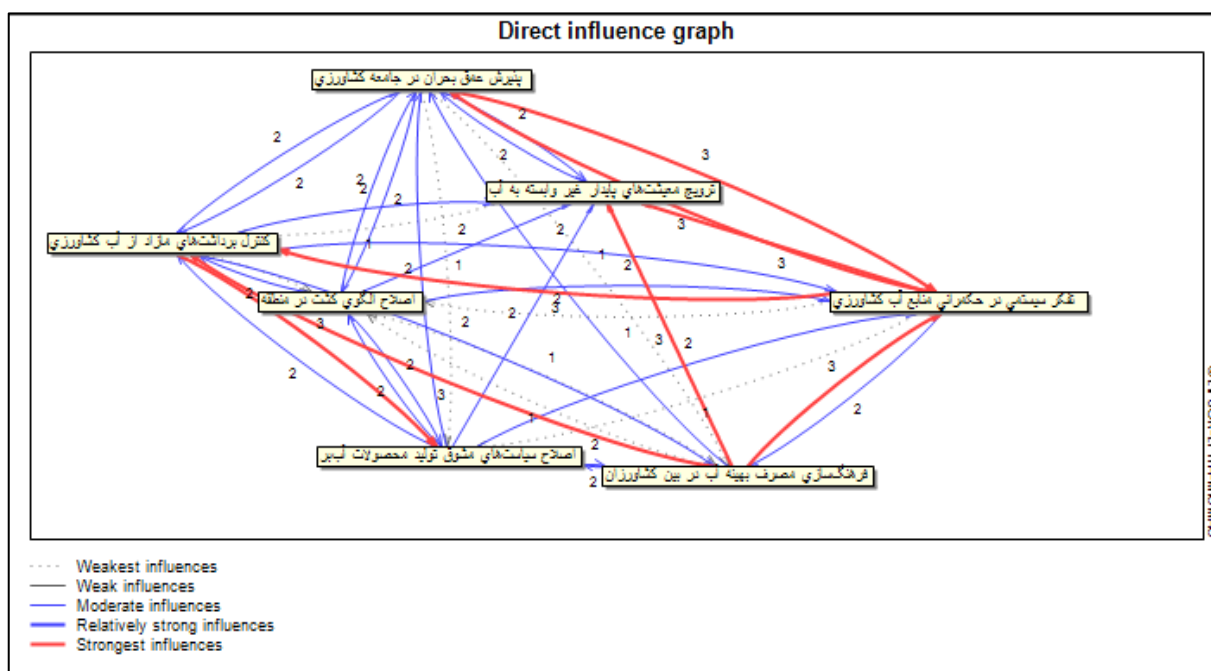
می‌شود. عامل پذیرش عمق بحران در جامعه کشاورزی در این محدوده قرار گرفت. در کل، عوامل دو وجهی این پژوهش (ناحیه دوم) عبارت‌اند از پذیرش عمق بحران در جامعه کشاورزی، تفکر سیستمی در حکمرانی منابع آب کشاورزی و کنترل برداشت‌های مازاد از آب کشاورزی. یادآوری می‌شود در این پژوهش این عوامل ضمن دارا بودن شاخص‌های اهمیت و عدم قطعیت بالا، شاخص‌های اثرگذاری و اثرپذیری بالا را نیز دارا هستند؛ بنابراین می‌توان گفت هر عملی روی آنها منجر به واکنش و تغییر دیگر عوامل خواهد شد.

پ- عوامل مستقل

این عوامل دارای تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پایینی هستند و به طور مستقل عمل می‌کنند و چندان متاثر از عوامل دیگر نیستند که در این پژوهش عاملی در این محدوده قرار نگرفت.

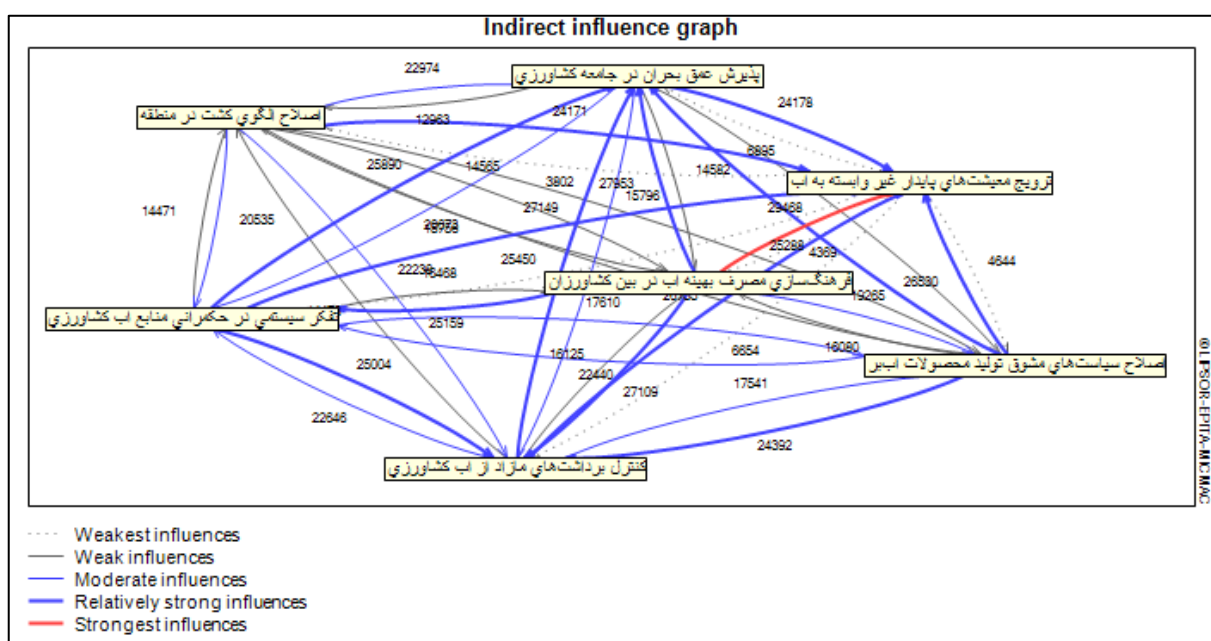
ت- عوامل تأثیرپذیر

این عوامل تأثیرگذاری پایین و تأثیرپذیری بسیار بالایی دارند، بنابراین نسبت به تغییرات عوامل تأثیرگذار و دووجهی بسیار حساس هستند و به عبارت دیگر این عوامل خروجی سیستم هستند. نتایج این پژوهش نشان داد که عامل ترویج معیشت‌های پایدار غیروابسته به آب جزو این متغیرهاست، یعنی عامل بسیار اثرپذیری است نسبت به دیگر عوامل. این عامل در اغلب مطالعات تاب‌آوری در حوزه کشاورزی در برابر مخاطرات طبیعی مانند خشکسالی، سیل و تغییرات اقلیم جزو عوامل افزایش‌دهنده تاب‌آوری شناخته شده است. اما باید توجه داشت این عامل خود تحت تأثیر عوامل مهم و اثرگذار دیگری است. بنابراین، برای استقرار معیشت‌های جایگزین با



شکل ۵- نقشه روابط (اثرگذاری و اثرپذیری) مستقیم عوامل بر یکدیگر

Fig. 5 - Map of direct relationships (Impact and influence) of factors on each other



شکل ۶- نقشه روابط (اثرگذاری و اثرپذیری) غیرمستقیم عوامل بر یکدیگر

Fig. 6 - Map of indirect relationships (Impact and Influence) of factors on each other

نتیجه گیری

این پژوهش با به کارگیری رویکرد آینده پژوهی و تحلیل اثرهای متقابل، به شناسایی و واکاوی پیشران های کلیدی مؤثر بر توسعه آبی ظرفیت تاب آوری کشاورزان استان زنجان در برابر بحران فزاینده کم آبی پرداخت. یافته اصلی مطالعه، فراتر از شناسایی فهرستی از عوامل، برجسته ساختن نقش محوری سه پیشران کلیدی است که به دلیل اهمیت بالا، عدم قطعیت قابل توجه و به ویژه نقش ارتباطی و پیوندی آنها (اثرگذاری و اثرپذیری بالا)، به مثابه نقاط اهرمی اصلی برای شکل دهی به آینده تاب آوری در این استان عمل می کنند. این سه پیشران عبارتند از: «پذیرش عمق بحران در جامعه کشاورزی»، «وجود تفکر سیستمی در حکمرانی منابع آب کشاورزی» و «کنترل برداشت های مازاد از آب کشاورزی». درک عمیق تعاملات پیچیده و بازخوردهای متقابل بین این سه پیشران، برای طراحی مداخلات مؤثر و پایدار در استان زنجان امری حیاتی است.

تحلیل روابط نشان می دهد که «پذیرش عمق بحران» به عنوان پیشران شناختی-اجتماعی، نقشی بنیادین و توانمندساز دارد. در استان زنجان، جایی که شواهد بحران آب کاملاً مشهود است - از کسری تجمعی نگران کننده آب زیرزمینی و ممنوعه و بحرانی شدن اکثر دشت های اصلی استان گرفته تا کاهش محسوس آورد رودخانه ها و برداشت حدود یک سوم از منابع آب زیرزمینی توسط چاه های غیرمجاز- نپذیرفتن یا کم اهمیت جلوه دادن این واقعیت ها توسط بخش هایی از جامعه کشاورزی یا حتی بدنه مدیریتی می تواند هرگونه اقدام اصلاحی را با مقاومت یا تعلل مواجه سازد. پذیرش گسترده و عمیق بحران، پیش نیاز ایجاد اراده جمعی و آماده بودن برای اجرای راهکارهای بعضاً دشوار مانند «کنترل برداشت های مازاد» و زمینه ساز اصلی برای درک ضرورت گذار از مدیریت سنتی و بخشی نگر به سمت «تفکر سیستمی در حکمرانی» است. «تفکر سیستمی در حکمرانی»، که خبرگان این پژوهش آن را نامشخص ترین

عامل برای آینده استان ارزیابی کردند، نقش یکپارچه کننده و راهبردی دارد. حاکم شدن چنین تفکری در میان نهادهای متعدد و بعضاً ناهماهنگ متولی آب و کشاورزی در استان زنجان می تواند تضمین کند اقداماتی مانند «کنترل برداشت ها» نه به صورت مجزا و صرفاً انتظامی بلکه به عنوان بخشی از یک بسته سیاستی جامع (شامل مدیریت تقاضا، اصلاح الگوی کشت، حمایت از معیشت های جایگزین، مدیریت مشارکتی و سایر موارد) و با در نظر گرفتن تمامی ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی طراحی و پیاده سازی شود. تفکر سیستمی با برجسته ساختن این روابط متقابل می تواند به تقویت «پذیرش بحران» نیز کمک کند، زیرا نشان می دهد که ادامه روندهای فعلی چه پیامدهای گسترده و برگشتناپذیری برای کل سیستم اجتماعی- اکولوژیکی استان خواهد داشت. در این میان، «کنترل برداشت های مازاد»، با توجه به وابستگی شدید بخش کشاورزی استان به منابع آب (به ویژه آب زیرزمینی) و وضعیت بحرانی این منابع، یک اقدام عملیاتی و ضروری برای جلوگیری از فروپاشی کامل منابع پایه و حفظ حداقل های لازم برای تاب آوری آینده است. این عامل نه تنها پیش نیاز برای پایداری است، بلکه به صورت حلقه بازخورد بر دو پیشران دیگر نیز تأثیر می گذارد. توفیق ملموس در کنترل برداشت ها (که نیازمند تفکر سیستمی و پذیرش بحران است) می تواند اعتماد به سیستم حکمرانی را افزایش دهد و ضرورت اقدامات سازگارانه را بیشتر نمایان سازد (تقویت X3 و X8). بالعکس، ناتوانی در کنترل مؤثر برداشت ها می تواند تلاش ها را برای حکمرانی سیستمی بی اثر جلوه دهد و بحران را تشدید کند و سرانجام پذیرش آن را به شکل نامطلوب تری تحمیل کند. بنابراین، پیام کلیدی این پژوهش برای سیاست گذاران و برنامه ریزان استان زنجان این است که راهبرد مؤثر برای توسعه پایدار ظرفیت تاب آوری کشاورزان، نیازمند توجه همزمان، یکپارچه و مستمر به هر سه پیشران کلیدی (پذیرش بحران، تفکر سیستمی و کنترل برداشت ها)

استان برداشته شود؛ این گام‌ها عبارت‌اند از: راه‌اندازی پلتفرم عمومی و تعاملی آب‌نمای زنجان برای نمایش داده‌های کلیدی به زبان ساده؛ برگزاری منظم کارگاه‌های مشارکتی تحلیل پیامدهای کم‌آبی با حضور کشاورزان مناطق مختلف، مدیران و متخصصان برای بررسی سناریوهای آینده؛ و طراحی و اجرای بسته‌های آموزشی-ترویجی بحران آب ویژه کشاورزان و دانش‌آموزان روستایی با تمرکز بر وضعیت آبخوان‌های محلی. این درک مشترک، سرمایه اجتماعی لازم را برای حمایت از اجرای راهبردهای حکمرانی سیستمی و پذیرش اقدامات کنترل برداشت فراهم می‌کند.

۲- راهبرد دوم، استقرار حکمرانی سیستمی، یکپارچه و تطبیقی آب: برای عبور از مدیریت جزیره‌ای و بخشی‌نگر کنونی، لازم است ساختار و فرآیندهای حکمرانی آب در استان زنجان با رویکرد سیستمی بازآرایی شود. پیشنهاد می‌شود این اقدام‌ها در دستور کار قرار گیرد: تشکیل شورای عالی آب استان زنجان با اختیارات کافی و با حضور تمامی ذی‌نفعان کلیدی برای راهبری یکپارچه؛ الزامی کردن پیوست تحلیل اثرهای سیستمی آب برای تمامی طرح‌های توسعه‌ای استان؛ تعریف شاخص‌های کلیدی عملکرد مشترک برای ارزیابی هماهنگ دستگاه‌های مسئول؛ و ایجاد شبکه‌های تخصصی حل مسئله آب بین کارشناسان دستگاه‌های مختلف. چنین ساختار و رویکردی می‌تواند تضمین کند اقدامات کنترل برداشت به صورت عادلانه، کارا و در هماهنگی با سایر برنامه‌های توسعه و سازگاری اجرا شود و بازخوردهای لازم برای تقویت پذیرش بحران ایجاد گردد.

۳- راهبرد سوم، اجرای برنامه جامع، هوشمند و مشارکتی کنترل برداشت‌ها: با توجه به نقش محوری کنترل برداشت در حفظ منابع باقی‌مانده آب زیرزمینی زنجان، اجرای برنامه‌ای قاطع و هوشمند ضروری است. این برنامه باید شامل تکمیل و هوشمندسازی سامانه اندازه‌گیری حجمی آب برای تمامی چاه‌های مجاز با قابلیت پایش آنلاین

و مدیریت فعالانه تعاملات پیچیده بین آنهاست. تمرکز بر هر یک از این پیشران‌ها به تنهایی، بدون توجه به دو پیشران دیگر، احتمالاً به نتایج پایدار و مطلوب منجر نخواهد شد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش دارای پیامدهای مهم نظری و کاربردی است. از لحاظ نظری، این مطالعه اهمیت به‌کارگیری رویکردهای سیستمی و آینده‌نگر مانند تحلیل اثرهای متقابل عامل‌ها را برای درک عمیق‌تر دینامیک‌های پیچیده تاب‌آوری و شناسایی نقاط مداخله مؤثر، فراتر از صرفاً فهرست کردن عوامل، نشان می‌دهد. برجسته شدن همزمان عوامل شناختی-اجتماعی (X3)، رویکردی-حکمرانی (X8) و فنی-نظارتی (X20) به عنوان پیشران‌های محوری، بر ماهیت چندوجهی تاب‌آوری و لزوم توجه یکپارچه به ابعاد مختلف آن تأکید می‌کند. از دیدگاه کاربردی و سیاست‌گذاری برای استان زنجان، نتایج این پژوهش قویاً بیان می‌کند برنامه‌ها و مداخلات آتی برای توسعه پایدار ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان باید به طور ویژه بر تقویت و بهبود همزمان این سه پیشران کلیدی متمرکز شوند. پرداختن صرف به عوامل تأثیرگذار یا تأثیرپذیر، بدون توجه به این سه عامل محوری که نقش پیوندی و تسهیل‌گری دارند، ممکن است به نتایج پایدار و سیستمی منجر نشود.

با توجه به یافته‌های کلیدی پژوهش مبنی بر نقش محوری و تعامل پیچیده سه پیشران پذیرش عمق بحران، تفکر سیستمی در حکمرانی و کنترل برداشت‌های مازاد در توسعه آبی ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان استان زنجان و در عین حال با در نظر گرفتن شرایط بحرانی منابع آب و وابستگی کشاورزی استان به این منابع، پیشنهادها کاربردی زیر در راستای تقویت متوازن این سه پیشران و افزایش تاب‌آوری ارائه می‌شود:

۱- راهبرد اول، نهادینه‌سازی پذیرش آگاهانه بحران آب در استان زنجان: در این خصوص پیشنهاد می‌شود به جای اطلاع‌رسانی‌های کلی مجموعه‌ای از گام‌های مشخص برای ایجاد درک عمیق و مشترک از وضعیت بحرانی منابع آب

و اعمال نظام تخصیص/تعرفه‌گذاری حجمی انعطاف‌پذیر (با لحاظ‌کردن الگوی کشت و ملاحظات اجتماعی)؛ اجرای برنامه شفاف و هدفمند برای تعیین تکلیف برداشت‌های غیرمجاز (ترکیب برخورد با متخلفان عمده و ارائه راهکار ساماندهی مشروط برای چاه‌های کم‌اثر)؛ و به‌کارگیری «ظرفیت‌های نظارت مردمی و فناوری‌های نوین» (مانند سنجش از دور و اپلیکیشن‌های گزارش‌دهی) برای افزایش اثربخشی نظارت و کاهش تخلفات باشد. توفیق این برنامه مستلزم حمایت اجتماعی حاصل از X3 و هدایت سیستمی X8 است.

در پایان، ضروری است به محدودیت‌های روش‌شناسی پژوهش اشاره شود تا خواننده در تفسیر نتایج دقت لازم را داشته باشد. این مطالعه با بهره‌گیری از روش‌های آینده‌پژوهی مانند تحلیل عدم قطعیت بحرانی و تحلیل اثرهای متقابل و تلفیق آن با قضاوت خبرگان، به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر ظرفیت‌سازی تاب‌آوری پرداخته است. این رویکردها برای تحلیل مسائل پیچیده، سیستمی و چندبعدی مناسب هستند (Amer et al., 2013)، اما محدودیت‌هایی نیز دارند که باید مدنظر قرار گیرند. نخست، روش‌های مذکور بر پایه نظرهای انسانی استوارند که همواره

با سوگیری‌های ذهنی، نهادی و گروهی همراهاند (Okoli & Pawlowski, 2004). دوم، به‌رغم تلاش در انتخاب پانلی متنوع از خبرگان، مواردی مانند اختلاف در سوابق تخصصی، علایق بخشی و دیدگاه‌های شخصی می‌تواند بر امتیازدهی عوامل اثر بگذارد. برای نمونه، رتبه پایین عامل "قیمت‌گذاری واقعی آب" ممکن است برخاسته از ملاحظات اجتماعی یا سیاسی برخی خبرگان باشد، در حالی که شواهد تجربی اهمیت کلیدی آن را در بالابردن بهره‌وری مصرف آب تأیید کرده‌اند (Molle & Berkoff, 2007). سوم، تعاملات غیرخطی، اثرهای هم‌زمان و روابط دینامیکی بین متغیرها در چنین روش‌هایی به‌خوبی شناسایی نمی‌شوند. چهارم، استفاده از میانگین نظرها ممکن است باعث نادیده‌گرفتن دیدگاه‌های نوآورانه، انتقادی یا اقلیت شود. امکان اثرپذیری پاسخ‌ها از فشار گروهی یا تمایل به اجماع ظاهری وجود دارد (Rowe & Wright, 1999). از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از روش‌های ترکیبی مانند مدل‌سازی سیستمی، تحلیل حساسیت، داده‌کاوی و اعتبارسنجی تجربی بهره‌گیری شود تا هم دقت یافته‌ها افزایش یابد و هم قابلیت تعمیم آنها بهبود یابد.

مراجع

- Abdolshahnejad, M., Khosravi, H., Nazari Samani, A., & Alambeigi, A. (2022). Identification of variables affecting farmer's resilience to dust based on expert opinion. *Iranian Rangeland and Desert Research*, 29 (1). 36-52. (in Persian).
- Agricultural Statistics Year 1401-1402 (2024). Deputy Director of Statistics, *Center for Statistics, Information and Communication Technology*. 1 and 3. (in Persian)
- Alibakhshi, H., Dourandish, A. & Sabuhi Sabuni, M. (2020). Investigating the Effects of Climate Change on the Agricultural Market. *Agricultural Economics*, 13(4), 55-86.
- Amer, M., Daim, T. U., & Jetter, A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, 46, 23–40.
- Ardakaniyan, R (2021). Water Scarcity Adaptation National workgroup. *Available on:* <https://www.wsanw.ir>. National Water Scarcity Adaptation Program Book (in Persian).
- Asadpourian, Z., Naderi mahdei, K. & Mohammadi, Y. (2022). Investigating the Strategies of Sustainable Management of Agricultural Water Resources in Lorestan Province. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 17(2), 63-80. (in Persian).
- Astaneh, M., Taghipour, F. & Davazdahemami, M. H. (2019). developing a model for social capacity building and water crisis socialization. *strategic Research on Social Problems in Iran*, 8(2), 25,19-22. (in Persian).

- Bagheri, E., Fard Moradinia, S., Jani, R. & Falsafian, A. (2024). Analysis and Investigation of Hydrological Drought Indicators in Mahenshan of Zanjan Province. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 18(65), 74-93.
- Bagheri, R., Ghorbani, M., Khalighi Sigaroudi, S. & Alambeigi, A. (2021). Analysis of Factors Affecting Resilience of Local Communities in the Face of Climate Fluctuations in Yazd. *Journal of Range and Watershed Managment*, 74(2), 303-321. (in Persian).
- Bathaïy, S. S., Chizari, M. & Sadighi, H. (2024). Discriminant Function of the Factors Determining the Farmers' Resilience to Climate Changes (Case Study: Farmers in Ghezel Ozan River Basin, Zanjan Province). *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 55(1), 95-112. (in Persian).
- Behboudi, D. & Ghorbani, F. (2023). Analyzing the Leverage Points of Qualitative System Dynamic Model of Water Governance (Case Study: Qarranqu Basin), *Iran-Water Resources Research*. 19 (1). 22-45. (in Persian).
- Benhamou, P. A., Bernués, A., Gaspar, P., Lizarralde, Manuel, J., Mancilla, L., Mandaluniz, N., Mena, Y., Soriano, B., Ondé, D., & Collado, M. (2024). How do farm and farmer attributes explain perceived resilience? *Agricultural Systems*, Vol 219.
- Chikwanha, O.C., Mupfiga, S., Olagbegi, B.R., Katiyatiya, C.L.F., Molotsi, A.H., Abiodun, B.J., Dzama, K., & Mapiye, C. (2021). Impact of water scarcity on dryland sheep meat production and quality: Key recovery and resilience strategies, *Journal of Arid Environments*, 190, 104511.
- Chimi, P. M., Mala, W., Fobane, J. L., Ngamsou A. K., Batamack N. B., Nganmeni, L., Pokam, E., Minfele, S., Matick, J. Tchandjie, F., Manga, F., & Bell, j. m. (2024). Factors affecting decision-making to strengthen climate resilience of smallholder farms in the Centre Region of Cameroon. *Climate Smart Agriculture*. 1(1), 100004.
- Delangizan, S., Karimi, M. SH., & Norouzi, H. (2017). Regional Scenario Planning Based On Critical Uncertainties. *Urban Management*, 16(3) 48, 497-512. (in Persian).
- Delbecq, A. L., Van de Ven, A. H., & Gustafson, D. H. (1975). *Group Techniques for Program Planning: A Guide to Nominal Group and Delphi Processes*. Scott Foresman.
- Finke, P. (2024). Modelling soil development under global change. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-55583-1>
- Godet, M. (2008). Strategic foresight: Use and misuse of scenario building. *Cahiers du LIPSOR*, Paris.
- Godet, M., & Durance, P. (2011). *Strategic Foresight for Corporate and Regional Development*. UNESCO Publishing.
- Haas, S., Gianoli, A., & Van Eerd, M. (2021). The roles of community resilience and risk appraisal in climate change adaptation: the experience of the Kannagi Nagar resettlement in Chennai. *Environment and Urbanization*, 33(2), 560–578.
- IPCC (2014). Climate change 2014, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report.
- Jafari, A.M., Ghadami Firouzabadi, A., Solgi, M., Zarei, GH., & Shanazi, K. (2024). Economic Valuation of Water in Agricultural Sector of Hamedan Province, Iran. *Water Research in Agriculture*, 37(4), 369-383. (in Persian).
- Jamshidi, A. & Anabestani, A. (2022). Interpretive Structural modeling of factors affecting the development of resilience to climate change (with emphasis on drought) of villagers in west of Urmia Lake. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 11(42), 1-22. (in Persian).
- Karimi, S., & Sepahvand, F. (2019). Effective educational drivers on the economic empowerment of women in Nahavand rural communities in line with the development of home businesses. *Agricultural Education Research Management*. 12(54). 30-52. (in Persian).
- KHodamoradi, S., Maddahi, M. E., Ahmadi, H., Besharat, M. A., & Mazaheri Tehrani, M. M. (۲۰۲۱). The Conceptualization of Cultural Resilience. *Strategic studies of public policy (Strategic studies of globalization Journal)*. 11(38). 276-297. (in Persian)

- Kuntke, F., Linsner, S., Steinbrink, E., Franken, J., & Reuter, C. (2022). Resilience in Agriculture: Communication and Energy Infrastructure Dependencies of German Farmers. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(2), 214-229.
- Maracchi, G. (2000). Agricultural drought—a practical approach to definition, assessment and mitigation strategies. In *Drought and drought mitigation in Europe*, 63-75. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Mesgaran, M. & Azadi, P. (2018). A National Adaptation Plan for Water Scarcity in Iran. Stanford Iran 2040 project. www.iranian-studies.stanford.edu/iran2040
- Mohammadloo, M., Rahmani Fazli, A. R., Sajadi, J. & Cheraghi, M. (2024). Evaluating the effects of drought on economic resilience of rural settlements (case study: Mahneshan County, Zanzan province). *Economic Geography Research*, 5(15), 1-19. (in Persian).
- Molle, F., & Berkoff, J. (2007). *Water pricing in irrigation: Mapping the debate in the light of experience*. Book Chapters, International Water Management Institute.
- Moradi, Z & Azami, S (2024). Major Drivers of Water Stress: An Empirical Analysis of Iran, *Journal of Quantitative Economics*, in press. (in Persian).
- Nazari, B., Jenab, M. & Fazeli Sangani, M. (۲۰۱۹). Analysis of Gross Value of Irrigated Agricultural Products in Qazvin Province Based on Gviap Index. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8 (3), 11-25. (in Persian).
- Nicholas, P., Fowler, S., Midmore, P., Coopmans, I., Draganova, M., Petitt, A. & Senni, S. (2021). Evidence of resilience capacity in farmers' narratives: Accounts of robustness, adaptability and transformability across five different European farming systems. *Journal of Rural Studies*. 88. 388-399.
- Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. *Information & Management*, 42(1), 15–29.
- Omran, A., Khorish, M. & Saleh, M. (2014). Structural analysis with knowledge-based MICMAC approach. *International Journal of Computer Applications*, 86 (5), 256-268.
- Pourasadollah. M. & Rhimizadeh M. R. (2018). An introduction to water governance, climate change and uncertainty. *Journal Extension Scientific (Professional) Aquifer*. (in Persian).
- Prat-Benhamou, A., Bernués, A., Gaspar, P., Lizarralde, J., Mancilla-Leytón, J., Mandaluniz, N., Mena, Y., Soriano, B., Onde, D., & Martin-Collado, D. (2024). How do farm and farmer attributes explain perceived resilience? *Agricultural Systems*. 219. 104016.
- Rafiei, M. (2021). The pillars of futures studies. available on: <https://modireamari.org>
- Rahbar. S. A. Shahhosseini A. A. & Niazi. I. (2018). Identifying and analyzing macro trends affecting crude oil prices with a foresight approach. *Management Improvement*. 40 (12), 26-1. (in Persian).
- Ramazani, M. E., & Khodapanah, K. (2021). Future Study of Resilience Improvement of Rural Against Drought Based on Practical Training, A Case Study: Ghale Chaei Watershed Area. *Regional Planning*, 10(40), 147-162. (in Persian).
- Rowe, G., & Wright, G. (1999). The Delphi technique as a forecasting tool: issues and analysis. *International Journal of Forecasting*, 15(4), 353–375.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Sadeghloo, T., Bozarjemehri, K. & Ahmadi, S. (2022). Analysis the Effect of Perception of flood Risk on the Resilience of Local Communities to Disasters (Study Area: Villages of Binalood County). *Geography and Environmental Planning*, 33(3), 119-138. (in Persian).
- Saei, R., Asadi, A., Kalantari, K. & Alambeigi, A. (2024). The Application of Futures Studies in Identifying and Analyzing Factors Affecting the Challenges of Damask Roses Cultivation Development in East Azerbaijan Province. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 19(2), 39-53. (in Persian).
- Sarmasti, M. (2021). Fars News Agency interview with the director of the Protection and Operation Office of the Zanzan Regional Water Company. Available on: <https://farsnews.ir/Provinces/1666006748000087110> (in Persian).

- Sepahvand, F., Naderi Mahdei, K., Gholamrezai, S. & Bijani, M. (2023). The Use of Foresight in the Sustainable Management of Water Resources in the Agricultural Sector of the Karkheh-Olia Basin. *Journal of Rural Research*, 13(4), 650-669. (in Persian).
- Seyed Akhlaghi, S. J. & Taleshi, M. (2018). Improving the resilience of local communities; Future Strategy for dealing with drought Case study: Hablehrood watershed. *Iran Nature*, 3(3), 60-68. (in Persian).
- Tafula, M., Chilundo, M., Sousa, W., Bjornlund, H., Pittock, J., Ramshaw, P., & Wellington, M. (2025). Climate change adaptation benefits from rejuvenated irrigation farming systems in Mozambique. *International Journal of Water Resources*.
- World Resources Institute (WRI) (2021). Ensuring Prosperity in a Water-stressed World – our challeng. Available on: <https://www.wri.org/water>.
- Yeganegi, S.K. & Babaei, F. (2022). Application of Operations Research in Futures Studies. *Research Paper on Industrial Management and Engineering*, 4(13), 124-133. (in Persian).
- Zanjan Regional Water Company (2022). Report on the Status of Groundwater Resources in Zanjan Province. *Ab-ban Quarterly*, (20), 11.
- Zhou, H., Jing'ai W., Jinhong W., & Huicong J. (2009). Resilience to natural hazards: A geographic perspective. *Nat Hazards*, 53:21-43.

Research Article**Analysis of the Dimensions of Farmers' Resilience to Drought Crisis Using Content Analysis Method****Mohammad Mehdi Ghasemi¹ & Javad Ghasemi^{2✉}**

1. Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2. Assistant Professor, Institute of Agricultural Education and Extension, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

(✉ Corresponding Author: ja.ghasemi@areeo.ac.ir)

ARTICLE INFO**Received:** 24 March 2025**Revised:** 20 April 2025**Accepted:** 25 April 2025**Available Online:** 17 May 2025**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Ghasemi, M.M., & Ghasemi, J., (2025). Analysis of the Dimensions of Farmers' Resilience to Drought Crisis Using Content Analysis Method. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. V.26, No.98, P: 43-66

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.368969.1611>

Introduction

Undoubtedly, drought is one of the most complex and major natural hazards that can affect many economic sectors and reduce both water availability and water quality necessary for productive agriculture. Globally, most freshwater (around 70 percent) is used by the agricultural sector, and in the future, demand for agricultural freshwater will increase. However, due to population growth and the need for food security, coupled with the decline in available water resources caused by over-extraction of water resources, drought, and climate change, water scarcity has become one of the challenges of the agricultural sector. In Iran, the agricultural sector, as one of the most important economic activities, is heavily dependent on water resources; however, due to drought and mismanagement of water resources, it faces serious challenges in ensuring sustainable agricultural water resources, which are leading to an unprecedented crisis in the water sector. To manage this crisis, in addition to the role of government institutions, farmers and local communities must have the ability to adapt to climate change and drought, and resilience capabilities. During the drought period, farms that had enough resilience capabilities were able to continue their activities, which could lead to the sustainability of the agricultural and rural sector. Accordingly, the main purpose of this research was to analyze the dimensions of farmers' resilience to drought and water crisis in the agricultural sector of Iran.

Methodology

In this study, the content analysis method was used to analyze the dimensions of farmers' resilience to drought. To conduct the research, the following steps were taken: 1) Identifying the main problem and research objectives; 2) Selecting the samples or texts; 3) Defining, coding, and categorizing semantic units; 4) Assessing the reliability of the results; and 5) Interpreting the findings. The aim of content analysis in this study was to gain a comprehensive understanding of the "components of farmers' resilience to drought and water crises in the agriculture sector". The sampling framework involved reviewing papers in this research field (published in scientific journals between 2008 and 2024). Accordingly, 112 papers were identified, out of which 78 papers were directly relevant to the research topic. Finally, each selected paper was assigned a code. The third step involved defining semantic units and coding them. Accordingly, words, sentences, and paragraphs were considered as semantic units. These units were then coded with a short phrase. Subsequently, subcategories and categories were formed by summarizing the coded concepts. In the fourth step, to ensure the reliability of the results, researcher triangulation was used. In the final step, the findings were interpreted by comparing subcategories and categories and referring back to the data.

Results and Discussion

Based on the analysis of selected papers, five categories and 63 concepts were identified and extracted in the context of the farmers' resilience to drought and water crisis in the agricultural sector, that were summarized into five categories, including: "economic capital," "social capital," "human capital," "physical and infrastructural capital," and "natural capital". The research findings indicated that, regarding economic capital, "diversification of economic activities and job opportunities in rural areas" and "access to bank facilities" were in the highest ranks; in relation to social capital, "cooperation, participation, and group and collective activities" and "membership in associations, cooperatives, organizations, credit funds, etc. for managing drought crisis" were in the highest ranks; Concerning human capital "participation in extension courses" and "awareness of the drought crisis and its consequences" were in the highest ranks; regarding physical and infrastructure capital, "access to welfare, infrastructural, and development services" and "use of technical and infrastructural equipment" were in the highest ranks; and finally regarding natural capital "using appropriate and modern irrigation management methods" and "using modern methods in production and crops improvement" were in the highest ranks.

Conclusions

For success in the field of farmers' resilience to drought, all the mentioned dimensions must be addressed simultaneously and through a comprehensive approach, because many of these components interact with each other and can either strengthen or weaken one another. Hardware and software requirements, technical and infrastructural aspects, and education and awareness should be considered alongside the involvement of local communities and formal and informal organizations. A one-dimensional approach cannot yield desirable results. Although some dimensions of resilience have been studied and examined less than others, which does not indicate their lesser importance compared to other dimensions, on the other hand, examining the direct and indirect effects and consequences of these dimensions is sometimes challenging. Finally, farmers' resilience to drought and water crisis and the development of resilient behaviors in farmers and local communities require the availability of necessary infrastructure and special support. This is a cross-sectoral and inter-ministerial issue, and serious decisions need to be made in the legislative, policy-making, and supervisory sectors.

Keywords: Climate change, Resilient behavior, Water crisis, Water Resource Management



© 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.2025.368969.1611>

نوع مقاله: پژوهشی

تحلیل ابعاد تاب آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی با استفاده از روش تحلیل محتوا

محمد مهدی قاسمی^۱ | جواد قاسمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

چکیده

بحران آب و خشکسالی از چالش‌های اساسی در بخش کشاورزی است که ضرورت دستیابی به امنیت غذایی و حفظ منابع پایه تولید، روز به روز بر اهمیت پرداختن به آن می‌افزاید. برای مقابله با چنین شرایطی، تاب‌آوری کشاورزان اهمیت ویژه‌ای دارد. در پژوهش حاضر با رویکرد تحلیل محتوا، به بررسی ابعاد و مولفه‌های تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی پرداخته شده است. بر این اساس، از مقاله‌های منتشر شده در مجلات علمی معتبر در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۳ استفاده شد. مقاله‌های شناسایی شده مرتبط با موضوع ۱۱۲ مورد بودند که از این تعداد، ۷۸ منبع به‌طور مستقیم با موضوع پژوهش ارتباط داشتند. بر اساس تحلیل‌ها، در مجموع ۶۳ مفهوم در حیطه موضوع تحقیق شناسایی و استخراج شدند که در پنج مقوله کلی «سرمايه انسانی»، «سرمايه طبيعي»، «سرمايه فيزيكي و زیربنایی»، «سرمايه اقتصادي» و «سرمايه اجتماعي» دسته‌بندی شدند. در این بین، سرمايه اقتصادي با ۱۸ دسته مفهوم و ۱۸۵ بار تکرار در منابع مختلف، در بالاترین رتبه قرار گرفت. این یافته‌ها همچنین نشان داد که در خصوص سرمايه اقتصادي، «تنوع معيشت»، در خصوص سرمايه اجتماعي، «همکاری و مشارکت و اقدام جمعي کشاورزان در امور روستا و کشاورزي»، در خصوص سرمايه انساني، «شرکت در دوره‌های آموزشی- ترويجي»؛ در خصوص سرمايه فيزيكي و زیربنایی، «برخورداری از خدمات رفاهي، زیربنایی و عمرانی در روستا» و در خصوص سرمايه طبيعي، «استفاده از شیوه‌های مناسب و نوین مدیریت آبیاری» به ترتیب در بالاترین رتبه‌ها قرار گرفتند. در مجموع، برای توفیق در زمینه تاب‌آوری، باید همه ابعاد به‌صورت توانمند و با رویکردی جامع مورد توجه قرار گیرند؛ بالابردن تاب‌آوری و توسعه رفتارهای تاب‌آورانه کشاورزان نیازمند فراهم بودن بسترهای لازم و حمایت‌های فرابخشی و فراوزارخانه‌ای در بخش‌های قانون‌گذاری، سیاست‌گذاری و اجرایی و نظارت است.

واژه‌های کلیدی: بحران آب، تغییر اقلیم، مدیریت منابع آب، رفتار تاب‌آورانه

مقدمه

به منابع آب شیرین نشان می‌دهد که تولیدات کشاورزی در سطح جهانی، شوک قابل‌توجهی را متحمل خواهد شد که تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و پایداری خواهد بود (Biswas et al., 2025). در عین حال، با توجه به روندهای فعلی در رشد جمعیت جهان، تقاضای غذایی که باید توسط کشاورزی پاسخ داده شود، به‌شدت به بهره‌برداری کارآمد از منابع آبی موجود بستگی دارد (Saad et al., 2020).

امروزه، دسترسی به آب شیرین محدود است، تا آنجا که آب شیرین به منبعی کمیاب تبدیل شده است (Aivazidou, 2022). تغییرات آب و هوایی، بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و افزایش جمعیت، همگی فشار قابل‌توجهی را بر منابع آب وارد کرده است که این امر تهدیدی جدی برای بخش‌های مختلف جامعه به‌ویژه در کشاورزی به‌شمار می‌رود. پیش‌بینی‌ها در خصوص دسترسی

۱ استادیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۲ استادیار، موسسه آموزش و ترویج کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. (✉ نویسنده مسئول: Email: ja.ghasemi@areeo.ac.ir)
<https://doi.org/10.22092/IDSER.2025.368969.1611>

دغدغه های اصلی کشاورزان ساکن در مناطق دارای شرایط بحرانی تبدیل کرده است. اثرهای مستقیم خشکسالی طیف وسیعی دارد مانند کاهش محصول، کاهش سطح آب زیرزمینی، افزایش نرخ مرگ و میر دام و حیات وحش. اثرهای غیرمستقیم خشکسالی شامل کاهش عملکرد محصول و درآمد کمتر کشاورزان، افزایش قیمت مواد غذایی، بیکاری و مهاجرت است (Hajian & Ghasemi, 2021). خشکسالی با تأثیر منفی بر جوانب مختلف اقتصادی، اجتماعی، محیطی و روانشناختی معیشت جوامع روستایی از یک سو و از سوی دیگر به دلیل وابستگی کم کشاورزان کوچک مقیاس به زمین های کشاورزی، اگر چاره اندیشی نشود این کشاورزان به سرعت از بخش کشاورزی خارج می شوند و در نتیجه روز به روز روستاها متروکه خواهند شد (Savari & Abdeslahi, 2019).

از وقوع خشکسالی نمی توان جلوگیری کرد اما اگر ماهیت و ویژگی های آن بررسی شود می توان نسبت به پیش بینی آن امیدوار بود و با آمادگی و برنامه ریزی، آثار زیان بار آن را کاهش داد و اگر ممکن باشد کنترل کرد. از این رو، بررسی علمی خشکسالی به خصوص بر اساس شاخص های چندمتغیره به منظور برنامه ریزی و مدیریت منابع آب و مقابله با مشکلات ناشی از کمبود آب ضروری است (Rezaei et al., 2024). اما برای مدیریت این چالش، علاوه بر مشارکت دستگاه های اجرایی و نهادهای قانون گذاری، لازم است مردم به ویژه بهره برداران و جوامع محلی توان سازگاری با این پدیده را داشته باشند (Damavandi et al., 2024) و بر این اساس، راهبردهای سازگاری گوناگون را برای کاهش اثرهای کمبود آب در شیوه های مبتنی بر کشاورزی خود به کار گیرند (Rahmani et al., 2018). خشکسالی مخاطره ای است اجتماعی- طبیعی و تکرار شونده که با تغییرات آب و هوایی، میزان و شدت آن تغییر می کند، از این رو ادراک خشکسالی و اتخاذ راهبردهای مواجهه با آن به منظور کاهش آسیب پذیری و افزایش تاب آوری، دو جزء کلیدی فرآیند سازگاری با این مخاطره است (Nouri & Nooripoor, 2024).

در بخش کشاورزی ایران نیز کمبود آب اصلی ترین عامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی و غذایی به شمار می رود (Hoseini et al., 2021). ایران در منطقه خشک و نیمه خشک قرار دارد و بر اساس نتایج پژوهش های علمی و شواهد تجربی قطعی شده است که ایران در سال های اخیر درگیر کم آبی و خشکسالی و بحران جدی آب است. این پدیده، آثار منفی بسیاری به دنبال دارد و فرآیند توسعه کشور به ویژه در بخش کشاورزی و روستایی را تحت تأثیر قرار داده است (Khatibi & Arjjumend, 2019; Damavandi et al., 2024). از دلایل بحران و ناامنی آبی در بخش کشاورزی ایران می توان به روند گرم/خشک شدن در نیم قرن اخیر، استفاده ناکارآمد از آب، رشد جمعیت، کاهش کمی و کیفی آب های زیرزمینی، مشکلات سیاسی و اقتصادی و حکمرانی نامناسب در این حوزه اشاره کرد (Nouri et al., 2023). اما در میان مخاطره های محیطی، خشکسالی شدیدترین و مؤثرترین مخاطره طبیعی به لحاظ کاهش تولیدات بخش کشاورزی و شدت رنج روستاییان به شمار می آید (Seyed Akhlaghi & Taleshi, 2021). خشکسالی با در نظر گرفتن اینکه محدوده ای وسیع را در برمی گیرد، پیچیده تر از دیگر مخاطره های طبیعی است. خشکسالی به دلیل اینکه در مناطق روستایی زمینه بروز دیگر چالش ها را فراهم می آورد، یکی از پرهزینه ترین مخاطره های طبیعی به شمار می رود (Yeganeh et al., 2022).

