

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)



جلد ۲۶، شماره ۱۰۱، زمستان ۱۴۰۴



Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

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

پژوهشی

جلد ۲۶، شماره ۱۰۱، زمستان ۱۴۰۴

Vol. 26, No. 101, Winter 2025

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

فهرست مقالات

- ۱ بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوک‌های مستغرق با جهت جریان در حوضچه های آرامش بر ضخامت لایه مرزی
کیمیا اخوان، منوچهر حیدرپور
- ۱۵ تعیین میزان آب کاربردی، بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت مدیریت کشاورزان استان البرز با استفاده از مدل FAO-AquaCrop
صمد حسین‌زاده اجیرلو، بیژن نظری، فریبرز عباسی، افشین خورسند
- ۳۱ اثر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد میوه، بهره‌وری آب و پارامترهای رشدی انگور
سیدحسن موسوی‌فضل
- ۴۹ اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم
نادر نادری
- ۶۵ بهره‌وری آب و ارزیابی تحمل به کم‌آبی در ارقام و ژنوتیپ‌های پرمحصول سیب‌زمینی در منطقه اردبیل
کرامت اخوان گیگلو، داود حسن‌پناه، احمد موسی‌پور گرجی، یوسف جهانی جلودار
- ۸۳ ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی
شناور در رودخانه‌های کوهستانی جنگلی
محمد رستمی، امیرحسین رحیمی

AERI

Contents

- 1 Investigating the Influence of Submerged Block Arrangement and Angle of Incidence to Flow Direction on Boundary Layer Thickness in Stilling Basins
Manouchehr Heidarpour, Kimia Akhavan
- 15 Determining the Amount of Applied Water, Water Productivity, and Yield of Forage Maize under Farmers' Management in Alborz Province Using the FAO-AquaCrop Model
Samad Hosseinzadeh Ajirlou, Bijan Nazari, Fariborz Abbasi, Afshin Khorsand
- 31 Effect of Subsurface Drip Irrigation on the Fruit Yield, Water Productivity, and Growth Parameters of Grapevine
Seyed Hassan Mousavi Fazl
- 49 TImpact of Water Consumption Management on Yield and Yield Components of Wheat
Nader Naderi
- 65 Water Productivity and of Water Deficit Tolerance Evaluation in High-Yielding Potato Cultivars and Genotypes in Ardabil Region
Keramat Akhavan Gigloo, Davoud Hassanpanah, Ahmad Mousavipoor Gorji, Yuosef Jahani Jelodar
- 83 ENumerical Evaluation of the Performance of Protective Steel Beams in Reducing Bridge Opening Blockage Risk Caused by Floating Woody Debris in Mountainous Forested Rivers
Mohammad Rostami, Amir Hossein Rahimi

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 ۱۰۱، زمستان ۱۴۰۴ شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

فهرست مقالات

مقاله پژوهشی

- بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی
کیمیا اخوان، منوچهر حیدرپور ۱
- تعیین میزان آب کاربردی، بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت مدیریت کشاورزان استان البرز با استفاده از مدل
FAO-AquaCrop
صمد حسین‌زاده اجیرلو، بیژن نظری، فریبرز عباسی، افشین خورسند ۱۵
- اثر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد میوه، بهره‌وری آب و پارامترهای رشدی انگور
سیدحسین موسوی‌فضل ۳۱
- اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم
نادر نادری ۴۹
- بهره‌وری آب و ارزیابی تحمل به کم‌آبی در ارقام و ژنوتیپ‌های پرمحصول سیب‌زمینی در منطقه اردبیل
کرامت اخوان گیگلو، داود حسن‌پناه، احمد موسی‌پور گرجی، یوسف جهانی جلودار ۶۵
- ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی شناور در رودخانه‌های
کوهستانی جنگلی
محمد رستمی، امیرحسین رحیمی ۸۳

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:

- خالد احمدآلی	- مسعود اکبری	- سالومه سپهری	- ابوالفضل ناصری
- جواد احدیان	- حسن اجاقلو	- نادر عباسی	- افشین یوسف گمرکچی
- امیر اسلامی	- فرزین پرچی عراقی	- میثم عابدین‌پور	- حجت‌الله یونسی
- مهدی اکبری	- امید رجا	- مصطفی گودرزی	

ویراستار علمی و ادبی: محمدرضا داهی

ویراستار انگلیسی: محمدرضا داهی

مدیر داخلی: افشین یوسف گمرکچی

صفحه‌آرا: شبنم جباری

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

تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۲۷۰۸۳۵۹ (۰۲۶)، دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)