خشکسالی در حقیقت زیان بارترین پدیده طبیعی است که در همه اقلیم های جهان حتی در مناطق مرطوب رخ می دهد. خشکسالی کشاورزی گذشته از آسیب رساندن به محصولات زراعی و باغی و تغییر پوشش گیاهی، آسیب های اجتماعی و اقتصادی را هم در پی دارد (Salahi et al., 2024). بنابراین، به لحاظ ارتباط تنگاتنگ روستا و کشاورزی، پیامدهای منفی خشکسالی بر اقتصاد روستایی بیش از دیگر فضاهای جغرافیایی نمایان است. وقوع مکرر خشکسالی و پیچیدگی عوامل زمینه ساز و درهم تنیدگی پیامدهای منفی ناشی از خشکسالی، این پدیده را به یکی از

گرچه تاب‌آوری مفهوم پیچیده‌ای است که از رویکرد بوم‌شناسی آن پدیدار شد، اما به تدریج بر سایر حیطه‌های تخصصی اقتصادی، اجتماعی و ... از جمله محیط‌های روستایی نیز نفوذ کرده است (Seyed Akhlaghi & Taleshi, 2021). تاب‌آوری امروزه یکی از مهمترین موضوع‌ها برای رسیدن به پایداری است که به منزله راهی برای تقویت جوامع با استفاده از ظرفیت‌های آنها مطرح است. در واقع بالا بردن تاب‌آوری جوامع روستایی برای اجتناب از زیان‌های اقتصادی و اجتماعی مهم است و منجر به بازیابی آسان‌تر بعد از وقوع بلایای طبیعی می‌شود (Yeganeh, 2024). در تحلیل مفهوم تاب‌آوری چهار بعد اجتماعی (Akbarian Ronizi & Ramezanzadeh Lasboyee, 2019; Yeganeh *et al.*, 2022; Yeganeh *et al.*, 2022; Yeganeh, 2024)، نهادی (Darban Astane & Ghasemi, 2022) و کالبدی- محیطی (Karimi & Ataei, 2022) قابل توجه است. نظریه‌های مختلفی در باب تاب‌آوری بر مبنای ابعاد چهارگانه ارائه شده است که فصل مشترک تمامی آنها توانایی ایستادگی و واکنش مثبت به فشار با تغییر است (Rafieiyan *et al.*, 2021; Khodapanah, 2023).

اما، ارزیابی اثرهای محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی خشکسالی‌های اخیر در کشورهای مختلف نشانگر تاب‌آوری پایین جوامع در برابر مخاطره خشکسالی و دیگر بحران‌های آب‌محور است. آسیب‌های وارد شده بر کشاورزان و پیامدهای خشکسالی‌های دوره‌ای خود بیانگر نداشتن آمادگی و تاب‌آوری کشاورزان در برابر این مخاطره و پیامدهای آن و همچنین ناکارآمدی سیستم‌های مدیریت بحران در این موارد است. از این‌رو، نخستین گام ضروری برای مقابله با خشکسالی و تعدیل تبعات آن، شناخت و درک دقیق از ابعاد آسیب‌پذیری و مقاومت افراد برای ارتقای آستانه تحمل و انعطاف‌پذیری آنان است که در اغلب کشورهای در حال توسعه از آن غفلت شده است (McManus *et al.*, 2012). بنابراین، شناخت و سنجش تاب‌آوری کشاورزان و به‌طور کلی جامعه محلی، در بخش‌های مختلف شامل آمادگی مقابله با

2019). به‌همین دلیل، در سطح جهانی تغییرات چشمگیری در نگرش به مخاطرات دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که رویکرد غالب از تمرکز ضعیف بر کاهش آسیب‌پذیری به افزایش تاب‌آوری در مقابل سوانح تغییر پیدا کرده است. بر اساس این نگرش، برنامه‌های کاهش اثر مخاطره‌ها باید به دنبال ایجاد و تقویت ویژگی‌های تاب‌آوری در جوامع باشند و در زنجیره مدیریت سوانح به مفهوم تاب‌آوری اجتماعات محلی توجه کنند (Cutter *et al.*, 2008). تاب‌آوری ابزاری است برای کاهش اثر سوانح طبیعی که ظرفیت سازگاری را نیز فراهم می‌کند. تاب‌آوری شیوه‌ای از تفکر است که دیدگاه هدایت و سازماندهی تفکر را ارائه می‌دهد و به عبارت دیگر، محتوای ارزشمندی برای تحلیل سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی فراهم می‌کند (Keihka *et al.*, 2020).

تاب‌آوری مفهومی است که گستره‌ای وسیع در بخش‌ها و زمینه‌های علمی مختلف، از بوم‌شناسی تا مدیریت بحران دارد (Morkunas *et al.*, 2018). واژه تاب‌آوری (Resiliense) از ریشه لاتین واژه "Resilio" به معنای "برگشت به عقب" گرفته شده است (Kelin & Nicholls, 2003) و مفهوم آن ریشه در علم فیزیک و ریاضی دارد. به لحاظ زمانی، کاربست مفهوم تاب‌آوری در علوم مختلف از دهه ۱۹۷۰ با شروع کار هولینگ (Holling) به‌طور روزافزونی بررسی و ارزیابی شده است (Holling, 1973). به‌نقل از (Seyed Akhlaghi & Taleshi, 2021). تعریف‌های متعددی از تاب‌آوری ارائه شده است که ناشی از روش‌های گوناگون و تفاوت‌های بنیادی موجود در رویکردها و دیدگاه‌های مطرح در این حوزه است. تاب‌آوری به‌طور خلاصه عبارت است از توانایی نظام اجتماعی یا اکولوژیکی نسبت به جذب و مواجهه با بی‌نظمی یا اختلال، به‌طوری‌که بتواند ساختارها عملکرد اساسی، ظرفیت بازسازماندهی و ظرفیت سازگاری را در مقابل تغییرات و تنش‌ها حفظ کند (Anabestani *et al.*, 2016). بسیاری از محققان نیز تاب‌آوری را توانایی غلبه و گذرکردن از حوادث ناگوار تعریف کرده‌اند (Condly, 2006).

دارد، به جای مشاهده مستقیم رفتار افراد یا پرسش در مورد آنها، پیامها و آثاری که آنان به وجود آورده اند مورد توجه، تحلیل و مطالعه قرار می گیرد و مطالعه با این روش اغلب در پی شناخت ارزش های فرهنگی و دیدگاه های اجتماعی اصلی است که در رسانه ها عرضه می شود. این روش، به عنوان یک تکنیک تحقیقی، از اوایل قرن حاضر شروع شد و تاکنون تحولات زیادی داشته است و برای تجزیه و تحلیل نظام مند محتوای متون (کتاب ها، مجلات، روزنامه ها، مقاله ها، گزارش ها، مجله ها و ...)، تصویرها، صداها و دیگر رسانه ها استفاده می شود که در رشته های مختلف علمی از جمله علوم رفتاری کاربرد دارد. با این روش، مشخصات خاص پیام به طور روشمند و دقیق و به منظور استنباط علمی شناسایی می شود (Frankfort-Nachmias & Nachmias, 2003). بر این اساس، با توجه به امکان اجرای روش تحلیل محتوا روی داده های متنی، امکان تعریف دقیق مقوله ها و کدگذاری، استخراج مضامین و مفاهیم مرتبط با موضوع تحقیق از درون مقاله ها و همچنین امکان درک الگوها، سوگیری ها یا روندهای موجود در محتوای مقاله ها، استفاده از این روش، به طور مناسب تری می توانست در تحقق هدف این پژوهش نقش داشته باشد.

برای اجرای تحقیق بر اساس این روش، گام های زیر برداشته شد: ۱) مشخص شدن مسئله اصلی و هدف های تحقیق؛ ۲) انتخاب نمونه یا متون مورد نظر (شامل مقاله ها)؛ ۳) تعیین، کدگذاری و طبقه بندی واحدهای معنایی؛ ۴) بررسی قابلیت اطمینان نتایج و ۵) تفسیر یافته ها (Lavaei Adaryani et al., 2019). بر اساس گام های پنج گانه یاد شده، هدف روش تحلیل محتوا در مطالعه حاضر کسب شناخت جامع تر و درک عمیق تر درباره «ابعاد و مولفه های تاب آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی» در ایران به عنوان مسئله و هدف اصلی پژوهش بود.

در گام دوم، از آنجا که در تحلیل محتوا برای پاسخگویی دقیق به مسئله اصلی پژوهش، پیدا کردن منابع از الزام های اساسی به شمار می رود و متون و اسناد از منابع مهمی هستند

خشکسالی، توان پیشگیری از اثرهای سوء خشکسالی، توان بازیابی و برگشت پذیری و واکنش آنان در شرایط خشکسالی ضروری است و با بررسی عوامل مؤثر بر بهبود تاب آوری می توان گامی مثبت در این زمینه برداشت (Savari & Abdeslahi, 2019). در واقع، کاهش ابعاد آسیب پذیری کشاورزان از طریق افزایش سطح تاب آوری و ارتقای انعطاف پذیری در برابر پیامدهای مخاطره خشکسالی می تواند یکی از کارویژه های مدیریت، برنامه ریزی و توسعه کشاورزی در کشور باشد که از طریق شناسایی دقیق عوامل تأثیرگذار در تقویت تاب آوری امکان پذیر است (Akhgari & Ghasemian Moghadam, 2023).

مسئله مهم آن است که در مطالعات مختلف در این حوزه در کشور (عمدتاً مطالعات موردی)، به یک یا تعدادی از ابعاد تاب آوری پرداخته شده است، در صورتی که این موضوع بسیار پیچیده و چندوجهی است و نمی توان به صورت تک بعدی به آن نگریست. علاوه بر این، بسیاری از این ابعاد ضمن برخورداری از میزان تأثیرات متفاوت می توانند برهمکنش متقابل با دیگر ابعاد نیز داشته باشند. از سوی دیگر، بررسی ها نشان می دهد در پژوهش های پیشین در خصوص هر یک از ابعاد نیز همه مولفه ها بررسی نشده و شدت و اهمیت آنها کمتر دیده شده است. از این رو، ضروری است تا با دیدی عمیق تر و با تحلیل و مقایسه منابع مختلف، به بررسی جامع همه ابعاد این مقوله در زمینه مقابله با خشکسالی، مولفه های تشکیل دهنده هر یک از ابعاد و اهمیت و فراوانی هر یک پرداخته شود تا از این طریق بتوان به دید مناسب و جامعی برای برنامه ریزی و سیاستگذاری در این حوزه، پیش بینی روندها و تصمیم گیری های عملی دست پیدا کرد. بر این اساس، هدف کلی پژوهش حاضر، بررسی ابعاد و مولفه های تاب آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی در کشور به صورت نظام مند و با رویکرد تحلیل محتوا است.

مواد و روش ها

در پژوهش حاضر، از روش تحلیل محتوا بهره گرفته شد. در این روش که هم در پژوهش های کمی و هم کیفی کاربرد

حصول اطمینان از صحت و اعتبار علمی اطلاعات، صرفاً از مقاله‌های علمی چاپ شده در مجلات معتبر استفاده گردید و از دیگر منابع صرف‌نظر شد. بر این اساس، در مرحله انتخاب منابع واجد شرایط تحلیل محتوا از مقاله‌های منتشر شده در مجلات علمی معتبر در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۳ در حوزه موضوع مطالعه استفاده شد. دلیل انتخاب این بازه زمانی، دستیابی به یک دید جامع از مطالعات حدود ۱۵ سال اخیر است. دلیل بررسی‌نشدن منابع پیش از این بازه زمانی نیز این بود که در آن سال‌ها مطالعات کمتر و با پراکندگی بیشتری بود و عمده مطالعات در حوزه تاب‌آوری در سال‌های اخیر انجام شده‌اند، دیگر اینکه تغییرات اقلیمی طی سال‌های اخیر سریع‌تر و شدیدتر و تاثیر آن بر بخش کشاورزی و جامعه روستایی نسبت به سال‌های قبل بیشتر بوده است؛ در نتیجه مطالعات در بازه یاد شده می‌توانند دید واقع‌بینانه‌تری ارائه دهند.

با مرور کامل ادبیات، مقاله‌های مرتبط انتخاب و با یکدیگر مقایسه شدند. در این راستا کلید واژه‌های «تاب‌آوری» به همراه خشکسالی، نوسان‌های آبی، کم‌آبی، بی‌آبی، مدیریت آب، بحران آب و کاهش آب قابل دسترس جستجو گردید. در گام بعدی، از بین مقاله‌های یافت شده مقاله‌های دارای محتوای کاملاً مرتبط با تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی انتخاب شدند. تعداد مقاله‌های شناسایی شده مرتبط با موضوع ۱۱۲ مورد بود که از این تعداد، ۷۸ منبع به‌طور مستقیم و کامل با موضوع پژوهش مرتبط بودند. لازم است یادآوری شود در خصوص تاب‌آوری در ابعاد مختلف روستا و کشاورزی مطالعات متعدد انجام شده و دارای ادبیات غنی است، اما در این پژوهش، صرفاً مطالعات مرتبط با موضوع یاد شده بررسی شده است.

مقاله‌های مورد نظر نیز از طریق جستجو در پایگاه‌های مختلفی مانند پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)، پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایرانداک)، مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی (فپاک) و پایگاه مجلات

که پژوهشگران برای تبادل از آنها استفاده می‌کنند (Krippendorff, 2019)، مقاله‌های پژوهشی برای بررسی پیشینه تجربی به عنوان منابع اصلی مورد نظر قرار گرفت.

لازم است گفته شود که به مقوله تاب‌آوری و ابعاد آن در کشورهای مختلف جهان نیز پرداخته شده است. به‌طور مثال، ابعاد اجتماعی (Birhanu et al., 2017; Jayadas & Ambujam, 2021; Bahta & Myeki, 2021; Sass et al., 2024; Pret et al., 2025; Nzeyimana et al., 2025; Sarmah et al., 2025)؛ طبیعی (Birhanu et al., 2017; Sass et al., 2025; Shiimi et al., 2023; Sarmah et al., 2025)؛ فیزیکی (Birhanu et al., 2017; Jayadas et al., 2024)؛ و اقتصادی (Birhanu et al., 2017; Jayadas & Ambujam, 2021; Shikwambana et al., 2022; Shiimi et al., 2023; Nzeyimana et al., 2025)؛ (Birhanu et al., 2017; Jayadas & Ambujam, 2021; Shikwambana et al., 2022; Shiimi et al., 2023; Pret et al., 2025; Nzeyimana et al., 2025) بررسی و تحلیل

شده‌اند. اما با توجه به شرایط خاص جامعه روستایی و بخش کشاورزی کشور و ماهیت موضوع تحقیق که به‌شدت متاثر از عوامل اقتصادی، اجتماعی، فنی، محیط‌زیستی و اقلیمی و مکان‌محور است و اینکه هر کشور بسیاری از ویژگی‌های خاص خود را دارد و این ویژگی‌ها برخی در تناقض با هم هستند. ضمن اینکه کشاورزان در برابر بحران آب و خشکسالی از راهکارهای مبتنی بر دانش بومی استفاده می‌کنند که برخی از آنها منحصر به فرد و خاص شرایط کشور هستند. از طرفی، ویژگی‌های خاص و تنوع نظام‌های بهره‌برداری در بخش کشاورزی کشور و به‌ویژه غلبه نظام خرده‌دهقانی، در کنار پیچیدگی‌ها و شرایط چالش‌برانگیز بهره‌برداری از آب در این بخش، شرایط ویژه‌ای را در بخش حکمفرما کرده است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن هدف تحقیق مبنی بر استفاده از نتایج آن در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، تمرکز این پژوهش صرفاً بر مطالعات داخلی با توجه به شرایط بومی، تجربیات و دستاوردهای داخلی است.

به‌منظور دستیابی به این هدف، چارچوب نمونه‌گیری بررسی مقاله‌های این حوزه از پژوهش در کشور بود. به‌منظور

نتایج و بحث

با توجه به پرسش اصلی پژوهش حاضر مبنی بر اینکه «ابعاد و مولفه های تاب آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی کدام اند؟»؛ این مولفه ها از متن مقاله های مورد اشاره در جدول (۱) استخراج شدند. لازم به یادآوری است که تاب آوری سازه ای است چندبعدی که از نظر مفهومی، بسته به حوزه مطالعاتی می تواند ابعاد مختلفی داشته باشد و در حوزه های مختلف نیز تفاوت هایی با هم دارد. به طور مثال، بررسی ادبیات موضوع در داخل و خارج از کشور نشان داد که تاب آوری در برابر خشکسالی شامل ابعاد اقتصادی، اجتماعی، نهادی، محیط زیستی، فناورانه، فردی و روانی است. اما، معمولاً تاب آوری دارای چهار بعد اصلی است که در بسیاری از زمینه ها مشترک هستند که عبارت اند از: تاب آوری فردی، اجتماعی، اکولوژیک/محیط زیستی، و اقتصادی. بر این اساس، در این پژوهش تلاش شد با روش تحلیل محتوا، دسته بندی جامع، دقیق و تخصصی تری از ابعاد تاب آوری در برابر خشکسالی با توجه شرایط کشور و پژوهش ها و تجربیات موجود در کشور از طریق تحلیل و بازچینش مفاهیم استخراج شده ارائه گردد.

از این رو، ابتدا برای تمام عوامل استخراج شده از مطالعات پیشین، کدی در نظر گرفته شده است که بر این اساس، ۶۳ مفهوم شناسایی شدند. در گام بعدی، مواردی که دارای مفهوم مشترکی بودند، در قالب مفهومی کلی تر که بیانگر نمایای مجموع مفاهیم آن طبقه که در واقع حوزه ها یا ابعاد تاب آوری باشد خلاصه و طبقه بندی شدند و نامی برای آن در نظر گرفته شد. بر این اساس، پنج بعد سرمایه انسانی، سرمایه طبیعی، سرمایه فیزیکی و زیربنایی، سرمایه اقتصادی و اجتماعی شناسایی و نامگذاری شد. برای درک بهتر و تحلیل هر یک از این ابعاد، در جدول های (۲) تا (۶) هر طبقه یا در واقع هر بعد به صورت مجزا و به ترتیب بیشترین مفهوم استخراج شده و فراوانی مربوط به هر یک ارائه شده است.

تخصصی نور (Noormags) انتخاب شدند. سرانجام، پس از پالایش اولیه مقاله های جمع آوری شده به هر یک از مقاله های منتخب مورد استفاده در تحلیل، یک کد اختصاص داده شد. در جدول (۱)، مقاله های مستخرج و کد هر یک از آنها ارائه شده است.

پس از انتخاب نهایی منابع مورد نظر، در گام سوم مشخص کردن واحدهای معنایی و کدگذاری آنها مدنظر قرار گرفت. بر این اساس، واژه، جمله و پاراگراف به عنوان واحدهای معنایی در نظر گرفته شدند. پس از آن، واحدهای معنایی کدگذاری شدند که در این راستا، ابتدا واحدهای معنایی در قالب مفهیمی (به صورت یک عبارت کوتاه) خلاصه شدند که بتوان یکی از ابعاد تاب آوری کشاورزان را در برابر بحران خشکالی از آن استنباط کرد. این مفاهیم به صورت کدهایی شمارش شده و فراوانی هر یک از آنها محاسبه شد. بر این اساس، ۶۳ مفهوم با ۶۰۴ تکرار از میان مقاله های مورد بررسی در خصوص تاب آوری شناسایی شدند. پس از آن، زیرطبقات و طبقات تشکیل شدند؛ به این شکل که با تلخیص مفاهیم کدگذاری شده که دارای مفهوم مشترکی بودند، زیرطبقات با مفهومی کلی تر و در نهایت با تلخیص این زیرطبقات، طبقات اصلی که در واقع بیانگر هر یک از حوزه ها و یا ابعاد تاب آوری کشاورزان بودند تشکیل شدند که شامل پنج بعد سرمایه انسانی، سرمایه طبیعی، سرمایه فیزیکی و زیربنایی، سرمایه اقتصادی و سرمایه اجتماعی بودند. در گام چهارم، برای حصول قابلیت اطمینان نتایج، از تکنیک سه وجهی سازی محقق استفاده شد که از طریق همکاری محققان با هم در کدگذاری و تحلیل و تفسیر داده ها محقق می شود و احتمال بروز اربها را کاهش می دهند. در گام پنجم و نهایی نیز، به تفسیر یافته ها با استفاده از مقایسه زیرطبقات و طبقات و ارجاع مجدد به داده ها پرداخته شد.

تحلیل ابعاد تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی با استفاده از روش تحلیل محتوا

جدول ۱- مقاله‌های مورد بررسی به همراه کد مربوط به هریک

Table 1- Reviewed papers along with the code for each one

نویسندگان / سال انتشار مقاله Authors / year of publication of the paper	کد code	نویسندگان / سال انتشار مقاله Authors / year of publication of the paper	کد code	نویسندگان / سال انتشار مقاله Authors / year of publication of the paper	کد code
Imani & Mohamadi Mashkool, 2019	53	Sadeghloo <i>et al.</i> , 2014	27	Damavandi <i>et al.</i> , 2024	1
Zarif Moradian <i>et al.</i> , 2022	54	Hosseini <i>et al.</i> , 2012	28	Sharafi & Zarafshani, 2011	2
Mohammadloo <i>et al.</i> , 2024	55	Ahmadyoosefi <i>et al.</i> , 2021	29	Maleksaeidi <i>et al.</i> , 2016	3
Kor <i>et al.</i> , 2023	56	Afrakhteh <i>et al.</i> , 2015	30	Heidari-Sareban & Majnoui-Toutakhaneh, 2017	4
Vazirian <i>et al.</i> , 2021	57	Sabzehei <i>et al.</i> , 2019	31	Keshavarz & Moghadas, 2021	5
Jahansoozi <i>et al.</i> , 2024	58	Ghasemi <i>et al.</i> , 2020	32	Yeganeh, 2024	6
Javadizadeh <i>et al.</i> , 2016	59	Leis <i>et al.</i> , 2022	33	Babae <i>et al.</i> , 2021	7
Khatibi <i>et al.</i> , 2019	60	Rafieiyan <i>et al.</i> , 2011	34	Roknedin Eftekhari <i>et al.</i> , 2014	8
Azizi <i>et al.</i> , 2023	61	Majnoui Tutakhaneh <i>et al.</i> , 2018	35	Seyed Akhlaghi & Taleshi, 2021	9
Malekan <i>et al.</i> , 2021	62	Anabestani <i>et al.</i> , 2016	36	Khodapanah, 2023	10
Salahi Isfahani, 2021	63	Esmailnejad & Alijani, 2017	37	Velaie <i>et al.</i> , 2020	11
Motaghd <i>et al.</i> , 2023	64	Esmailnejad & Pudineh, 2017	38	Jamshidi & Anabestani, 2022	12
Roknedin Eftekhari & Vazin, 2016	65	Daman Bagh <i>et al.</i> , 2020	39	Sharifinia, 2018	13
Naimabadi & Salimi Sobhan, 2021	66	Rezaei, 2012	40	Sadeghloo & Sojasi Qeidari, 2016	14
Saleh <i>et al.</i> , 2022	67	Abedi Sarvestani <i>et al.</i> , 2018	41	Akbarian ronizi & Ramezanzadeh Lasboyee, 2019	15
Ramazani & Khodapanah, 2021	68	Karimi & Ataei, 2022	42	Yeganeh <i>et al.</i> , 2022	16
Tawakoli <i>et al.</i> , 2023	69	Khakifirouz <i>et al.</i> , 2022	43	Nasrnia & Ashktorab, 2021	17
Norouzi, 2019	70	Mousavi & Niknami, 2021	44	Savari & Abdeslahi, 2019	18
Anbari & Mehdizadeh Ardakani, 2023	71	Nouri & Nooripoor, 2019	45	Taleshi Seyed Akhlaghi, 2019	19
Saemipoor <i>et al.</i> , 2018	72	Taleshi <i>et al.</i> , 2018	46	Keihka <i>et al.</i> , 2020	20
Darban Astane & Ghasemi, 2022	73	Seyed Akhlaghi & Taleshi, 2019	47	Hoseini <i>et al.</i> , 2021	21
Savari & Khosravipour, 2018	74	Jamshidi & Anabestani, 2020	48	Jafari <i>et al.</i> , 2020	22
Safari Aliakbari, 2023	75	Behzadfar <i>et al.</i> , 2015	49	Nazaripour <i>et al.</i> , 2024	23
Ehsani & Shokoohi, 2022	76	Shakeri Bostanabad <i>et al.</i> , 2022	50	Hajian & Ghasemi, 2021	24
Akhgari & Ghasemian Moghadam, 2023	77	Hajian & Ghasemi, 2021	51	Poortaheri <i>et al.</i> , 2013	25
Shabani <i>et al.</i> , 2023	78	Azkiya & Imani, 2006	52	Mehrabi <i>et al.</i> , 2022	26

۱- سرمایه اقتصادی همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، این

اولین طبقه یا بعد که از تلخیص مفاهیم به دست آمد و بعد شامل ۱۸ دسته مفهوم بود که ۱۸۵ بار در منابع مختلف بیشترین تعداد مفهوم را به خود اختصاص داد، سرمایه تکرار شده بودند. در حقیقت، بیشترین موضوعی که در مقوله

فراوانی یک تا ۱۳ قرار داشتند که از بین آنها اعتماد اجتماعی و انسجام اجتماعی فراوانی بیشتری داشتند.

۳- سرمایه انسانی

همان طور که در جدول (۴) دیده می شود، سومین مقوله شناسایی شده مربوط است به سرمایه انسانی که بر این اساس ۱۳ مفهوم کلی استخراج شد که در مجموع ۱۰۵ بار در مقاله های مختلف تکرار شده بودند. در این بین، مفاهیم «شرکت در دوره های آموزشی- ترویجی در زمینه مدیریت ریسک و مخاطرات» و «آگاهی از بحران آب و پیامدهای آن» به ترتیب با فراوانی ۲۸ و ۲۰ در بالاترین رتبه ها قرار داشتند و پس از آن، «دسترسی به رسانه ها و منابع اطلاعاتی و ارتباطاتی در زمینه مدیریت بحران های آبی» و «سطح تحصیلات کشاورزان و اعضای خانواده های آنها» هر یک با فراوانی ۱۰ در رتبه های بعدی قرار گرفتند.

۴- سرمایه فیزیکی و زیربنایی

چهارمین عامل شناسایی شده، سرمایه فیزیکی و زیربنایی بود. همان طور که در جدول (۵) دیده می شود، این عامل شامل ۱۱ دسته مفهوم است که ۸۹ بار در منابع مختلف تکرار شده بودند. در این بین، «برخورداری از خدمات رفاهی، زیربنایی و عمرانی (راه های ارتباطی، آب و برق، گاز، تلفن و اینترنت، خدمات بهداشتی و درمانی، آموزشی عمومی و ...)»، «استفاده از تجهیزات فنی و زیربنایی (آبیاری مدرن، ماشین آلات و ادوات کشاورزی و نهادهای کشاورزی) در واحد تولیدی»، «توسعه عملیات زیربنایی در زمینه آب و خاک (شبکه های آبیاری و زهکشی، تسطیح و یکپارچه سازی، پوشش نهرها، اصلاح هندسی اراضی و ...)» و «توسعه زیرساخت های لازم در زمینه مدیریت بحران های طبیعی توسط نهادهای دولتی» به ترتیب با فراوانی ۱۹، ۱۸، ۱۱ و ۱۰ بیشترین تکرار را در منابع مورد بررسی داشتند. پس از آنها نیز هفت مفهوم با تعداد تکرار کمتر (از یک تا هشت) قرار داشتند.

تاب آوری به آن پرداخته شده است، مقوله های اقتصادی است. در این بین، «تنوع بخشی فعالیت های اقتصادی و اشتغال در روستا (تنوع معیشتی)» با ۳۵ تکرار و «دسترسی به تسهیلات بانکی در جهت جبران خسارت با سود کم و بازپرداخت مناسب» با ۲۸ تکرار با اختلاف قابل توجهی در بالاترین رتبه ها قرار گرفتند. پس از این دو مفهوم، «برخورداری از بیمه کشاورزی» و «حمایت های دولتی (اعطای یارانه حمایتی، حمایت های مالی، کمک بلاعوض و بخشودگی یا تنفس در زمان پرداخت تسهیلات در زمان بحران، پرداخت مستمری و ...)» به ترتیب با فراوانی ۲۰ و ۱۶ بیشترین تکرار را در منابع مورد بررسی به خود اختصاص داد. پس از این چهار مفهوم، ۱۴ مفهوم دیگر با فراوانی ۱ تا ۱۶ قرار داشتند.

۲- سرمایه اجتماعی

دومین عامل که بیشترین تعداد مفهوم را به خود اختصاص داد، سرمایه اجتماعی بود. همان طور که در جدول (۳) دیده می شود، این عامل شامل ۱۳ دسته مفهوم است که ۱۳۳ بار در منابع مختلف تکرار شده اند. در این بین، «همکاری و مشارکت و اقدام جمعی (مشارکت مالی و غیرمالی در طرح های اجرایی روستا، کارهای عام المنفعه و ...)» با فراوانی ۳۰، در بالاترین رتبه قرار گرفت و به نوعی یکی از مفاهیمی بود که در مجموع مفاهیم شناسایی شده نیز در بالاترین رتبه ها قرار گرفت. پس از آن، «عضویت در انجمن ها، تعاونی ها و تشکلهای صندوق های اعتباری و ... برای مدیریت بحران های آبی»، «نقش آفرینی مدیریت نهادهای سازمان های رسمی و غیررسمی محلی (رهبران محلی، شوراهای دهیاری ها و ...) برای مدیریت بحران های آبی» و «میزان بهره گیری از دانش بومی برای مدیریت بحران های آبی» به ترتیب با فراوانی ۲۲، ۲۰ و ۱۵ بیشترین تکرار را در منابع مورد بررسی داشت. پس از این مفاهیم نه مفهوم با

تحلیل ابعاد تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی با استفاده از روش تحلیل محتوا

جدول ۲- بعد سرمایه اقتصادی تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی

Table 2- The dimension of economic capital in farmers' resilience to drought crisis

فرآوانی Frequency	کد مقاله Paper Code	مفاهیم Concepts	طبقه Category
35	1, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 19, 22, 23, 24, 25, 30, 32, 37, 41, 43, 46, 47, 50, 51, 56, 60, 61, 63, 64, 66, 67, 69, 70, 73, 75, 77	تنوع بخشی فعالیت‌های اقتصادی و فرصت‌های شغلی در روستا (تنوع بخشی معیشت) Diversification of economic activities and job opportunities in rural areas (livelihood diversification)	سرمایه اقتصادی Economic capital
28	1, 6, 7, 9, 10, 16, 17, 22, 23, 29, 32, 33, 38, 39, 41, 43, 46, 47, 48, 55, 63, 64, 67, 68, 73, 75, 77, 78	دسترسی به تسهیلات بانکی با سود کم و بازپرداخت مناسب Access to bank facilities with low interest rates and reasonable repayment terms	
20	1, 6, 7, 9, 10, 14, 19, 32, 33, 41, 42, 43, 47, 48, 59, 64, 67, 70, 72, 77	دسترسی و برخورداری از بیمه کشاورزی Access to agricultural insurance	
16	1, 6, 10, 14, 16, 20, 22, 30, 33, 43, 47, 55, 63, 64, 73, 77	حمایت‌های دولتی (اعطای یارانه حمایتی، حمایت‌های مالی، کمک بلاعوض و بخشودگی یا تنفس در زمان پرداخت تسهیلات در زمان بحران، پرداخت مستمری و ...) Government support (granting support subsidies, financial support, grants, payment of pensions, etc.)	
14	1, 6, 22, 47, 48, 55, 61, 62, 63, 68, 70, 73, 75, 77	میزان پس‌انداز کشاورزان و خانواده‌های آنها The level of financial savings of farmers and their families	
13	1, 6, 24, 37, 41, 46, 47, 48, 56, 67, 69, 73, 77	فعالیت اقتصادی خارج از محدوده روستا و فعالیت‌های غیر کشاورزی (درآمد و معیشت جایگزین) Economic activity outside the village boundaries and non-agricultural activities (alternative income and livelihood)	
10	9, 15, 47, 48, 54, 61, 67, 68, 75	میزان دارایی و سرمایه The amount of assets and capital	
9	1, 15, 47, 48, 61, 63, 68, 72, 78	میزان درآمد حاصل از بخش کشاورزی The amount of income derived from the agricultural sector	
7	6, 22, 32, 33, 38, 48, 67	توسعه صنایع و کسب و کارهای جدید (تبدیلی و تکمیلی کشاورزی و ...) Development of new industries and businesses (Agricultural processing and complementary industries, etc.)	
5	49, 55, 67, 68, 75	مشارکت زنان روستایی در فعالیت‌های اقتصادی Participation of rural women in economic activities	
5	1, 6, 15, 55, 67	توانایی تغییر شغل و مهیا کردن شغل جدید در شرایط بحرانی The ability to change jobs and create new job opportunities in critical situations	
5	1, 6, 47, 69, 70	توانایی تطبیق و برگشت به شرایط شغلی و درآمدی مناسب پس از بروز بحران Ability to adapt and return to appropriate job and income conditions after a crisis	
5	1, 41, 43, 55, 67	شناسایی زنجیره‌های تولید و توانایی بازاریابی محصولات کشاورزی Identification of production chains and agricultural product marketing ability	
4	1, 47, 69, 70	خوش‌بینی و امیدوار بودن به آینده اقتصاد روستا و بخش کشاورزی Being hopeful about the future of the rural economy and the agricultural sector	
4	41, 43, 55, 67	ثبات قیمت محصولات کشاورزی (به‌ویژه محصولات راهبردی) Price stability of agricultural products (especially strategic products)	
3	7, 33, 43	تضمین خرید محصولات کشاورزی Guaranteed purchase of agricultural products	
1	6	افزایش سرمایه‌گذاری (دولتی و غیردولتی) در روستا Increasing investment (governmental and non-governmental) in rural areas	جمع کل
1	6	تمایل افراد بومی به سرمایه‌گذاری در روستا Willingness of local people to invest in rural areas	
185	185	Total	

جدول ۳- بعد سرمایه اجتماعی تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی

Table 3- The dimension of Social capital in farmers' resilience to drought crisis

طبقة	مفاهيم	کد مقاله	فراوانی
Category	Concepts	Paper Code	Frequency
سرمایه اجتماعی Social capital	همکاری و مشارکت و اقدام جمعی (مشارکت مالی و غیرمالی در طرح‌های اجرایی روستا، کارهای عام‌المنفعه و ...)	1, 2, 7, 9, 10, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 29, 31, 32, 33, 36, 43, 46, 61, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 77, 78	30
	عضویت در انجمن‌ها، تعاونی‌ها و تشکل‌ها، صندوق‌های اعتباری و ... برای مدیریت بحران‌های آبی	2, 7, 16, 17, 18, 32, 36, 39, 41, 43, 47, 48, 61, 63, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 77	22
	نقش‌آفرینی مدیریت نهادها و سازمان‌های رسمی و غیررسمی محلی (رهبران محلی، شوراهای دهیاری‌ها و ...) برای مدیریت بحران‌های آبی	1, 7, 9, 12, 15, 17, 18, 33, 36, 41, 43, 46, 47, 48, 61, 62, 63, 67, 68, 69	20
	میزان بهره‌گیری از دانش بومی برای مدیریت بحران‌های آبی	1, 7, 10, 14, 19, 26, 32, 40, 41, 46, 47, 64, 66, 73, 77	15
	اعتماد اجتماعی (قرض دادن پول، ضمانت بانکی دیگران، قرض دادن ادوات و ...)	1, 18, 20, 23, 31, 43, 46, 47, 61, 63, 66, 68, 70	13
	انسجام اجتماعی (معاشرت و تعامل با دیگران، شرکت در جلسات عمومی و ...)	18, 20, 31, 32, 33, 47, 62, 63, 66, 68	10
	میزان تعلق خاطر به روستا	9, 13, 15, 26, 46, 48, 68, 70	8
	احساس رضایت شغلی (از شغل کشاورزی)	1, 47, 55, 72, 75	5
	تمایل به ماندگاری در روستا و امید به آینده	1, 7, 9, 46	4
	احساس رضایت از زندگی در روستا	1, 9, 67	3
	امنیت اجتماعی	68	1
	اشتراک دانش و تجربه بین سایر کشاورزان	67	1
	امانت از درگیری‌های قوم و قبیله‌ای در روستا	1	1
	Preventing ethnic and tribal conflicts in the village		
جمع کل	Total	133	133

تحلیل ابعاد تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی با استفاده از روش تحلیل محتوا

جدول ۴- بعد سرمایه انسانی تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی

Table 4- The dimension of Human capital in farmers' resilience to drought crisis

فرآوانی Frequency	کد مقاله Paper Code	مفاهیم Concepts	طبقه Category
28	1, 3, 7, 10, 16, 19, 20, 26, 28, 32, 33, 36, 39, 40, 41, 43, 44, 47, 48, 56, 57, 61, 62, 63, 64, 66, 72, 73, 74	شرکت در دوره‌های آموزشی- ترویجی در زمینه مدیریت ریسک و مخاطرات Participation in extension courses in the field of risk and hazards management	سرمایه انسانی Human capital
20	1, 5, 7, 9, 10, 20, 23, 28, 35, 36, 41, 43, 46, 47, 48, 56, 70, 72, 73, 77	آگاهی از بحران آب و پیامدهای آن Awareness of the water crisis and its consequences	
10	1, 23, 33, 34, 43, 47, 63, 67, 72, 78	دسترسی به رسانه‌ها و منابع اطلاعاتی و ارتباطاتی در زمینه مدیریت بحران‌های آبی Access to media and informational and communication resources related to water crisis management	
10	17, 43, 46, 47, 48, 61, 68, 70, 72, 78	سطح تحصیلات کشاورزان و اعضای خانواده آنها Education level of farmers and their family members	
7	1, 9, 15, 20, 47, 48, 72	پایبندی به اعتقادات دینی و مذهبی Adherence to religious and sectarian beliefs	
7	1, 9, 12, 23, 33, 47, 72	درک و آشنایی با روش‌های مدیریت ریسک در زمینه مدیریت بحران‌های آبی Understanding risk management methods related to water crisis management	
6	47, 60, 61, 68, 76, 78	ویژگی‌های جمعیت‌شناختی بهره‌برداران و اعضای خانواده آنها (سن، جنسیت، قومیت و طبقه اجتماعی و ...) Demographic characteristics of farmers and their family members (age, gender, ethnicity, social class, etc.)	
6	1, 17, 62, 63, 69, 72	تجربه مقابله با بحران‌های آبی Experience of dealing with Water crisis	
4	15, 33, 36, 58	آمادگی روانی برای مقابله با بحران‌های پیش‌آمده (توانمندسازی روانی) Psychological preparedness to face emerging crises (psychological empowerment)	
3	1, 7, 10	خلاقیت و نوآوری در امر تولید و مدیریت منابع آبی Creativity and innovation in the production and water resource management	
2	43,44	نقش‌آفرینی مراکز تحقیقاتی در امر مدیریت بحران‌های آبی Role playing of research centers in water crisis management	
1	1	توانایی یادگیری موضوعات جدید در امر تولید و مدیریت منابع آبی Ability to learn new topics in production and water resource management	
1	1	توانایی و تحلیل مسائل و مشکلات Ability to analyze issues and problems	
105	105	Total	جمع کل

جدول ۵- بعد سرمایه فیزیکی و زیربنایی تابآوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی

Table 5- The dimension of Physical and infrastructure capital in farmers' resilience to drought crisis

فرآوانی Frequency	کد مقاله Paper Code	مفاهیم Concepts	طبقه Category
19	1, 7, 9, 10, 12, 17, 20, 43, 46, 47, 48, 54, 57, 61, 68, 69, 70, 72, 78	برخورداری از خدمات رفاهی، زیربنایی و عمرانی (راههای ارتباطی، آب و برق، گاز، تلفن و اینترنت، خدمات بهداشتی و درمانی، آموزشی عمومی و ...) Access to welfare, infrastructural, and development services (transportation, water, electricity, gas, telephone and internet, health and medical services, public education, etc.)	سرمایه فیزیکی و زیربنایی Physical and infrastructure capital
18	9, 10, 17, 23, 26, 29, 33, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 65, 67, 69, 73, 78	استفاده از تجهیزات فنی و زیربنایی (آبیاری مدرن، ماشین آلات و ادوات کشاورزی و نهادهای کشاورزی) Use of technical and infrastructural equipment (modern irrigation, agricultural machinery, and agricultural inputs)	
11	29, 33, 39, 41, 42, 46, 48, 55, 69, 73, 77	توسعه عملیات زیربنایی در زمینه آب و خاک (شبکه های آبیاری و زهکشی، تسطیح و یکپارچه سازی، پوشش نهرها، اصلاح هندسی زمین ها و ...) Development of infrastructural operations in water and soil management (irrigation and drainage networks, land leveling and consolidation, canal lining, land geometric correction, etc.)	
10	1, 7, 11, 14, 23, 26, 30, 46, 57, 70	توسعه زیرساخت های لازم در زمینه مدیریت بحران های طبیعی توسط نهادهای دولتی Development of necessary infrastructure for managing natural crises by government institutions	
8	14, 28, 32, 33, 43, 59, 64, 77	توسعه بانک های اطلاعاتی و سیستم های پایش و پیش آگاهی در خصوص خشکسالی و بحران های آب محور Development of databases and monitoring and early warning systems for drought and water-related crises	
6	9, 17, 47, 61, 75, 77	مساحت واحد تولیدی Area of the production unit	
5	1, 9, 12, 32, 64	دسترسی به خدمات فنی - مهندسی و مشاوره ای Access to technical-engineering and advisory/ consulting services	
4	7, 15, 61, 68	دسترسی به سکونتگاه مناسب Access to suitable settlements	
4	1, 7, 55, 62	دسترسی به نهادهای تولیدی Access to production inputs	
3	1, 9, 17	دسترسی به مراکز خرید و فروش تجهیزات فنی و زیربنایی (آبیاری مدرن، ماشین آلات و ادوات کشاورزی و نهادهای کشاورزی) Access to centers for buying and selling technical and infrastructural equipment (modern irrigation, agricultural machinery and tools, and agricultural inputs)	
1	61	نوع مالکیت اراضی Type of land ownership	جمع کل
89	89	Total	

۵- سرمایه طبیعی

«استفاده از روش های نوین در امر تولید و مدیریت بهزراعی»

آخرین عامل شناسایی شده سرمایه طبیعی بود. همان طور که در جدول (۶) دیده می شود، این عامل شامل هشت دسته مفهوم است که ۹۲ بار در منابع مختلف تکرار شده بودند. در این بین، «استفاده از شیوه های مناسب و نوین مدیریت آبیاری» با ۲۲ تکرار در بالاترین رتبه و پس از آن، «وجود تنوع محصولات تولیدی در واحد تولیدی (تنوع کشت)» و «کشت محصولات با نیاز آبی پایین و مقاوم به خشکسالی» به صورت برابر و هر یک با فراوانی ۱۶ قرار داشتند.

تحلیل ابعاد تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی با استفاده از روش تحلیل محتوا

جدول ۶- بعد سرمایه طبیعی تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی

Table 6- The dimension of natural capital in farmers' resilience to drought crisis

فرآوانی Frequency	کد مقاله Paper Code	مفاهیم Concepts	طبقه Category
22	1, 27, 33, 35, 41, 42, 43, 45, 47, 48, 52, 53, 57, 60, 62, 64, 67, 68, 72, 73, 77, 78	استفاده از شیوه‌های مناسب و نوین مدیریت آبیاری Using appropriate and modern irrigation management methods	سرمایه طبیعی Natural capital
16	9, 19, 33, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 64, 65, 67, 73, 77, 78	استفاده از روش‌های نوین در امر تولید و بهزراعی (تغذیه، خاکورزی، مدیریت آفات و بیماری‌ها، تاریخ کشت بهینه و ...) Using modern methods in production and crops improvement (such as nutrition, tillage, pest and disease management, optimal planting date, etc.)	
16	1, 7, 24, 27, 33, 37, 41, 42, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 55, 77	تنوع محصولات تولیدی در واحد تولیدی (تنوع کشت) Crop diversity in the production unit (crop diversification)	
16	1, 19, 29, 33, 35, 37, 40, 41, 42, 52, 53, 57, 64, 67, 73, 77	کشت محصولات با نیاز آبی پایین و مقاوم به خشکسالی Cultivation of low-water-demand and drought-resistant crops	
16	16, 19, 21, 26, 33, 35, 37, 43, 44, 47, 55, 62, 67, 68, 73, 78	اصلاح الگوی کشت (محصولات جایگزین، ترکیب کشت، توسعه کشت گلخانه‌ای، کشت محصولات با مزیت نسبی بالا و ..) Crop pattern modification (alternative crops, crop rotation, development of greenhouse cultivation, cultivation of high comparative advantage crops, etc.)	
4	1, 7, 67, 72	دسترسی به منابع آبی Access to water resources	
1	67	تنوع منابع آبی Diversity of water resources	جمع کل
1	1	دسترسی به خاک مناسب و حاصلخیز Access to suitable and fertile soil	
92	92	Total	

۶۳ مفهوم در حیطه موضوع تحقیق شناسایی و استخراج شدند که در پنج دسته کلی «سرمایه انسانی»، «سرمایه طبیعی»، «سرمایه فیزیکی و زیربنایی»، «سرمایه اقتصادی»، و «سرمایه اجتماعی» دسته‌بندی شدند.

در مجموع نیز جمع‌بندی یافته‌های تحقیق بر اساس طبقات شناسایی شده، تعداد مفاهیم و فراوانی کل مفاهیم هر طبقه در قالب جدول (۷) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، مطابق تحلیل‌ها روی ۷۸ مقاله نهایی منتخب، در مجموع پنج بعد یا طبقه اصلی و

جدول ۷- ابعاد پنج‌گانه تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران خشکسالی

Table 7- Five dimensions of farmers' resilience to drought crisis

فرآوانی Frequency	تعداد مفاهیم Number of Concepts	طبقات Categories
185	18	سرمایه اقتصادی Economic capital
133	13	سرمایه اجتماعی Social capital
105	13	سرمایه انسانی Human capital
89	11	سرمایه فیزیکی و زیربنایی Physical and infrastructure capital
92	8	سرمایه طبیعی Natural capital
604	63	جمع کل Total

نتیجه گیری

کارهای خرد و خانگی و همچنین توسعه صنایع کوچک می تواند ضمن پایداری مناطق روستایی، سبب تامین معیشت پایدار ساکنان و حفظ منابع پایه آب و خاک شود. از طرفی، بالارفتن سطح معیشت خانوارهای روستایی سبب می گردد تا جریان سرمایه به سمت فعالیت های کشاورزی نیز بیشتر شود که این امر به نوبه خود می تواند از یک سو سبب بالارفتن بهره وری و از سوی دیگر موجب اتخاذ راهبردهایی در جهت افزایش تاب آوری شود.

در خصوص تاب آوری اقتصادی، با توجه به خرده دهقانی و معیشتی بودن بخش قابل توجهی از بخش کشاورزی، حمایت های دولتی به ویژه در قالب تسهیلات مالی با بهره و دوره بازپرداخت مناسب ضروری است؛ اما عملاً بخش قابل توجهی از فعالان این بخش از این تسهیلات بی بهره هستند یا بهره لازم را نمی برند، به ویژه اینکه با مشکلاتی در زمینه تامین وثیقه لازم مواجه هستند. سومین عامل مهم در این بعد نیز برخورداری از بیمه کشاورزی است. بدون شک، بیمه کشاورزی یکی از ابزارهای کارآمد مدیریت ریسک و بالارفتن تاب آوری به شمار می رود، اما بیمه کشاورزی آنچنان که باید و شاید نقش خود را به شکل مؤثر ایفا نمی کند. در بسیاری از موارد، غرامت های پرداختی تناسب چندانی با شدت خسارات وارد شده ندارد، در زمان برآورد خسارت نیز تضاد و اختلافاتی به وجود می آید و معمولاً نارضایتی بهره برداران را در پی دارد. در نتیجه رغبت کافی در بیشتر حوزه ها برای برخورداری از خدمات بیمه ای وجود ندارد. از طرفی، باید سازوکارهای تشویقی و حمایتی لازم نیز در این زمینه ارائه شود. اما، صندوق بیمه کشاورزی، باید در کنار سیاست های حمایتی و بیمه ای خود، به سمت ارائه سازوکارهای مناسب در زمینه مدیریت ریسک حرکت کند و گر نه با منابع محدود در اختیار و ریسک های بسیار گسترده و روزافزون در بخش کشاورزی نمی تواند تاثیر لازم را در تاب آور کردن کشاورزان داشته باشد.

در تحقیقات در دیگر کشورها (Birhanu et al., 2017; Matlou & Bahta, 2019; Xu et al., 2021; Bahta & Myeki, 2021; Balaei et al., 2021; Jayadas & Ambujam, 2021; Shikwambana et al., 2022; Shiimi

در این پژوهش با رویکرد تحلیل محتوا سعی شد به بررسی و تحلیل مولفه های تاب آوری کشاورزان در برابر بحران آب در بخش کشاورزی کشور در مقاله های علمی معتبر منتشر شده داخلی با توجیهات بیان شده پرداخته شود. بر این اساس، در مجموع، در بررسی ۷۸ مقاله منتخب، ۶۳ مفهوم در قالب پنج دسته کلی «سرمایه انسانی»، «سرمایه طبیعی»، «سرمایه فیزیکی و زیربنایی»، «سرمایه اقتصادی» و «سرمایه اجتماعی» شناسایی شد.

به عنوان اولین و پرتکرارترین مفهوم، سرمایه اقتصادی با ۱۸ دسته مفهوم و ۱۸۵ بار شناسایی شد که در این خصوص «تنوع بخشی فعالیت های اقتصادی و اشتغال در روستا (تنوع معیشتی)» و «دسترسی به تسهیلات بانکی برای جبران خسارت با سود کم و بازپرداخت مناسب» بالاتر از دیگر موارد بود که نشان از اهمیت این دو مفهوم داشت. جالب توجه این است که تنوع معیشتی و اتکاء درآمدی کمتر به بخش کشاورزی و به ویژه بخش تولیدی کشاورزی، به عنوان مهم ترین راهکار بیان شده است که در بین همه مفاهیم نیز بالاترین فراوانی و تکرار را به خود اختصاص داد که نشان از اهمیت ویژه آن برای برنامه ریزی های آتی حوزه توسعه کشاورزی و روستایی و به ویژه مدیریت آب کشاورزی دارد. در حقیقت، با توجه به محدودیت های منابع آبی و در عین حال، حفظ پایداری مناطق روستایی باید تاحدممکن فشار از منابع آب و خاک برای تامین معیشت برداشته شود و اقتصاد روستا، تنها به اقتصاد بخش کشاورزی گره نخورد. در بسیاری از مناطق روستایی، به سبب خشکسالی پرداختن به فعالیت های کشاورزی یا مقدور نیست یا توجیه اقتصادی و محیط زیستی لازم را ندارد، در نتیجه ساکنان این مناطق ناچار به مهاجرت به شهرها می شوند و این امر سبب دامن زدن به حاشیه نشینی و پیامدهای ناگوار ناشی از آن می گردد. بنابراین، با توجه به ارزان تر بودن نسبی نیروی کار در مناطق روستایی، توسعه زنجیره های ارزش و اجرای فعالیت های اقتصاد وابسته به کشاورزی و غیرکشاورزی به ویژه کسب و

تحقیقات مختلف در دیگر کشورها (Ranjan & Athalye, 2009; Birhanu *et al.*, 2017; Matlou & Bahta, 2019; Bahta & Myeki, 2021; Jayadas & Ambujam, 2021; Aguilar *et al.*, 2022; Shiimi *et al.*, 2023; Sass *et al.*, 2024; Pret *et al.*, 2025; Nzeyimana *et al.*, 2025; Sarmah *et al.*, 2025) نیز بر سرمایه اجتماعی به عنوان مولفه‌ای کلیدی در زمینه افزایش تاب‌آوری تاکید شده است. سرمایه انسانی با ۱۳ مفهوم و ۱۰۵ بار در مقاله‌های مختلف در رتبه بعدی قرار داشت. همان‌طور که دیده می‌شود، از نظر تعداد مفاهیم با سرمایه اجتماعی برابر است، اما تعداد تکرار آنها در منابع مورد بررسی کمتر بود. در خصوص این مفهوم نیز شرکت در دوره‌های آموزشی-ترویجی، آموزش و آگاهی‌بخشی و دسترسی به منابع اطلاعات تکرار بیشتری داشتند که نشان از اهمیت، ضرورت و جایگاه ویژه نظام ترویج و آموزش کشاورزی در امر مدیریت بحران‌ها به‌ویژه بحران‌های آب‌محور دارد. این نهاد علاوه بر نقش ذاتی خود در انتقال و نشر دانش و فناوری‌های نوین می‌تواند در پیش‌آگاهی و اطلاع‌رسانی پیش از وقوع بحران‌ها، آموزش و توانمندسازی عمومی و تخصصی در خصوص سازوکارهای مدیریت بحران پیش از بحران‌ها و حین بحران‌ها و آماده کردن افراد برای سازگاری و بازگشت به شرایط مطلوب و ارائه گزیده‌های جایگزین پس از وقوع بحران‌ها نقش مهمی داشته باشد. البته این امر می‌تواند در زمینه توانمندسازی بهره‌برداران برای توسعه معیشت‌های جایگزین و تقویت تشکلهای نیز مؤثر باشد؛ بنابراین، آموزش و ترویج به‌طور مستقل به‌عنوان یک بعد در تاب‌آوری و تاثیر بر دیگر ابعاد می‌تواند نقش‌آفرینی مؤثری داشته باشد. یادآوری این نکته نیز ضروری است که میزان اثرگذاری فعالیت‌های آموزشی-ترویجی به‌نسبت هزینه صرف شده عموماً بسیار بالا و به‌صرفه است. محققان دیگر کشورها (Matlou & Bahta, 2019; Nzeyimana *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021; Aguilar *et al.*, 2022; Shiimi *et al.*, 2023; Apio *et al.*, 2023; Sass *et al.*, 2024) نیز به تاثیر بعد سرمایه انسانی در تاب‌آوری اشاره داشته‌اند.

et al., 2023; Ingraio *et al.*, 2023; Issaka *et al.*, 2023; Pret *et al.*, 2025; Nzeyimana *et al.*, 2025) نیز بر تاثیر عوامل و ابعاد اقتصادی بر تاب‌آوری کشاورزان در بحران‌های آبی و خشکسالی تاکید شده است.

پس از آن، بعد سرمایه اجتماعی با ۱۳ دسته مفهوم و ۱۳۳ تکرار قرار داشت که مقوله مشارکت بهره‌برداران در امور آب، کشاورزی و دیگر مسائل توسعه روستایی به‌ویژه طرح‌های اجرایی و نقش تشکلهای و سازمان‌های محلی در مدیریت مشارکتی امور بیش از دیگر موارد خودنمایی می‌کرد که این یافته هم بسیار مهم است، زیرا از برخی از مفاهیم اقتصادی هم فراوانی و تکرار بیشتری داشتند. اما در خصوص مشارکت بهره‌برداران به‌ویژه در پروژه‌ها و طرح‌های عمرانی، از جمله طرح‌های آب و خاک، روش‌های معمول به‌گونه‌ای است که عمده مراحل آن اعم از مطالعه، طراحی و اجرا، در بخش دولتی یعنی بیرون از جوامع محلی اجرا می‌شود و عملاً جلب مشارکت پایدار و مؤثر صورت نمی‌گیرد، همین امر سبب بروز مشکلات بسیاری در زمان بهره‌برداری و نگهداری از سازه‌ها و تاسیسات آبی می‌شود. در خصوص نقش تشکلهای از لحاظ تاریخی نیز باید گفت یکی از عناصری مؤثر در شکل‌گیری تشکلهای در جامعه روستایی مقوله آب بوده است و حول این موضوع همواره تشکلهای رسمی و غیررسمی متعددی شکل گرفته که منجر به مدیریت مناسب آب و حل بسیاری از منازعات و تنش‌ها شده است. رویکردهای توسعه نشان می‌دهد که بدون مشارکت جامعه محلی از ابعاد فردی و گروهی نمی‌توان به پایداری طرح‌ها و پروژه‌ها و به‌طور کلی برنامه‌های توسعه‌ای دست یافت؛ اما با توجه به وجود چالش‌ها و مشکلات پیش‌روی تشکلهای و تعاونی‌ها از جمله فقدان آموزش و توانمندسازی مناسب ارکان و اعضا، فقدان پایش و آسیب‌شناسی مسائل و مشکلات آنها، حمایت نکردن دولت به‌اندازه کافی، نفوذ گروه‌های پر قدرت در تشکلهای، مسائل قانونی و حقوقی، توزیع ناعادلانه آب، پایین بودن سطح سرمایه اجتماعی و مانند آن ضرورت آسیب‌شناسی، بازمهندسی و توانمندسازی آنها به‌شدت احساس می‌شود. در

مالی و پشتیبانی و نقش آفرینی بین بخشی نیاز خواهد بود. به طور مثال، در برنامه الگوی کشت، به شکل جدی به سازوکارهای ارتقای بهره‌وری و بهره‌برداری بهینه از منابع آب و خاک اشاره شده است که اجرای آن با رعایت استلزامات یاد شده می‌تواند نقش مهمی در تاب‌آوری کشاورزان داشته باشد. یافته‌های این بخش همراستای نتایج تحقیقات دیگر محققان (Birhanu et al., 2017; Bahta & Myeki, 2021; Aguilan et al., 2022; Issaka et al., 2023; Shiimi et al., 2023; Sarmah et al., 2025) است.

در مجموع می‌توان چند نتیجه مهم از یافته‌های به دست آمده گرفت. اول اینکه تاثیر برخی از مولفه‌های شناسایی شده در تاب‌آوری کشاورزان و جامعه محلی اگر چه بیشتر است، اما برای موفقیت در این موضوع باید همه ابعاد یاد شده را به صورت توامان و رویکردی جامع مورد توجه قرار داد زیرا بسیاری از این موارد دارای برهمکنش متقابل اند و می‌تواند باعث تقویت و ضعف یکدیگر شوند. در واقع، مباحث سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، فنی- تخصصی و زیربنایی، آموزشی و اطلاع‌رسانی در کنار مباحث مشارکت جامعه محلی و تشکلهای رسمی و غیررسمی باید در کنار هم مورد توجه قرار گیرند و تک‌بعدی نگری نمی‌تواند نتایج مطلوبی در پی داشته باشد. در پژوهش‌های داخلی و خارجی نیز عمدتاً به تعدادی از این ابعاد در کنار یکدیگر توجه شده است. دوم اینکه ممکن است ابعادی از تاب‌آوری کمتر از ابعاد دیگر بررسی شده باشند که نشان‌دهنده کم‌اهمیت بودن آنها نیست؛ بررسی پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم این ابعاد به‌ویژه به صورت کمی بعضاً مشکل است. سوم اینکه تاب‌آوری کشاورزان و توسعه رفتارهای تاب‌آورانه آنها در زمینه خشکسالی و بحران آب، نیاز به فراهم بودن بسترهای لازم و حمایت‌های ویژه‌ای دارد که این امر موضوعی فرابخشی و فراوزارتخانه‌ای است و در بخش‌های قانون‌گذاری، سیاست‌گذاری و اجرایی و نظارت نیاز به اتخاذ تصمیمات جدی دارد.

سرمایه فیزیکی و زیربنایی با ۱۱ دسته مفهوم و ۸۹ بار تکرار در رتبه بعدی قرار داشت که برخورداری از خدمات رفاهی، زیربنایی و عمرانی در محیط زندگی کشاورزان و استفاده از تجهیزات فنی و زیربنایی در زمینه آبیاری مدرن، ماشین‌آلات و ادوات کشاورزی و نهادهای کشاورزی مهم‌ترین مسائل پرتکرار در این حوزه شناسایی شد. برخی از این مفاهیم شناسایی شده در این بعد، اگرچه به طور مستقیم به مقوله آب و کشاورزی ارتباط ندارد، ولی در بعد کلان می‌تواند زمینه توانمندشدن جامعه محلی برای مدیریت مطلوب‌تر بحران و بالابردن تاب‌آوری آنها را فراهم آورد در واقع، این بعد بیشتر موارد زیربنایی و سخت‌افزاری را شامل می‌شود که شاید نهادهای متولی مدیریت آب نقش مستقیمی در آنها نداشته باشند. اما نکته‌ای که در زمینه توسعه فناوری‌های مرتبط با آبیاری و مدیریت آب ضروری است گفته شود این است که پیش از ورود هر فناوری باید ویژگی‌های فناوری و مولفه‌های مؤثر بر پذیرش آن مانند مزیت نسبی، سهولت استفاده، سازگاری، آزمون‌پذیری و رویت‌پذیربودن در شرایط بهره‌برداران مورد توجه قرار گیرد. بعد فیزیکی و زیربنایی نیز در پژوهش‌های بین‌المللی (Ranjan & Athalye, 2009; Birhanu et al., 2017; Xu et al., 2021; Jayadas & Ambujam, 2021; Aguilan et al., 2022; Shikwambana et al., 2022; Ingrao et al., 2023; Apio et al., 2023; Shiimi et al., 2023; Issaka et al., 2023; Nzeyimana et al., 2025) به عنوان مولفه‌ای مؤثر در تاب‌آوری مورد تاکید قرار گرفته است.

سرمایه طبیعی با هشت دسته مفهوم و ۹۲ تکرار در ردیف آخر قرار داشت که استفاده از شیوه‌های مناسب و نوین مدیریت آبیاری بیش از دیگر موارد خودنمایی می‌کرد. در حقیقت، مفاهیم مستخرج از این بعد بیشتر دربرگیرنده مباحث فنی مرتبط با مدیریت بهینه آبیاری، بهبود عملیات کشاورزی، اصلاح الگوی کشت و مواردی از این دست بود که بی‌شک از عوامل مهمی است که به طور مستقیم بر تاب‌آوری بهره‌برداران از بعد فنی تاثیرگذار هستند. برای تحقق اصولی این بعد، در کنار توجه به اسناد بالادستی، به حمایت‌های

مراجع

- Abedi Sarvestani, A., Ghorbani, K. & Khaksar Moghaddam, G. (2018). Studying the methods of drought coping by farmers (case study: Shirvan County of Northern Khorasan Province). *Geography and Sustainability of Environment*. 28: 13-31. (In Persian).
- Afrakhteh, H., Azizpur, F., Tahmasebi, A. & Sulaimany, A. (2015). Rural adaptation strategies to drought, case study: Pshtang Village in Ravansar township. *Journal of Environmental crisis Management*. 2(3): 341-354. (In Persian).
- Aguilar, F.X., Hendrawan, D., Cai, Z., Roshetko, J.M. & Stallmann, J. (2022). Smallholder farmer resilience to water scarcity. *Environment, Development and Sustainability*. 24: 2543-2576.
- Ahmadyoosefi, R., Choobchian, S. & Chizari, M. (2021). Investigating the implementation of drought crisis management programs in Kerman Province. *Journal of Emergency Management*. 10(2): 157-166. (In Persian).
- Aivazidou, E. (2022). Water management in agriculture and industry: Challenges, trends, and opportunities. *Sustainability*. 14(66). <https://doi.org/10.3390/su14010066>
- Akbarian ronizi, S.R. & Ramezanzadeh Lasboyee, M. (2019). Farmers' resilience against drought with an emphasis on economic factors and social capital in rural areas: a case study of Roniz in Estahban County. *Journal of Rural Research*. 10(2): 230-243. (In Persian).
- Akhgari, M. & Ghasemian Moghadam, A. (2023). Prioritization of the effective factors on the economic resilience of rural households against drought (Case Study: Tastagaran section of Tabas County). *Village and Space Sustainable Development*. 4(2): 112-129. (In Persian).
- Anabestani, A., Javanshiri, M., Mahmoudi, H. & Darban Astaneh, M. (2018). Spatial analysis of villagers' resilience against environmental hazards (A case study of central district of Faruj County). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. 5(1): 17-38. (In Persian).
- Anbari, M. & Mehdizadeh Ardakani, M. (2023). The role of NGOs in facilitating and promoting social resilience in rural areas against water scarcity (Case study of Abrar Charity Institute in the villages of Ghainat city). *Journal of Social Development and Welfare Planning*. 14(53): 1-49. (In Persian).
- Apio, A.T., Thiam, D.R. & Dinar, A. (2023). Farming under drought: An analysis of the factors influencing farmers' multiple adoptions of water conservation practices to mitigate farm-level water scarcity. *Journal of Agricultural and Applied Economics*. 55(3): 432-470.
- Azizi, M., Rostami, F. & Heidari, R.J. (2023). Evaluation of livelihood resilience of agroforestry system users in Paveh city in the face of drought. *Forest Research and Development*. 9(1): 29-45. (In Persian).
- Babae, M., Jalalian, H. & Afrakhtehh, H. (2021). Rural livelihood resilience (case study of villages around Lake Urmia within the city of Urmia). *Journal of Geography and Planning*. 25(77): 1-15. (In Persian).
- Bahta, Y.T. & Myeki, V.A. (2021). Adaptation, coping strategies and resilience of agricultural drought in South Africa: implication for the sustainability of livestock sector. *Heliyon*. 7(11). 2021, e08280. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08280>
- Balaei, B., Noy, I., Wilkinson, S., & Potangaroa, R. (2021). Economic factors affecting water supply resilience to disasters. *Socio-Economic Planning Sciences*. 76, 2021, 100961, <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100961>.
- Birhanu, Z., Ambelu, A., Berhanu, N., Tesfaye, A. & Woldemichael, K. (2017). Resilience understanding dimensions and adaptive strategies to the impact of recurrent droughts in Borana Zone, Oromia Region, Ethiopia: A Grounded Theory Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14(2):118. doi: 10.3390/ijerph14020118. PMID: 28134771; PMCID: PMC5334672.
- Biswas, A., Sarkar, S., Das, S., Dutta, S., Choudhury, M.R., Giri, A., Bera, B., Bag, K., Mukherjee, B. & Banerjee, K. (2025). Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production – A critical review of the impacts and adaptation strategies. *Cambridge Prisms: Water*. 2025; 3:e4. doi:10.1017/wat.2024.16
- Condly, S.J. (2006). Resilience in children: A review of literature with implications for education. *Urban Education*. 41(3): 211- 236.

- Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E. & Webb, J. (2119). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*. 18(4): 598-606.
- Daman Bagh, J., Rahmani, B., MoridSadat, P. & Khaledi, S. (2020). Assessing and ranking the development of rural areas against drought resilience emphasizing the economic dimension, in Mahidsht of Kermanshah Township. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*. 10(37): 91-122. (In Persian).
- Damavandi, A., Saadi, H. & Naderi Mahdei, K. (2024). Measuring and Analyzing the Resilience of Rural Households in Hamadan Province Against Agricultural Water Poverty. *Geography and Development*. 22(74): 111-138. (In Persian).
- Darban Astane, A. & Ghasemi, F. (2022). Assessing the resilience of rural farmers to drought and identifying livelihood strategies (Case Study: Central Part of Shazand County). *Village and Development*. 25(2): 1-22. (In Persian).
- Ehsani, M. & Shokoohi, Z. (2022). Estimation of Iran's agricultural resilience index to climate change. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 7(1): 63-78. (In Persian).
- Esmailnejad, M. & Alijani, B. (2017). Analysis and ranking of adaptation strategies to climate change from the perspective of local people in Sistan plain. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. 4(1): 63-72. (In Persian).
- Esmailnejad, M. & Pudineh, M. (2017). Evaluation of adaptation to climate change in rural areas south of South Khorasan. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(11): 85-100. (In Persian).
- Frankfort-Nachmias, C., & Nachmias, D. (2003). *Research Methods in the Social Sciences*. Translated by Fazel Larijani and Reza Fazeli, Tehran: Soroush Publications, 1st Edition. (In Persian).
- Ghasemi, M., Sahebi, S. & Mehrganmajd, J. (2020). Identify livelihood resilience strategies against drought risk from the point of view of rural households (case study: Dehestan Golmakan, Chenaran county). *Environmental Sciences*. 18(1): 117-136. (In Persian).
- Hajian, N. & Ghasemi, M. (2021). The role of diversity of income sources on the vulnerability of rural farmer households exposed to drought (Case Study: Chenaran County). *Journal of Emergency Management*. 10(2): 141-155. (In Persian).
- Heidari-Sareban, V. & Majnoui-Toutakhaneh, A. (2017). The role of livelihood diversity on the resilience of rural households living around the Urmia Lake against drought. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. 3(4): 49-70. (In Persian).
- Hoseini, S.M., Mazandarani Zadeh, H. & Nazari, B. (2021). Simultaneously Management of Surface and Groundwater Resources and Increasing Farmers' Resilience to Water Scarcity by Predicting the Price of Agricultural Products and using GA (Case Study of Irrigation and Drainage Network of Qazvin Plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(2): 563-576. (In Persian).
- Hosseini. S.M., Sharifzadeh, A., Gholamrezaei, S. & Akbari, M. (2012). Explaining components of drought crisis management in southeastern rural and nomadic areas of Iran. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*. 42(2): 185-197. (In Persian).
- Imani, B. & Mohamadi Mashkool, A. (2019). Analysis of the relationship between livelihoods and resilience of rural areas against drought (Case Study: Villages of Ardabil). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 7(4): 147-164. (In Persian).
- Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G. & Huisingh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*. 9(8):e18507. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507>.
- Issaka, Y.B., Donkoh, S.A. & Kranjac-Berisavljevic, G. (2023). Factors influencing resilience to climate variability among smallholder lowland rice farming households in northern Ghana. *UDS International Journal of Development*. 10(1): 32-44.
- Jafari, M., Rezvani, M., Faraji Sabokbar, H., Ghaderi Masoom, M. & Darban Astaneh, A. (2020). Analysis of economic resilience of farmers to drought impacts (case study: rural settlements of Fasa County). *Journal of Regional Planning*. 10(39): 61-78. (In Persian).
- Jahansoozi, M., Farahani, H., Einali, J. & Mohammadi Yeganeh, B. (2024). the role of social capital to improve the resilience of rural households in drought conditions) Case Study: Mashhad Township). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 13(4): 344-385. (In Persian).

- Jamshidi, A. & Anabestani, A. (2020). Interpretive structural modeling of factors affecting the development of resilience to climate change (with emphasis on drought) of villagers in west of Urmia Lake. *Arid Regions Geographic Studies*. 11(42): 1-22. (In Persian).
- Jamshidi, A. & Anabestani, A. (2022). Analysis of the effects of distributive justice indices on rural areas resilience to drought (case study: rural areas in west of Urmia Lake). *Journal of Natural Environmental Hazards*. 10(30): 127-150. (In Persian).
- Jayadas, A. & Ambujam, N.K. (2021). Research and design of a Farmer Resilience Index in coastal farming communities of Tamil Nadu, India. *Journal of Water and Climate Change*. 12(7): 3143–3158.
- Karimi, H. & Ataei, P. (2022). Consequences of applying adaptation strategies of Sistan farmers to drought: resilience and viability. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*. 17(2): 149-164. (In Persian).
- Keihka, Z., Bazrafshan, J., Ghanbari, S. & Keikha, A. (2020). Analysis of resilience of Sistan rural communities against environmental hazards. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 9(23): 1-18. (In Persian).
- Kelin, R. J. & Nicholls, F. (2003). Resilience to natural hazards: how useful is this concept? *Journal of Environmental Hazards*. 5: 35-45.
- Khakifirouz, Z., Niknami, M., Keshavarz, M., & Sabouri, M.S. (2022). Drivers of farmers' resilience to drought: a case of Sistan Plain. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*. 18(1): 161-179. (In Persian).
- Khatibi, S. & Arjumend, H. (2019). Water crisis in making in Iran. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2(3): 45-54.
- Khatibi, S. A., Golkarian, A., Mosaedi, A. & Sojasi Qeidari, H. (2019). Assessment of resilience to drought of rural communities in Iran. *Journal of Social Service Research*. 45(2). 151–165.
- Khodapanah, K. (2023). Analyzing the Role of Rural Management in Increasing Resiliency of Rural Areas against Drought from the Perspective of Rural People (Case Study: Central Part of the City of Ardabil). *Journal of Natural Environmental Hazards*. 12(36): 25-40. (In Persian).
- Kor, A., Balali, H., Movahedi, R. & Sharifzadeh, M. (2023). Examining the components and indicators of economic resilience of farmers against climate disasters. *Journal of Rural Research*. 14(2): 200-217.
- Krippendorff, J. (2019). *Content analysis: An introduction to its methodology*. Sage publications. Fourth Edition.
- Lavaei Adaryani, R., Kalantari, K., Asadi, A. & Alambeigi, A. (2019). Content Analysis of Business Cooperatives Theories Emphasizing Network Functions. *Journal of Business Management*. 11(1): 3-24. (In Persian).
- Leis, N., Rostami, F. & Alibeygi, A.H. (2022). Strategies to improve farmers' resilience to drought from the perspective of experts: a study in Miandoab County. *Geography and Development*. 19(65): 77-98. (In Persian).
- Majnouni Tutakhaneh, A., Heydari Sareban, V. & Mofarrah Bonab, M. (2018). Evaluating the effects of lake Urmia's drought on resilience changes in rural settlements. *Journal of Research & Rural Planning*, 6(4): 67-89. (In Persian).
- Malekan, A., Dadvarkhani, F. & Darban Astane, A. (2021). Drought management in rural areas with emphasis on resilience approach, studied in Kangavar city. *Human Geography Research Quarterly*. 53(2): 717-732. (In Persian).
- Maleksaeidi, H., Karami, E., Zamani, G.H., Rezaei-Moghaddam, K., Hayati, D. & Masoudi, M. (2016). Discovering and characterizing farm households' resilience under water scarcity. *Environment, development and sustainability*. 18: 499-525.
- Maltou, R. & Bahta, Y.T. (2019). Factors influencing the resilience of smallholder livestock farmers to agricultural drought in South Africa: Implication for adaptive capabilities. *Jambá: Journal of Disaster Risk Studies*. 11(1), a805. <https://doi.org/10.4102/jamba.v11i1.805>
- McManus, P. (2012). Rural community and rural resilience: What is important to farmers in keeping their country towns alive?. *Journal of Rural Studies*. 49: 21-28.

- Mehrabi, S., Yazdani, M.R. & ghorbani, M. (2022). Resilience assessment in social-ecological systems against available water depletion (case study: Harchegan Village). *Journal of Emergency Management*. 11(1): 67-80. (In Persian).
- Mohammadloo, M., Rahmani Fazli, A. R., Sajjadi, J. & Cheraghi, M. (2024). Evaluation of drought on economic resilience of rural settlements (case study: Mahneshan County, Zanjan Province). *Economic Geography Research*. 5(15).1 -19. (In Persian).
- Morkunas, M. (2018). How resistant is the agricultural sector? Economy Resilience exploited. interdisciplinary approach to economics And Sociology. *Economics and Sociology*. 11(3): 321-332.
- Motaghed, M., Shabanali Fami, H., Asadi, A. & Kalantari, K. (2023). An analysis of farmers' appropriate actions to improve the resilience of small-scale farming units in Hamedan Province under climate change conditions. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 12(38): 31-52. (In Persian).
- Mousavi, S. & Niknami, M. (2021). Explaining the driving policies of drought management: the case of study of Tehran Province. *Journal Strategic Studies of Public Policy*. 11(40): 132-153. (In Persian).
- Naimabadi, N. & Salimi Sobhan, M.R. (2021). Analysis of social capital components in strengthening the resilience of nomadic households against drought. A study of the nomads of Neyshabur city. *Journal of Studies of Nomadic Land Planning*. 1(1): 101-114. (In Persian).
- Nasrnia, F. & Ashktorab, N. (2021). Sustainable livelihood framework-based assessment of drought resilience patterns of rural households of Bakhtegan basin, Iran. *Ecological Indicators*. 128, 107817, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107817>
- Nazaripour, H., Tavousi, T. & Brahoui, F. (2024). The limits of coping and resilience against the risks caused by climate change case study: Zahedan County. *Journal of the Climate Change Research*. 5(17): 1-16. (In Persian).
- Norouzi, A. (2019). Measuring the resilience of rural settlements against the environmental hazards (case study: Boldaji District). *Journal of Physical Development Planning*. 4(3): 79-88. (In Persian).
- Nouri, M. & Nooripoor, M. (2019). Perception to action of Mohr County of Fars Province farmers towards confrontation with drought. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*. 15(1): 71-87. (In Persian).
- Nouri, M., Homaei, M., Pereira, L.S. & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*. 288, 2023, 108480, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108480>.
- Nzeyimana, L., Danielsson, Å., Andersson, L. & Gyberg, V. B. (2021). Success and failure factors for increasing Sub-Saharan African smallholders' resilience to drought through water management. *International Journal of Water Resources Development*. 39(2): 273-293.
- Nzeyimana, L., Danielsson, Å., Brodén-Gyberg, V. & Andersson, L. (2025). Constructing Ubudehe? Farmers' perceptions of drought impacts and resilience capacities in Bugesera, Rwanda. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 17(1): 89-108.
- Poortaheri, M., Eftekhari, A. & Kazemi, N. (2013). The role of drought risk management approach in reducing social – economic vulnerability of farmers and rural regions case study: Sulduz Rural District, West Azarbaijan. *Journal of Rural Research*. 4(1): 1-22. (In Persian).
- Pret, V., Falconnier, G.N. Affholder, F., Corbeels, M., Chikowo, R. & Descheemaeker, K. (2025). Farm resilience to climatic risk. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 45(10) (2025). <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00998-w>
- Rafieiyani, M., Rezaei, M., Asgari, A., Parhizkar, A. & Shayan, S. (2011). Conceptual explanation of resilience and its indexing in community-based disaster management (CBDMD). *Journal of Spatial Planning and Geomatics*. 15(4): 19-41. (In Persian).
- Rahmani, S., Yazdanpanah, M., Forouzani, M. & Abdeslahi, A. (2018). Investigating farmers' beliefs and strategies to adapt to water scarcity and factors affecting them in Mamassani County. *Journal of Water Research in Agriculture*. 32(2): 321-340. (In Persian).
- Ramazani, M.E. & Khodapanah, K. (2021). Future study of resilience improvement of rural against drought based on practical training, a case study: Ghale Chaei Watershed Area. *Journal of Regional Planning*. 10(40): 147-162. (In Persian).

- Ranjan, R. & Athalye, S. (2009). Drought resilience in agriculture: the role of technological options, Land use dynamics, and risk perception. *Natural Resource Modeling*. 22(3): 437-462.
- Rezaei, R. (2012). An identification and analysis of the solutions, coping up with drought in rural regions of zanzan Province from Jihad-e-Keshavarzi experts' viewpoints. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*. 43(1): 125-134. (In Persian).
- Rezaei, S., Masoompour Samakosh, J. & Miri, M. (2024). Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) in Iran based on multivariate standardized drought index. *Advanced Technologies in Water Efficiency*. 4(1): 82-98. (In Persian).
- Roknedin Eftekhari, A. & Vazin, N. (2016). Differences in effectiveness of indigenous and modern knowledge to reduce vulnerabilities of rural communities to natural disaster (Case study: Rural communities of Khoresh-Rostam district, Khalkhal Township, Iran). *Human Geography Research Quarterly*. 47(4): 727-742. (In Persian).
- Roknedin Eftekhari, A., Moosavi, S.M., Poortaheri, M. & Farajzadeh Asl, M. (2014). Analysis of the role of livelihood diversity to rural household resilience in drought condition: case study of the drought exposed areas of Isfahan Province. *Journal of Rural Research*. 5(3): 639-662. (In Persian).
- Saad, A., Benyamina, A.H. & Gamatié, A. (2020). Water management in agriculture: A survey on current challenges and technological solutions. *IEEE Access*. 2020, 8: 38082-38097. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2974977>
- Sabzehei, M.T., Soleimani, A. & Yousefi, N. (2019). Investigating the effect of social capital on the social resilience of villagers in the biology environmental risks (with an emphasis on the drought) Case study: villages of sub-strict Badar of Ravansar in 2018. *Two Quarterly Journal of Contemporary Sociological Research*. 8(14): 283-310. (In Persian).
- Sadeghloo, T. & Sojasi Qeidari, H. (2016). Ranking of effective factors for farmer resilience increasing against of natural hazards (with emphasis on drought) study area: rural farmer in Ijrud Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 3(2): 129-154. (In Persian).
- Saemipoor, H., Ghorbani, M., Malekian, A. & Ramazanzadeh lasboei, M. (2018). Evaluating local beneficiary's resilience encountered with prolonged drought condition (Case study: Nardin village, Mayamey county, Semnan Province). *Journal of Rangeland*. 12(1): 62-72. (In Persian).
- Safari Aliakbari, M. (2023). Investigating factors affecting the economic and social resilience of rural areas (case study, Kermanshah County). *Spatial Planning*. 12(4): 1-4. (In Persian).
- Salahi Isfahani, G. (2021). Assessment of socio-economic resilience of villages in Saman watershed (Markazi Province) in water fluctuations in recent years. *Journal of the Iranian Geographical Association*. 19(68): 185-204. (In Persian).
- Salahi, B. & Vatanparast Galeh Juq, F. (2024). Agricultural drought monitoring in the aras river catchment using satellite and meteorological indicators. *Environmental Hazards Management*. 11(3): 193-212. (In Persian).
- Saleh, I., Salehnia, N., Mirbagheri, S.Sh., Akbarpour, H. & Bastani M. (2022). Investigating the role of livelihoods diversity in resilience and welfare level of the rural community in the face of climate change (with emphasis on drought). *Journal of Water and Sustainable Development*, 9(1): 75-84. (In Persian).
- Sarmah, T., Balta-Ozkan, N., Konak, A., Shrimpton, E., Sass, K.S., De Macedo, M.B., Mendiondo, E.M., Da Huo, A.C.N. & Jacobson, M.G. (2025). Usability of agricultural drought vulnerability and resilience indicators in planning strategies for small farms: A principal component approach. *Climate Services*. 38, 100569, <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100569>.
- Sass, K.S., Konak, A., de Macedo, M.B., Benso, M.R., Shrimpton, E., Balta-Ozkan, N., Sarmah, T., Mendiondo, E.M., da Silva, G.J., da Silva, P.G.C., Nardocci, A.C. & Jacobson, M. (2024). Enhancing drought resilience and vulnerability assessment in small farms: A global expert survey on multidimensional indicators. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 110, 104616, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104616>.
- Savari, M. & Abdeslahi, A. (2019). Analysis of the role of social capital to improve the resilience of rural households in drought conditions in the county of Divandarreh. *Journal of Rural Research*. 10(2): 214-229. (In Persian).

- Savari, M. & Khosravipour, B. (2018). Analysis of the resilience effects on the liveliness of rural households in drought conditions, in Divandarreh County. *Journal of spatial planning*. 8(3): 19-40. (In Persian).
- Seyed Akhlaghi, S.J. & Taleshi, M. (2019). Improving the resilience of local communities; Future Strategy for dealing with drought Case study: Hablehrood watershed. *Journal of Iran Nature*. 3(3): 60-68. (In Persian).
- Seyed Akhlaghi, S.J. & Taleshi, M. (2021). Rural resilience assessment in Hablehrood watershed with emphasis on drought. *Watershed Engineering and Management*. 13(1) 137-151. (In Persian).
- Shabani, M., Maleki, M., Mosayebi, M., & Mirzaee Noroozani, A.A. (2023). Investigating the effects of drought on changes in resilience and vulnerability of rural settlements in villages of Kavar City, Fars Province. *Watershed Management Research*. 36(2): 71-86. (In Persian).
- Shakeri Bostanabad, R., Mahdiar Esmaeli, M.R. & Salehi Komrudi, M. (2022). Investigating the Economic Resilience of Iran's Agriculture sector. *Journal of Agricultural Economics Research*. 13(4): 41-59. (In Persian).
- Sharafi, L. & Zarafshani, K. (2011). Economic and social vulnerability assessment among farmers towards drought (Case of study: Wheat Farmers Kermanshah, Sahne, and Ravansar townships). *Journal of Rural Research*. 1(4): 129-154. (In Persian).
- Sharifinia, Z. (2018). Assessing the Social resilience of rural areas against flooding using FANP and WASPAS models (Case Study: Chardange District of Sari County). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 8(2): 1-26. (In Persian).
- Shiimi, D.K., Charamba, V., Bello, H.M. & Lutaaya, E. (2023). Factors affecting smallholder subsistence farmers' drought adaptation and resilience: a case study from northern-central Namibia. *Namibian Journal of Environment*. 7: 21-38.
- Shikwambana, S., Malaza, N., & Ncube, B. (2022). Enhancing the Resilience and Adaptive Capacity of Smallholder Farmers to Drought in the Limpopo Province, South Africa. *Conservation*. 2(3):, 435-449.
- Taleshi, M. Seyed Akhlaghi, S.J. (2019). Role of livelihood diversity in rural households' resilience against drought risk (Case study: Hablehroud Basin). *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 26(2): 459-473. (In Persian).
- Taleshi, M., Aliakbari, E., Jafari, M. & Seyed Akhlaghi, S.J. (2018). Developing and validating of appropriate indices for rural resilience to draught (Case Study: Hableroud Watershed Basine). *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 24(4): 881-896. (In Persian).
- Tawakoli, M., Ruknuddin Eftekhari, A. & Jafari Sirizi, M. (2023). An analysis of resilience of rural farmers in the direction of drought management: a case study of farmers of Siriz rural district in Kerman Province. *The Journal of Spatial Planning*. 27(1): 64-102. (In Persian).
- Vazirian, R., Karimian, A.A., Ghorbani, M., Afshani, A. & Dastorani, M. T. (2021). Measuring and evaluating the dimensions affecting the improvement of resilience of rural communities in the face of drought (Case Study: Sabzevar County). *Journal of Rural Research*. 11(4): 630-645. (In Persian).
- Velaie, M., Abdolahi, A., Eskandarzade, A., Hoseinzade, A. & Zarbi, H. (2020). Analysis role of rural management in resilience of villagers against drought (case study: rural settlements in the township of Miyandoab). *Journal of Studies of Human Settlements Planning*. 15(3): 857-872. (In Persian).
- Xu, W., Zhong, Z., Proverbs, D., Xiong, S. & Zhang, Y. (2021). Enhancing the resilience of the management of water resources in the agricultural supply chain. *Water*. 13(12), 1619, <https://doi.org/10.3390/w13121619>
- Yeganeh, A. (2024). Monitoring and evaluation of economic resilience of gardeners in the central part of Malekan city using Q method of factor analysis. *Journal of Agricultural Economics Research*. 16(1): 45-60. (In Persian).
- Yeganeh, A., Shafiei, A. & Bokaie, A. (2022). Analysis of economic and social resilience of gardeners against drought and its effective factors (Case study: Central part of Malekan county). *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*. 9 (2022): 161-178. (In Persian).
- Zarif Moradian, Sh., Daneshvar Khakhki, M. & Sabouhi Sabouni, M. (2022). The effect of drought on rural farmers households' resilience index. *Journal of Agricultural Economics & Development*. 36(3): 301-315. (In Persian).

Research Article**Estimating Scour Hole Dimensions Downstream of Triangular-Triangular Compound Sharp-Crested Weirs Using Artificial Intelligence Models****Sasan Nejati¹, Mehdi Meftah Halaghi^{2✉}, Abdolreza Zahiri³, Younes Aminpour⁴**

1. Ph.D Student of Water Structures, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. Associated Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
4. Assistant Prof., Department of Hydraulic Structures, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

(✉ Corresponding Author: meftah@gau.ac.ir)**ARTICLE INFO****Received:** 5 May 2025**Revised:** 24 May 2025**Accepted:** 25 May 2025**Available Online:** 7 June 2025**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Nejati, S., Meftah Halaghi, M., Zahiri, A., & Aminpour, Y., (2025). Estimating scour Hole Dimensions Downstream of Triangular-Triangular Compound Sharp-Crested Weirs Using artificial Intelligence Models. (In Persian with English abstract). *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. V.26, No.98, P: 67

<https://doi.org/10.22092/IDSER.2025.369369.1618>

Introduction

This study investigates scour downstream of triangular-triangular compound weirs, which generate unique flow patterns leading to increased turbulence and scour. Initially, laboratory experiments were conducted to identify key influencing factors, followed by dimensional analysis to determine relevant dimensionless parameters. Three artificial intelligence algorithms Artificial Neural Network (ANN), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), and Support Vector Machine (SVM) were then used to perform sensitivity analysis and predict scour depth. The research enables a comparative evaluation of these models in predicting complex hydraulic phenomena.

Methodology

This study examines the scouring phenomenon downstream of triangular-triangular compound weirs using experimental methods and artificial intelligence models. The investigated weir was constructed by combining two triangular sections with angles of 90° and 150°, installed in a 6.7-meter long and 90-centimeter wide experimental flume at the Water Research Institute of the Ministry of Energy. Tests were conducted with four different flow rates ranging from 7.08 to 54.94 liters per second using sediments with an average diameter of 0.5 mm. The scouring profile was analyzed through digital imaging and Grapher software.

For the modeling section, four artificial intelligence methods were employed to predict scouring hole dimensions: ANN, ANFIS and SVM. These models were selected for their capability to identify nonlinear relationships and complex patterns in data, with their performance evaluated using RMSE, Nash-Sutcliffe efficiency (NS), and MARE metrics. This study provides a framework for comparing various AI methods in hydraulic problems and can contribute to improving the design of hydraulic structures.

Results and Discussion

Given the complex and uncertain nature of scour phenomena in slope control structures, as evidenced by previous research and the significant errors in conventional models, this study employed AI approaches (ANN, ANFIS and SVM) that require less understanding of underlying physical mechanisms. A Comprehensive sensitivity analysis was first conducted on dimensionless input parameters (Fr_D , t/t_0 , and y_{tw}/y_h), with all algorithms implemented in MATLAB and Python. The models were trained on 70% of experimental data and tested on 30%, while a thorough parameter sensitivity analysis was performed across all four models to enhance prediction accuracy of scour hole dimensions.

In the ANN modeling approach, a sensitivity analysis of input parameters was conducted by varying each input by $\pm 10\%$ to evaluate their relative influence on scour hole dimensions. The results revealed that the particle Froude number had the greatest impact (45%) on maximum scour depth, while t/t_0 significantly affected scour hole length (32%). The SVM model's sensitivity analysis showed that the particle Froude number had the highest average influence (55%), whereas y_{tw}/y_h had the least (10%). Similarly, ANFIS analysis indicated the particle Froude number's dominant effect (62% average) with y_{tw}/y_h again showing minimal impact. Comparative evaluation of error metrics demonstrated that the SVM model outperformed the other proposed methods, exhibiting superior accuracy and performance in predicting scour characteristics.

Conclusions

This study aimed to evaluate the performance of artificial intelligence models in predicting the dimensions of the scour hole downstream of a triangular–triangular compound weir, based on laboratory data. Three AI models: Artificial Neural Network (ANN), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), and Support Vector Machine (SVM) were assessed. The results showed that all three models were capable of estimating key scour parameters, but the SVM model outperformed the others in terms of higher accuracy, lower relative error, and better agreement with experimental data. From a hydraulic perspective, the findings indicated that the particle Froude number was one of the most influential parameters on scour dimensions. As the Froude number increases, both the maximum scour depth and scour hole length significantly increase, highlighting the critical role of flow energy in scour development downstream of compound weirs. The results also showed that under concentrated flow conditions and with increasing relative time, the scour hole continued to expand, indicating a progressive development process. Based on these results, it is recommended that in the design of compound weirs especially triangular–triangular types the effects of the Froude number and inflow conditions should be carefully considered to prevent the formation of deep scour holes. Furthermore, the SVM model, as a precise predictive tool, can assist hydraulic structure designers in evaluating scour risk and implementing appropriate protective measures (e.g., protective aprons, stepped profiles, or more resistant materials) before construction. These findings can contribute to improving the safety of hydraulic structures, reducing scour-related damage, and optimizing future designs.

Keywords: Sensitivity analysis, Particle Froude number, Experimental data, Nash-Sutcliffe efficiency (NS), Neural network.



© 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.2025.369369.1618>

نوع مقاله: پژوهشی

تخمین ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز لبه تیز مرکب مثلثی- مثلثی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی

ساسان نجاتی^۱، مهدی مفتاح هلقی^۲، عبدالرضا ظهیری^۳، یونس امین پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

چکیده

سرریزهای مرکب به منظور افزایش ظرفیت تخلیه جریان و رفع محدودیت های سرریزهای ساده در دبی های بالا طراحی می شوند. یکی از مهم ترین چالش ها و تهدیدهایی که در پایداری این سازه ها مطرح می شود، احتمال وقوع آبشستگی در پایین دست این نوع سرریزهاست. از این رو، بررسی و پیش بینی عمق و محل حفره آبشستگی اهمیت بالایی دارد. در این تحقیق، در آزمایشگاه روی سرریز مرکب مثلثی - مثلثی مطالعه گردید. سرریز مورد مطالعه، پس از ساخت در فلوم آزمایشگاهی نصب و نیمرخ های آبشستگی در پایین دست سازه، در دبی های مختلف استخراج گردید. پارامترهای مؤثر بر آبشستگی در پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی- مثلثی شناسایی گردیدند و ابعاد حفره آبشستگی با بهره گیری از مدل های هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی، شبکه عصبی- فازی تطبیقی و شبکه ماشین بردار پشتیبان تخمین زده شد. تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر بر ابعاد حفره آبشستگی حاکی از آن است که با تغییر ۱۰ درصد در متغیرهای ورودی، عدد فرود ذره بیشترین تاثیر را بر ابعاد حفره دارد. افزون بر این، مقایسه مقادیر پیش بینی شده توسط مدل های هوش مصنوعی با داده های آزمایشگاهی حاکی از دقت بالای مدل های هوش مصنوعی است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که روش ماشین بردار پشتیبان با کرنل RBF، با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸۹۵ بهترین عملکرد را در پیش بینی بیشینه عمق آبشستگی دارد.

واژه های کلیدی

تحلیل حساسیت، عدد فرود ذره، داده های آزمایشگاهی، ضریب نش-ساتکلیف، شبکه عصبی

مقدمه

تمامی اجزای سازه وارد مدار می شود و الگوی جریان به طور محسوس تغییر می کند. این تغییرات می توانند باعث ایجاد ناپایداری هایی مانند امواج شدید، گردابه و جداسدن جریان در پایین دست شوند که شرایط را برای وقوع آبشستگی فراهم می کنند. در چنین شرایطی، انرژی زیاد جریان به بستر منتقل و موجب جابه جایی ذرات رسوبی می شود که این موضوع به شکل گیری حفره های عمیق در نزدیکی پایه های سرریز می انجامد. عمق و گستره این حفره ها به عواملی مانند

سرریزهای مرکب یکی از گزینه های مؤثر برای تخلیه ایمن آب در مواجهه با جریان هایی با نوسان های زیاد دبی شناخته می شوند. این سازه ها با بهره گیری از ترکیب شکل های مختلف هندسی، قابلیت تطبیق با شرایط متغیر جریان را دارند و نحوه عملکرد هیدرولیکی آنها بسته به شدت جریان متفاوت است، به طوریکه در دبی های پایین تنها بخشی از سرریز فعال است، اما با افزایش ناگهانی جریان،

^۱ دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (Email: meftah@gau.ac.ir)^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.^۴ استادیار پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط های آبی، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران.

اجرای ۶۷ آزمایش، تأثیر عواملی مانند طول و عمق حوضچه آرامش، شیب سرریز پلکانی، دبی جریان و ویژگی های بستر را بر ابعاد حفره آبستگي بررسی کردند و نشان دادند افزایش طول حوضچه می تواند عمق بیشینه آبستگي را تا ۷۸ درصد کاهش دهد. این محققان روابطی نیز برای پیش بینی عمق، موقعیت و حجم حفره ارائه کردند. مقایسه مدل ارائه شده در مرجع مذکور با سرریز اوجی نشان می دهد که سرریز پلکانی، به دلیل تلفات انرژی بیشتر، کاهش قابل توجهی در آبستگي به همراه دارد و نیز افزایش عدد فرود و کاهش شیب سرریز، عمق و طول حفره را افزایش می دهد. روشنگر و همکاران (Roushangar et al., 2016) با مقایسه روش های تجربی، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه نویسی ژن برای پیش بینی عمق آبستگي پایین دست سازه های کنترل نشان دادند شبکه های عصبی پیشخور، در مقایسه با روش برنامه نویسی ژن و روابط تجربی کلاسیک، دقت بالاتری دارد. این برتری در تمامی سازه های مورد مطالعه شامل سرریزهای منتهی به پرتاب کننده جامی، سازه های کنترل شیب لبه تیز و مایل مشاهده گردید. در مطالعه ای تجربی، عبیدا و همکاران (Obida et al., 2023) تأثیر کف بندهای صلب را بر پدیده آبستگي در ناحیه پایین دست سرریزهای لبه تیز بررسی کردند و نشان دادند نصب سازه های حفاظتی صلب در پایاب می تواند به میزان قابل توجهی (۱۹/۳ درصد) از عمق نهایی حفره آبستگي بکاهد. این یافته از لحاظ ارائه راهکاری عملی برای کاهش خسارت های ناشی از فرسایش بستر در پایین دست سازه های هیدرولیکی با اهمیت است. مقایسه داده های آزمایشگاهی در دو حالت با کف بند حفاظتی و بدون کف بند حفاظتی، تأثیر مثبت این روش را در پایداری سازه و کنترل فرآیند آبستگي به خوبی آشکار می سازد. دانشفراز و همکاران (Daneshfaraz et al., 2025) در پژوهشی به بررسی آزمایشی تأثیر ترکیب سازه های گابیونی روسترال (با زاویه رأس ۱۲۰ درجه) و تثبیت بستر با رس بر کاهش آبستگي و بهبود پارامترهای هیدرولیکی پرداختند و نشان دادند با ترکیب گابیون روسترال و افزودن ۱۰ درصد

جنس ذرات رسوبی، ویژگی های جریان و هندسه سازه وابسته است. در سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی، به دلیل تمرکز جریان در مرکز، سرعت جریان به طور محسوسی افزایش می یابد و در نتیجه پتانسیل آبستگي نیز بیشتر می شود. بررسی دقیق این پدیده برای ارزیابی الگوی تنش برشی در بستر و شناسایی نواحی بحرانی ضروری است زیرا تنش های بیش از حد در برخی نقاط می توانند در بلند مدت باعث ناپایداری یا آسیب دیدگی سازه شوند. در دهه های اخیر، توجه پژوهشگران به بررسی عملکرد سرریزهای مرکب در شرایط مختلف هیدرولیکی افزایش یافته است. یکی از مطالعات برجسته در این زمینه، پژوهش آزمایشگاهی مارتینز و همکاران (Martinez et al., 2005) است که به بررسی کارایی سرریز لبه تیز مرکب با فرم مثلثی-مثلثی در سدهای رسوب گیر واقع در مناطق کوهستانی می پردازد. نتایج به دست آمده از مطالعات این محققان نشان می دهد که این نوع سرریز ضمن حفظ پیوستگی منحنی دبی-اشل در طیف وسیعی از شرایط جریان، دقت بالایی در اندازه گیری دبی، حتی در جریان های کم یا سیلابی نیز دارد. آنها همچنین با طراحی نسخه های مختلفی از این سرریز با تغییرات در ویژگی های هندسی، مدلی برای محاسبه ضریب دبی کل ارائه کردند که دقت قابل قبولی دارد. در مطالعه ای دیگر، گوغوش و همکاران (Göğüş et al., 2006) عملکرد سرریزهای مرکب پهن با ترکیب مستطیلی - مستطیلی را در کانال های باز بررسی و با استفاده از ۹ مدل مرکب و یک مدل ساده مستطیلی، اثر تغییر عرض تاج پایینی و ارتفاع پله را بر ضریب های تخلیه و سرعت تحلیل کردند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش عرض تاج پایینی نقش مهمی در افزایش ضریب تخلیه دارد اما به طور کلی، سرریزهای مرکب نسبت به انواع ساده مستطیلی از نظر تخلیه حساس تر به شرایط جریان پایین دست هستند و عملکرد متفاوتی دارند.

پژوهشگران متعددی به بررسی آبستگي پایین دست سازه هایی مانند سرریزها پرداخته اند. امین پور و همکاران (Aminpour et al., 2015) در مطالعه ای آزمایشگاهی با

دقت ۲۰ درصد بالاتر از ANN و ۸.۵ درصد بالاتر از SVM، بهترین عملکرد را دارد. این محقق همچنین گزارش داد که افزایش تعداد پارامترهای ورودی لزوماً دقت مدل ها را بهبود نمی بخشد و انتخاب بهینه پارامترها اهمیت بالایی دارد. ماجدی اصل و همکاران (Majedi-Asl et al., 2024) در مقاله ای با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین QNET و SVM به پیش بینی ضریب دبی سرریزهای قوسی ماریچ با زاویه ۶ درجه پرداختند. هر دو الگوریتم دقت بالایی در مدل سازی نشان دادند، ولی عملکرد SVM اندکی بهتر بود. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که نسبت بار کل آب نقش کلیدی در تعیین ضریب دبی دارد. این مطالعه نشان دهنده توانایی بالای مدل های یادگیری ماشین در پیش بینی دقیق رفتار هیدرولیکی سرریزهای پیچیده است.

مدل های عددی مبتنی بر فیزیک اگر چه ابزارهای قدرتمندی برای شبیه سازی سیستم های هیدرولوژیکی هستند، اما به دلیل نیاز به داده های ورودی دقیق و پیچیدگی های محاسباتی، در برخی شرایط عملی با محدودیت هایی روبه رو می شوند. زمانی که داده های میدانی ناکافی هستند یا اولویت با دقت نتایج به جای تبیین مکانیزم های فیزیکی است، مدل های هوشمند داده محور مانند شبکه های عصبی می توانند گزینه ای مناسب باشند. این مدل ها با بهره گیری از توانایی یادگیری الگوهای پیچیده می توانند روابط غیرخطی بین پارامترهای مؤثر را بدون نیاز به درک دقیق فیزیک پدیده، مدل سازی کنند (Nourani et al., 2017). در سال های اخیر، به دلیل پیچیدگی و عدم قطعیت موجود در فرآیندهای هیدرولیکی، استفاده از مدل های داده محور در پژوهش ها رشد چشمگیری داشته است. مدل هایی مانند شبکه های عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم های عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و ماشین های بردار پشتیبان (SVM) به طور گسترده برای مدل سازی پدیده های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی به کار گرفته شده اند. مطالعات متعددی نیز به ارزیابی عملکرد و دقت این مدل ها در بازنمایی رفتار سامانه های پیچیده آبی اختصاص یافته

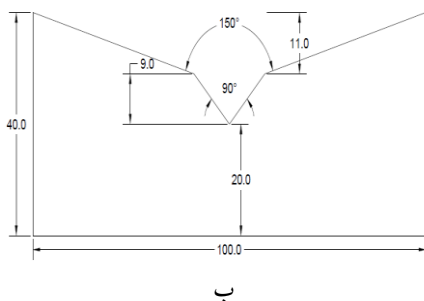
رس به بستر، آبشستگی ۴۰-۱۶/۵ درصد کاهش و اتلاف انرژی بهبود می یابد. در مطالعه ای دیگر، دانش فراز و همکاران (Daneshfaraz et al., 2021) عملکرد مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) را برای پیش بینی پارامترهای هیدرولیکی آبشار قائم مجهز به دو صفحه افقی بررسی کردند. برای این منظور، ۱۲۰ سری داده آزمایشگاهی به کار گرفته شد تا طول نسبی پرش، عمق نسبی پایین دست و انرژی نسبی باقیمانده تخمین زده شود. نتایج تحقیق نشان داد مدل SVM دقت بسیار بالایی در پیش بینی این پارامترها دارد و پارامترهایی مانند عمق بحرانی نسبی، فاصله نسبی صفحات و تخلخل صفحات تأثیر زیادی بر عملکرد مدل دارند. این تحقیق نشان داد که استفاده از صفحات افقی می تواند موجب کاهش انرژی باقیمانده و بهبود عملکرد سازه های آبریزش قائم شود و مدل های هوشمند مانند SVM ابزاری کارآمد برای تحلیل رفتار هیدرولیکی چنین سازه هایی به شمار می روند. اقبال خرمی و همکاران (Khorrami et al., 2022) پدیده آبشستگی را در ناحیه پایین دست سازه های هیدرولیکی با استفاده از دو روش مدل سازی آزمایشگاهی و شبکه عصبی مصنوعی تحلیل کردند. در این پژوهش، پارامترهای مؤثری شامل دبی جریان، ارتفاع انرژی، مشخصات ذرات رسوب بستر (میانگین قطر ذرات) و زاویه پرتاب جت خروجی به عنوان متغیرهای ورودی برای پیش بینی عمق حفره آبشستگی به کار گرفته شدند. یافته های تحقیق مذکور حاکی از آن است که مدل مبتنی بر هوش مصنوعی (شبکه عصبی)، در مقایسه با روش های تحلیلی و معادلات تجربی رایج، در شبیه سازی پدیده آبشستگی دقت و قابلیت اطمینان بالاتری دارد. این برتری به ویژه در شرایط پیچیده هیدرولیکی و تنوع پارامترهای مؤثر آشکارتر می شود. در پژوهشی دیگر، شهرام موسوی (Mousavi., 2023) با بررسی کارایی مدل های هوش مصنوعی (شبکه عصبی مصنوعی، سیستم عصبی-فازی تطبیقی و ماشین بردار پشتیبان) در پیش بینی عمق آبشستگی پایین دست سازه های کنترل شیب با سرریز لبه تیز نشان داد که مدل ANFIS با

فراهم می‌کند. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق ابعاد حفره آبشستگی پایین‌دست سرریز است.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

در این پژوهش، برای تعیین پارامترهای کلیدی مؤثر بر فرآیند آبشستگی از یک مدل آزمایشگاهی استفاده شد و آبشستگی موضعی در پایین‌دست سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به صورت آزمایشگاهی بررسی گردید. برای این منظور، سرریز مورد استفاده از جنس فلز با لبه‌ای از جنس برنج ساخته شد، نمای شماتیک آن در شکل ۱ قابل مشاهده است. این سرریز دو بخش مثلثی با زاویه‌های ۹۰ و ۱۵۰ درجه دارد و در مدل آزمایشگاهی، ارتفاع و طول آن به ترتیب ۴۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.



است (Singh & Datta, 2007; Nourani et al., 2008; Li & Tsai, 2009; Foddiss et al., 2005).

این تحقیق به بررسی جامع پدیده آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی پرداخته است. در مرحله اول، با پرداختن به آزمایش‌های دقیق آزمایشگاهی، پارامترهای کلیدی مؤثر بر فرآیند آبشستگی شناسایی و پس از آن با استفاده از روش تحلیل ابعادی، پارامترهای بی‌بعد مؤثر استخراج شدند. در بخش مدل‌سازی، سه الگوریتم پیشرفته هوش مصنوعی شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) به کار گرفته شدند. این مدل‌ها برای تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر و پیش‌بینی دقیق ابعاد حفره آبشستگی به کار گرفته شدند. این مطالعه امکان مقایسه سیستماتیک عملکرد مدل‌های مختلف هوش مصنوعی را در پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده هیدرولیکی



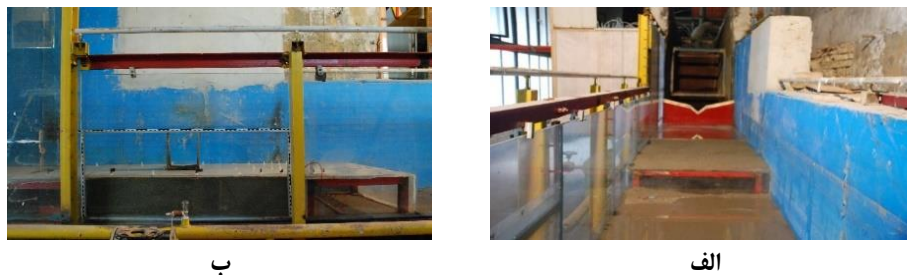
شکل ۱ - سرریز مرکب مثلثی - مثلثی مورد مطالعه: (الف) مدل ساخته شده در کارگاه (ب) طرح شماتیک سرریز

Fig. 1- Triangular-Triangular compound weir under investigation: (a) physical model constructed in the workshop, (b) schematic diagram

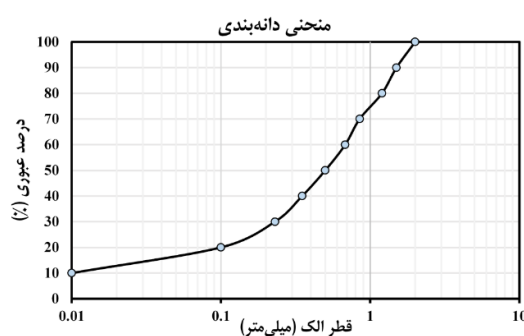
یک مخزن مدرج به شکل مکعب مستطیل به طول ۹۰ سانتی‌متر (مطابق شکل ۳-ب) استفاده شده است. ذرات رسوبی به کار رفته در آزمایش‌ها قطر متوسط معادل ۰/۵ میلی‌متر دارند که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. آب مورد نیاز نیز از طریق مخزن اصلی مؤسسه با ظرفیت تقریبی ۸۰۰ مترمکعب تأمین شد و انتقال آن به بالادست فلوم با استفاده از یک پمپ گریز از مرکز مدل ۲۵۰-۲۹ صورت پذیرفت.

برای بررسی آزمایشگاهی پدیده آبشستگی، مدل معرفی شده در شکل ۱ در فلوم آزمایشگاهی متعلق به مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو نصب و راه‌اندازی شد. این فلوم با طول ۶/۷ متر و عرض ۹۰ سانتی‌متر طراحی شد و دیواره‌های جانبی آن ترکیبی از شیشه شفاف (با ضخامت ۸ میلی‌متر) در یک سمت و بلوک‌های بتنی در سمت دیگر است. نمای کلی این سامانه در شکل ۲ ارائه شده است. در بخش پایین‌دست سرریز، یک حوضچه آرامش از جنس پلکسی‌گلاس قرار گرفته و برای جمع‌آوری ذرات رسوبی، از

تخمین ابعاد حفرة آبستگى در پایین دست سرریز لبه تیز مرکب مثلى-مثلى با استفاده از مدل های هوش مصنوعى



شکل ۲- فلوم آزمایشگاهی استفاده شده در این مطالعه: (الف) نمای داخلی (ب) ناحیه مدرج تعبیه شده برای تعبیه ذرات رسوبی
Fig. 2- Laboratory flume used in this study: (a) internal view, (b) the graded section prepared for sediment placement



شکل ۳- منحنی دانه بندی ذره رسوبی مورد استفاده.
Fig. 3- Particle size distribution curve of the sediment used.

پارامترهای مورد استفاده و روش اجرای آزمایش
برای تعیین ابعاد حفرة آبستگى، مجموعه ای از آزمایش ها با دبی های مختلف به اجرا در آمد. بدین منظور برای برداشت نیمرخ های طولی حفرة آبستگى، از روش تصویربرداری و تحلیل داده های دیجیتال با استفاده از نرم افزار Grapher (نسخه ۷.۰.۱۸۷۰، ۲۰۰۷، تولید شرکت Golden Software) بهره گرفته شد. در این فرایند، دوربینی به صورت عمود بر سطح جریان و منطقه آبستگى، روی یک سه پایه در موقعیت مناسب نصب شد و از آن برای ثبت تصاویر مورد نیاز استفاده گردید. آزمایش ها با در نظر گرفتن ۴ دبی مختلف در محدوده ۵۴/۹۴ – ۷/۰۸ لیتر بر ثانیه دنبال گردید که روند هر یک به مدت ۳ ساعت (۱۷ مقطع زمانی) به طول انجامید. خلاصه روند آزمایش ها به همراه محدوده پارامترهای مؤثر آن در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۲ نیز زمان های برداشت نیمرخ طولی آبستگى برداشت شده مشاهده می شود.

جدول ۱- پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق
Table 1- Parameters investigated in this study

دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (Lit/s)	عدد فرود ذره Particle Froude number	عرض فلوم (سانتی متر) Flume width (cm)	عمق آب بالادست سرریز (سانتی متر) Upstream depth (cm)	عمق آب پایین دست سرریز (سانتی متر) Tailwater depth (cm)
7.08	174.88	90	53.4	31.2
15.9	392.75		56.5	11.5
37.35	922.60		59.53	35.15
54.94	1357.109		62.70	41.04

جدول ۲- خلاصه ای از مشخصات نیمرخ های آبشستگی برداشت شده

Table 2- A summary of the characteristics of the extracted scour profiles

تعداد آزمایش	زمان های برداشت نیمرخ طولی حفره (دقیقه)	مدت زمان آزمایش (ساعت)
Number of experiments	scour hole profile measurement times (minutes)	Time (Hour)
4	0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180	3

برای اندازه گیری دبی جریان، از یک سرریز لبه تیز مستطیلی با ارتفاع ۳۰ سانتی متر و عرض ۹۰ سانتی متر استفاده شد که در انتهای پایین دست فلوم نصب شده بود. محاسبه دبی عبوری از این نوع سرریز براساس رابطه کلی سرریزهای لبه تیز مستطیلی است که به صورت زیر بیان می شود:

حسب متر است)، بر اساس معادله ریوک (Rehbock, 1929) و به صورت زیر بیان می شود:

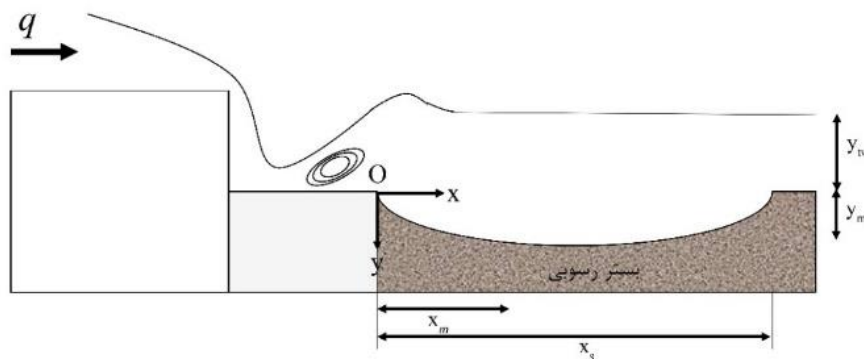
$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{h}{p} \quad (2)$$

استخراج پارامترهای بدون بعد

به منظور دستیابی به هدف های این پژوهش، ابتدا متغیرهایی استخراج شدند که بر هندسه حفره آبشستگی در پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی موثرند و با صرف نظر کردن از پارامترهایی که تأثیر چندانی بر ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست ندارند، هندسه حفره آبشستگی را می توان تابع عوامل زیر دانست:

$$f(Scour) = f(x_m, y_m, x_s) = f(\rho, \mu, \rho_s, D_{50}, p, q, y_{tw}, y_h, g, t, x_m, y_m, x_s) = 0 \quad (3)$$

در شکل ۴، پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی در پایین دست سرریز مرکب مثلثی-مثلثی مشاهده می شود.



شکل ۴- پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز مرکب مثلثی - مثلثی

Fig. 4- Effective parameters on the local scour phenomenon downstream of a triangular-triangular compound weir

در رابطه (۳) y_m : عمق بیشینه آبشستگی (متر)؛ x_m : حفره آبشستگی؛ ρ : گرانروی سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره (متر)؛ x_s : طول ρ_s : گرانروی ذره رسوبی (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ μ : گرانروی

سرریز با توجه به اینکه ثابت در نظر گرفته شده است، جزو پارامترهای مؤثر لحاظ نگردیده اند. به دلیل آشفته بودن جریان در پایین دست سرریز، از عدد رینولدز صرف نظر گردید. در نتیجه با استفاده از روش π باکینگهام، تحلیل ابعادی و بی بعدسازی به صورت زیر خواهد بود:

$$\left(\frac{y_m}{D_{50}}, \frac{x_m}{D_{50}}, \frac{x_s}{D_{50}}\right) = \varphi\left(\frac{y_{tw}}{D_{50}}, \frac{y_h}{D_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{t}{t_0}, Fr_D, \frac{\mu}{\rho \cdot D_{50} \cdot \sqrt{g \cdot D_{50}}}\right)$$

با علوم آب، ابزاری مؤثر برای پیش بینی پدیده های وابسته به زمان به حساب می آید. شبکه عصبی پیش رو با ساختاری شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان که با الگوریتم یادگیری پس انتشار تنظیم شده است، به عنوان مدلی مناسب برای شبیه سازی رفتارهای زمانی و غیرخطی در حوزه های آب و محیط زیست شناخته می شود (Govindaraju., 2000).

ب) مدل ماشین بردار پشتیبان^۲

ماشین بردار پشتیبان روش یادگیری مؤثری بر پایه نظریه بهینه سازی با قیود است که از اصل کمینه سازی خطای ساختاری پیروی می کند و هدف آن دستیابی به مدلی با قدرت تعمیم بالاست. در چارچوب رگرسیون SVN تابعی از متغیرهای مستقل برای پیش بینی متغیر وابسته y تخمین زده می شود. مانند دیگر مدل های رگرسیونی، در اینجا نیز فرض بر این است که رابطه بین ورودی ها و خروجی از طریق یک تابع ریاضی $f(x)$ با در نظر گرفتن میزان خطای مجاز ε و نویز مدل سازی می شود (Cortes & Vapnik., 1995). تابع پیش بینی در SVM به صورت زیر تعریف می شود:

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (7)$$

$$y = f(x) + \text{noise} \quad (8)$$

در این رابطه ها: w بردار ضرائب؛ $\varphi(x)$ تابع کرنل^۳؛ و b ثابت مشخصه های تابع رگرسیونی است. برای آموزش مدل، تابع هدف به صورت زیر بهینه می شود:

$$1/2 W^T W + C(\sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*)) \quad (9)$$

دینامیکی سیال (نیوتن ثانیه بر متر مربع)؛ D_{50} ، دانه بندی ذرات رسوبی (متر)؛ p ، ارتفاع سرریز (متر)؛ q ، دبی در واحد عرض سرریز (متر مربع بر ثانیه)؛ y_{tw} ، عمق آب پایین دست سرریز (متر)؛ y_h ، عمق آب بالادست سرریز (متر)؛ g ، شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛ و t ، زمان (ثانیه) است. دو زاویه (۴)

در این تحقیق، t_0 زمان مشخصه است که به صورت $t_0 = \sqrt{\frac{D_{50}}{g}}$ در نظر گرفته شده و Fr_D عدد فرود ذره است که بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Fr_D = \frac{q}{\sqrt{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1) D_{50}^3}} \quad (5)$$

با لحاظ کردن پارامتر D_{50} در بخش های مختلف رابطه (۴) و صرف نظر کردن از پارامتر $\frac{\mu}{(\rho \cdot D_{50} \cdot \sqrt{g \cdot D_{50}})}$ به دلیل ثابت بودن آن، رابطه (۴) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$= \varphi\left(\frac{y_{tw}}{y_h}, \frac{t}{t_0}, Fr_D\right) \quad (6)$$

مدل های هوش مصنوعی

الگوهای مبتنی بر هوش مصنوعی در سال های اخیر به عنوان ابزارهایی قدرتمند و مستقل از روابط فیزیکی صریح، کاربرد وسیعی در تحلیل مسائل پیچیده مهندسی یافته اند. در این پژوهش، سه روش رایج از مدل های داده محور شامل شبکه عصبی مصنوعی، سیستم تطبیقی عصبی- فازی و ماشین بردار پشتیبان به شرح زیر برای مدل سازی ابعاد حفره آبستکی در پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی به کار گرفته شده اند. استفاده از این مدل ها به دلیل توانایی بالای آنها در شناسایی الگوهای پنهان و روابط غیرخطی در داده ها، رویکردی مؤثر در پیش بینی دقیق رفتارهای هیدرولیکی به شمار می رود.

الف) شبکه های عصبی مصنوعی^۱

شبکه های عصبی مصنوعی از روش های رایج و داده محور هستند و به طور گسترده در حل مسائل مختلف به کار برده می شوند. به ویژه نوع پیش رو این شبکه ها در حوزه های مرتبط

³ Kernel Trick

¹ Artificial Neural Networks (ANN)

² Support Vector Machines (SVM)

قیود بهینه سازی به صورت رابطه (۱۰) تعریف می شود:

$$y_i - w^T \varphi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \quad (10)$$

$$w^T \cdot \varphi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0$$

$$i=1,2,3,\dots,N$$

که در آن: C , پارامتر جریمه؛ ε , آستانه مجاز خطا؛ و ξ_i^* متغیرهای کمکی برای بیان خطاهای بیش از ε هستند. از توابع کرنل معمولاً به عنوان جایگزینی برای محاسبه مستقیم $\phi(x)$ ، بدلیل شباهت آنها در فضای ویژگی استفاده می شود.

جدول ۳- کرنل های متداول برای ساخت انواع مختلف SVM

Table 3- Common kernels for constructing different types of SVM

پارامترها Parameters	فرمول Formula	نوع کرنل Kernel
c : جمله ثابت	$K(x_i, x_j) = x_i^T \cdot x_j + c$	خطی (Linear)
c : جمله ثابت d : درجه	$K(x_i, x_j) = (x_i^T \cdot x_j + c)^d$	چند جمله ای (Polynomial)
γ : پهنای باند	$K(x_i, x_j) = e^{-\gamma \ x_i - x_j\ ^2}$	توابع پایه شعاع یا گاوسی (RBF)

(آزمایش) سنجیده می شود. معیارهای استفاده شده در این تحقیق شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی نش- ساتکلیف (NS) و میانگین خطای نسبی مطلق (MARE) هستند. این معیارها برای مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی از رابطه های (۱۲ تا ۱۴) به دست می آیند.

$$MARE = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n |(x)_{i(Exp)} - (x)_{i(Cal)}| \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n ((x)_{i(Exp)} - (x)_{i(Cal)})^2} \quad (13)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N ((x)_{i(Exp)} - (x)_{i(Cal)})^2}{\sum_{i=1}^N ((x)_{i(Exp)} - (\bar{x})_{i(Exp)})^2} \quad (14)$$

در این رابطه ها: x_{exp} ، x_{cal} و $\bar{x}_{Exp}$ به ترتیب نشان دهنده مقدار آزمایشگاهی، پیش بینی شده توسط مدل و متوسط داده های آزمایشگاهی و n تعداد داده هاست.

تحلیل حساسیت

با توجه به یافته های پژوهش های پیشین که در بخش مقدمه به آنها اشاره شد و همچنین با در نظر گرفتن خطاهای قابل توجه مدل های مرسوم، ماهیت غیرقطعی و پیچیده روابط بین پارامترهای مؤثر بر پدیده آبستگي در سازه های کنترل شیب، مدلسازی این فرآیند را با چالش های اساسی

ج) مدل شبکه عصبی-فازی تطبیقی^۱

مدل ANFIS (سیستم عصبی-فازی تطبیقی) روشی است ترکیبی که از ادغام شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) و منطق فازی برای مدل سازی پدیده های غیرخطی و پیچیده استفاده می کند. این مدل در مقاله حاضر به منظور تخمین عمق آبستگي پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی به کار گرفته شد. این مدل ترکیبی از دو رویکرد فازی و عصبی در یک چارچوب یکپارچه است. در این ساختار، بخش فازی وظیفه برقراری رابطه بین ورودی ها و خروجی ها را بر عهده دارد، در حالی که پارامترهای توابع عضویت فازی توسط شبکه عصبی آموزش داده بهینه سازی می شوند. به این ترتیب، مدل عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) از قابلیت های هر دو روش به صورت هم زمان بهره مند است (Jang et al., 1997). در این مقاله، از سیستم فازی سوگنو استفاده گردید که در آن خروجی هر قانون فازی به صورت تابعی خطی از ورودی ها تعریف می شود.

معیار ارزیابی مدل ها

کارایی مدل های هوش مصنوعی معمولاً با استفاده از معیارهای ارزیابی مختلفی در مراحل آموزش و صحت سنجی

¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

مدل ها نرمال سازی شدند تا مقیاس بندی یکسانی داشته باشند. با این همه، نمودارهای به دست آمده به منظور مقایسه بهتر به صورت غیرنرمال رسم شده اند.

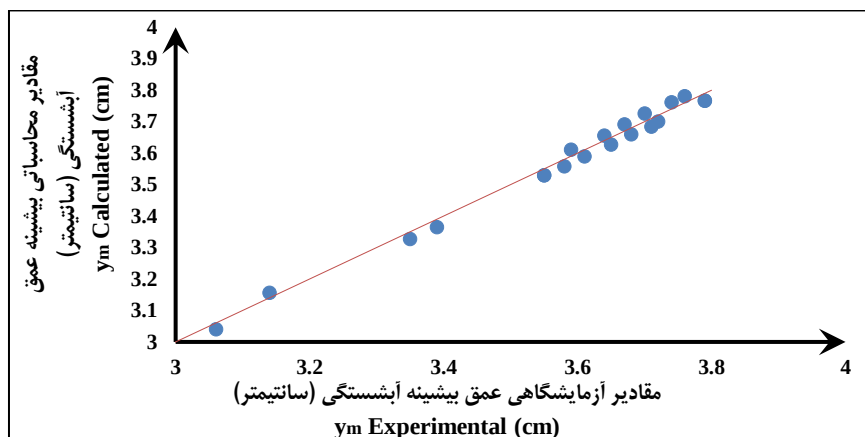
نتایج مدل شبکه های عصبی مصنوعی (ANN)

شکل (۵)، نمودار پراکنش بیشینه عمق آبشستگی به دست آمده از داده های آزمایشگاهی و مدل ANN را نشان می دهد. در این مقاله، برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی از الگوریتم لونبرگ - مارکارت استفاده شد (Haykin & Lippmann, 1994). در شکل های (۶) و (۷) نیز نمودار پراکنش مقادیر فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره و طول حفره آبشستگی به دست آمده از داده های آزمایشگاهی و مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است. مقایسه بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی نشان می دهد در اکثر نقاط مدل ANN تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد گرچه برخی از تفاوت های مشاهده شده می تواند ناشی از محدودیت های مدل، عدم قطعیت در داده های ورودی، یا نیاز به بهبود آموزش شبکه عصبی باشد. جدول (۴) نیز عملکرد مدل ANN را در پیش بینی پارامترهای مرتبط با آبشستگی بر اساس معیارهای خطا نشان می دهد. مقادیر RMSE پایین (۰/۰۶۹ تا ۰/۰۷۲) و ضریب نش-ساتکلیف بالا (۰/۷۲۶ تا ۰/۸۹۱) در دو پارامتر اول، بیانگر دقت قابل قبول مدل است، در حالی که RMSE بالاتر (۱/۲۴۵) برای پارامتر طول حفره آبشستگی، نیاز به بهبود مدل در این بخش یا بررسی داده های ورودی را نشان می دهد. میانگین خطای نسبی (MARE) کمتر از ۳ درصد برای تمام پارامترها نیز تأیید کننده عملکرد کلی مناسب مدل است.

مواجه ساخته است. این پیچیدگی های ذاتی موجب گردید در مطالعه حاضر از رویکردهای هوش مصنوعی شامل شبکه های عصبی مصنوعی، سیستم های عصبی-فازی تطبیقی و ماشین های بردار پشتیبان که نیاز کمتری به درک مکانیزم های فیزیکی حاکم بر پدیده دارند، به عنوان مدل های پیش بینی به منظور تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر استفاده شود. در این راستا، تحلیل حساسیت جامعی روی پارامترهای ورودی مدل ها به عنوان لایه اولیه پردازش داده ها صورت گرفت. تمامی الگوریتم ها و ابزارهای محاسباتی مورد نیاز در محیط نرم افزار MATLAB و Python پیاده سازی و توسعه داده شدند. برای تعیین لایه ورودی از پارامترهای بدون بعد t/t_0 ، Fr_D و y_{tw}/y_h استفاده شد. برای بهبود دقت پیش بینی مدل های هوش مصنوعی، بخشی از داده های آزمایشگاهی به عنوان داده های ورودی به کار رفتند. در همه مدل ها، ۷۰ درصد داده ها برای واسنجی (آموزش) و ۳۰ درصد برای آزمایش (تست) به کار برده شد. به منظور تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر ابعاد حفره آبشستگی، تمامی پارامترها در هر سه مدل پیشنهادی بررسی شدند.

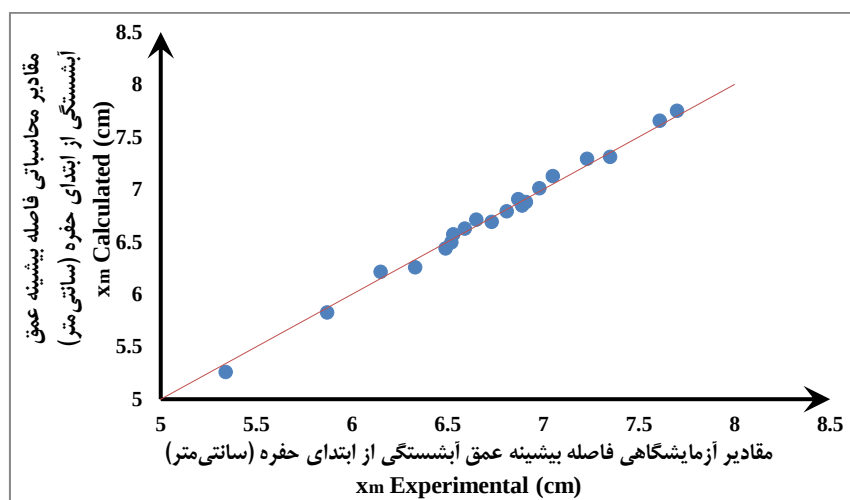
نتایج و بحث

به منظور مقایسه داده های آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل های هوش مصنوعی، نمودارهای پراکنش مربوط به پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی در پایین دست سرریز مثلثی - مثلثی، شامل بیشینه عمق آبشستگی، فاصله محل بیشینه عمق از ابتدای حفره و طول کلی حفره رسم شد. نتایج تحلیل حساسیت این پارامترها برای هر یک از مدل های هوش مصنوعی ارائه گردید. لازم است گفته شود تمامی داده های ورودی پیش از آموزش



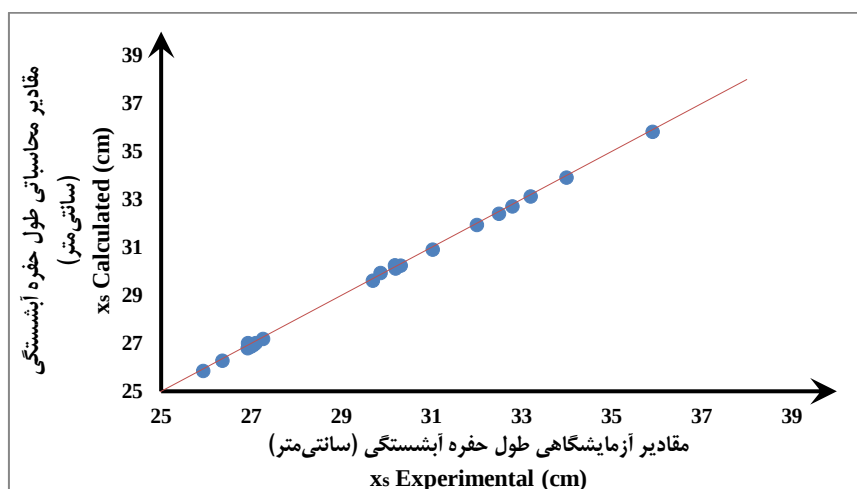
شکل ۵- مقادیر بیشینه عمق آبشستگی (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل ANN)

Fig. 5- Maximum scour depth values (laboratory and computational obtained from the ANN model values)



شکل ۶- مقادیر فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل ANN)

Fig. 6- Distance of maximum scour depth from the beginning of the scour hole (laboratory and computational obtained from the ANN model values)



شکل ۷- مقادیر طول حفره آبشستگی (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل ANN)

Fig. 7- Scour hole length values (laboratory and computational obtained from the ANN model values)

جدول ۴- نتایج محاسبه معیارهای خطا برای کل داده ها (نتایج آزمایشگاهی در مقابل پیش بینی شده توسط ANN)

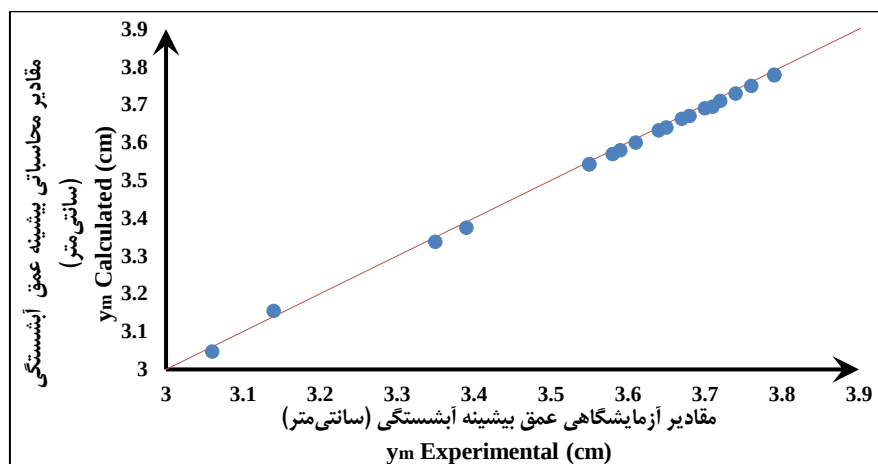
Table 4- Error metric results for the entire dataset (experimental results vs. ANN-predicted values)

معیار Criteria	نسبت پیشینه عمق آبستگى به دانه بندی ذرات	نسبت فاصله پیشینه عمق آبستگى از ابتدای حفرة به دانه بندی ذرات	نسبت طول حفرة آبستگى به دانه بندی ذرات
	Y_m/D_{50}	x_m/D_{50}	x_s/D_{50}
میانگین مربعات خطا (RMSE)	0.069	0.072	1.245
نش - ساتکلیف (NS)	0.726	0.891	0.854
میانگین خطای نسبی مطلق (MARE)	2.57%	1.58%	1.92%

برای آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی، هر ورودی به میزان $\pm 10\%$ درصد تغییر یافت و تاثیر نسبی آنها بر ابعاد حفرة آبستگى بررسی شد و این نتیجه به دست آمد که عدد فرود ذره با 45% درصد بیشترین تاثیر را بر پیشینه عمق آبستگى دارد و t_0 نیز با 32% درصد تاثیر قابل توجهی بر طول حفرة آبستگى دارد.

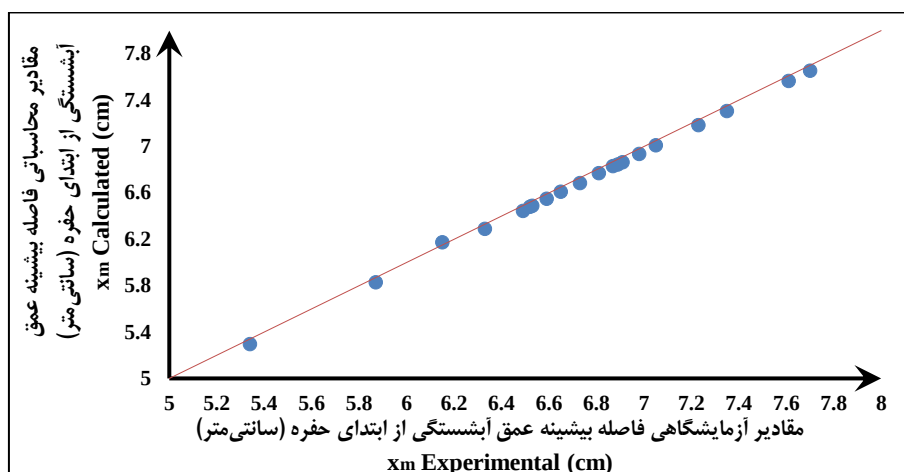
نتایج مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)

در فرآیند آموزش مدل SVM، از کرنل شعاعی پایه (RBF) استفاده شد. مقدار پارامترهای تنظیمی مدل به صورت $C=10$ و $\gamma=0.1$ تعیین گردید و الگوریتم آموزش نیز روش Optimization Sequential Minimal انتخاب شد. شکل های (۸)، (۹) و (۱۰) پراکنش داده های آزمایشگاهی را در مقابل داده های پیش بینی شده توسط مدل SVM نشان می دهد. مقایسه مقادیر محاسباتی و



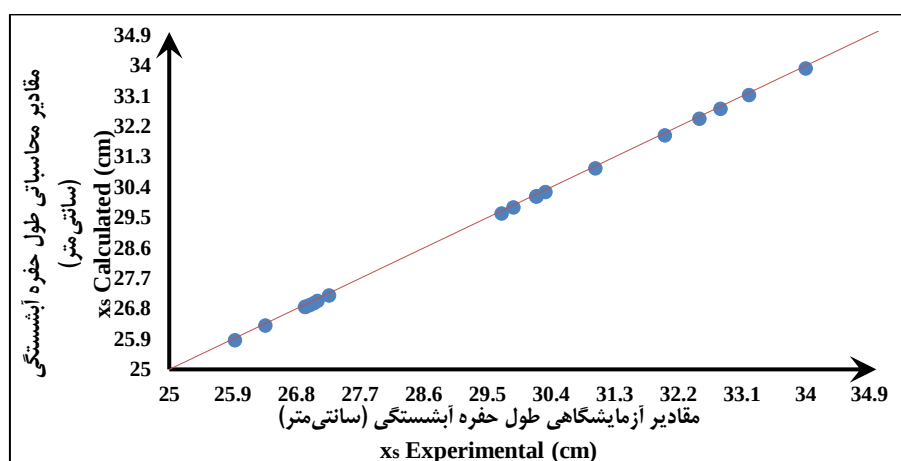
شکل ۸- مقادیر پیشینه عمق آبستگى (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل SVM - کرنل RBF)

Fig. 8- Maximum scour depth values (experimental values and computational results obtained from the SVM model - RBF kernel)



شکل ۹- مقادیر فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل SVM - کرنل RBF)

Fig. 9- Distance of maximum scour depth from the beginning of the scour hole (laboratory and computational obtained from the SVM model - RBF kernel)



شکل ۱۰- مقادیر طول حفره آبشستگی (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل SVM - کرنل RBF)

Fig. 10- Scour hole length values (laboratory and computational obtained from the SVM model - RBF kernel)

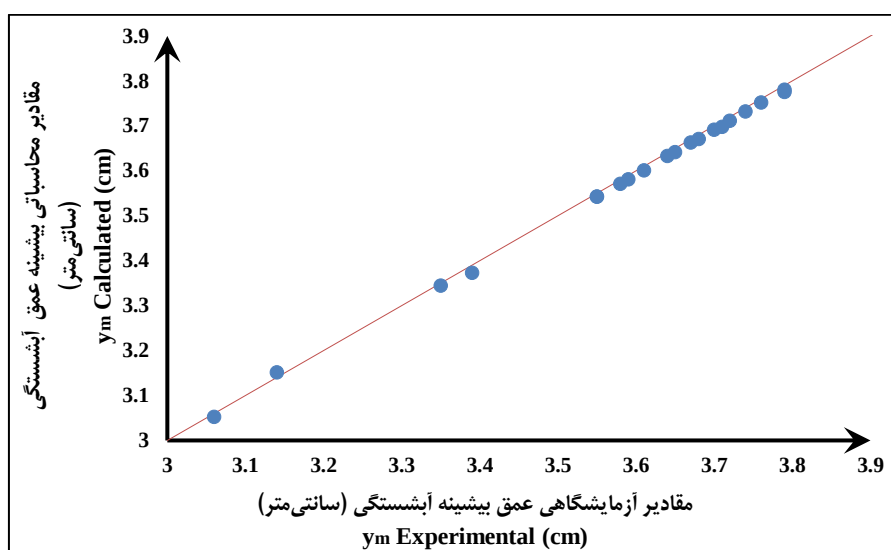
جدول ۵- نتایج محاسبه معیارهای خطا برای کل داده ها (نتایج آزمایشگاهی در مقابل پیش بینی شده توسط SVM-RBF)

Table 5- Error metric results for the entire dataset (experimental results vs. SVM(RBF)-predicted values)

معیار Criteria	نسبت فاصله بیشینه عمق آبشستگی به دانه بندی ذرات Y_m/D_{50}	نسبت فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره به دانه بندی ذرات x_m/D_{50}	نسبت طول حفره آبشستگی به دانه بندی ذرات x_s/D_{50}
میانگین مربعات خطا (RMSE)	0.055	0.058	1.109
نش - ساتکلیف (NS)	0.803	0.895	0.868
میانگین خطای نسبی مطلق (MARE)	1.98%	1.18%	1.59%

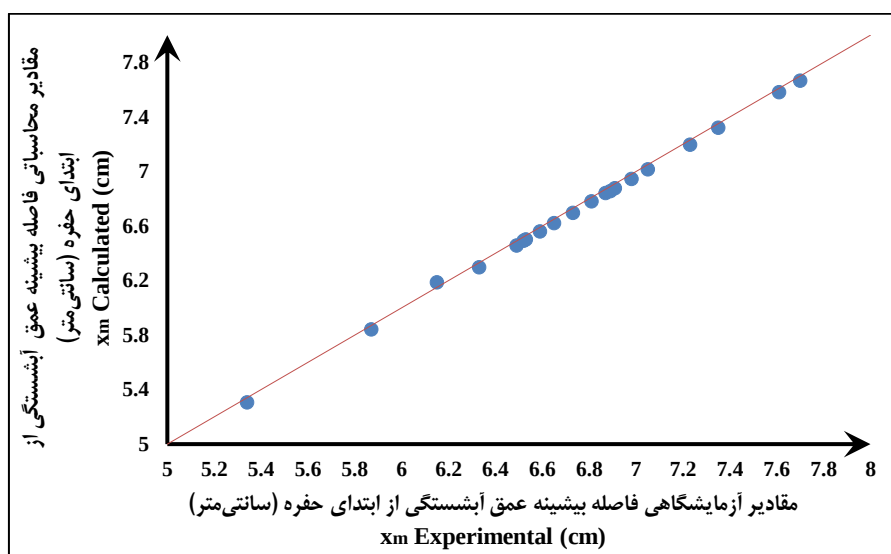
نتایج آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای ورودی با مدل SVM نشان می دهد که عدد فرود ذره با میانگین ۵۵ درصد بر x_m ، ۵۸ درصد و بر x_s ، ۵۲ درصد است. بیشترین تاثیر و نسبت y_{tw}/y_h با میانگین درصد کمترین

نتایج مدل شبکه عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) داده های آزمایشگاهی را در مقابل داده های پیش بینی شده برای مدل سازی ابعاد حفره آبستگی در پایین دست سرریزهای مرکب مثلثی-مثلثی به روش ANFIS از سه تابع قوسی برای هر ورودی و ۲۷ قانون فازی استفاده شد. توابع عضویت استفاده شده در این تحقیق از نوع گاوسی (Gaussian) است. شکل های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) پراکنش



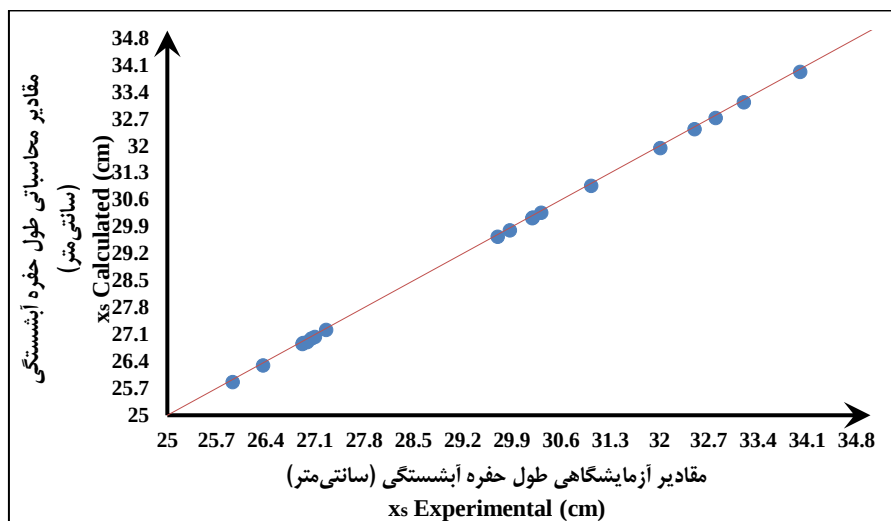
شکل ۱۱- مقادیر بیشینه عمق آبستگی (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل ANFIS)

Fig. 11- Maximum scour depth values (experimental values and computational results obtained from the ANFIS model)



شکل ۱۲- مقادیر فاصله بیشینه عمق آبستگی از ابتدای حفره (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست آمده از مدل ANFIS)

Fig. 12- Distance of maximum scour depth from the beginning of the scour hole (laboratory and computational results obtained from the ANFIS model)



شکل ۱۳- مقادیر طول حفره آبشستگی (مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی بدست آمده از مدل ANFIS)

Fig. 13- Scour hole length values (laboratory and computational obtained from the ANFIS model)

جدول ۶- نتایج محاسبه معیارهای خطا برای کل داده ها (نتایج آزمایشگاهی در مقابل پیش بینی شده توسط ANFIS)

Table 6- Error metric results for the entire dataset (experimental results vs. ANFIS model)			
معیار Criteria	نسبت بیشینه عمق آبشستگی به دانه بندی ذرات Y_m/D_{50}	نسبت فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره به دانه بندی ذرات x_m/D_{50}	نسبت طول حفره آبشستگی به دانه بندی ذرات x_s/D_{50}
میانگین مربعات خطا (RMSE)	0.058	0.063	1.125
نش - ساتکلیف (NS)	0.785	0.898	0.872
میانگین خطای نسبی مطلق (MARE)	2.12%	1.22%	1.65%

با ارزیابی سه مدل هوش مصنوعی شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) نتایج نشان داد که هر سه مدل توانایی مناسبی در تخمین پارامترهای کلیدی آبشستگی دارند، اما مدل SVM با دقت بالاتر، خطای نسبی کمتر و سازگاری بهتر با داده های آزمایشگاهی بهترین مدل معرفی شد.

از منظر هیدرولیکی، یافته های این تحقیق نشان داد که عدد فرود ذره یکی از مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر ابعاد حفره آبشستگی است، به گونه ای که با افزایش آن، هم بیشینه عمق و هم طول حفره به طور قابل توجهی افزایش می یابد. این امر نشان دهنده نقش کلیدی انرژی جریان در توسعه آبشستگی پایین دست سرریزهای مرکب است. نتایج همچنین نشان دادند که در شرایط جریان متمرکز و با

با آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای ورودی با مدل ANFIS، دیده می شود عدد فرود ذره با ۶۴ درصد بیشترین تأثیر و نسبت y_{tw}/y_h با ۸ درصد کمترین تأثیر را بر بیشینه عمق حفره آبشستگی دارد. این مقدار تأثیر عدد فرود در فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره و طول حفره نیز مشاهده می شود. با توجه به جدول های (۴)، (۵) و (۶) و مقایسه مقادیر به دست آمده از معیارهای خطای در نظر گرفته شده، روش SVM نسبت به دو مدل پیشنهادی دیگر دقیق تر است و کارایی نسبتاً بهتری دارد.

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی عملکرد مدل های هوش مصنوعی در پیش بینی ابعاد حفره آبشستگی پایین دست سرریز مرکب مثلثی-مثلثی، بر پایه داده های آزمایشگاهی به اجرا در آمد.

افزایش زمان نسبی، طول حفره آبشستگی به مرور گسترش می یابد و روند توسعه ای حفره ادامه دار خواهد بود. با تکیه بر نتایج این تحقیق، پیشنهاد می شود که در طراحی سرریزهای مرکب، به ویژه از نوع مثلثی - مثلثی، لازم است اثر عدد فرود و شرایط جریان ورودی به دقت بررسی و در نظر گرفته شود تا از ایجاد حفره های عمیق آبشستگی جلوگیری گردد. استفاده از مدل SVM به عنوان ابزار پیش بینی دقیق می تواند به طراحان سازه های هیدرولیکی کمک کند تا خطر آبشستگی را پیش از اجرای پروژه ارزیابی و تدابیر حفاظتی لازم را (مانند استفاده از کف بند حفاظتی، پله سازی یا مصالح مقاوم تر) بیندیشند. این یافته ها می توانند در بهبود ایمنی سازه های هیدرولیکی، کاهش خسارت های ناشی از آبشستگی و بهینه سازی طراحی های آبی نقش مؤثری داشته باشند. در زمینه استفاده از مدل های هوش مصنوعی نیز با توجه به پیشرفت های اخیر در حوزه یادگیری ماشین، پیشنهاد می شود در تحقیقات آبی از مدل های نوین مانند LightGBM, XGBoost یا شبکه های عصبی عمیق (Deep Learning) برای بهبود دقت پیش بینی و ارزیابی عملکرد مدل ها در تخمین آبشستگی استفاده شود.

مراجع

- Aminpour, Y., and Farhoudi, J. (2015). Investigation of local scour phenomenon downstream of stilling basins in the presence of steppe spillway. *Journal of Hydraulics*, (9)4. 25–38. (In Persian)
- Cortes, C., and Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- Chen, S. T., and Yu, P. S. (2007). Real-time probabilistic forecasting of flood stages. *Journal of Hydrology*, 340(1-2), 63-77.
- Daneshfaraz, R., Bagherzadeh, M., Esmaeeli, R., Norouzi, R., & Abraham, J. (2021). Study of the performance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens. *Water Supply*, 21 (1): 217–231.
- Daneshfaraz, R., Mehriavar, E., Aminvash, E., & Rezaie, M. (2025). Experimental investigation of scouring parameters of the downstream bed of simple and gabion rostral drops. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*; 74 (4): 335–348.
- Foddiss, M. L., Ackerer, P., Montisci, A. and Uras, G. (2015), Ann-Based Approach for the Estimation Aquifer Pollutant Source Behaviour, *Water Science and Technology, Water Supply*, 15(6), 1285-1294.
- Göğüş, M., Defne, Z., and Özkandemir, V. (2006). Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, (132) 3, 272–280.
- Govindaraju, R. S. (2000), Artificial Neural Networks in Hydrology. Ii: Hydrologic Applications, *Journal of Hydrologic Engineering*, 5, 124-137.
- Haykin, S. and Lippmann, R. (1994), Neural Networks, a Comprehensive Foundation, *International Journal of Neural Systems*, 5, 363-364.
- Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. and Mizutani, E. (1997), Neuro-Fuzzy and Soft Computing; a Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, *Prentice-Hall*.
- Khorami, E., Heidari, M., and Ghobadian, R. Estimation of downstream scour in non-cohesive materials and sensitization of factors affecting it in ski-jump using neural network and laboratory model. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, (23)86, 111-132. (In Persian)
- Li, X. and Tsai, F. T.-C. (2009), Bayesian Model Averaging for Groundwater Head Prediction and Uncertainty Analysis Using Multimodel and Multimethod, *Water resources research*, 45(9).
- Martínez, J., Reca, J., Morillas, M. T., and López, J. G. (2005). Design and calibration of a compound sharp-crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, (131)2, 112–116.
- Majedi-Asl, M., Omidpour Alavian, T., Seyfari, Y., & Kouhdaragh, M. (2024). Modeling of discharge Coefficient of nonlinear weirs with QNET and SVM methods, *Journal of Hydraulic Structures*, 10(2): 30-45.

- Mousavi, S. (2023). Estimating the scour depth of slope control structures with sharp-crested weir using artificial intelligence models. *Water Resources*, (15)55, 105-118. (In Persian)
- Nourani, V., Mousavi, S., Sadikoglu, F., & Singh, V. P. (2017). Experimental and AI-based numerical modeling of contaminant transport in porous media. *Journal of contaminant hydrology*, (205), 78-95.
- Nourani, V., Mogaddam, A. A. and Nadiri, A. O. (2008), An Ann-Based Model for Spatiotemporal Groundwater Level Forecasting, *Hydrological Processes*, (22), 5054-5066.
- Obaida A., Khattab N., & Mohammed A (2023). Scour depth downstream sharp-crested weir. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 1-11.
- Singh, R. M. and Datta, B. (2007), Artificial Neural Network Modeling for Identification of Unknown Pollution Sources in Groundwater with Partially Missing Concentration Observation Data, *Water Resources Management*, (21), 557-572.
- Rehbock, T.(1929), Discussion of Precise Measurements, *Trans of ASCE*. 93: p. 1143- 1162.
- Roshanghar, K., & Rohparvar, B. (2013). Evaluation of Artificial Intelligence Systems for Simulation of Bridge Piers Scouring in Cohesive Soils. *Water and Soil Science*, 23(3), 169-182. (In Persian)

Research Article**Experimental and numerical investigation of the effect of blockage progression on scour downstream of box culvert****Reza Bavandpoori Gilan¹, Rasool Ghobadian^{✉2}, Ali Arman³**

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

2. Water Engineering Department, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah.

(✉) Corresponding Author: r_ghobadian@razi.ac.ir

ARTICLE INFO**Received:** 2 May 2025**Revised:** 20 May 2025**Accepted:** 30 May 2025**Available Online:** 28 June 2025**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Ghobadian, R., & Arman, A., & Bavandpoori Gilan, R., (2025) .Experimental and numerical investigation of the effect of blockage progression on scour downstream of box culvert. (In Persian with English abstract). Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research. V.26, No.98, P: <https://doi.org/10.22092/idser.2025.369299.1617>

Introduction

Blockage in the culvert is a major factor in reducing its efficiency. The effect of culvert blockage intensifies by progress in the barrel. This study investigated the effect of blockage progression on scour downstream of box culvert using experimental tests, which hasn't been investigated in previous research. In order to more accurately identify the flow pattern, especially along the culvert channel and the interaction of flow and sediment downstream, numerical simulations were performed with FLOW-3D software. The findings can aid engineers in considering the effects of scour and blockage in the design of more efficient culverts.

Methodology

Using the modeling of natural phenomena in a laboratory environment, we can understand the behavior of a phenomenon in a real environment. The planned experiments were conducted in the Hydraulic Laboratory of the Water Sciences and Engineering Department at Razi University. The width, depth, and length of the flume are 0.50 m, 0.60 m, and 5.40 m, respectively. The culvert, with a length of 30 cm and a rectangular cross-section measuring 10 cm in width and 7.50 cm in height, is made of glass with a thickness of 8 mm. To ensure developed flow upon entering the culvert, it is positioned 3.60 m from the beginning of the flume. At the inlet and outlet of the culvert, a type 2 USBR transition with equal angles of convergence and divergence of 26.50 degrees is used. To control the downstream water level at the desired level, a sharp-crested weir with variable height is installed downstream of the culvert. the floor of the flume upstream of the structure is uniformly covered with concrete, and the downstream section is filled by uniform sediment with diameter of 0.85 mm and thickness of 20 cm. A total of 36 experiment were conducted with three flow rate of 2.95, 5.38 and 8.03 L/s, four downstream depth of 4.5, 10.3, 16.3 and 23 cm with three blockage scenarios 0, 0.2L and 0.32L where L is the barrel length. After reaching equilibrium in each experiment, the height of the installed weir was increased to prevent a rapid drop in water level, then the pump was turned off. After complete drainage, bed changes were recorded using a 3D scanner equipped with a Kinect camera, which had an accuracy of ± 0.2 mm. The data extracted from the camera was then prepared for plotting the necessary graphs. Finally, the bed surface was carefully leveled for the next experiment.

Results and Discussion

Based on the comparison of experimental and numerical results, it was determined that the numerical model has sufficient ability to simulate the water surface and its results are reliable. Regarding sedimentary

results, comparison of the results test Q_2 y_{t3} α_{32} β_{32} by both experimental and numerical methods showed the formation of a scour hole immediately after the end of the outlet transition and the creation of a sedimentation mound after the hole. Investigation of the effect of relative tailwater depth on scour depth in unblocked conditions showed that at a fixed relative tailwater depth, the dimensionless maximum scour depth increases with the increasing flow intensity parameter. Specifically, as the flow intensity increases from 0.45 to 1.24 at a constant tailwater depth, the flow velocity inside the culvert barrel increases, and consequently, water exits the culvert downstream with greater velocity. This increase in velocity at a fixed tailwater depth leads to higher shear stress on the bed and enhanced flow power in sediment transport and bed erosion. Regarding the effect of the progression of blockage in the culvert barrel on scour at the outlet, it can be said that when the inlet section of the culvert is blocked, the maximum scour depth downstream of the culvert decreases. The reason for this is that, in the case of fixed blockage, an eddy flow with a horizontal axis is created just behind the obstruction, causing the streamlines separate and resulting in intense turbulence in the channel, in such a way that the flow hits the culvert roof several times and then dives back toward the channel floor. This process leads to significant energy loss in the flow, reducing the flow's potential for downstream scour compared to the unblocked condition.

Conclusions

progression of the blockage in the culvert barrel can affect the flow hydraulic within it and has notable impacts on the scour of the downstream bed. Due to the impossibility of measuring some parameters, such as the Maximum scour hole depth at desired times in the laboratory environment due to high flow turbulence, the powerful FLOW-3D numerical model was used after its calibration. The results indicated that in both conditions, with and without blockage, the maximum scour depth significantly affected by the changes in flow intensity and tailwater depth. An increase in flow intensity leads to an increase in scour depth. In unblocked conditions, there is a critical relative tailwater depth for each specified flow intensity, below which scour depth decreases with increasing tailwater depth, and above which it increases. The laboratory results showed that for a fixed tailwater depth, with an increase in flow intensity, the location of maximum scour depth moved closer to the end of the culvert outlet. The blockage at the inlet section on culvert conduit, with blockage percentages of 20% and 32%, significantly affected the erosion and turbulence of the flow downstream. Compared to the unblocked condition, the presence of the blockage created turbulence in the flow, resulting in a significant drop in flow energy, which decreased the scour depth. However, as the tailwater depth increases, the impact of blockage on scour diminishes due to reduced turbulence in the channel. Given the great importance of water structures, especially culverts, in conveying flood, it is necessary for the designer to pay special attention to the issue of downstream scour when designing the culvert, because the poor performance of the culvert in conveying water during a flood can directly target the health of human communities living downstream and the efficiency of communication infrastructure.

Acknowledgment

We would like to thank the respected professors of the Department of Water Science and Engineering, Razi University, who prepared the necessary laboratory equipment for this research.

Keywords: Scour, Inlet blockage, Laboratory investigation, Culvert, Numerical Model



© 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.2025.369299.1617>

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر پیشروی انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه ای

رضا باوندپوری گیلان^۱، رسول قبادیان^{۲*}، علی آرمان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

چکیده

کالورت ها سازه های هیدرولیکی هستند که در تقاطع مجرای آب با جاده و موانع به کار می روند. انسداد کالورت از عوامل مهم کاهش کارایی و تخریب آن است. تاثیر انسداد با پیشروی در مجرای اصلی کالورت تشدید می یابد. پیشروی انسداد موجب ایجاد تغییرات اساسی در هیدرولیک جریان و به دنبال آن تغییر در آبشستگی پایین دست نسبت به حالت بدون انسداد می شود. در این تحقیق، تاثیر پیشروی انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه ای به صورت آزمایشگاهی بررسی شد، موضوعی که در تحقیقات پیشین بررسی نشده است. به منظور شناسایی دقیق تر الگوی جریان، به ویژه در طول مجرای کالورت و اندرکنش جریان و رسوب در پایین دست، شبیه سازی عددی با نرم افزار FLOW-3D به انجام رسید. آزمایش ها در سه شدت دبی ۰/۴۵، ۰/۸۳ و ۱/۲۴؛ چهار عمق پایاب نسبی ۰/۴۷، ۱/۳۷، ۲/۱۷ و ۳/۰۷ و سه پیشروی انسداد صفر، ۰/۳۲L و ۰/۵L به اجرا درآمدند که در آن L طول مجرای کالورت است. نتایج موید وابستگی عمق آبشستگی به پیشروی انسداد، شدت دبی و عمق پایاب می باشد. در غیاب انسداد، وجود یک عمق پایاب نسبی بحرانی، ابتدا باعث کاهش و سپس افزایش عمق آبشستگی در پایین دست می شود. بررسی نتایج در حالت انسداد ۳۲ درصد سطح مقطع ورودی در دو پیشروی ۳۲ و ۵۰ درصد انسداد در مجرای کالورت نشان داد که با افزایش عمق پایاب تاثیر پیشروی انسداد بر عمق آبشستگی ناچیز می شود، به طوری که در عمق پایاب نسبی ۳/۰۷، مقدار حداکثر عمق آبشستگی پایین دست در سه حالت بدون انسداد و انسداد با پیشروی های ۳۲ و ۵۰ درصد، تفاوت چندانی ندارند. یافته های تحقیق حاضر می تواند راهکارهای مناسبی برای کنترل آبشستگی در پایین دست کالورت در برابر انسداد و پیشروی آن به طراحان ارائه دهد.

واژه های کلیدی: آبشستگی انتهایی، انسداد بالادست، مدل آزمایشگاهی، کالورت، نرم افزار عددی

مقدمه

باید به عنوان یکی از تمهیدات عمده در طراحی، ساخت و بازسازی سیستم بزرگراه های سراسری هر کشور اندیشیده شود (Abt et al., 1985). انسداد سازه های زهکشی متقاطع با زیرساخت، به ویژه در مناطق شهری که با افزایش تولید زباله مواجه هستند، موضوعی مهم در پروژه های مهندسی عمران است. هنگام سیل، زباله ها روی هم انباشته می شوند و با کاهش ظرفیت انتقال سازه، پتانسیل تخریب و ایجاد

کالورت از سازه های هیدرولیکی است که برای انتقال جریان آب از زیر جاده، کانال و دیگر موانع طراحی و اجرا می شود (شکل ۱-الف). کالورت سازه هیدرولیکی ساده ای است که برای کنترل جریان و سرعت آن در جریان روباز مورد استفاده قرار می گیرد (Günal et al., 2019). اجرای کالورت هایی با طراحی مناسب به منظور عبور ایمن سیلاب

^۱ دانشجوی دکترای گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. (نویسنده مسئول: Email: r_ghobadian@razi.ac.ir)^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

اثرهای نامطلوب سیل افزایش می یابد (Iqbal & Riaz, 2024). کارایی کالورت می تواند با انسداد مقطع بالادست به چالش کشیده شود. تجمع زباله، حرکت اجسام مانند تنه درختان، رسوبات و ... به دهانه کالورت از مهمترین عوامل ایجاد انسداد آن هستند و می توانند کارایی سازه را کاهش دهند (شکل ۱-ب).



شکل ۱- الف): کالورت در تقاطع با جاده ب): انسداد ورودی کالورت (اقبال و ریاض، ۲۰۲۴)

Fig 1- A: Culvert at the intersection with a road. B: Blockage at the inlet of the culvert (Iqbal & Riaz, 2024)

در محل کالورت به دلیل انقباض جریان، سرعت متوسط در مجرای کالورت بیشتر از مجرای بالادست خواهد بود. در صورت ترکیب انقباض جریان و انسداد مقطع بالادست کالورت، افزایش سرعت جریان تشدید می شود و در مقایسه با حالت بدون انسداد، باعث تغییر در آبشستگی بستر پایین دست خواهد شد. آبشستگی، فرسایش جدار آبراهه در اثر فرسایش بستر یا جریان آب در پایین دست سازه های هیدرولیکی است (Nohani & Heidarnajad, 2014). بی توجه بودن به آبشستگی می تواند منجر به وارد شدن آسیب بیش از حد به ساختار کالورت و تخریب آن شود (Abt et al., 1996; Mendoza et al., 1983). کالورت ها در زمان زهکشی آب مازاد، تحت تاثیر خطر آبشستگی موضعی قرار می گیرند (Galán & González, 2020). با این اوصاف، با توجه به تعداد زیاد کالورت ها، بسیاری از کالورت های کوچک و متوسط بدون اقدامات حفاظتی در برابر آبشستگی اجرا می شوند (Day et al., 2001).

شبکه های حمل و نقل بر الگوی طبیعی زهکشی سطحی حوزه های آبخیز تاثیر می گذارند و روانایی با غلظت غیرطبیعی را به سمت سازه های زهکشی به ویژه کالورت

گسیل می کنند (Galán & González, 2020). بسیاری از محققان مانند امامی و شلیس (Emami & Schleiss, 2006)، سروریان و همکاران (Sorourian et al., 2014)، امینی و سلیمانی (Amini & Solaimani, 2018)، گالان و گونزالز (Galán & González, 2020)، عثمان و همکاران (Othman et al., 2021)، عثمان و همکاران (Othman et al., 2023)، عثمان و همکاران (Othman et al., 2024) و ... با اشاره به اهمیت طراحی صحیح کالورت برای جلوگیری از تخریب آن، هدررفت سرمایه و نیز تحمیل هزینه های تعمیر و نگهداری، برآورد دقیق عمق آبشستگی و مکان آن در پایین دست کالورت را ضروری دانسته اند. اوپی (Opie, 1967) ایجاد انرژی جنبشی اضافی در خروجی را که به دنبال تغییر در جریان ایجاد می شود، عامل بروز آبشستگی در کالورت دانسته است. بر اساس تحقیق مودی و همکاران (Moody et al., 2005)، فرسایش زمانی رخ می دهد که جریان روی مرزهای جامد بیش از یک مقدار آستانه، که عمدتاً به دما و نوع خاک بستگی دارد، تنش برشی وارد کند.

عمق آبشستگی پایین دست سازه های هیدرولیکی به دبی، مدت زمان سیلاب و تغییر در مقادیر پارامترهای

هیدرولیکی و هندسی بستگی دارد (Elsebaie, 2013). بوهان (Bohan, 1970) آبشستگی در خروجی کالورت را با استفاده از مدل فیزیکی مقیاس شده بررسی کرد و افزون بر ارائه یک معادله به منظور تخمین حداکثر عمق آبشستگی بر اساس عدد فرود و مدت زمان آزمایش، نشان داد که شکل مقطع کالورت تاثیر چندانی بر ابعاد چاله ندارد. چن و همکاران (Chen et al., 1970) و ایت و همکاران (Abt et al., 1987) نشان دادند که در یک دبی یکسان، کالورت جعبه‌ای با ارتفاعی معادل با قطر کالورت دایره‌ای حداکثر عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. راف و همکاران (Ruff et al., 1982) با هدف مدیریت فرسایش در امتداد طولی سواحل، آبشستگی در خروجی کالورت دایره‌ای را در بسترهای رسوبی چسبنده و غیرچسبنده بررسی کردند و چند رابطه تجربی را برای تخمین ابعاد چاله آبشستگی وابسته به قطر کالورت و دبی ارائه دادند. مندوزا و همکاران (Mendoza et al., 1983) تاثیر دیوار عمودی بر آبشستگی پایین دست کالورت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، ۵۸ درصد از حداکثر ابعاد چاله پس از ۱۵ دقیقه و ۹۵ درصد آن پس از ۵۰۰ دقیقه از لحظه شروع شکل می‌گیرد و جریان در نبود دیواره عمودی، مصالح بستر رسوبی را تا ۱۵ درصد بیشتر دچار فرسایش می‌کند. ایت و همکاران (Abt et al., 1985)، تاثیر شکل و شیب کف کالورت (صفر، ۲ و ۵ درصد) را بر آبشستگی در خروجی بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، در یک دبی ثابت با افزایش شیب از ۲ به ۵ درصد، آبشستگی افزایش یافته ولی تغییر شیب از صفر به ۲ تاثیر چندانی بر آبشستگی نداشته است. آبی‌دا و تانسن (Abida & Townsend, 1991) آبشستگی در بستر ماسه‌ای پایین دست کالورت جعبه‌ای را با فرض دبی، عرض کالورت، عمق پایاب، عرض کانال پایین دست و ویژگی‌های مصالح بستر به عنوان پارامترهای موثر بررسی و رابطه‌ای تجربی را که در تخمین عمق فرسایش در بستر سنگی مناسب بوده است به منظور استفاده در بسترهای ماسه‌ای اصلاح کرده‌اند. ایت و همکاران (Abt

et al., 1996) روش‌های تخمین حداکثر عمق آبشستگی در خروجی کالورت را به کمک آزمایش‌های تجربی توسعه دادند و یک رابطه وابسته به دبی، شعاع هیدرولیکی، زمان، پارامترهای هندسی و مصالح بستر ارائه کردند. دی و همکاران (Day et al., 2001) ضمن بررسی تاثیر عمق پایاب و مقیاس مدل بر عمق آبشستگی پایین دست کالورت در بسترهای ماسه‌ای، یک مدل جدید پیش‌بینی عمق آبشستگی با الحاق یک تابع اصلاحی برای اعمال تاثیر عمق پایاب ارائه دادند. لیریانو و همکاران (Liriano et al., 2002) با مطالعه روی آبشستگی در خروجی کالورت در جریان آشفته نشان دادند که حداکثر عمق آبشستگی و حداکثر شدت آشفته‌گی در یک چاله کاملاً توسعه یافته در یک مکان یکسان رخ می‌دهد. ریگی و بارتلمس (Rigby & Barthelmess, 2011) مکانیسم‌های انسداد کالورت و تاثیر آن بر رفتار سیل را بررسی کردند و نشان دادند یکی از پیامدهای انسداد کالورت انحراف جریان در هنگام سیلاب است و به طور قابل توجهی رفتار سیلاب را دستخوش تغییر می‌کند. سروریان و همکاران (Sorourian et al., 2014) با تاکید بر اهمیت تاثیر انسداد به عنوان یک فاکتور مهم، تاثیر انسداد بخشی از مقطع ورودی را بر آبشستگی در پایین دست کالورت جعبه‌ای در جریان غیرماندگار بررسی کردند. نتایج نشان داده است که ۸۸ تا ۹۸ درصد از حداکثر عمق آبشستگی در شاخه بالارونده هیدروگراف رخ می‌دهد. سروریان و همکاران (Sorourian et al., 2015) ارتباط آبشستگی با درصد انسداد و ویژگی‌های جریان ماندگار را در پایین دست کالورت جعبه‌ای مطالعه کردند و نشان دادند حداکثر عمق و مساحت ناحیه آبشستگی بستر در حالت وجود انسداد مقطع، بیشتر از حالت غیرمسدود است. نجف‌زاده (Najafzadeh, 2015) و نجف‌زاده و کارگر (Najafzadeh & Kargar, 2019) از روش شبکه عصبی، الگوریتم زنبور و برنامه‌نویسی بیان ژن برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست کالورت استفاده کردند. گالان و گونزالز (Galán & González, 2020) آبشستگی

غیرماندگار است. برخلاف نظر برخی محققان که بروز انسداد را بر عملکرد کالورت در حین سیلاب بی تاثیر دانسته اند نتایج تحقیقات علمی اهمیت آن را در مناطق خاص تایید می کنند. گروه باران و رواناب جامعه مهندسين آب استرالیا (ARR) اهمیت مطالعه انسداد در کالورت را به رسمیت شناخته و دستورالعمل هایی برای در نظر قرار گرفتن در زمان طراحی آن تدوین کرده است. اخیراً رویکرد استفاده از اطلاعات بصری برای تفسیر انسداد به عنوان بعد جدید مسئله در نظر گرفته می شود (Iqbal & Riaz, 2024). این محققان ضمن مطالعه پیشرفت ها، چالش ها و فرصت ها در مطالعه انسداد سازه های هیدرولیکی، بر نیاز به رویکردهای داده محور و همچنین همکاری بین رشته ای تاکید می کنند.

بروز انسداد در کالورت از طریق کاهش سطح مقطع عبور جریان موجب ایجاد اختلال در نقش اساسی آن خواهد شد. اگر حرکت عامل انسداد به ورودی کالورت محدود نشود و در مجرا هم پیشروی کند، تاثیر آن بر مسئله برجسته می شود. پیشروی انسداد باعث ایجاد تغییرات اساسی در هیدرولیک مسئله و آبشستگی در خروجی نسبت به حالت بدون انسداد می شود. افزایش پیشروی انسداد، کاهش بیشتر سطح مقطع عبور جریان و افزایش مقاومت عامل انسداد در برابر حرکت را به همراه خواهد داشت، در این حالت، کارایی کالورت به شدت تحت تاثیر قرار می گیرد و پایداری سازه و شبکه ارتباطی متقاطع با آن دچار چالش جدی خواهد شد. این موضوع می تواند به تخریب کامل سازه و تحت تاثیر قرار گرفتن زندگی ساکنان مناطق پایین دست منجر شود. علی رغم آمار قابل توجه تحقیق در زمینه مطالعه تاثیر انسداد بر آبشستگی در خروجی کالورت، تمرکز منابع فقط به بررسی اثر انسداد ثابت معطوف است و تاثیر طول پیشروی انسداد بررسی نشده است. نقص موجود، لزوم مطالعه دقیق تاثیر پیشروی انسداد را بر آبشستگی در خروجی کالورت به منظور ایمن سازی سازه، حفاظت از جوامع بشری ساکن در پایین دست و نیز جلوگیری از تضعیف منابع مالی تایید

پایین دست کالورت را یک فرآیند پیچیده و تحت تاثیر فاکتورهای متعدد توصیف کردند و هدف اصلی از اجرای تحقیق مذکور را تشخیص موثرترین پارامترها بر ابعاد چاله آبشستگی دانستند. بر اساس نتایج به دست آمده، تاثیر دیواره های بال شکل^۱، انسداد ورودی، عمق پایاب و شکل کالورت بر چاله آبشستگی تایید شده است. ژانگ و وو (Zhang & Wu, 2019) با اشاره به نبود رابطه ای واحد به منظور پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی در مراجع، آبشستگی بیش از حد در خروجی کالورت را یکی از دلایل اصلی تخریب آن دانسته اند و یک رابطه تجربی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی با لحاظ پارامترهای هندسی مقطع ارائه دادند. طاه و همکاران (Taha et al., 2020) تاثیر انسداد بر سطح آب و ابعاد چاله آبشستگی پایین دست کالورت جعبه ای را با استفاده از مدل FLOW-3D بررسی کردند و یک رابطه برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه دادند. نتایج تحقیق نشان داده است که انسداد کالورت در ورودی به میزان ۷۰ درصد، باعث افزایش ۲/۳ برابر در عمق آب بالادست و ۳ برابر در سرعت میانگین نسبت به حالت شاهد شده است.

عثمان و همکاران (Othman et al., 2023) عملکرد مدل عددی FLOW-3D و مدل های جایگزین را با به کارگیری روش Box-Behnken در پیش بینی عمق آبشستگی و موقعیت آن در پایین دست کالورت جعبه ای با هدف بهینه سازی طراحی آن مطالعه کردند. مقادیر بهینه پارامترهای مورد مطالعه در تحقیق را می توان به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی ایمن کالورت در برابر آبشستگی استفاده کرد. عثمان و همکاران (Othman et al., 2024) کارایی مدل عددی FLOW-3D را در پیش بینی عمق آبشستگی و موقعیت ایجاد آن پایین دست کالورت های دایره ای در جریان ماندگار و غیرماندگار ارزیابی کردند. مقایسه نتایج نشان می دهد که پیش بینی های مدل عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی در هر دو حالت جریان ماندگار و

¹ Wing Walls

می‌کند. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع و نبود منابع کافی، هدف از این پژوهش بررسی تاثیر پیشروی انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت به کمک شبیه‌سازی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی خواهد بود.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

برای بررسی مسئله مورد بحث در این تحقیق از مدل‌سازی آزمایشگاهی استفاده گردید. آزمایش‌های طرح شده در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه رازی به اجرا درآمدند. عرض، عمق و طول فلوم به ترتیب ۵۰/۰، ۶۰/۰ و ۴۰/۵ متر است. به منظور آرام کردن جریان ورودی، در ابتدای فلوم یک مخزن فلزی مجهز به صفحات آرام کننده جریان قرار داده شد. کالورت با مقطع مستطیل و با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۰، ۱۰ و ۷/۵ سانتیمتر از جنس شیشه به ضخامت ۸ میلیمتر ساخته شد. به منظور حصول اطمینان از توسعه یافتگی جریان هنگام ورود به سازه، کالورت در فاصله ۳/۶۰ متر از ابتدای فلوم جانمایی شد. در ورودی و خروجی کالورت از تبدیل تیپ USBR۲ با زاویه همگرایی و واگرایی یکسان برابر با ۲۶/۵ درجه استفاده شد. آب سیستم با استفاده از یک پمپ گریز از مرکز ۱۶ کیلووات تامین شد که روی مخزن زمینی با حجم ۱۲ مترمکعب قرار دارد. برای کنترل سطح آب پایین دست در تراز دلخواه، یک سرریز لبه تیز با ارتفاع متغیر در انتهای پایین دست نصب شد. با توجه به اینکه هدف از پژوهش، بررسی آبشستگی پایین دست در اثر پیشروی انسداد به مجرای کالورت است، کف فلوم در بالادست سازه به صورت یکنواخت با بتن پوشش و پایین دست سازه نیز با رسوب یکنواخت به قطر ۰/۸۵ میلیمتر و ضخامت ۲۰ سانتیمتر بالا آورده شد. در مجموع، ۳۶ آزمایش با سه دبی ۵/۳۸، ۲/۹۵ و ۸/۰۳ لیتر بر ثانیه و چهار عمق پایاب ۴/۵، ۱۰/۳، ۱۶/۳ و

۲۳ سانتی‌متر اجرا گردید. در تمامی آزمایش‌ها زمان کافی برای حصول اطمینان از برقراری تعادل بستر لحاظ شد. با توجه به اینکه استقرار انسداد در طبیعت به دهانه ورودی کالورت محدود نمی‌شود، از این رو انسدادهایی با پیشروی ۰/۳۲L و ۰/۵L در شرایط مختلف هیدرولیکی طراحی و نتایج بررسی شد. مشخصات آزمایش‌های اجرا شده به صورت خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است که در آن h ارتفاع مقطع کالورت، y_t عمق پایاب و اندیس‌های i و z در α_i و β_z به ترتیب نسبت ارتفاع انسداد به ارتفاع مقطع و نسبت طول پیشروی انسداد به طول مجرای کالورت هستند. لازم است گفته شود با توجه به مقدار حداکثر دبی در دسترس، فضای ارتفاعی فلوم، قطر رسوب مورد استفاده و ...، معیار انتخاب مقادیر پارامترهای y_t ، α و β و تشکیل ترکیب‌های مختلف از آنها، ایجاد اطمینان از بروز آبشستگی در پایین دست است. در این خصوص ابتدا چند آزمایش محدود با استفاده از مدل عددی FLOW-3D به مدت زمان محدود اجرا و پس از آن به صورت عملی در محیط آزمایشگاه اجرا گردید.

در هر آزمایش، دبی ورودی به فلوم با استفاده از دبی‌سنج التراسونیک با حداکثر خطای ± 1 درصد اندازه‌گیری و به کمک سرریز مثلی لبه تیز با زاویه راس ۵۳ درجه، که روی مخزن خروجی در پایین دست فلوم قرار دارد، صحت‌سنجی شد. عمق جریان به کمک عمق‌سنج متحرکی که روی لبه فلوم نصب شده است، با خطای ± 1 درصد اندازه‌گیری شد. پس از به تعادل رسیدن هر آزمایش ارتفاع سرریز تعبیه شده به منظور جلوگیری از افت سریع سطح آب افزایش داده شد و سپس پمپ خاموش شد. پس از زهکشی کامل تغییرات بستر به کمک پوشگر سه بعدی مجهز به دوربین Kinect که دقت آن ± 1 درصد است برداشت شد. داده‌های استخراج شده از دوربین برای رسم کردن نمودارهای لازم آماده‌سازی شد. سطح بستر نیز برای آزمایش بعدی به دقت تسطیح گردید.

جدول ۱- مشخصات آزمایش های اجرا شده

Table 1- characteristics of the performed tests

ردیف	نماد	شدت دبی	y _t /h	ردیف	نماد	شدت دبی	y _t /h
Row	Test	DI	y _t /h	Row	Test	DI	y _t /h
۱	Q ₁ y _{t1} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۰/۶	۱۹	Q ₂ y _{t3} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۲/۱۷
۲	Q ₁ y _{t2} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۱/۳۷	۲۰	Q ₂ y _{t4} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۳/۰۷
۳	Q ₁ y _{t3} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۲/۱۷	۲۱	Q ₂ y _{t1} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۰/۶
۴	Q ₁ y _{t4} α ₀ β ₀	۰/۴۶	۳/۰۷	۲۲	Q ₂ y _{t2} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۱/۳۷
۵	Q ₂ y _{t1} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۰/۶	۲۳	Q ₂ y _{t3} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۲/۱۷
۶	Q ₂ y _{t2} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۱/۳۷	۲۴	Q ₂ y _{t4} α ₂₀ β ₅₀	۰/۸۴	۳/۰۷
۷	Q ₂ y _{t3} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۲/۱۷	۲۵	Q ₂ y _{t1} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۰/۶
۸	Q ₂ y _{t4} α ₀ β ₀	۰/۸۴	۳/۰۷	۲۶	Q ₂ y _{t2} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۱/۳۷
۹	Q ₃ y _{t1} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۰/۶	۲۷	Q ₂ y _{t3} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۲/۱۷
۱۰	Q ₃ y _{t2} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۱/۳۷	۲۸	Q ₂ y _{t4} α ₃₂ β ₀	۰/۸۴	۳/۰۷
۱۱	Q ₃ y _{t3} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۲/۱۷	۲۹	Q ₂ y _{t1} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۰/۶
۱۲	Q ₃ y _{t4} α ₀ β ₀	۱/۲۵	۳/۰۷	۳۰	Q ₂ y _{t2} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۱/۳۷
۱۳	Q ₂ y _{t1} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۰/۶	۳۱	Q ₂ y _{t3} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۲/۱۷
۱۴	Q ₂ y _{t2} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۱/۳۷	۳۲	Q ₂ y _{t4} α ₃₂ β ₃₂	۰/۸۴	۳/۰۷
۱۵	Q ₂ y _{t3} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۲/۱۷	۳۳	Q ₂ y _{t1} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۰/۶
۱۶	Q ₂ y _{t4} α ₂₀ β ₀	۰/۸۴	۳/۰۷	۳۴	Q ₂ y _{t2} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۱/۳۷
۱۷	Q ₂ y _{t1} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۰/۶	۳۵	Q ₂ y _{t3} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۲/۱۷
۱۸	Q ₂ y _{t2} α ₂₀ β ₃₂	۰/۸۴	۱/۳۷	۳۶	Q ₂ y _{t4} α ₃₂ β ₅₀	۰/۸۴	۳/۰۷

آنالیز ابعادی

بر پدیده فیزیکی معین منجر می شود. پارامترهای تاثیرگذار بر عمق آبشستگی پایین دست کالورت در شرایط وجود انسداد را می توان با رابطه ۱ معرفی کرد:

تحلیل ابعادی^۱ یکی از مهم ترین ابزارهای مطالعه جریان سیال است و به کمک نوعی روش فشرده کردن، به رفع پیچیدگی و کاستن از تعداد متغیرهای تجربی موثر

$$d_{s,max} = \psi(B, S_0, L, S_{oc}, b, h, \alpha, \beta, y_u, v_u, y_t, d_{50}, G_s, \sigma_g, \varphi, p, S_{fd}, \rho, \mu, g) \quad (1)$$

ضریب شکل ذرات رسوب، ρ جرم حجمی سیال، μ لزوجت دینامیکی سیال و g شتاب ثقل است. با توجه به اینکه تنها از یک کالورت با مشخصات ثابت و یک ذره رسوب یکنواخت ($\sigma_g \leq 1/3$) استفاده می شود، بررسی تاثیر پارامترهای مرتبط با این عوامل حذف می شود. با توجه به روباز بودن جریان و ترکیب پارامترهای عرض کف، شتاب ثقل، عمق و سرعت جریان در بالادست با استفاده از اصل

در این رابطه: $d_{s,max}$ حداکثر عمق آبشستگی، B عرض کف فلوم، S_{oc} شیب کف فلوم، L طول کالورت، S_{fd} شیب کف کالورت، b عرض مجرای کالورت و h ارتفاع آن، α درصد انسداد مقطع، β درصد پیشروی انسداد در مجرا، y_u و v_u عمق و سرعت جریان در بالادست، y_t عمق جریان در پایاب، d_{50} متوسط قطر ذره رسوب، G_s چگالی ویژه ذرات رسوبی، σ_g انحراف معیار مصالح کف، φ زاویه اصطکاک داخلی مصالح کف، p تخلخل مصالح کف، S_{fd}

¹ dimensional analysis

استخراج برخی پارامترهایی که در محیط آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری نیستند از مدل عددی FLOW-3D پس از واسنجی آن با نتایج آزمایشگاهی استفاده شد. در رابطه‌های ۳ تا ۸، معادلات ریاضی حاکم بر مسئله ارائه شده است (Valizadeh et al., 2024).

$$\frac{dp}{dt} + \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی سیال، t زمان و $\bar{u}$ ، $\bar{v}$ و $\bar{w}$ سرعت جریان به ترتیب در راستای محورهای x ، y و z هستند. در سیال تراکم‌ناپذیر، معادله پیوستگی جریان به صورت رابطه ۴ بازنویسی می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \Delta \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) \quad (5\text{-الف})$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \Delta \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} \right) \quad (5\text{-ب})$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \Delta \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{w}}{\partial z} \right) \quad (5\text{-ج})$$

$$\bar{u}_i \bar{u}_j = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\tau_{i,j} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

در این رابطه‌ها: μ_t و ν_t به ترتیب لزوجت‌های گردابی دینامیکی و سینماتیکی هستند و طبق رابطه $\mu_t = \rho \nu_t$ به یکدیگر ارتباط داده می‌شوند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی از مدل FLOW-3D استفاده شد، بدین منظور ابتدا هندسه فلوم و کالورت در نرم‌افزار AutoCAD ایجاد و در مدل عددی فراخوانی شد. شرایط استفاده شده در مرزهای موجود در مدل مذکور در جدول (۲) و تصویرهای مربوط و هندسه ایجاد شده در شکل (۳) ارائه شده است.

پی-باکینگهام، گروه‌های بدون بعد را می‌توان به شکل رابطه ۲ بازنویسی کرد:

$$\frac{d_{s,max}}{h} = \psi(\alpha, \beta, \frac{y_t}{h}, DI) \quad (2)$$

که در آن DI شدت دبی است و به صورت $DI = \frac{Q}{b\sqrt{gh^3}}$ تعریف می‌گردد.

مدل عددی

نرم‌افزارهای مختلفی در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی توسعه یافته‌اند. صرفه‌جویی در زمان، هزینه‌های عملیاتی کم، سهولت بیشتر و دستیابی به عملکرد آزمایشی از مهمترین مزایای شبیه‌سازی عددی نسبت به رویکرد تجربی است (Bui et al., 2020). در این تحقیق، به منظور

رابطه‌های (۵-الف) تا (۵-ج) به ترتیب معادلات ناویر-استوکس در جهت‌های x ، y و z هستند. بخش آخر در رابطه‌های مذکور تنش‌های رینولدزی هستند که به صورت رابطه ۶ بیان می‌شوند:

$$\rho \frac{d\bar{u}_i}{dt} = F_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \Delta \bar{u}_i - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، u_i و u_j به ترتیب معرف سرعت جریان در جهت‌های x_i و x_j ، $\bar{P}$ فشار و μ لزوجت دینامیکی سیال است. برای حل آشفتگی جریان معمولاً از فرضیه بوزینسک استفاده می‌شود که گرادیان‌های سرعت را به کمک ویسکوزیته گردابی به تنش‌های رینولدزی مرتبط می‌سازد (رابطه‌های ۷ و ۸).

جدول ۲- شرایط مرزی استفاده شده در مرزهای مدل عددی FLOW-3D

Table 2- Boundary conditions used in the boundaries of the FLOW-3D numerical model

مرز	X _{min}	X _{max}	Y _{min}	Y _{max}	Z _{min}	Z _{max}
سطح آزاد	دیوار	دیوار	دیوار	تراز سطح آب	دبی ورودی	شرط مرزی

تحلیل حساسیت مدل عددی
برای حصول اطمینان از نبود وابستگی نتایج مدل های عددی به پارامترهای کلیدی مانند ابعاد شبکه محاسباتی ایجاد شده و مدل حل آشفتگی لازم است حساسیت نتایج به این موارد تحلیل شود. بدین منظور حساسیت مدل

FLOW-3D به شبکه بندی فضای محاسباتی و مدل آشفتگی بررسی و نتایج در قالب جدول (۳) ارائه گردید و شاخص های آماری جذر میانگین مربعات خطا^۱ و میانگین خطای مطلق^۲ برای انتخاب گزینه برتر استفاده شد.

جدول ۳- حساسیت نتایج نرم افزار عددی به مدل حل آشفتگی و اندازه شبکه محاسباتی

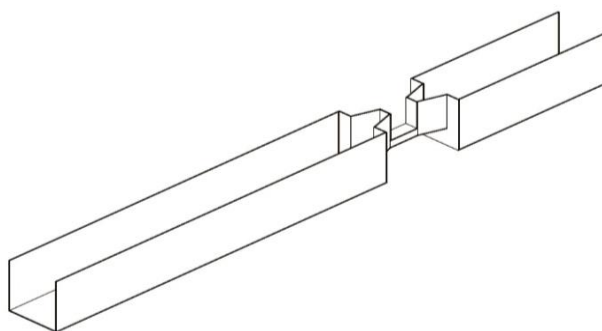
Table 3- sensitivity of numerical software results to the turbulence solution model and computational grid size

بررسی حساسیت نتایج به مدل آشفتگی			
شاخص های آماری		مدت زمان شبیه سازی	مدل آشفتگی
MAE	RMSE	(ثانیه)	
۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۱۵۱۲۰۰	RNG
۰/۰۲۹	۰/۰۲۳	۱۸۷۲۰۰	K-ε

بررسی حساسیت نتایج به اندازه شبکه محاسباتی			
شاخص های آماری		مدت زمان شبیه سازی	اندازه شبکه (میلی متر)
MAE	RMSE	(ثانیه)	
۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۲	۳۴۵۶۰۰	کوچک (۴)
۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱۸	۱۵۱۲۰۰	متوسط (۶)
۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۵	۱۲۶۰۰۰	بزرگ (۸)

با توجه به نتایج مربوط به تحلیل حساسیت نتایج مدل عددی به ابعاد شبکه محاسباتی و مدل آشفتگی و دقت در شاخص های آماری محاسبه شده که در جدول (۳) ارائه شد، شبکه محاسباتی و مدل آشفتگی به ترتیب ۶ میلیمتر و RNG انتخاب گردید. نمای کلی فلوم و کالورت در مدل آزمایشگاهی و عددی، شرایط مرزی و شبکه بندی فضای محاسباتی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

برای اطمینان یافتن از کافی بودن زمان شبیه سازی در مدل عددی مورد استفاده، منحنی تعادل فرسایش و رسوب گذاری مربوط به تست $Q_{21} y_{13} \alpha_{22} \beta_{22}$ در شکل (۳) نمایش داده شده است.



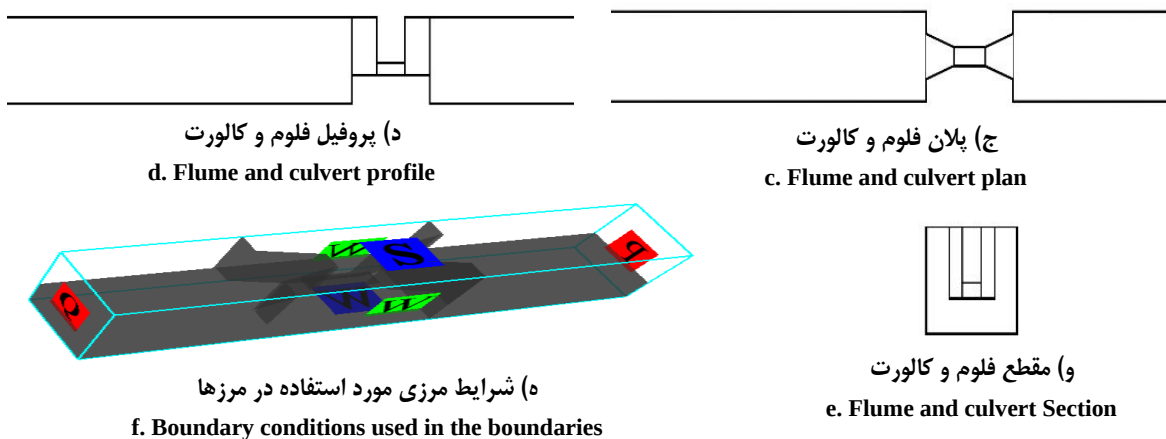
ب) نمای سه بعدی فلوم و سازه
b. 3D view of flume and structure



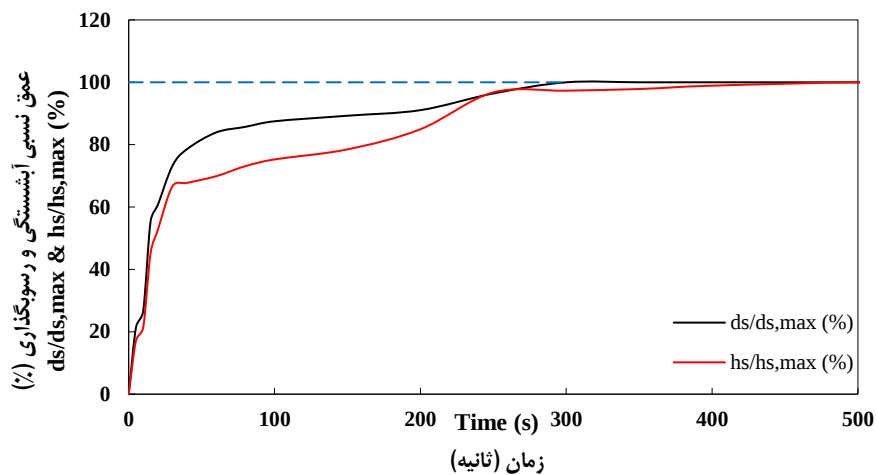
الف) نمای کلی فلوم آزمایشگاهی
a. Overview of the laboratory flume

¹ Root Mean Square Error, RMSE

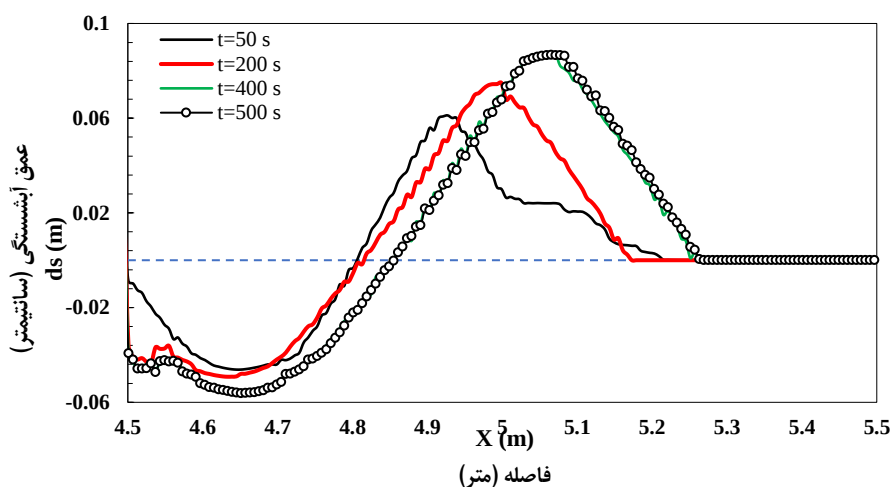
² Mean Absolute Error, MAE



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و هندسه مدل عددی به همراه شرایط مرزی
Fig. 2- View of the laboratory flume and geometry of the numerical model with the boundary conditions



شکل ۳- تغییرات عمق آبشستگی و رسوبگذاری مربوط به تست $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$
Fig. 3- Changes in scour depth and sedimentation related to test $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$



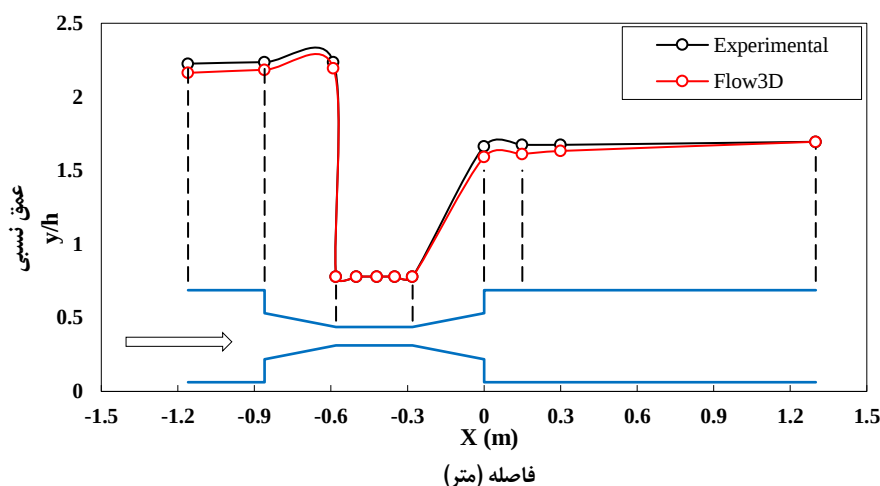
شکل ۴- تغییرات فرسایش و رسوبگذاری بستر وابسته به زمان در خروجی کالورت در تست $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$
Fig. 4- Time-dependent changes in bed erosion and sedimentation in culvert outlet in the test $Q_2 y_{12} a_{22} \beta_{22}$

همانطور که در شکل (۳) دیده می شود، بیش از ۹۰ درصد از فرسایش و رسوبگذاری تا زمان ۳۰۰ ثانیه رخ داده است ولی روند شبیه سازی به منظور حصول اطمینان از به تعادل رسیدن تا ۵۰۰ ثانیه ادامه داده شد. میزان فرسایش و رسوبگذاری در زمان ۴۰۰ ثانیه پس از آغاز مدلسازی در نرم افزار FLOW-3D به ترتیب 0.0007 و 0.0011 متر در ثانیه محاسبه شد که مقدار ناچیز آن نشان می دهد این فرآیندها به تعادل رسیده اند. به منظور بررسی دقیق تر نیمرخ طولی چاله فرسایش و تپه رسوبگذاری در امتداد خط مرکزی فلووم در شکل (۴) رسم شده است. همان گونه که مشاهده

نتایج و بحث

واسنجی مدل عددی

برای واسنجی مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی مربوط به تست $(Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32})$ استفاده شد. در شکل (۵)، نیمرخ طولی سطح آب محاسبه شده و اندازه گیری شده در محور کانال به منظور مقایسه نشان داده شده است.

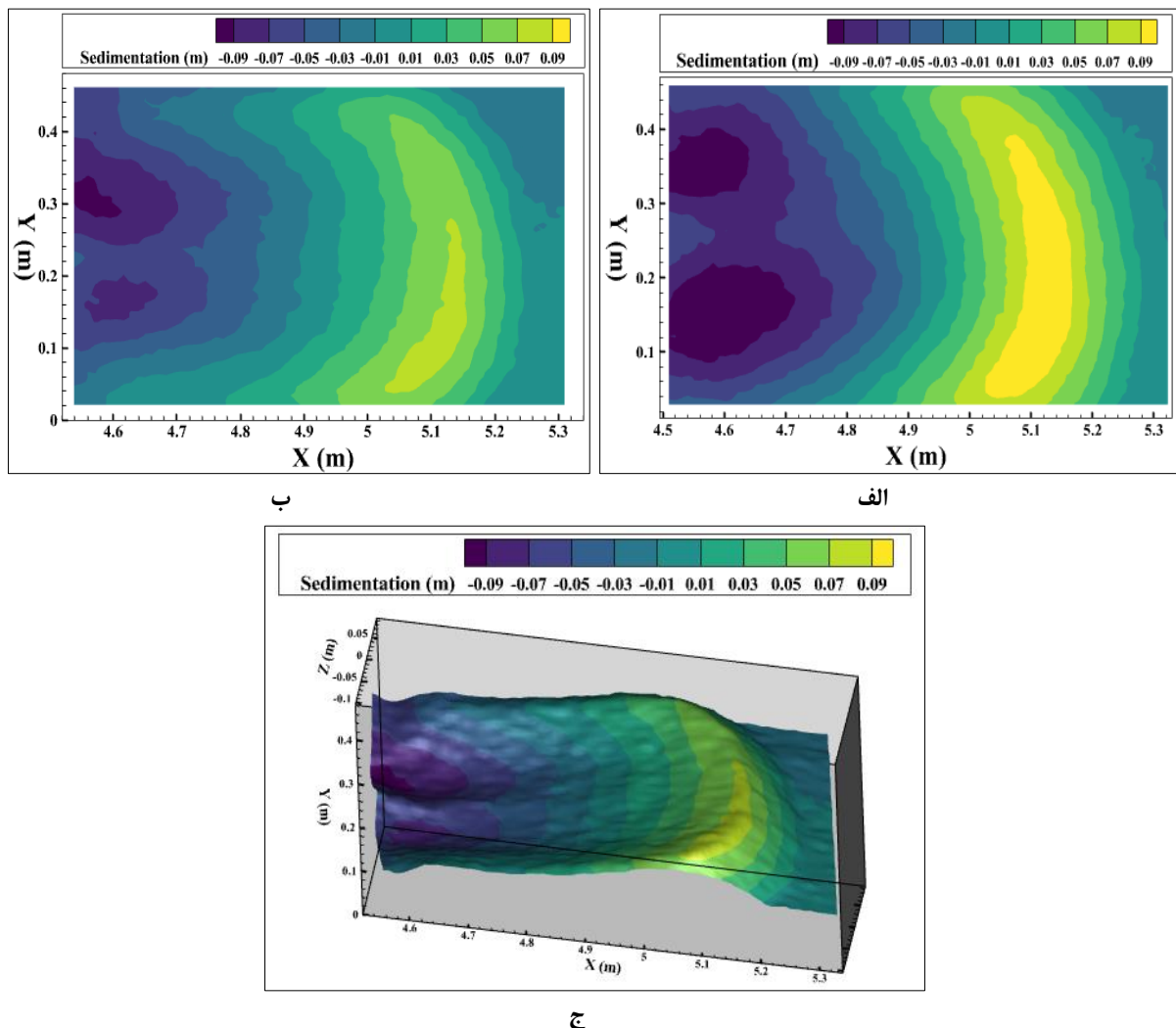


شکل ۵- نیمرخ طولی سطح آب اندازه گیری شده و محاسبه شده در تست $Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$

Fig. 5- Longitudinal profile of the water surface measured and simulated in the test $Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$

می شود که محاسبات عددی نیز این موضوع را تایید می کند. در طول تبدیل خروجی به دلیل افزایش سطح مقطع و کاهش سرعت جریان، تراز سطح آب مشاهداتی و عددی روند افزایشی را نشان می دهند. در انتهای تبدیل خروجی تراز سطح آب مشاهداتی و عددی روند صعودی دارند که می تواند ناشی از رژیم جریان بالایی و جریان فوق بحرانی در این محل باشد. در شکل (۶)، الگوی فرسایش حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در تست $Q_2 y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$ نشان داده شده است.

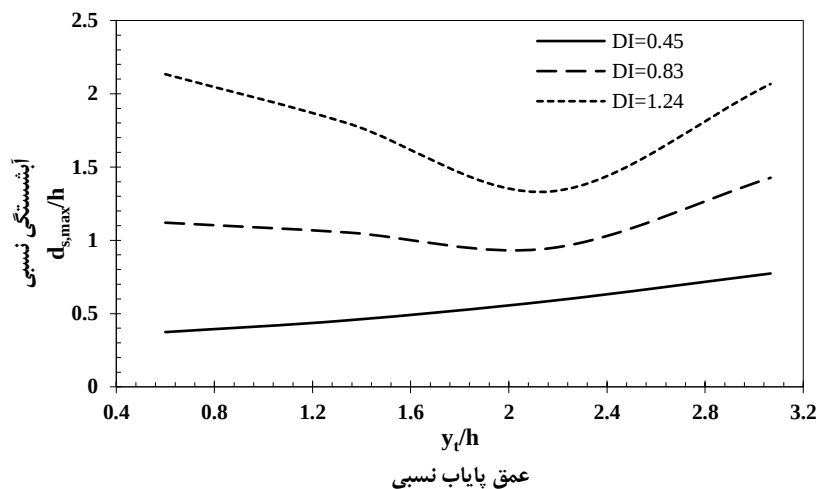
همانطور که شکل (۵) نشان می دهد، مدل FLOW-3D توانایی کافی در شبیه سازی سطح آب در فلووم و کالورت را دارد و می توان به دقت نتایج آن اعتماد کرد. حداکثر اختلاف رقوم سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در آزمایش موردنظر $1/9$ سانتی متر است که کمتر از ۱۰ درصد عمق جریان است و نشان از دقت مدل عددی و واسنجی صحیح آن دارد. بلافاصله بالادست ورودی کالورت مشاهدات آزمایشگاهی و سطح آب مدلسازی شده پس زدگی سطح آب را نشان می دهند. بعد از ورودی کالورت سطح آب مقداری منقبض



شکل ۶- الگوی فرسایش و رسوب گذاری در تست $Q_{21} Y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$, الف) آزمایشگاهی ب) مدل عددی ج) نمای سه بعدی
Fig. 6- Erosion and sedimentation pattern for the test $Q_{21} Y_{13} \alpha_{32} \beta_{32}$, a: Laboratory, b: numerical model, c: 3D

همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می شود، در انتهای تبدیل خروجی یک چاله رسوبی تشکیل شده است. ذرات رسوب شسته شده از این چاله یک تپه رسوب گذاری را بلافاصله بعد از آن تشکیل می دهد. در این آزمایش حداکثر ارتفاع تپه رسوب گذاری و عمق چاله فرسایش برای نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی به ترتیب ۹ و ۹ سانتی متر و ۷ و ۸ سانتی متر از سطح اولیه بستر است. موقعیت تپه رسوب گذاری و چاله فرسایشی آزمایشگاهی و مدل عددی تقریباً بر هم منطبق هستند. صحت سنجی نشان از توانایی مدل عددی در شبیه سازی الگوی جریان و فرسایش در انتهای سازه کالورت مورد بررسی دارد.

آبشستگی پایین دست در حالت بدون انسداد نمودار تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی اندازه گیری شده در حالت بدون انسداد به ازای عمق های پایاب نسبی و شدت دبی مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. لازم است گفته شود مقادیر پارامتر DI برابر با ۰/۴۵، ۰/۸۳ و ۱/۲۴ به ترتیب متناظر با دبی های ۲/۹۵، ۵/۳۸ و ۸/۰۳ لیتر بر ثانیه است.



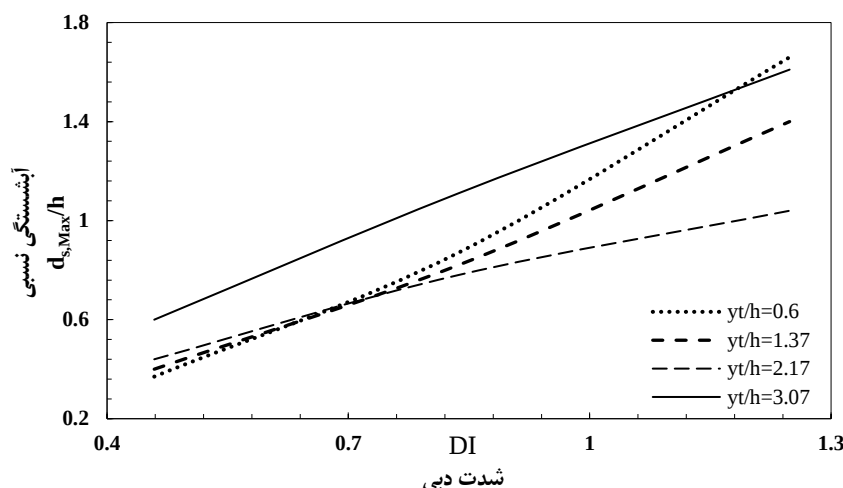
شکل ۷- تغییرات عمق آبستگي در برابر عمق پایاب در حالت بدون انسداد
Fig. 7- Variation of scour depth against tailwater depth in the unblock condition

مشاهدات آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی در این شدت دبی نشان داد در ابتدا با افزایش عمق پایاب، عمق جریان در محدوده تبدیل خروجی نیز افزایش می یابد و خروجی کالورت به سمت مستغرق شدن هدایت می شود. در این حالت، جریان خروجی از کالورت مانند جت ورودی به مخزن پر عمل می کند که سرعت آن کاهش می یابد، در نتیجه مقدار فرسایش تا حدودی کاهش می یابد. در عمق های پایاب نسبی بیشتر از ۲/۱۷ جریان خروجی از کالورت به شدت مستغرق شده است، سطح مقطع موثر جریان خروجی از کالورت کاهش یافته است و بردارهای سرعت جریان خروجی در اثر فشار آب لایه های بالایی بیشتر به سمت کف حرکت می کند و بستر را بیشتر مورد هجوم و فرسایش قرار می دهند. این عملکرد مانند جریان پایین دست دریاچه کشویی با درجه استغراق بالاست که در آن انقباض خطوط جریان، کاهش سطح مقطع موثر جت خروجی و انحراف بیشتر بردارهای سرعت به سمت کف رخ می دهد. در واقع کاهش سطح مقطع جریان در محل کالورت باعث افزایش ناگهانی سرعت و ایجاد جریان مشابه جت افقی شده است. جریان خروجی از کالورت با سرعت زیاد و تداخل آن با جریان برگشتی موجب ایجاد جریان ثانویه و تغییر در اندرکنش آن با ذرات رسوبی پایین دست می شود. این تغییر، گردابه های قابل توجهی در

همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است در عمق پایاب نسبی ثابت، با افزایش پارامتر شدت دبی مقدار حداکثر عمق آبستگي نسبی بیشتر می شود. در واقع با افزایش شدت دبی از ۰/۴۵ تا ۱/۲۴ در یک عمق پایاب نسبی ثابت سرعت جریان داخل مجرای کالورت بیشتر می شود و به تبع آن جریان با سرعت بیشتر از مجرای کالورت به سمت پایین دست خارج می شود. افزایش سرعت در عمق پایاب ثابت، افزایش مقدار تنش برشی بستر و افزایش قدرت جریان در انتقال ذرات رسوب و فرسایش بستر را به همراه دارد. نتایج مدل سازی عددی نشان می دهد به ازای $y_t/h=1/37$ مقدار تنش برشی اعمال شده به بستر در شروع شبیه سازی برای $DI=0/46$ برابر با ۱/۲ نیوتن بر مترمربع و به ازای $DI=0/84$ برابر با ۲/۲ نیوتن بر مترمربع است. افزایش تنش برشی عامل اصلی فرسایش بیشتر بستر بلافاصله بعد از تبدیل خروجی سازه کالورت است.

در منحنی های نشان داده شده در شکل (۷)، یک نقطه عطف در دو مقدار شدت دبی ۰/۸۳ و ۱/۲۴ به وضوح دیده می شود. به عبارتی، با افزایش مقدار شدت دبی، تقعر در نمودار و نقطه عطف آن نمایان تر می شود. برای مثال، در شدت دبی ۱/۲۴ به ازای افزایش عمق پایاب نسبی از ۰/۸ تا ۲ عمق آبستگي نسبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

مسیر جریان تشکیل می‌دهد و افزایش آبشستگی و افزایش تنش برشی وارد بر ذرات بستر و برخاستن ذرات را به همراه دارد. معلق شدن ذرات بستر به دلیل گردابه‌های ایجاد شده موجب حمل آنها به سمت پایین دست و تشکیل حفره آبشستگی و به دنبال آن تپه رسوب گذاری شده است. در شکل (۸)، نمودار تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در برابر شدت دبی در حالت بدون انسداد به ازای مقادیر مختلف عمق پایاب نسبی نمایش داده شده است.



شکل ۸- تغییرات عمق آبشستگی در برابر شدت دبی در حالت بدون انسداد

Fig. 8- Variation of scour depth against flow intensity in the unblocked condition

است. به ازای $y_t/h=2/17$ که تقریباً متناظر با نقطه تقعر نمودارهای نشان داده شده در شکل است، تغییرات شدت دبی کمترین تاثیر را در آبشستگی پایین دست دارد. به عبارتی، اگر در عمل عمق پایاب نسبی در این محدوده کنترل شود، تغییرات دبی سیلاب تاثیر چندانی بر تغییر فرسایش پایین دست کالورت نمی‌گذارد.

علاوه بر پارامتر حداکثر عمق آبشستگی، فاصله محل وقوع حداکثر فرسایش از سازه نیز مهم است، زیرا اگر حداکثر عمق آبشستگی در نزدیکی سازه رخ دهد، تخریب آن محتمل تر است (Galán & González, 2020). بنابر نتایج آزمایشگاهی در یک عمق پایاب ثابت با افزایش دبی جریان، نقطه وقوع حداکثر عمق آبشستگی به انتهای تبدیل خروجی نزدیک تر می‌شود. فاصله طولی نقطه مذکور از انتهای تبدیل خروجی در آزمایش‌های بدون انسداد مجرای کالورت در جدول ۴ ارائه شده است.

همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در حالت کلی به ازای یک عمق پایاب نسبی ثابت با افزایش پارامتر شدت دبی به دلیل افزایش دبی جریان و افزایش اختلاف عمق جریان بالادست و پایین دست کالورت، سرعت جریان خروجی از کالورت افزایش و به تبع آن مقدار حداکثر عمق فرسایش در پایین دست نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نمودارها نشان می‌دهند که بیشترین مقدار فرسایش در شدت دبی $1/24$ و به ازای اعماق نسبی حداکثر $3/07$ رخ می‌دهد. در عمق نسبی $0/6$ خروجی کالورت به صورت آزاد عمل می‌کند و به دلیل کم بودن سطح مقطع جریان، سرعت جریان افزایش می‌یابد و حداکثر فرسایش مشاهده می‌شود. از طرفی، به ازای $y_t/h=3/07$ همان گونه که پیش تر نیز اشاره شد، پایین دست کالورت به شدت مستغرق شده است و فشار آب لایه‌های بالایی بردارهای سرعت را به سمت بستر بیشتر منحرف کرده و در نتیجه فرسایش بیشتری قابل مشاهده

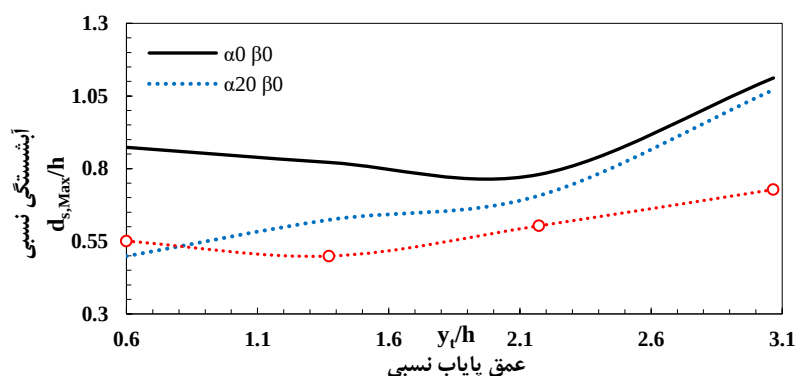
جدول ۴ - فاصله محل حداکثر عمق آبشستگی از انتهای تبدیل خروجی (حالت بدون انسداد)

Table 4 - Location of the point with maximum scour depth in unblocked Tests

ردیف	نماد آزمایش	$X_{s,max}$ (m)	ردیف	نماد آزمایش	$X_{s,max}$ (m)
Row	Test		Row	Test	
۱	$Q_1 y_{t1} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۸	۷	$Q_2 y_{t3} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۸
۲	$Q_1 y_{t2} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۵	۸	$Q_2 y_{t4} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۱
۳	$Q_1 y_{t3} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۷	۹	$Q_3 y_{t1} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۷
۴	$Q_1 y_{t4} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۳	۱۰	$Q_3 y_{t2} \alpha_0 \beta_0$	۰/۰۵
۵	$Q_2 y_{t1} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۶	۱۱	$Q_3 y_{t3} \alpha_0 \beta_0$	۰
۶	$Q_2 y_{t2} \alpha_0 \beta_0$	۰/۱۲	۱۲	$Q_3 y_{t4} \alpha_0 \beta_0$	۰

دلیل تشکیل نقطه مذکور در فاصله طولی کمتر بر اساس مشاهدات عینی آن است که با افزایش دبی جریان در ابتدا با عمق کم و سرعت زیاد در امتداد خط مرکزی فلولم به ذرات رسوب برخورد می کند و باعث حرکت آن و توسعه چاله می شود، پس از گذشت زمان کافی و افزایش عمق جریان، چاله در همان شکل اولیه خود توسعه می یابد و موقعیت نقطه حداکثر عمق آبشستگی تغییر نمی کند. این موضوع لزوم افزایش دقت در زمان طراحی کالورت و توجه ویژه به پدیده آبشستگی برای حفاظت موثر از سازه و عملکرد صحیح آن به خصوص در مواقع سیلاب را دوچندان می کند.

تاثیر انسداد بر عمق آبشستگی در خروجی به منظور بررسی دقیق تر، ابتدا نتایج مربوط به انسداد مقطع ورودی در حالت بدون پیشروی انسداد ($\beta=0$) و تاثیر آن بر آبشستگی پایین دست ارائه و پس از آن تاثیر پیشروی انسداد در طول مجرای کالورت به مقدار ۳۲ درصد ($\beta=32\%$) و $\alpha=32\%$ تجزیه و تحلیل گردید. در هر دو مورد به منظور مقایسه نتایج حالت بدون انسداد نیز در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است. در شکل (۹)، تغییرات عمق فرسایش نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی برای دو درصد انسداد مقطع ۲۰ و ۳۲ درصد نشان داده شده است.



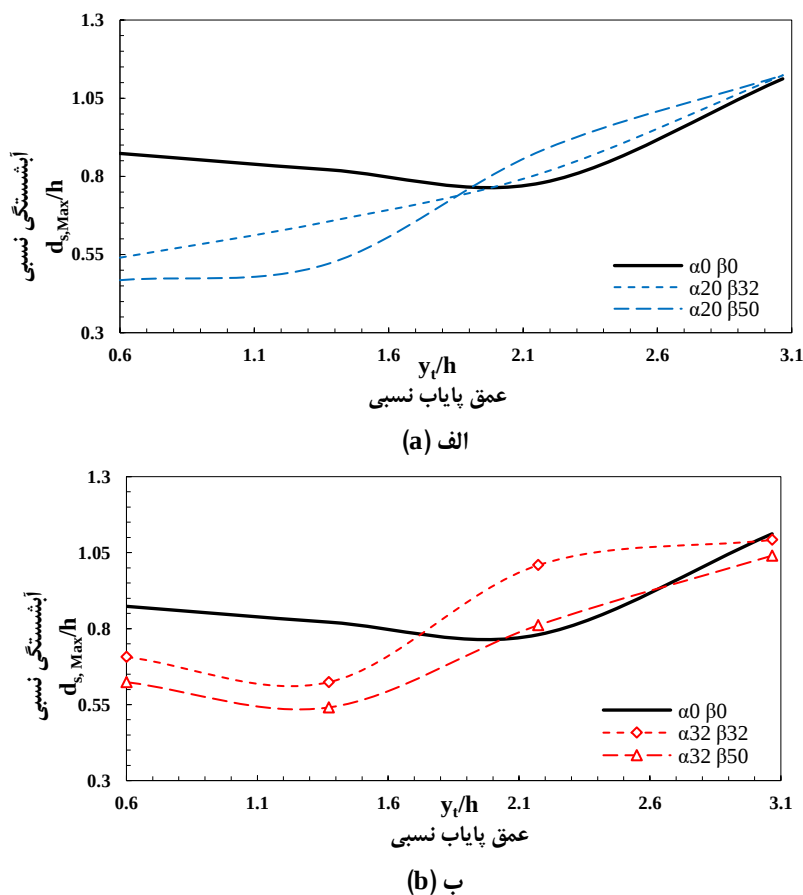
شکل ۹- تغییرات حداکثر عمق فرسایش نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی به ازای انسداد مقطع ورودی کالورت ۲۰ و ۳۲ درصد

Fig. 9- Changes in Maximum Relative Scour Depth versus Relative Tailwater Depth for Inlet Blockage Percentages $\alpha=20$ and 32%

همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می شود در حالتی که مقطع ورودی کالورت دچار انسداد شود مقدار حداکثر فرسایش در پایین دست کالورت کاهش یافته است. دلیل این امر آن است که در حالت انسداد ثابت، دقیقاً در وجه پشت عامل انسداد، جریان گردابی با محور افقی ایجاد می شود که باعث جداسازی خطوط جریان و تلاطم شدید جریان در مجرا می گردد، به گونه ای که چندین مرتبه جریان به سقف مجرای کالورت برخورد و مجدداً به سمت کف مجرا حرکت می کند. این روند باعث افت شدید انرژی و کاهش پتانسیل جریان خروجی در فرسایش پایین دست در مقایسه با حالت

بدون انسداد می‌شود. با افزایش عمق پایاب و مستغرق شدن مجرای کالورت، تلاطم جریان در مجرا کاهش می‌یابد و مقدار فرسایش در حالت با انسداد و بدون انسداد به هم نزدیک می‌شود. شکل (۹) همچنین نشان می‌دهد وقتی افزایش عمق پایاب پایین دست، مجرای کالورت را از حالت جریان آزاد خارج می‌کند ($y_t/h > 1/37$)، با افزایش درصد انسداد مقطع ورودی مقدار فرسایش پایین دست دچار کاهش بیشتری می‌شود، در حالی که در شرایط جریان آزاد در خروجی مجرای کالورت ($y_t/h = 0/6$) افزایش انسداد باعث

افزایش عمق فرسایش پایین دست شده است. مقایسه کلی نتایج به دست آمده با نتایج تحقیق طاها و همکاران (Taha et al., 2020) اجرا شده روی بررسی تاثیر انسداد بر سطح آب و ابعاد چاله آبشستگی پایین دست کالورت جعبه‌ای با استفاده از مدل FLOW-3D، نشان می‌دهد در هر دو تحقیق بروز انسداد ثابت در برخی موارد باعث کاهش و در تعدادی از تست‌ها باعث افزایش مقدار آبشستگی نسبت به حالت بدون انسداد شده است. در شکل (۱۰)، تاثیر پیشروی انسداد در مجرای کالورت نشان داده شده است.



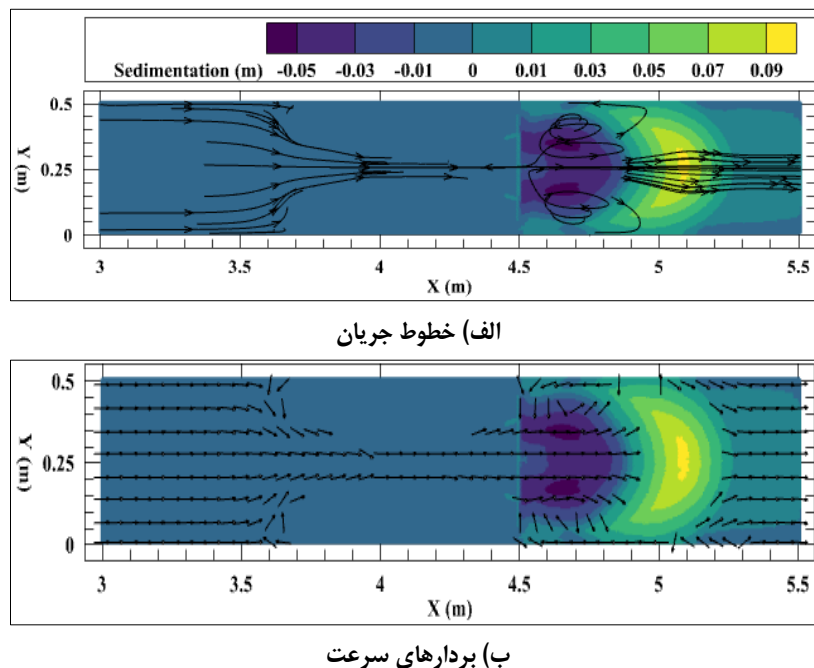
شکل ۱۰- الف: تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی به ازای $\alpha = 20\%$ ؛ ب: تغییرات حداکثر عمق آبشستگی نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی به ازای $\alpha = 32\%$

Fig 10- a: Changes in Maximum Relative Scour Depth versus Relative Tailwater Depth for Blockage Progress of 32% and 50% at $\alpha=20\%$ b: Changes in Maximum Relative Scour Depth versus Relative Tailwater Depth for Blockage Progress of 32% and 50% at $\alpha=32\%$

همانگونه که در شکل ۱۰-الف مشخص است تاثیر نفوذ انسداد در مجرای کالورت بر عمق آبشستگی پایین دست به موقعیت تراز سطح آب در پایاب بستگی دارد. عمق پایاب نسبی کمتر از حدود ۲ پیشروی انسداد منجر به کاهش عمق

آبشستگی در پایین دست و بیشتر از آن مقدار آبشستگی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با افزایش عمق پایاب تاثیر پیشروی انسداد بر عمق آبشستگی ناچیز می‌شود به گونه‌ای که به ازای $y_t/h = 3/07$ مقدار حداکثر عمق آبشستگی

پایین دست در سه حالت بدون انسداد و انسداد با پیشروی های ۳۲ و ۵۰ درصد تفاوت چندانی ندارند. با توجه به نمودارهای شکل ۹-ب که مربوط به پیشروی ۳۲ و ۵۰ درصدی عامل انسداد در حالت انسداد ۳۲ درصدی مقطع است دیده می شود که روندی همانند حالت قبل حاکم است، با این تفاوت که عمق آبشستگی مربوط به پیشروی انسداد



شکل ۱۱- خطوط جریان و بردارهای سرعت در تست $Q_2 y_{13} a_{32} \beta_{32}$

Fig. 11: Streamlines and velocity vectors in test $Q_2 y_{13} a_{32} \beta_{32}$

شکل (۱۱) نشان می دهد که با افزایش پیشروی عامل انسداد در مجرای کالورت وضعیت بردارهای سرعت به طور قابل توجهی دستخوش تغییر شده است و هجوم آنها به سمت پایین دست خروجی شدت بیشتری می یابد، به طوری که موجب افزایش آبشستگی و رسوبگذاری در بستر رسوبی شده است.

نتیجه گیری

انسداد مجرای کالورت یکی از مهمترین چالش هایی است که موجب کاهش کارایی و افزایش احتمال تخریب آن می شود. پیشروی انسداد در مجرای کالورت می تواند هیدرولیک جریان را تحت تأثیر قرار دهد و بر آبشستگی بستر پایین دست کالورت اثر قابل توجهی بگذارد. تمرکز

محققان پیشین در خصوص تأثیر انسداد بر آبشستگی در پایین دست کالورت روی بررسی اثر انسداد ثابت بوده و اثر پیشروی انسداد در مجرای کالورت بررسی نشده است که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. در تحقیق حاضر با اجرای ۳۶ آزمایش تجربی در آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه رازی، اثر پیشروی انسداد به میزان ۳۲ و ۵۰ درصد بر آبشستگی در خروجی کالورت بررسی شد و شبیه سازی عددی مسئله نیز تجزیه و تحلیل گردید. نتایج تحقیق نشان داد در هر دو حالت با انسداد و بدون انسداد، حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات شدت جریان و عمق پایاب به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می گیرد. افزایش شدت جریان، افزایش عمق آبشستگی را به همراه دارد. در شرایط بدون انسداد، به ازای هر شدت جریان مشخص یک عمق پایاب

پتانسیل جریان خروجی در فرسایش بستر شد، با این حال با افزایش عمق پایاب به دلیل کاهش اغتشاش در مجرای کالورت تأثیر انسداد بر آبشستگی کاهش یافت. تأثیر پیشروی انسداد بر عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب نسبی ناچیز شد، به گونه‌ای که در $y_t/h=3/1$ در حداکثر عمق آبشستگی پایین دست در حالت بدون انسداد و پیشروی انسداد به مقدار ۳۲ و ۵۰ درصد تفاوت چندانی ایجاد نشد. با توجه به اهمیت موضوع آبشستگی و اثرهای نامطلوب آن بر پایداری سازه‌های هیدرولیکی، به طور خاص کالورت، و ایجاد چالش جدی در مواقع بروز سیلاب، استفاده از برخی سازه‌های تثبیت کننده بستر مانند کفبند حفاظت کننده و سرریز بالدار می‌تواند در مدیریت، کاهش یا انتقال چاله آبشستگی به مکانی دورتر از تکیه‌گاه کالورت بسیار موثر باشد.

نسبی بحرانی وجود دارد که تا قبل از آن، عمق آبشستگی پایین دست با افزایش عمق پایاب کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. این عمق پایاب نسبی بحرانی برای شدت جریان $DI=1/24$ تقریباً $2/17$ است $(y_t/h=2/17)$. نتایج آزمایشگاهی همچنین نشان داد به ازای یک عمق پایاب نسبی ثابت با افزایش شدت جریان، محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی به انتهای تبدیل خروجی نزدیک‌تر می‌شود، این موضوع به دلیل تأثیر مستقیم بر پایداری سازه به خصوص در زمان سیلاب، اهمیت طراحی صحیح کالورت و توجه ویژه به آبشستگی در پایین دست آن را برجسته می‌سازد. انسداد ۲۰ و ۳۲ درصد سطح مقطع ورودی کالورت بر میزان تلاطم جریان و فرسایش در پایین دست تأثیر قابل توجهی نشان داد. در مقایسه با حالت بدون انسداد، وجود انسداد به دلیل ایجاد اغتشاش باعث افت شدید انرژی جریان و کاهش

سپاسگزاری

از استادان محترم گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه رازی که تجهیزات آزمایشگاهی لازم را برای اجرای این پژوهش آماده‌سازی کردند سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- Abt, S. R., Ruff, J. F. & Doehring, F. K. (1985). Culvert Slope Effects on Outlet Scour. J. Hydraul. Eng. 111, 1363-1367.
- Abt, S. R., Ruff, J. F., Doehring, F. K. & Donnell, C. A. (1987). Influence of Culvert Shape on Outlet Scour. J. Hydraul. Eng. 113, 393-400.
- Abt, S. R., Thompson, P. L. & Lewis, T. M. (1996). Enhancement of the Culvert Outlet Scour Estimation Equations. Journal of the Transportation Research Board. 1523(1), 178-185.
- Abida, H. & Townsend, R. (1991). Local scour downstream of box-culvert outlets, Journal of Irrigation and Drainage Engineering 118(6): 1001-1003.
- Amini, A. & Solaimani, N. (2018). The Effects of Uniform and Nonuniform Pile Spacing Variations on Local Scour at Pile Groups. Marine Georesources and Geotechnology 36(7): 861-866.
- Ahmed, K. O., Amini, A., Bahrami, J., Kavianpour, M. R. & Hawez, D. M. (2021). Numerical modeling of depth and location of scour at culvert outlets under unsteady flow conditions. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 12(4), 04021040.
- Ahmed, K. O., Nariman, N., Hawez, D. M., Kisi, O. & Amini, A. (2023). Predicting and Optimizing the Influenced Parameters for Culvert Outlet Scouring Utilizing Coupled FLOW 3D-Surrogate Modeling. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 47(3), 1763-1776.
- Ahmed, K. O., Kavianpour, M. R., Amini, A. & Aminpour, Y. (2024). Numerical modelling of downstream scour in circular culverts: Impact of inlet blockages and variable flow conditions. PLoS ONE 19(10): e0312501.

- Bohan, J. (1970). Erosion and Riprap Requeriments at Culvert and Storm-Drain Outlets, Technical Report, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Chen, Y. H. (1970). Scour at Outlets of Box Culverts, Master's thesis, Colorado State University.
- Day, R., Liriano, S. L. & White, W. R. (2001). Effect of tailwater depth and model scale on scour at culvert outlets, in: Proceedings of the ICE - Water and Maritime Engineering 148(3): 189-198.
- Emami, S. & Schleiss, A. J. (2006). Design of erosion protection at diversion tunnel outlets with concrete prisms, Canadian Journal of Civil Engineering 33: 81-92.
- Elsebaie, H. I. (2013). an experimental study of local scour around circular bridge pier in sand soil. Int. J. Civ. Environ. Eng.13, 23–28.
- Galán, Á. & González, J. (2022). Effects of shape, inlet blockage and wing walls on local scour at the outlet of non-submerged culverts: undermining of the embankment. Environ Earth Sci 79, 25.
- Günel, M., Günel, A.Y. & Osman, K. (2019). Simulation of blockage effects on scouring downstream of box culverts under unsteady flow conditions. International Journal of Environmental Science and Technology. 16, 5305–5310.
- Iqbal U. & Riaz, M. Z. B. (2024). Blockage at cross-drainage hydraulic structures - Advances, challenges and opportunities. Heliyon. 10(16): e35786.
- Liriano, S. L., Day, R. & Rodney, W. (2002). Scour at culvert outlets as influenced by the turbulent flow structure, J. Hydraul. 40(3): 367–376.
- Mendoza, C., Abt, S. R. & Ruff, J. F. (1983). Headwall inuence on scour at culvert outlets, Journal of Hydraulic Engineering 109(7): 1056-1060.
- Moody, J. A., Smith, J. D. & Ragan, B. W. (2005). Critical shear stress for erosion of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires, J. Geophys. Res.-Earth, 110, F01004, <https://doi.org/10.1029/2004JF000141>, 2005.
- Najafzadeh, M. (2015). Neurofuzzy-Based GMDH-PSO to Predict Maximum Scour Depth at Equilibrium at Culvert Outlets. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 7(1), 2016.
- Najafzadeh, M. & Kargar, A. R. (2019). Gene-expression programming, evolutionary polynomial regression, and model tree to evaluate local scour depth at culvert outlets. J Pipeline Syst Eng Pract 10(3): 04019013
- Nohani, E. & Heidarnajad, M. (2014). Experimental Investigation of the Effect of Flow Angle of Attack on the Rate of Scour around the Slotted Bridge Pier at Different Levels of River Bend. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET), 2(12).
- Opie, T. R. (1967). Scour at Culvert Outlets, Ph.D. thesis, Colorado State University.
- Rigby, E. H. & Barthelmess, A. J. (2011). Culvert Blockage Mechanisms and Their Impact on Flood Behaviour: Are All Blockages Created Equal,” in 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering, Engineers Australia, Brisbane, Australia. 380-387.
- Ruff, J. F., Abt, S. R., Mendoza, C., Shaikh, A. & Klobberdanz, R. (1982). Scour at Culvert Outlets in Mixed Bed Materials, Technical Report, U.S. Department of Trans portation. Federal Highway Administration.
- Sorourian, S., Keshavarzi, A., Ball, J. & Samali, B. (2014). Blockage effects on scouring downstream of box culverts under unsteady flow. Australasian Journal of Water Resources, 18(2): 180-190.
- Sorourian, S., Keshavarzi, A. & Ball, J. E. (2015). Scour at partially blocked box-culverts under steady flow. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 169(6): 247-259.
- Taha, N., El-Feky, M. M., El-Saiad, A. A. & Fathy, I. (2020). Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. Alex Eng J 59:3503–3513.
- Tien Bui, D., Shirzadi, A., Amini, A., Shahabi, H., Al-Ansari, N., Hamidi, S., Singh, S.K., Thai Pham, B., Ahmad, B.B. & Ghazvinei, P. T. (2020). A Hybrid Intelligence Approach to Enhance the Prediction Accuracy of Local Scour Depth at Complex Bridge Piers. Sustainability. 12(3): 1063.
- Valizadeh, R., Arman, A. & Ghobadian, R. (2024). Controlling the local scouring of the bottom of the protective inclined apron in a 90- degree mild bend using a numerical model, DOI:10.1016/j.oceaneng.2024.118177.
- Zhang, R. & Wu, P. (2019). The investigation of shape factors in determining scour depth at culvert outlets, ISH Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1080/09715010.2019.1611492.

Research Article

Vulnerability zoning of the Alborz County of Qazvin Province aquifer using DRASTIC method and GIS

Hosein Atashgaran¹, Massumeh Rostamabadi^{2✉}, Saeed Kazemi Mohsenabadi³

1. MSc student of water and hydraulic structures engineering, Islamic Azad University, Buin Zahra Branch, Buin Zahra, Iran.

2,3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, BuZ. C. Islamic Azad University, BuinZahra, BuinZahra, Iran.

(✉ Corresponding Author: rostamabadi@iaui.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 17 May 2024

Revised: 3 June 2025

Accepted: 7 June 2025

Available Online: 28 June 2025

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Atashgaran, H., & Roatamabadi. M., & Kazemi Mohsenabadi, S., (2025). Vulnerability zoning of the Alborz County of Qazvin Province aquifer using DRASTIC Method and GIS. (In Persian with English abstract). Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research. V.26, No.98, P: 67
<https://doi.org/10.22092/idsr.2025.369519.1621>

Introduction

Groundwater resources, as the main supplier of agricultural, drinking and industrial uses, are affected by polluting factors such as irrigation return water, urban and rural wastewater, and industrial effluents. Alborz County, one of the important agricultural and industrial regions of Qazvin Province, is at risk of groundwater pollution due to its increasing development and population. Due to the lack of implementation of appropriate wastewater disposal systems, a large volume of pollutants, including nitrate, enter the aquifer of this plain. The aim of this study is to investigate the vulnerability of the Alborz County aquifer using the DRASTIC method and to utilize the Geographic Information System (GIS) to determine areas susceptible to pollution and to provide management solutions to maintain the quality of groundwater resources.

Materials and Methods

Geographical Location

Alborz County is located in the northeast of Qazvin Province with an area of about 428 square kilometers. The county borders Qazvin County to the north, Abyeq County to the east, Abyek and Buin Zahra County to the south, and Qazvin County to the west. This region is heavily affected by environmental pressures due to industrial and agricultural development.

DRASTIC Model

The DRASTIC method, introduced by the US Environmental Protection Agency, focuses on assessing groundwater vulnerability using seven key parameters: depth of groundwater (D), net recharge (R), aquifer media (A), soil media (S), topography (T), Impact of vadoes zone (I), Hydraulic conductivity of the aquifer (C). A rate value and a weight were determined for each of these parameters based on table (1), and then these data were processed in ARCGIS software to prepare a vulnerability map of the region.

Table 1- Drastic parameter weight and rate table for Alborz County

Parameter	D	R	A	S	T	I	C
Weight	5	4	3	2	1	5	3
Rate	1--2	6--9	6--8	4--7	8--10	5--6	1--4

The vulnerability index (DI) was calculated based on the combination of these factors according to equation (1) and levels of vulnerability were identified.

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

Based on the analysis, the vulnerability index of the Alborz County plain varies between 87 and 136. According to the Drastic classification, the study area is divided into two zones of low vulnerability (31 percent) and medium vulnerability (69 percent). The western and central areas of the aquifer have the highest vulnerability potential due to the high groundwater level and low land slope and require more monitoring.

To examine the accuracy of the vulnerability zoning map, the nitrate level of groundwater in the area was examined. The results showed that areas with higher vulnerability have higher nitrate concentrations, indicating a direct relationship between the vulnerability index and groundwater quality. The most important polluting factor in this area is the excessive use of chemical fertilizers and the lack of urban wastewater treatment systems.

In order to assess the effect of different parameters on the vulnerability index, a sensitivity analysis of layer removal was performed. The results showed that the most important parameters affecting vulnerability are Impact of vadoes zone (I) and net recharge (R). Removing these factors caused significant changes in the vulnerability index, indicating their critical role in the transfer of contaminants to groundwater.

Conclusion

This research, by providing vulnerability maps, provides an important tool for planning and managing groundwater resources in Alborz County and will assist officials in major environmental and executive decisions. The results showed that Alborz County has areas with a moderate level of vulnerability, and the western and central parts of the aquifer should be considered as critical areas. Accordingly, the following suggestions are made:

Management of chemical fertilizer use: Modifying the cropping pattern and monitoring the use of nitrate fertilizers in order to reduce the transfer of contaminants to groundwater.

Implementation of urban and rural wastewater treatment projects: To prevent the entry of contaminated wastewater into groundwater resources.

Monitoring well drilling in vulnerable areas: Preventing hydraulic communication between contaminated and uncontaminated aquifers.

Accurate monitoring of groundwater quality: Implementing continuous monitoring systems to control and manage groundwater pollution.

Keywords: Vulnerability, Alborz Plain, Drastic .GIS



نوع مقاله: پژوهشی

پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان شهرستان البرز استان قزوین به روش دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی

حسین آتشگران^۱، معصومه رستم آبادی^۲✉، سعید کاظمی محسن آبادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷

چکیده

منبع ارزشمند آب زیرزمینی که تامین کننده اصلی مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی است، تحت تأثیر آلودگی ناشی از آب های برگشتی آبیاری آغشته به کودهای نیتراتی، فاضلاب شهری و روستایی و پساب های صنعتی است. در دشت شهرستان البرز، از قطب های بزرگ توسعه کشاورزی و صنعتی، هر ساله شهرک های متعدد ساخته می شود و جمعیت انسانی و تقاضای آب در آن رو به افزایش است. سالانه حجم بالایی از آلاینده ها از جمله نیترات به دلیل اجرانشدن سامانه مناسب دفع پساب ها وارد آبخوان این دشت می شود. هدف از این پژوهش، علاوه بر مشخص کردن مناطق مستعد آلوده شدن، کمک به تبیین سیاست های کاربردی برای برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست منطقه و مدیریت کیفی منابع آب زیرزمینی است. بدین منظور با مراجعه به سازمان های متعدد، آمار و داده های عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص، ساختار زمین شناسی آبخوان، بافت خاک، شیب منطقه، محیط غیراشباع، قابلیت انتقال و هم ضخامت آبرفت این آبخوان جمع آوری شد. پس از آن با استفاده از روش دراستیک بر مبنای سامانه اطلاعات جغرافیایی، نقشه پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان (امکان نفوذ و انتشار آلاینده ها از سطح زمین به آب زیرزمینی) تهیه و با اطلاعات موجود نیترات آب زیرزمینی در محیط GIS مقایسه و صحت سنجی شد. نتایج بررسی ها نشان داد دشت شهرستان البرز به دو پهنه قابل طبقه بندی است. حدود ۳۱ درصد از مساحت کل منطقه متعلق به کلاس آسیب پذیری کم و ۶۹ درصد از مساحت در کلاس آسیب پذیری متوسط قرار دارد. قسمت غربی و مرکزی آبخوان دشت شهرستان البرز به دلیل اینکه شیب زمین، در این نواحی بسیار کم و سطح آب زیرزمینی بالا است، پتانسیل آسیب پذیری بیشتری دارد.

واژه های کلیدی: آسیب پذیری، دشت شهرستان البرز، دراستیک، سامانه اطلاعات جغرافیایی

مقدمه

استفاده بیشتر از کودهای شیمیایی هرچند به بیشتر شدن محصول می انجامد، خطری جدی برای آب های زیرزمینی محسوب می شود. آلوده شدن آب های زیرزمینی علاوه بر مشکلات اقتصادی تهیه آب شیرین، مشکلات زیست محیطی و بهداشتی مانند شیوع بیماری ها را به دنبال دارد. تشخیص و کنترل آلودگی آب های زیرزمینی مشکل تر است تا آب های سطحی و از این رو بهترین راه مدیریت آب های زیرزمینی شناسایی عوامل آلاینده و جلوگیری از آلوده شدن آنهاست. یکی از راه های پیشگیری از آلودگی آب

زیرزمینی شناسایی مناطقی است که استعداد آلوده شدن بالایی دارند. با شناخت این موضوع می توان منطقه را از لحاظ آسیب پذیری پهنه بندی کرد و با اعمال تمهیدات لازم از آلوده شدن مناطق با آسیب پذیری بالا جلوگیری کرد (Babiker et al., 2005).

مفهوم آسیب پذیری آب زیرزمینی اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ در فرانسه برای هشدار درباره آلودگی آب ارائه گردید و به معنی امکان نفوذ و انتشار آلاینده ها از سطح زمین به آب زیرزمینی است (Vrba, 1994). یکی از مدل هایی که بیشترین کاربرد آن برای ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران.^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران. ✉ نویسنده مسئول: (Email: rostamabadi@iau.ac.ir)^۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران.

نسبت به دامنه وسیعی از آلاینده های بالقوه است، یعنی مدل DRASTIC، آلودگی آب زیرزمینی را با استفاده از مهم ترین عوامل هیدرولوژیکی موثر محاسبه می کند (Aller *et al.*, 1987). رحمان (Rahman, 2008) با ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی در سفره های کم عمق شهر آلیگرا، هند، با استفاده از مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی، نشان داد بیش از ۸۰ درصد از آب های زیرزمینی شهر در معرض آسیب پذیری متوسط تا زیاد است. رنگزن و همکاران (Rangzan *et al.*, 2008) آسیب پذیری آبخوان آبرفتی دشت ورامین را با استفاده از روش دراستیک در محیط GIS ارزیابی کردند. نقشه نهایی نشان داد ۰/۰۶ درصد از آبخوان کاملاً آسیب پذیر، ۱/۹۴ درصد دارای پتانسیل آلودگی خیلی زیاد، ۸ درصد زیاد، ۱۷ درصد متوسط تا زیاد، ۲۶ درصد متوسط تا کم، ۳۸ درصد کم و ۹ درصد دارای پتانسیل آلودگی خیلی کم است. چیت سازان و اختر (Chitsazan and Akhtari, 2009) به منظور ارائه نقشه آسیب پذیری آب های زیرزمینی در دشت خران، استان خوزستان، نقشه ای را برای نشان دادن مناطق با بالاترین پتانسیل آلودگی آب های زیرزمینی براساس شرایط هیدروژئولوژیکی و تأثیرات انسانی به دست آوردند و نشان دادند غرب و جنوب غربی آبخوان در معرض آسیب پذیری متوسط و غلظت بالای نیترات هستند و مناطق کوچکی در شمال غرب و شرق خطر آلودگی ندارند. فتحی و بیگی (Fathie and Beygi, 2012) در تحقیقات خود پتانسیل آسیب پذیری آبخوان شهرکرد را به کمک مدل دراستیک در محیط GIS و اثر تغییرات فصلی غلظت نیترات و فسفات را بر صحت پیش بینی مدل مورد نظر بررسی کردند. بر اساس نقشه نهایی آلودگی، آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه ۱۱/۵ درصد دارای پتانسیل آلودگی خیلی کم، ۷۹/۶ درصد دارای آسیب پذیری کم و ۸/۹ درصد دارای آسیب پذیری متوسط تعیین گردید. این محققان می افزایند در صحت سنجی مدل دراستیک باید به زمان نمونه برداری توجه شود. امیراحمدی و همکاران (Amirahmadi *et al.*, 2012) با استفاده از مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی به پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان داورزن در برابر عوامل آلاینده پرداختند و با انطباق یون نیترات روی نقشه نهایی دراستیک دریافتند همه نقاطی که دارای نیترات بالا هستند، در محدوده آلودگی زیاد قرار دارند که دقت و صحت مدل را تایید می کند. لاتامانی و همکاران (Lathamani *et al.*, 2015) به تعیین آسیب پذیری آبخوان با استفاده از روش دراستیک و با هدف تعیین منطقه حساس برای آلودگی آب های زیرزمینی با ادغام لایه های هیدروژئولوژیک در محیط سامانه اطلاعات جهانی پرداختند. این محققان کاربرد سامانه اطلاعات جغرافیایی مدل دراستیک را روشی مناسب به منظور تحلیل آسیب پذیری آب های زیرزمینی در محیط شهری می دانند. کریشنا و همکاران (Krishna *et al.*, 2015) روش دراستیک را برای تهیه نقشه آلودگی آب های زیرزمینی در ناحیه رانچی، جارکند در هند، در نظر گرفتند و گزارش دادند نقشه های آسیب پذیری آبخوان تولید شده در این مطالعه می تواند به منظور برنامه ریزی زیست محیطی و مدیریت آب های زیرزمینی استفاده شود. نخستین روحی و همکاران (Nakhostin Rouhi *et al.*, 2017) در منطقه عجب شیر، آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی آبخوان را با استفاده از دو مدل دراستیک و شاخص حساسیت^۱ (SI) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی ارزیابی کردند. ارزیابی دو مدل استفاده شده با شاخص کیفی (کل جامدات محلول) TDS^۲ نیز نشان داد مدل SI با ضریب همبستگی ۰/۷۶ نسبت به مدل دراستیک دقت زیادتری برای تهیه نقشه آسیب پذیری منطقه دارد. سرچشمه و شاه محمدی (Sarcheshmeh and Shahmohammadi, 2017) با ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت سلماس در برابر آلودگی ها، با استفاده از مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی نشان دادند عمق سطح ایستابی و منطقه غیراشباع مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص آسیب پذیری محدوده مطالعاتی سلماس هستند. محققان دیگر (Bera *et al.*, 2012)

^۲ Total Dissolved Solids^۱ Susceptibility Index (SI)

آسیب‌پذیری بالاست. پوربلیغی و همکاران (Pourbalighy *et al.*, 2022) با تهیه نقشه آسیب‌پذیری سفره آب‌های زیرزمینی دشت ایسین هرمزگان با استفاده از روش‌های دراستیک و گادز با کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی گزارش دادند دامنه مقادیر شاخص دراستیک بین ۵۹ تا ۱۶۳ است و نقشه این شاخص در شش طبقه از بدون آسیب‌پذیری تا آسیب‌پذیری زیاد استخراج شد. در مطالعات مرادی‌نژاد و همکاران (Moradinejad *et al.*, 2023) از روش‌های مختلف تخمین آسیب‌پذیری آب زیرزمینی مانند دراستیک معمولی اصلاح شده و فازی به وسیله سامانه اطلاعات جغرافیایی در دشت قزوین و تعیین روش بهینه از میان آنها استفاده شده است. در این مطالعه نیز کل دشت قزوین ارزیابی شده است. این مطالعه نشان داد روش دراستیک اصلاحی می‌تواند مدل بهینه در این دشت محسوب شود. حامد و همکاران (Hamed *et al.*, 2024) با استفاده از روش دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) مناطق آسیب‌پذیر آب زیرزمینی را در منطقه اربیل عراق رسم کردند و نشان دادند بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی منطقه است در حالی که مناطق مرکزی شمالی و شمال غربی کمترین پتانسیل آسیب‌پذیری را دارند. اوزگین و همکاران (Ozegin *et al.*, 2024) در تحقیقی با ارزیابی حساسیت آب‌های زیرزمینی به آلودگی و همچنین با تعیین نقشه شاخص کیفیت آب به منظور تعیین تناسب آن در ایالت ادو (نیجریه) با استفاده از مدل‌های دراستیک و دراستیک اصلاح شده نشان دادند خطر آلودگی در ۴۵ درصد از مناطق بسیار کم، در ۱۰ درصد کم، در ۲۰ درصد متوسط و در ۲۵ درصد زیاد است. گانور و همکاران (Ganwer *et al.*, 2024) در مطالعات خود به ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی حوضه سیونات با کمک دراستیک در سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداختند. هدف آنها شناسایی مناطقی بود که در معرض آلودگی آب‌های زیرزمینی قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده ارتباط معنی‌داری را بین مقادیر غلظت نیترات نمونه و مقادیر شاخص مدل دراستیک اصلاح شده

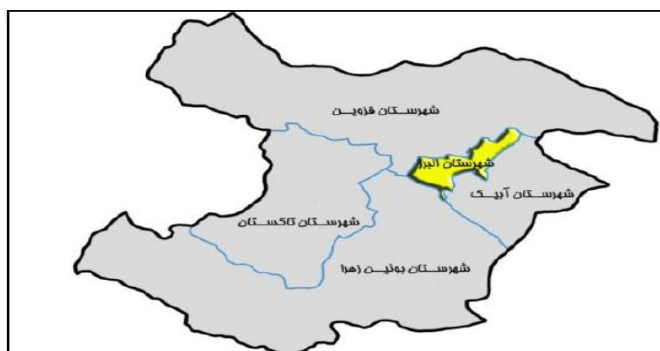
2021; Amiri *et al.*, 2020; Bhuvaneswaran and Ganesh, 2019; Ahmed and Nazzal, 2015; دراستیک و GIS برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری مناطق مورد مطالعه خود استفاده کردند. یزدانی و منصوریان (Yazdani and Mansourian, 2019) با بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین با چهار روش مختلف از جمله دراستیک نشان دادند با استفاده از روش دراستیک ۳۳ درصد از منطقه دارای آسیب‌پذیری خیلی کم، ۴۹ درصد آسیب‌پذیری کم، ۱۵ درصد آسیب‌پذیری کم تا متوسط و حدود ۳ درصد دارای آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد است؛ در این بررسی، قسمتی از شهرستان آبیک در استان قزوین مورد بررسی قرار گرفت. مردان و یارقلی (Mardan & Yargholi, 2020) با هدف پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دشت اردبیل از مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند و نشان دادند پتانسیل و میزان آلودگی آبخوان دشت اردبیل بالاست و با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی منطقه، که برای هدف‌های مختلف به‌کار می‌رود، حفاظت این مناطق به منظور جلوگیری از آلودگی و مدیریت بهینه منابع آب ضروری است. طاهری تیزرو و همکاران (Taheri Tizro *et al.*, 2021) با ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین با استفاده از روش دراستیک اصلاح شده مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان دادند نقشه آسیب‌پذیری به‌دست آمده با شاخص‌های کیفی مورد نظر تطابق نسبی دارد. نوین‌پور و همکاران (Novinpour *et al.*, 2022) آسیب‌پذیری سفره‌های زیرزمینی دشت چهاردولی را در شرق استان کردستان با استفاده از روش دراستیک اصلاح شده و منطق فازی بهینه بررسی کردند و گزارش دادند مناطق مرکزی، شمال غربی و شرقی دارای بالاترین سطح آلودگی بالقوه در منطقه مورد مطالعه هستند. آقازاده و همکاران (Aghazadeh *et al.*, 2022) با اصلاح برخی پارامترها از مدل دراستیک برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان مناطق شهری ارومیه استفاده کردند و نشان دادند که در اکثر مناطق ریسک آلودگی کم تا متوسط است و در برخی نواحی که فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی بالا و عمق آب زیرزمینی کم است، میزان

مناطق مستعد آلوده شدن، کمک به تبیین سیاست های کاربردی برای برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست منطقه و مدیریت کیفی منابع آب زیرزمینی است. بدین منظور آمار و داده های مورد نیاز این آبخوان جمع آوری گردید. برای به دست آوردن آماری که دارای دقت کافی باشد، به سازمان های دولتی زیادی مراجعه شد. برای گردآوری داده های مورد نیاز و بررسی صحت و سقم آنها زمان زیادی صرف شد. افزون بر آن، همکاری نکردن برخی نهادها نیز مشکلات فراوان دیگری را در راه تحقیق ایجاد کرد. اما نتایج پژوهش حاضر می تواند در درک هرچه بیشتر وضعیت موجود و اتفاقات احتمالی آینده کمک موثری باشد.

مواد و روش ها

موقعیت جغرافیایی منطقه

شهرستان البرز یکی از شهرستان های استان قزوین با مساحت ۴۲۸ کیلومترمربع در شمال شرقی استان که مرکز آن شهر الوند با ارتفاع ۱۲۱۸ متر از سطح دریاست. این شهرستان از شمال به شهرستان قزوین، از شرق با شهرستان آبیک، از جنوب با شهرستان های آبیک و بوئین زهرا و از غرب به شهرستان قزوین محدود است و ۲/۴ درصد از مساحت استان قزوین را تشکیل می دهد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی شهرستان البرز را در استان قزوین نشان می دهد.



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی شهرستان البرز در استان قزوین (سازمان مسکن و شهر سازی استان قزوین)

Fig. 1- Map of the geographical location of Alborz County in Qazvin Province (Qazvin Provincial Housing and Urban Development Organization)

آسیب پذیری آب زیرزمینی ارائه داده است که بر اساس آن پارامترهای مختلف هیدروژئولوژی بالقوه تاثیرگذار بر احتمال آلودگی، با ضریب وزنی و ضریب ارزش با یکدیگر

نشان داد. در گزارش اضافه شده است ابیستر منطقه مورد مطالعه در مناطق نسبتاً آسیب پذیر قرار دارد.

مرور مطالعات گذشته نشان می دهد آسیب پذیری آب های زیرزمینی در برابر آلودگی در شهرستان البرز استان قزوین تاکنون ارزیابی نشده است. شهرستان البرز به دلیل قابلیت های اقلیمی و جغرافیایی و همچنین توسعه های صنعتی و کشاورزی، یکی از قطب های کشاورزی و صنعتی استان قزوین است، به گونه ای که با ساخت شهرک های متعدد، سالانه بر جمعیت انسانی آن افزوده شده است که نتیجه آن افزایش قابل توجه تقاضای آب شهری و متوازن نبودن منابع آبی موجود با مصارف نظیر بوده است. به منظور تامین نیاز شرب و کشاورزی، تاکنون تلاشی مضاعف برای استفاده حداکثر از پتانسیل های سطحی منطقه صورت گرفته است و از آنجا که این منابع به تنهایی جوابگوی نیازها نبوده اند، از مخازن آب زیرزمینی نیز بهره برداری شده است. اجرانشدن سیستم مناسب دفع پساب های خانگی، صنعتی و کشاورزی سالانه حجم بالایی از آلاینده ها از جمله نیترات را وارد آبخوان دشت شهرستان البرز می کند.

با توجه به افزایش میزان آلودگی در این منطقه و در راستای حفظ کیفی منابع آب زیرزمینی، این تحقیق به کمک مدل کاربردی DRASTIC و سامانه اطلاعات جغرافیایی به اجرا در آمد. هدف از این پژوهش علاوه بر مشخص کردن

مدل دراستیک

سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا روش استاندارد را با نام روش دراستیک برای ارزیابی

مقدار آب نشت کرده به زمین دارد. آلودگی به شکلی وسیع از نوع و مقدار رس موجود در خاک متأثر است که امکان تورم یا متراکم شدن را دارد. هرچه رس موجود در خاک متورم‌تر شود و اندازه دانه‌های خاک کوچک‌تر باشد، تراوایی نسبی خاک پایین‌تر است و احتمال رسیدن آلودگی به سطح آب زیرزمینی کمتر خواهد بود (Dixon, 2005).

توپوگرافی⁵ (T) شیب سطح زمین (بر حسب درصد) است. در سطح با شیب زیاد امکان آلودگی آبخوان کمتر است و در سطوح کم شیب و افقی زمان ماندگاری آلودگی بیشتر و از این رو میزان نفوذ آن بیشتر خواهد بود (Dixon, 2005). ناحیه غیر اشباع⁶ (I) در تعریف دراستیک به محدوده بالای خط ایستایی آب زیرزمینی اطلاق می‌شود که همه خلل و فرج آن با آب پر نشده است. ناحیه غیر اشباع خاک تاثیر زیادی بر میزان نفوذ، طول مسیر و چگونگی حرکت آلاینده دارد و آن را کنترل می‌کند، از این رو بر زمان لازم برای میرایی و افت آلودگی تاثیرگذار است (Dixon, 2005). ضریب هدایت هیدرولیکی⁷ (C) (بر حسب متر بر روز) به قابلیت هدایت آب توسط مواد تشکیل دهنده آبخوان گفته می‌شود که عمدتاً به واسطه تخلخل مواد تشکیل دهنده آبخوان کنترل می‌شود. میزان انتشار وانتقال آلودگی در ناحیه اشباع تا حد زیادی به این پارامتر بستگی دارد. این مفهوم باید با مفهوم محیط آبخوان به خوبی تفکیک شود زیرا ممکن است محیط آبخوان تا حد زیادی نفوذناپذیر باشد ولی شامل شکاف‌های بزرگ باشد (Dixon, 2005).

به هریک از هفت پارامتر یادشده یک ارزش و یک وزن بر حسب اهمیت آن اختصاص داده می‌شود. از این رو شاخص دراستیک بر اساس وزن‌دهی به هفت پارامتر به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود که در آن DI شاخص دراستیک، I, T, S, A, R, D و C پارامترهای هفت‌گانه یادشده، r ارزش و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود. به عنوان

جمع می‌شوند و نقشه آسیب‌پذیری را ارائه می‌دهند (Aller *et al.*, 1987). برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری دراستیک، داده‌های مربوط به پارامترهای مختلف به محیط نرم افزار ARCGIS داده می‌شود و پس از برهم نهی لایه‌های داده‌های هیدروژئولوژیکی، نقشه آسیب‌پذیری ارائه می‌شود (Dixon, 2005). DRASTIC از حروف اول کلمات هفت‌گانه زیر به دست آمده است:

عمق آب زیرزمینی¹ (D) فاصله سطح زمین تا سطح ایستایی آبخوان یا ضخامت است که آب باید طی کند تا به سطح آبخوان برسد. افزایش این ضخامت منجر به تصفیه و حذف آلودگی به واسطه زون غیر اشباع خاک می‌شود. به طور معمول، پتانسیل حفاظت از آلوده شدن آب با افزایش این پارامتر بیشتر می‌شود (Dixon, 2005). تغذیه خالص² (R) میزان آبی است (بر حسب میلی‌متر بر سال) که از طریق زون غیراشباع خاک و توسط عوامل مختلفی مانند بارش به آب زیرزمینی می‌رسد. آب نفوذی عاملی اصلی برای انتقال آلودگی از محیط غیراشباع به ناحیه اشباع است و حامل آلودگی‌های جامد و مایعی است که به سطح آب زیرزمینی منتقل می‌شود و به افزایش کمی آلودگی و افت کیفی آب می‌انجامد. به طور کلی، هر ناحیه با تغذیه بالای آب در ریسک آلودگی بالاتری قرار دارد (Dixon, 2005). محیط آبخوان³ (A) به ساختار زمین در قسمت اشباع آبخوان گفته می‌شود. این پارامتر به نوع ترکیب و دانه‌بندی خاک بستگی دارد. به طور کلی ترکیب دانه‌های درشت و بازشدگی‌هایی مانند درز و شکاف در محیط آبخوان باعث انتقال سریع آلاینده و در نتیجه افزایش پتانسیل آلودگی می‌شود. از این رو هر چه محیط آبخوان ریزدانه‌تر باشد آلودگی کمتر خواهد بود (Dixon, 2005). محیط خاک⁴ (S) ناحیه بالایی زمین است که به طور متوسط عمقی در حدود شش فوت (حدود ۱/۸ متر) یا کمتر دارد. خاک و بافت آن اثر قابل توجهی بر

⁵ Topography

⁶ Impact of vadoes zone

⁷ Hydraulic Conductivity of the aquifer

¹ Depth to ground water

² Net Recharge

³ Aquifer media

⁴ Soil media

پارامترهای هفت گانه روش دراستیک ارائه کردند. این وزن ها با توجه به اهمیت پارامترها به آنها اختصاص داده می شود. برای نمونه، موثرترین فاکتورها که عمق برخورد به آب زیرزمینی و تاثیر محیط غیراشباع هستند، وزن پنج را دارند و کم اثرترین فاکتور توپوگرافی سطح زمین (شیب زمین) دارای وزن یک است. ارزش هر پارامتر هم به صورت عددی از ۱ یک تا ۱۰ متغیر است و این اجازه را به کاربر می دهد تا مدل را به صورت مناسب برای مناطق داده شده تنظیم کند. هر چه عمق آب زیرزمینی کمتر باشد، سهولت رسیدن آلاینده به سطح آب زیرزمینی بیشتر است. بیشترین ارزش یعنی ۱۰ مربوط به عمق کمتر از ۱/۵ متر و کمترین ارزش یعنی یک برای عمق های بیشتر از ۳۰ متر است (Babiker et al., 2005).

نمونه D_w وزن عمق آب زیرزمینی و D_r ارزش عمق آب زیرزمینی در شاخص دراستیک است.

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

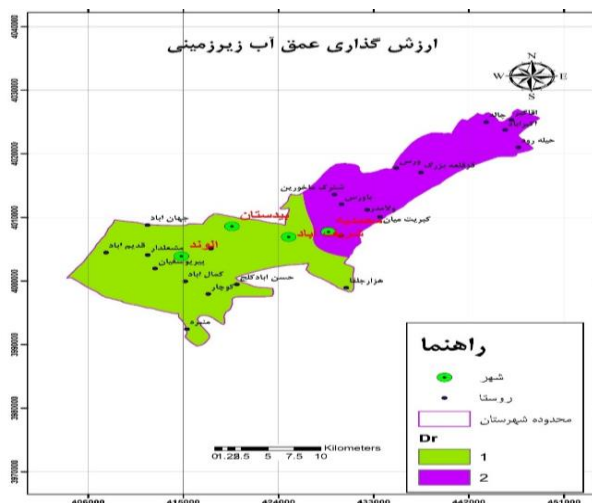
پارامترهای عمق آب زیرزمینی، شیب، محیط آبخوان و ناحیه غیر اشباع و نیز ساختار خاک به ترتیب از داده های سطح ایستابی، توپوگرافی سطح زمین، لوگ چاه ها و پروفیل خاک به دست می آیند. در منطقه مورد مطالعه، تغذیه آبخوان از پارامترهای بارش، آب برگشتی از کشاورزی، پساب شرب و صنعت و تغذیه از رودخانه به دست آمده است. به دلیل نبود اطلاعات مستقیم از میزان پارامتر هدایت هیدرولیکی، برای به دست آوردن آن، نقشه هم قابلیت انتقال بر نقشه هم ضخامت آب رفت تقسیم شده است.

آلر و همکاران (Aller et al., 1987) طی تحقیقاتی وزن های یک تا پنج را مطابق جدول (۱) برای وزن دهی به

جدول ۱- وزن های نسبت داده شده به پارامترهای هفت گانه (Rahman, 2008)

Table 1- Weights attributed to the seven parameters (Rahman, 2008)						
D_w	R_w	A_w	S_w	T_w	I_w	C_w
5	4	3	2	1	5	3

در منطقه مورد مطالعه، برای آگاهی از عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی از داده های مربوط به شبکه های پیزومتری استفاده شد که در محدوده های ۳۰-۲۳ متر در قسمت شمالی و بزرگ تر از ۳۰ متر در محدوده مرکز و غرب است. از این رو ارزش عمق سطح ایستابی این آبخوان مطابق شکل (۲) بین یک تا دو به دست آمد.

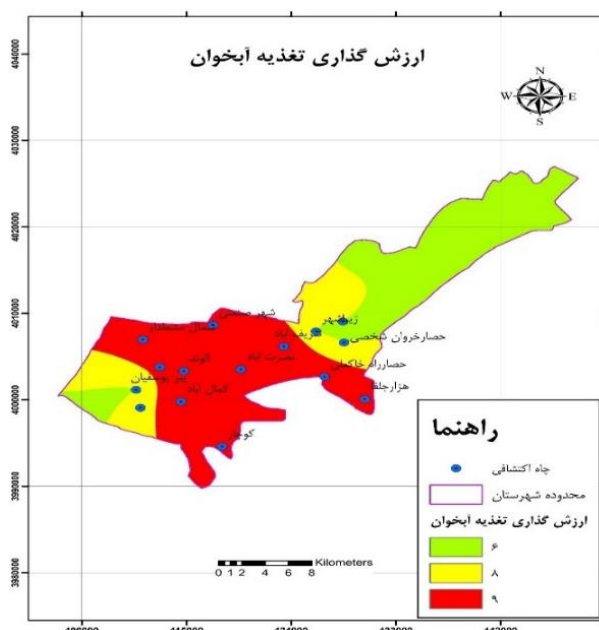


شکل ۲- ارزش گذاری عمق آب زیرزمینی

Fig. 2 - Groundwater depth rating

کانال‌ها، چاه‌ها، نفوذ از بارندگی در سطح دشت و چاه‌های شرب به محدوده آبخوان ۳۰/۵۷ سانتی بر سال است. بیشترین مقدار تغذیه در حوالی شهرهای الوند، شهر صنعتی البرز، محمدیه، نصرت آباد و شریف آباد در حدود ۳۹ سانتی‌متر بر سال و کمترین میزان تغذیه نیز مربوط به اراضی شمال شرقی و جنوب غربی دشت مانند روستاهای کوچار و پیروسیان با تغذیه حدود ۱۲ سانتی‌متر بر سال است. با تقسیم‌بندی لایه فوق و ارزش‌گذاری به محدوده‌های مختلف، دسته‌بندی دراستیک پارامتر تغذیه خالص آبخوان دشت شهرستان البرز مطابق شکل (۳) بین شش تا نه به‌دست آمد.

برای تغذیه بیش از ۲۵۰ میلی‌متر بر سال، ارزش پارامتر تغذیه خالص حداکثر مقدار یعنی نه است. از طرفی، در مناطق با تغذیه سطحی کمتر از ۵۰ میلی‌متر بر سال ارزش این پارامتر به عدد یک (کمترین ارزش) می‌رسد که کمترین احتمال آلودگی در این حالت وجود دارد (Babiker et al., 2005). با استفاده از منحنی‌های هم‌باران، آب برگشتی از شرب، صنعت و کشاورزی (شامل تغذیه زیرزمینی و تغذیه سطحی) و سپس اعمال ضریب‌های نفوذ، میزان نفوذ خالص به‌وسیله برهم‌نهی این لایه‌ها به‌دست آمد. میزان متوسط تغذیه ناشی از آب برگشتی از جریان ورودی رودخانه و

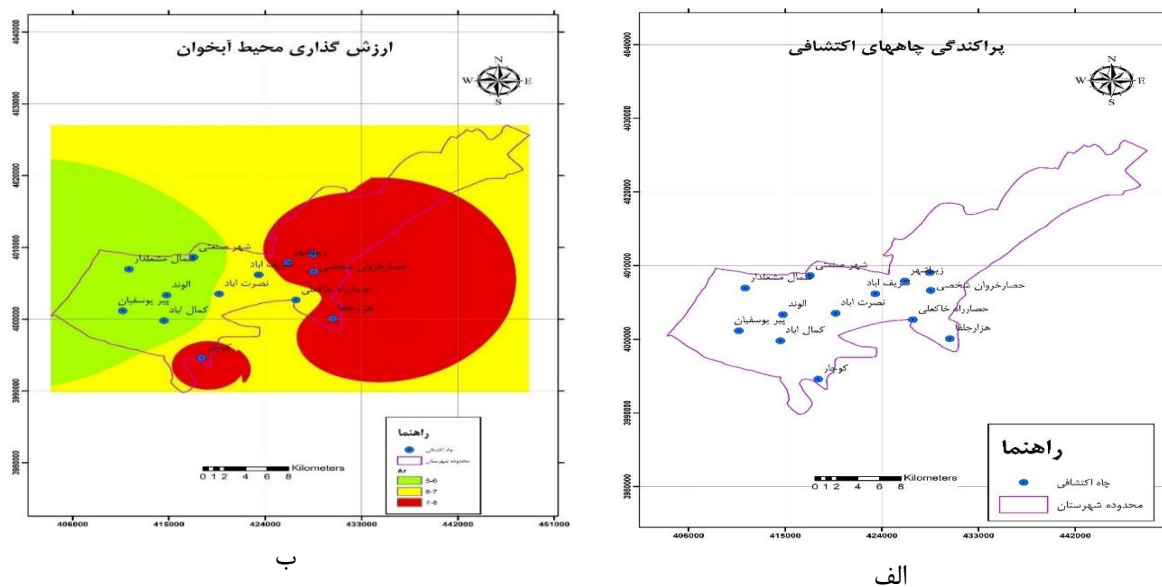


شکل ۳- ارزش‌گذاری تغذیه آبخوان

Fig. 3 Net Recharge rating

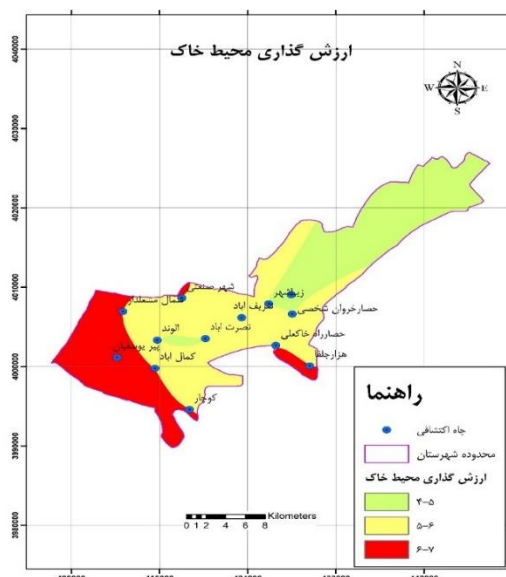
محیط غیر اشباع آبخوان دشت شهرستان البرز استفاده شده است در شکل (۴- الف) نشان داده شده است. با توجه به نیمرخ زمین‌شناسی چاه‌های اکتشافی و لوگ‌های حفاری، بیشتر مواد تشکیل‌دهنده محیط آبخوان مورد مطالعه ماسه سنگ توده شده و شن و ماسه است، بدین ترتیب مطابق شکل (۴-ب) ارزش محیط آبخوان شش تا هشت است.

سنگ‌های آهکی کارستی به دلیل وجود درزها و شکاف‌ها دارای بیشترین ضریب ارزش (۱۰) هستند. شیل‌های توده‌ای که حرکت آب در آن‌ها کند است دارای ارزش دو هستند. از سال ۱۳۴۶ تاکنون پی‌زومترهای متعددی برای اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت شهرستان البرز حفر شده است. موقعیت چاه‌های اکتشافی و پی‌زومترهایی که اطلاعات حاصل از آن‌ها برای نقشه‌های پهنه‌بندی محیط آبخوان و



شکل ۴- الف: نقشه لوگ های حفاری، ب: ارزش گذاری محیط آبخوان
Fig. 4- a: Drilling log map, b: Aquifer media rating

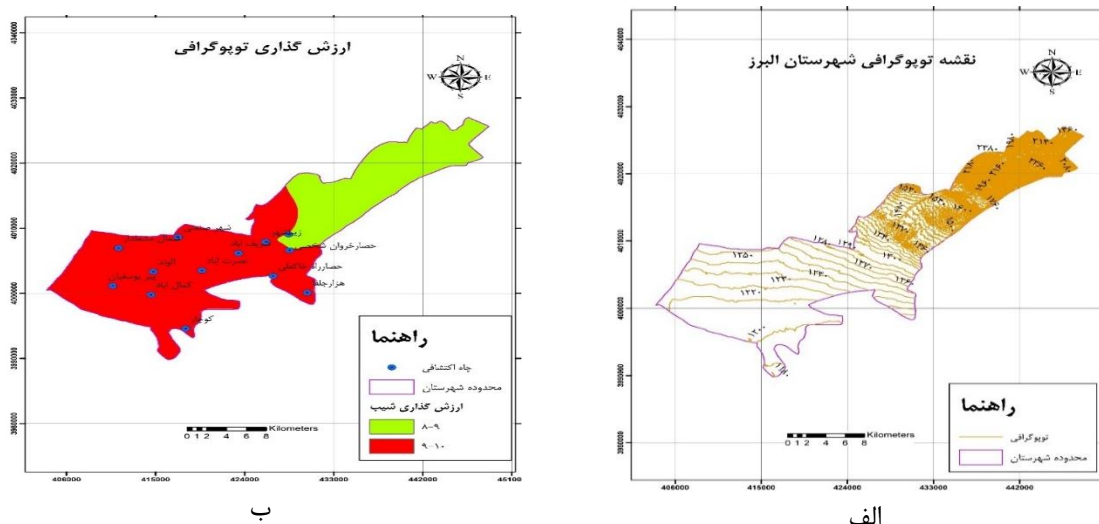
ریزدانه بودن بافت خاک باعث کاهش انتقال آلودگی به آب زیرزمینی می شود و با درشت دانه تر شدن محیط خاک امکان انتقال آلودگی افزایش می یابد، از این رو ارزش یک به خاک های رسی متورم نشده و ارزش ۱۰ به شن و جاهایی است.



شکل ۵- ارزش گذاری محیط خاک
Fig 5- Soil media rating

در مناطق با شیب کم، زمان ماندگاری آب بر سطح زمین بیشتر است، از این رو آب فرصت بیشتری برای نفوذ و در نتیجه انتقال آلاینده پیدا می کند و بالعکس. بدین ترتیب برای مناطق با شیب کمتر از دو درصد ارزش ۱۰ و برای مناطق با شیب بیشتر از ۱۸ درصد ارزش یک منظور شده است. بر اساس ارتفاع نقاط در مناطق مختلف دشت

شهرستان البرز شکل (۶-الف) ابتدا مدل رقومی ارتفاعی در به‌دست آمد. ارزش شیب مطابق شکل (۶-ب) از هشت تا محیط GIS تهیه شد و پس از آن شیب نقاط برحسب درصد ۱۰ متغیر است.

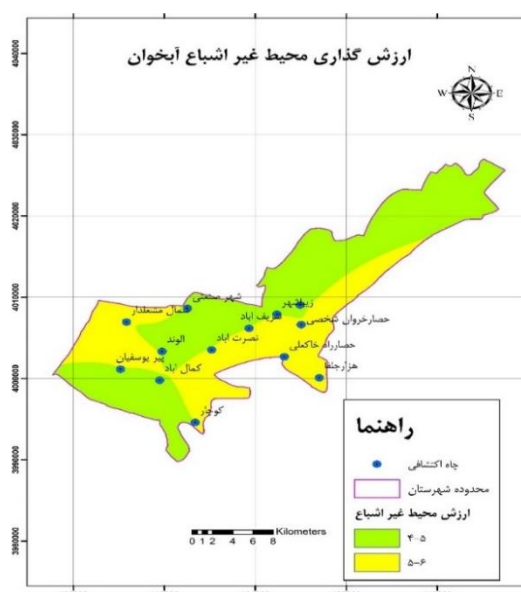


شکل ۶- الف: نقشه خطوط هم‌تراز شهرستان البرز، ب: ارزش گذاری توپوگرافی

Fig.6- a: Topographic map of Alborz County, b: Topographic rating

در مناطقی که زون غیراشباع خاک از سنگ آهک کارستی تشکیل شده است، به دلیل وجود درز و ترک سرعت حرکت آلاینده بیشتر است و آلاینده زمان کمتری لازم دارد تا به آب زیرزمینی برسد. در این حالت ارزش ۱۰، در مناطقی که محیط آبخوان از مواد ریزدانه نظیر سیلت و رس تشکیل شده باشد ارزش سه و در مناطقی که در محیط آبخوان لایه

محبوس کننده وجود داشته باشد ارزش یک برای پارامتر محیط آبخوان در نظر گرفته می‌شود، (Dixon, 2005). بر اساس جنس و نوع منطقه غیر اشباع حاصل از لوگ‌های حفاری، محدوده شهرستان به دو ارزش پنج و شش که بیانگر وجود ماسه‌سنگ، شن و ماسه با مقدار زیادی رس و سیلت است، مطابق شکل (۷) تقسیم‌بندی شده است.



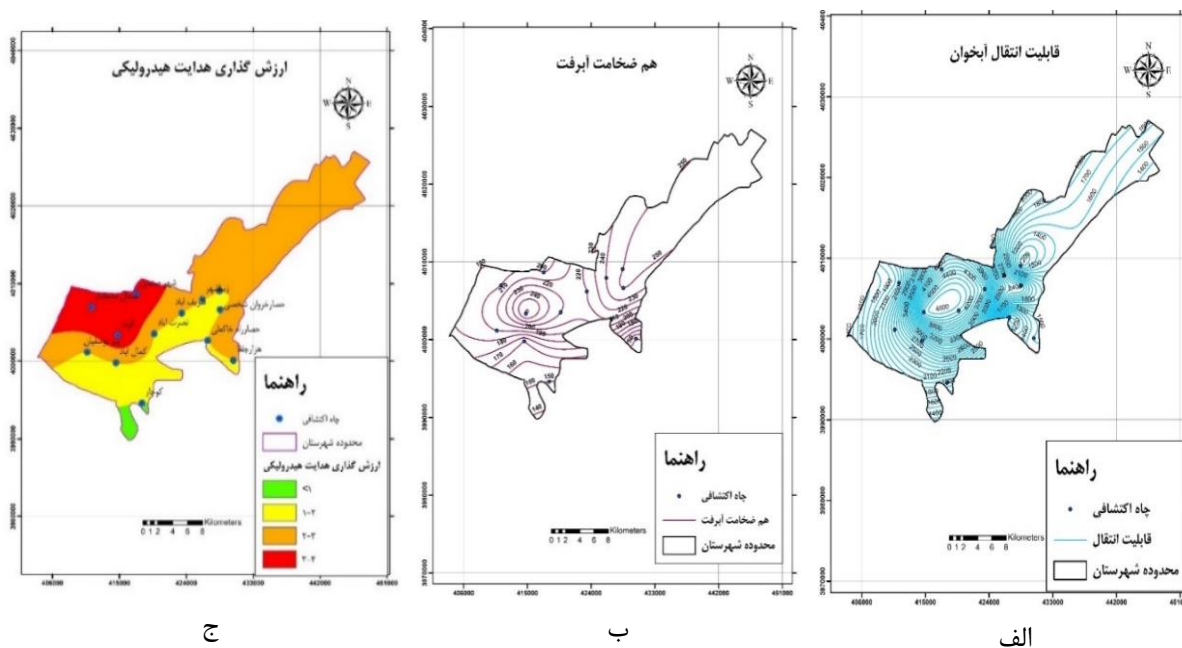
شکل ۷- ارزش گذاری محیط غیراشباع آبخوان

Fig. 7- Vadoes zone rating

در این منطقه تعداد زیادی چاه، بالغ بر ۲۰۰ حلقه، در گذشته مورد آزمایش پمپاژ قرار گرفت. با توجه به نقشه هم قابلیت انتقال (T) دشت شهرستان البرز شکل (۸- الف) بیشینه ضریب قابلیت انتقال بیش از ۱۰۰۰ مترمربع در روز است که میزان متوسط آن در قسمت مرکزی تا ۴۶۰۰ مترمربع در روز و در جهت شرق از مقدار آن کاسته شده و تا کمتر از ۱۲۰۰ مترمربع در روز نیز محاسبه شده است. با توجه به عملکرد رودخانه های موجود و مسیل های شمالی دشت، رسوبات آبرفتی در ناحیه شمال و غرب دشت غالباً دانه درشت اند و در جهت شرق به رسوبات ریزدانه رسی تبدیل می شوند. در ناحیه مرکزی و حوالی مرداب نمکی وجود تناوبی از لایه های رسی و ماسه ای سفره های تحت فشار را تشکیل داده است. براساس بررسی های ژئوالکتریک،

ضخامت آبرفت در ناحیه دشت و مخروط افکنه رودخانه خررود و ابهرود در حدود ۳۰۰ متر است و در مرکز حوالی نصرت آباد به ۲۵۰ متر می رسد شکل (۸- ب). از تقسیم نقشه ضریب قابلیت انتقال بر ضخامت آبرفت، نقشه هدایت هیدرولیکی منطقه مطابق شکل (۸- ج) به دست آمده است. هرچه میزان هدایت هیدرولیکی بالاتر باشد، سرعت حرکت آب زیرزمینی و امکان انتقال آلاینده بیشتر است و بالعکس. از این رو برای نفوذپذیری بیشتر از ۸۰ متر بر روز ارزش ۱۰ و برای نفوذپذیری کمتر از پنج متر بر روز ارزش یک در نظر گرفته می شود (Babiker et al., 2005).

ارزش پارامترهای دراستیک در شهرستان البرز در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۸- الف: نقشه قابلیت انتقال، ب: نقشه هم ضخامت آبرفت، ج: ارزش گذاری هدایت هیدرولیکی
Fig. 8- a: Transmissibility map, b: Alluvial iso-thickness map, c: Aquifer Hydraulic conductivity rating

جدول ۲- ارزش های نسبت داده شده به پارامترهای هفت گانه

Table 2- Rates attributed to the seven parameters

Dr	Rr	Ar	Sr	Tr	Ir	Cr
۱ تا ۲	۶ تا ۹	۶ تا ۸	۴ تا ۷	۸ تا ۱۰	۵ تا ۶	۴ تا ۱

نتایج

محاسبه شاخص دراستیک

کردن لایه‌های ارزش‌گذاری شده در وزن مربوط و جمع کردن تمامی لایه‌ها، نقشه شاخص آسیب‌پذیری بر اساس رابطه (۱) بدست می‌آید و سپس محدوده مورد مطالعه از نظر آسیب‌پذیری طبق جدول (۳) طبقه‌بندی می‌شود.

پس از ارزش‌گذاری و وزن‌دهی به هریک از پارامترهای روش دراستیک، برای ارزیابی آسیب‌پذیری دشت شهرستان البرز نقشه آسیب‌پذیری در محیط GIS تهیه گردید. با ضرب

جدول ۳- طبقه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری به روش دراستیک (Rahman, 2008)

Table 3- Classification of vulnerability index by drastic method (Rahman, 2008)

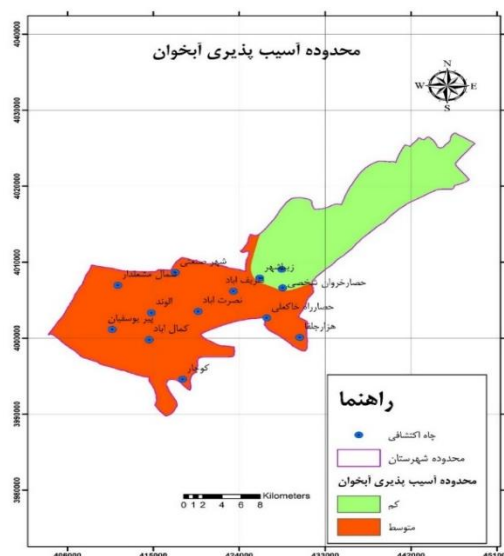
میزان آسیب‌پذیری	شاخص دراستیک (DI)
ناچیز و قابل صرف نظر	< 46
کم	47-92
متوسط	93-136
زیاد	137-184
خیلی زیاد	185 <

شیب زمین در قسمت‌های غربی و مرکز آبخوان بسیار کم و سطح آب زیرزمینی بالا است، از طرفی پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط شده است، از این رو باید کنترل این قسمت‌ها در مقابل آلودگی نسبت به سایر نواحی که دارای پتانسیل آسیب‌پذیری کم هستند مد نظر قرار گیرد.

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دشت قزوین به روش دراستیک معمولی در مطالعات مرادی‌نژاد و همکاران (Moradinejad et al., 2023) نشان داد شاخص آسیب‌پذیری برای آبخوان دشت قزوین بین ۶۶ تا ۱۴۱ به دست آمد یعنی حدود ۳۳ درصد از دشت در محدوده آسیب‌پذیری کم و بیش از ۶۲ درصد در محدوده آسیب‌پذیری متوسط و کمتر از پنج درصد دشت در ناحیه شرقی (قسمت شهرستان آبیک در شکل ۱) در محدوده آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. بر اساس پژوهش حاضر، دشت البرز که قسمتی از دشت قزوین است نیز دارای شاخص آسیب‌پذیری کم و متوسط است.

در مطالعات طاهری تیزرو و همکاران (Taheri Tizro et al., 2021) نشان داده شد که شاخص آسیب‌پذیری دراستیک دشت قزوین بین ۱۰۰ و ۱۵۳ متغیر است و شرق دشت قزوین دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی است.

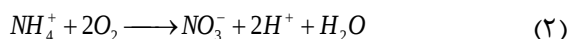
توصیف علمی میزان آسیب‌پذیری کم عبارت‌است از اینکه تغذیه به صورت پیوسته و گسترده به آبخوان صورت می‌گیرد و آلاینده‌ها توانایی واکنش در محیط را ندارند. در میزان متوسط تغذیه به صورت پیوسته به آبخوان وجود دارد، اما آسیب‌پذیری نسبت به بعضی از آلاینده‌ها ایجاد می‌شود. در شاخص زیاد، آسیب‌پذیری در خیلی از موارد نسبت به خیلی از آلاینده‌ها (به جز آنها که جذب یا انتقال بالایی دارند) ایجاد می‌شود. و در حالت خیلی زیاد آسیب‌پذیری نسبت به اکثر آلاینده‌ها با تأثیر سریع ایجاد می‌شود (Aller et al., 1987). هرچقدر شاخص دراستیک بزرگ‌تر باشد پتانسیل آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در مقابل آلودگی بیشتر خواهد بود و پهنه‌هایی که شاخص کوچک‌تر دارند، اگر چه این امکان وجود دارد که عاری از آلودگی نباشند اما پتانسیل کمتری برای آلوده‌شدن خواهند داشت (Dixon, 2005). بر اساس رابطه (۱)، شاخص آسیب‌پذیری دراستیک دشت شهرستان البرز بین ۸۷ تا ۱۳۶ متغیر است. بنابراین با توجه به جدول (۳)، دشت شهرستان البرز به دو پهنه با آسیب‌پذیری کم (شاخص بین ۴۷ تا ۹۲) و متوسط (شاخص بین ۹۳ تا ۱۳۶) طبقه‌بندی می‌شود. شکل (۹) پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه



شکل ۹- پهنه بندی آسیب پذیری دشت شهرستان البرز استان قزوین

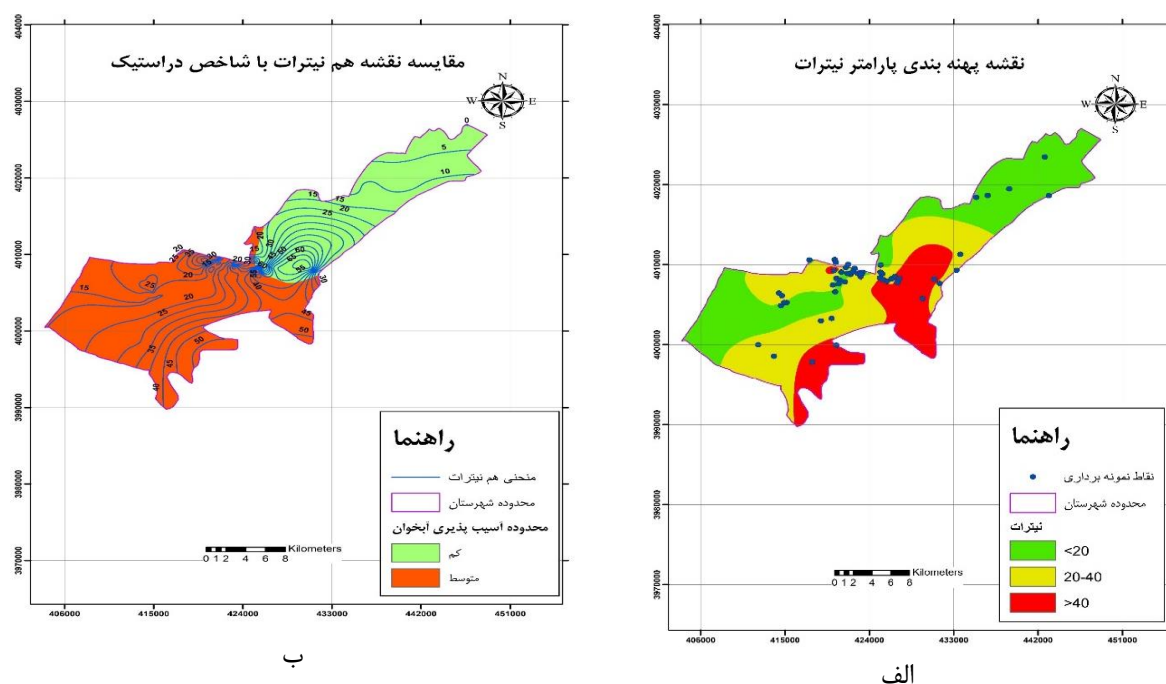
Fig. 9- Vulnerability zoning of the Alborz County plain, Qazvin Province

نیترات مستقیماً در فاضلاب خانگی و آب برگشتی از کشاورزی وجود ندارد ولی در اثر واکنش هیدرولیز اوره به آمونیوم تبدیل می شود. بر اساس رابطه (۲)، آمونیوم موجود نیز در اثر واکنش هوازی درون مخازن چاه های فاضلاب و محیط غیراشباع خاک، به نیترات تبدیل می شود که در اصطلاح علمی این پدیده را نیتریفیکاسیون می گویند و به آب زیرزمینی نشت می کند.



بر اساس شکل (۱۰-الف) اطلاعات مربوط به یون نیترات در اختیار بود و از این یون به عنوان شاخصی مناسب برای ارزیابی شاخص دراستیک استفاده شد و با نقشه پهنه بندی دراستیک منطقه در شکل (۱۰-ب) مقایسه شد. میزان آلاینده نیترات در نقاط مختلف دشت متفاوت است، مثلاً در بخش شمال شرقی دشت به علت کم بودن فعالیت کشاورزی و مصرف کم کودهای شیمیایی نیتروژنی، میزان نیترات موجود در آب زیرزمینی کم است و نقشه توزیع نیترات هماهنگی مناسبی با پهنه بندی آسیب پذیری این قسمت دارد. در قسمت مرکزی نیز که آسیب پذیری منطقه بالاست آلودگی نیترات این منطقه نیز بالاست، از این رو این ناحیه نیاز به مراقبت بیشتر دارد.

مقایسه نقشه هم نیترات با نقشه پهنه بندی دراستیک برای بررسی صحت نقشه آسیب پذیری تهیه شده باید نقشه تهیه شده را با معیار مناسبی مقایسه کرد. در میان آلودگی های غیرآلی مربوط به آب زیرزمینی بیشتر نگرانی ها مربوط به انتشار آلودگی های نیتراتی و فسفاتی است. نیترات بهترین شاخص برای نشان دادن آلودگی در اثر فعالیت های انسان و همچنین معیار مناسبی برای تشخیص محل های آسیب پذیر است. نیترات به لحاظ محیط زیستی نیز باعث مشکلات عدیده ای می شود. منابع مختلف ایجاد آلودگی نیتراتی در آب زیرزمینی به طور کلی شامل فعالیت های کشاورزی و فاضلاب های خانگی هستند. مقدار نیترات منتشر شده در زیر سطح زمین در اثر کاربرد کودهای شیمیایی شدیداً زیاد شده است، به طوری که در سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ که مصرف کودهای نیتراتی پنج تا شش برابر افزایش یافته، مقدار نیترات در زیر سطح زمین سه تا شش برابر زیاد شده است. البته باید مقدار نیتروژن ورودی به محیط تحت تاثیر بارندگی ها را در نظر گرفت که این منبع در مقایسه با کودها، نیتروژن بسیار کمتری وارد می کند (Jokar Niasar, 2002).



شکل ۱۰- نقشه هم نیترات دشت شهرستان البرز (الف)، مقایسه آن با پهنه‌بندی آلودگی دراستیک (ب)

Fig. 10- The iso-Nitrate (a) and Comparison of DRASTIC Vulnerability zoning and the iso-Nitrate maps of Alborz County plain (b)

زیرین منطقه باشد که باعث تفکیک لایه‌های شور و شیرین شده است. وجود این لایه‌ها از معجزات الهی در اکثر آب‌رفت‌هاست.

تحلیل حساسیت با حذف لایه‌ها

برخی محققان معتقدند که آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی ممکن است بدون استفاده از همه پارامترهای دراستیک نیز به‌دست آید و وزن‌ها و ارزش‌های نسبت داده شده دقت کافی نداشته باشند، برخی دیگر معتقدند که وزن‌ها و ارزش‌های نسبت داده شده به شاخص آسیب‌پذیری دراستیک دقت کافی دارند و هیچ دلیلی برای شک کردن به این ضریب‌ها وجود ندارد. از این رو آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای این مدل اجرا می‌شود. برای عملی کردن این تحلیل، در سطح دشت شهرستان البرز ابتدا با حذف تک تک لایه‌ها میزان حساسیت شاخص آسیب‌پذیری نسبت به هر پارامتر به‌دست آمد که نتایج به‌دست آمده از این تحلیل در جدول (۴) ارائه شده است.

به‌طور کلی قسمت‌هایی از غرب و مرکز دشت از لحاظ آسیب‌پذیری پتانسیل بالایی دارند. یکی از مهم‌ترین دلایل آن وجود رودخانه اصلی منطقه یعنی خررود است که همپوشانی نقشه‌های هم‌نیترات و آسیب‌پذیری با رودخانه خررود موید این موضوع است. نقش این رودخانه در اینجا انتقال دادن آلودگی است. عبور این رودخانه از مناطق با شیب زیاد باعث حمل آلودگی (کودهای شیمیایی شسته شده و فاضلاب‌های شهری و روستایی) از مناطق بالادست و نفوذ آلودگی در مناطق پایین‌دست پس از کاهش شیب مسیر و عبور از ارتفاعات و کاسته شدن از شدت جریان است. بالابودن سنگ کف و سطح ایستایی باعث شده است تا غلظت نیترات در این مناطق که اغلب دارای منابع تامین آب سطحی از قبیل قنات، چشمه و چاه‌های دستی هستند، نمود داشته باشد. در بررسی چاه‌های عمیق منطقه مشخص شد که تاکنون خوشبختانه آسیب جدی به این منابع ارزشمند تامین آب شیرین و باکیفیت وارد نشده که شاید یکی از دلایل آن وجود لایه‌های نفوذناپذیر رسی و مارنی در لایه‌های

جدول ۴- تحلیل حساسیت شاخص دراستیک به حذف لایه ها

Table 4- DRASTIC Index sensitivity analysis to the layered removing

پارامتر حذف شده Removed parameter	وزن Weight	تغییرات شاخص آسیب پذیری (بر حسب درصد) Vulnerability index changing (%)			
		Min	Mean	Max	SD
D	5	0	1.3	5.7	0.85
R	4	0.1	1.5	3.8	0.71
A	3	0	0.3	1.4	0.34
S	2	0	0.8	2.6	0.54
T	1	0.05	1	2.6	0.54
I	5	0	1.6	5.65	1.2
C	3	0	0.5	2.7	0.64

به دلیل بالابودن هزینه حذف آلودگی از منابع آب زیرزمینی، پهنه بندی آسیب پذیری ابزار ارزشمندی در اختیار مسئولان قرار می دهد تا بتوانند تصمیمات لازم را در مدیریت مصرف آب کشاورزی و کودهای کشاورزی، فاضلاب شهری و روستایی، تغییر کاربری اراضی و ... در دشت شهرستان البرز اتخاذ کنند. با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهاد می شود دستگاه های اجرایی ذی ربط تا پیش از بروز آسیب های جدی تر موارد زیر را اجرایی کنند:

سازمان جهاد کشاورزی بر مصرف کودهای شیمیایی و اصلاح الگوی کشت نظارت کند. نظام قیمت کودهای شیمیایی و افزایش قیمت محصولات کشاورزی سبب بالارفتن مصرف کودهای شیمیایی شده است. این سازمان می تواند از عملکرد دیگر کشورها در مهار مصرف بی رویه کودهای شیمیایی استفاده کند. برای مثال در انگلستان تولید گندم در هر هکتار در حدود هفت تن تثبیت شده و تولید بیشتر از آن را وزارت کشاورزی صرفا به دلیل مسائل محیط زیستی ممنوع اعلام کرده است. در بلژیک غلظت نیترات در زهاب مزارع را اندازه گیری می کنند و اگر غلظت نیترات آن از غلظت نیترات رودخانه بیشتر باشد با دادن اخطار و جریمه کردن، مقدار کود مصرفی را کاهش می دهند. شرکت های آب و فاضلاب روستایی و شهری در مناطقی که سنگ کف منطقه و عمق سطح آب بالا است طرح های انتقال و تصفیه فاضلاب را اجرایی می کند تا از آسیب رسیدن به منابع آب سطحی این مناطق جلوگیری شود. شرکت های

همانطور که در جدول (۴) مشاهده می شود، بیشترین وزن مؤثر با میانگین ۱/۶ مربوط به تاثیر ناحیه غیر اشباع (I) است که با وزن تئوری مربوط به این پارامتر همخوانی دارد، پس از آن نیز بیشترین وزن مربوط به تغذیه خالص (R) با مقدار ۱/۵ است. کمترین وزن مؤثر متعلق به محیط آبخوان (A) است. دلیل کم بودن وزن مؤثر عمق آب زیرزمینی، به رغم بالا بودن وزن تئوری آن را می توان به دلیل عمیق بودن سطح آب زیرزمینی در دشت شهرستان البرز دانست. می توان به این نکته پی برد که در نظر نگرفتن هر یک از پارامترها ممکن است باعث ایجاد خطاهایی در نتیجه گیری از مدل شود ولی می توان با دید کارشناسی نسبت به منطقه، وزن های مورد استفاده در مدل را تا حد معقولی تغییر داد و اصلاح کرد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، وضعیت آسیب پذیری آبخوان دشت شهرستان البرز با روش دراستیک و GIS بررسی شد. نتایج بررسی ها نشان داد در دشت شهرستان البرز با مساحت ۴۲۸ کیلومتر مربع حدود ۳۱ درصد از مساحت کل منطقه متعلق به کلاس آسیب پذیری کم و ۶۹ درصد از مساحت در قسمت غربی و مرکز آبخوان در کلاس آسیب پذیری متوسط قرار دارد. این پهنه بندی با توزیع نیترات آب زیرزمینی دشت شهرستان البرز از همخوانی خوبی دارد. از این رو لازم است کنترل این ناحیه ها در مقابل آلودگی مد نظر قرار گیرد.

آب منطقه‌ای در هنگام صدور مجوز حفاری در مناطق آسیب‌پذیر یا حتی کنار روخانه‌ها و آبراهه‌های آلوده دقت کنند عملیات حفاری باعث برقراری ارتباط هیدرولیکی بین لایه‌های آبدار بالایی و لایه‌های آبدار پایین نشود و آلودگی از سفره‌های آلوده بالایی به سفره‌های آبدار پایینی منتقل نشود. برای تغذیه مصنوعی لایه‌های آبدار با آب‌های جاری در مناطق شنی باید دقت کافی در آزمایش آب قبل از تغذیه داشته باشند تا موجب انتقال آلودگی به لایه‌های آبدار نشود. برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان روش‌های متعددی وجود دارد، در این مطالعه تنها از روش دراستیک برای دشت شهرستان البرز استفاده شده است، بهتر است از روش‌های دیگر نیز در این پهنه‌بندی استفاده شود و با مقایسه نتایج به دست آمده صحت، دقت، مزیت‌ها و معایب روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل شود. روش دراستیک از قضاوت مهندسی در ارزش‌گذاری و وزن‌دهی به پارامترهای مختلف تاثیرپذیر است.

سپاسگزاری

از سازمان مدیریت و پژوهش‌های اقتصادی کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نیرو، سازمان حفاظت آب و خاک، آب منطقه‌ای استان قزوین، آب و فاضلاب استان قزوین و سازمان مراتع و جنگل‌های استان قزوین که آمار و اطلاعات را در اختیار گذاشته‌اند سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- Aghazadeh, N., Chitsazan, M., Mirzaee, Y. & Ebrahimi, H. (2022). Modifying DRASTIC Model DRAST-VUL to determine groundwater vulnerability in an urban aquifer. *Watershed Engineering and Management*, 13(4), 690-703. doi: 10.22092/ijwmse.2021.125064.1596. (In Persian).
- Ahmed, I. & Nazzal, Y. (2015). Hydrogeological vulnerability and pollution risk apping of the Saq and overlying aquifers using the DRASTIC model and GIS techniques, NW Saudi Arabia. *Environment Earth Science*.64: 342-356.
- Aller, L., T. Bennet, J.H. Lehr, R.J. Petty, & G. Hackett. (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings*. EPA/600/2-87/035. US Environmental Protection Agency, Ada, OK, USA.
- Amirahmadi, A., Abbariki, Z. & Ebrahimi, M. (2022). Evaluation of the vulnerability of Davarzan Aquifer by DRASTIC method using GIS. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 2(6), 51-66. (In Persian).
- Amiri F., Tabatabaie, T., & Entezari M. (2020). GIS based DRASTIC and modified DRASTIC techniques for assessing groundwater vulnerability to pollution in Torghabeh-Shandiz of Khorasan County, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(12): 1-16. doi:https://doi.org/10.1007/s12517- 020-05445-0.
- Babiker, IS., Mohamed, MAA., & Hiyama, T. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1-3): 127-140.
- Bera, A., Mukhopadhyay, BP., Chowdhury, P., Ghosh, A., & Biswas, S. (2021). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214: 112085.
- Bhuvaneswaran, C., & Ganesh, A. (2019). Spatial assessment of groundwater vulnerability using DRASTIC model with GIS in Uppar odai subwatershed, Nandiyar, Cauvery Basin, Tamil Nadu. *Groundwater for Sustainable Development*, 9:100270. doi:https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100270.
- Chitsazan, M., & Akhtari, Y. (2009). A GIS-based DRASTIC Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran. *Water Resource Management*, 23, 1137-1155. doi:10.1007/s11269-008-9319-8.
- Dixon B. (2005). Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting groundwater vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis. *Journal of Hydrology*. 309(1-4):17-38. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.010>.

- Fathie, H. A. & Beygi, H. H. (2012). Zoning the vulnerability potential of Shahrekord aquifer using the DRASTIC model and its validation using seasonal changes in nitrate and phosphate pollutant concentrations. *Water Resources Engineering*, 5(14), 1-16. Doi: [20.1001.1.20086377.1391.5.14.1.6](https://doi.org/10.1001.1.20086377.1391.5.14.1.6) (In Persian).
- Ganwer, S., Sinha, M. Multaniya, A., & Ghodichore, N. (2024). Introducing reverse Multi Influencing Factor technique in DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment. *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 25, 101106. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101106>.
- Hamed Masoud, H., Dara Rebwar, N., & Kirlas Marios, C. (2024). Groundwater vulnerability assessment using a GIS-based DRASTIC method in the Erbil Dumpsite area (Kani Qirzhala), Central Erbil Basin, North Iraq. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 12(1): 16-33. doi: 10.26599/JGSE.2024.9280003.
- Jokar Niasar, V. (2002). Investigation and estimation of nitrate transfer from absorbent wells to the groundwater surface in Tehran, Master's thesis, Sharif University of Technology. (In Persian).
- Krishna, R., Iqbal, J., & Gorai, A.K. (2015). Groundwater vulnerability to pollution mapping of Ranchi district using GIS. *Applied Water Science* 5, 345–358. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0198-2>.
- Lathamani, M.R., Janardhana, B., Mahalingam, S., & Suresha. (2015). Evaluation of Aquifer Vulnerability Using Drastic Model and GIS: A Case Study of Mysore City, Karnataka, India, *Aquatic Procedia*. 4, Pages 1031-1038, doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.130.
- Mardan, H., & Yargholi, B. (2020). Ardabil Alluvial Plain Aquifer Vulnerability Zoning Using a Combination of GIS and DRASTIC Method. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6(97)), 391-406. (In Persian).
- Moradinejad, T., Rezaei, M., & Nakhaei, M. (2023). Vulnerability Assessment of Groundwater Resources in Qazvin Aquifer with DRASTIC, Modified and Fuzzy Methods. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(3), 35-56. doi: 10.22077/jdcr.2023.6186.1020. (In Persian).
- Nakhostin Rouhi, M., Rezaei Moghaddam, M. H., & Rahimpour, T. (2017). Groundwater vulnerability zonation using DRASTIC and SI models in GIS (Case Study: Ajabshir Plain). *Journal of Eco hydrology*, 4(2), 587-599. doi: 10.22059/ije.2017.61496. (In Persian).
- Novinpour, E.A., Moghimi, H., & Kaki, M. (2022). Aquifer vulnerability based on classical methods and GIS-based fuzzy optimization method (case study: Chahardoli plain in Kurdistan province, Iran). *Arabian Journal of Geoscience* 15, 360 (2022). doi.org/10.1007/s12517-022-09549-7.
- Ozegin, K., Ilugbo, S. & Adebo, B. (2024). Spatial evaluation of groundwater vulnerability using the DRASTIC-L model with the analytic hierarchy process (AHP) and GIS approaches in Edo State, Nigeria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 134 103562, doi.org/10.1016/j.pce.2024.103562.
- Pourbalighy, M., Rezayan, S., Rafaty, M., & hejazi, R. (2022). Evaluation of groundwater vulnerability of aquifers in aisin plain by drastic and GODS models and GIS. *Journal of RS and GIS for natural resources*, 12(4 (45), 71-94. (In Persian).
- Rahman, A. (2008). A GIS based model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Algarh, India. *Applied Geography*, 28(1):32–53.
- Rangzan, k., Firouzabadi, P, Mirzaei, & Alijani, f. (2008). Mapping of groundwater vulnerability using drastic and empirical assessment of unsaturated zone in gis, varamin plain. *Iranian journal of geology*, 2(6), 21-32. (In Persian).
- Sarcheshmeh, B. & Shahmohammadi-Kalalagh, S. (2017). Evaluation of Salmas Plain Aquifer Vulnerability to Pollution Using DRASTIC Model and GIS. *Water and Soil Science*, 26(4.2), 55-67. (In Persian).
- Taheri Tizro, A., Qaleban Tgmedash, M., & Farajy, F. (2021). Vulnerability evaluation of Qazvin Plain Using DRASTIC-AHP Based on Geographic Information System. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(29), 145-160. doi: 10.22111/jneh.2020.34024.1659. (In Persian).
- Vrba J., & Zoporozec A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise GmbH and Co, KG.
- Yazdani, V., & Mansourian, H. (2019). The assessment vulnerability of Qazvin-plain aquifer, sensitivity analysis removing parameters by using GIS. *Irrigation and Water Engineering*, 10(2), 127-145. doi: 10.22125/iwe.2019.100746. (In Persian).



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. 98, Spring 2025

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

Contents

Research Paper

Investigation of specific energy stability in converging side weirs with guiding structures. AmirReza Shahriari, Mehdi Daryaei, Seyed Mahmood Kashefipour, MohammadReza Zayeri.....	1
Exploring key drivers affecting the development of farmers' resilience capacity in the face of water scarcity. Mojtaba Noori, Rohollah Rezaei, MohammadKazem Rahimi.....	19
Analysis of the dimensions of farmers' resilience to drought crisis using content analysis method Mohammad Mehdi Ghasemi, Javad Ghasemi	43
Estimating scour hole dimensions downstream of triangular-triangular compounding sharp-crested weirs using artificial intelligence models. Sasan Nejati, Mehdi Meftah Halaghi, AbdolReza Zahiri, Younes Aminpour.....	67
Experimental and numerical investigation of the effect of blockage progression on scour downstream of box culvert. Reza Bavandpoori Gilan, Rasool Ghobadian, Ali Arman	85
Vulnerability zoning of the Alborz county of Qazvin province aquifer using DRASTIC method and GIS Hosein Atashgaran, Massumeh Rostamabadi, Saeed Kazemi Mohsenabadi	105

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

Vol. 26 No. 98 2025

Published by: Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Executive Director: Dr. H. Dehghani -sanij Professor

**Editor in Chief: Dr. N. Abbasi, Pro-
fessor 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:

- S. Emami	- S. Soltani	- B. Lashkarara	- P. Varjavand
- N. Heydari	- M.A. Shahrokhnia	- A. Mokhtaran	- A. Uossef Gomrokchi
- R. Daneshfaraz	- N. Abbasi	- Sh. Moghispoor	- H. Yonesi
- O. Raja	- J. Ghasemi	- H. Montaseri	
- R. Rezaei	- B. Kamayi Abbasi	- Y. Mehri	

AERI Site: www.aeri.ir

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

E-mail: aridsej@areeo.ac.ir