پایگاه اطلاعاتی مؤسسه: www.aeri.ir

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

پیام‌نگار: aridsej@areeo.ac.ir

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

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

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

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

ترتیب و شرح قسمت‌های مختلف مقاله

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

برگه مشخصات مقاله

این قسمت در یک صفحه جداگانه تهیه می‌شود و در 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 ضمیمه 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**Investigating the Influence of Submerged Block Arrangement and Angle of Incidence to Flow Direction on Boundary Layer Thickness in Stilling Basins****Manouchehr Heidarpour^{✉1}, Kimia Akhavan²**

1. Corresponding Author :Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Graduated of Hydraulic Structures, Department of Water Sciences and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

(✉ Corresponding Author: : heidar@iut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 3 January 2026

Revised: 25 January 2026

Accepted: 9 February 2026

Available Online: 4 May 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Heidarpour, M., Akhavan, K., (2026). Investigating the Influence of submerged block arrangement and angle of incidence to flow direction on boundary layer thickness in stilling basins. V.26, No.100, P: 1-14
<https://doi.org/10.22092/idsr.2026.371801.1637>

Extended Abstract**Introduction**

Hydraulic jump is a type of rapidly varied flow in which the flow transitions from supercritical to subcritical. Incorporating rough beds at the channel bottom leads to the maximization of energy dissipation, resulting in a significant reduction in conjugate depth and roller length. These results have important implications for the cost-effective design of stilling basins, which commonly encounter hydraulic jumps. One feature that has attracted the attention of researchers studying jumps on rough beds is the velocity profile of the jump on rough beds. In this research, the effect of the arrangement of submerged vanes on the velocity profiles of the hydraulic jump in a stilling basin was measured for Froude numbers ranging from 4.8 to 9.14.

Methodology

Experiments were conducted in the hydraulic laboratory in a rectangular channel with physical dimensions of length 8 m, width 0.4 m, and height 0.6 m. Submerged vanes were used as roughness elements on the bed of the laboratory channel. These vanes are made of Teflon, and the geometry of a submerged vane, including its width (w), thickness (t), angle of attack (θ), and vane length (L), is one of the parameters affecting the characteristics of the hydraulic jump. For measuring the flow velocity, an instrument called a Pitot tube was used. In the present study, for 12 experimental models, velocity was measured at five cross-sections along the width, and at three points across the width in each cross-section. Measurements were taken at five points along the depth, with equal spacing ratios from the channel bed to the free water surface, and the readings were averaged across three different widths.

Results and Discussion

In general, the maximum velocity value decreases with distance from the beginning of the jump and occurs at a lower depth from the water surface. The bed with submerged vanes causes a reduction in the flow velocity magnitude, and its maximum value occurs at higher points compared to the classical jump. The significance of the non-dimensionalized velocity graphs lies in comparing the growth of the boundary layer across the cross-sections. The average value of δ/b is 0.62 and 0.72, and for $50 < x/D_1$, the ratio δ/b lies above the average line. Due to the low effect of turbulence and secondary currents caused by the presence of submerged vanes, the boundary layer thickness is greater in regions of calm flow (areas with

lower velocity). At values less than 50, the ratio δ/b decreases compared to the average line. The results showed that the value of the non-dimensional boundary layer thickness parameter, δ/b , was 0.72, which was highest in the parallel arrangement of submerged vanes at an attack angle of 75° compared to angles of 45° and 90°. Meanwhile, this value was obtained in the butterfly arrangement with an attack angle of 45° and increased from 0.56 to 0.01 compared to what other researchers have obtained.

Conclusions

Therefore, the best characteristic for the non-dimensional boundary layer thickness parameter, δ/b , on artificial roughness was achieved with the butterfly arrangement and a 45° attack angle of the submerged vanes, which proved to be an influential factor. In contemporary hydraulic jump research, the use of advanced techniques, such as machine learning tools and numerical simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD), is increasing. Simulating hydraulic jumps with CFD is a complex task and requires careful attention to turbulence modeling, grid accuracy, boundary conditions, and various other factors. It is essential to employ advanced techniques for comprehensive three-dimensional (3D) velocity and bed shear stress measurements. Conducting turbulence analysis will contribute to a more refined understanding of the underlying flow dynamics. Furthermore, the challenge of hydraulic jump stability on adverse slopes persists. Introducing roughness elements and sills can enhance hydraulic jump stability on adverse slopes. Investigating the potential effects of scale in such conditions is necessary.

Keywords: hydraulic jump, velocity Profiles, Butterfly Arrangement

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article.

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by all authors. The first draft of the manuscript was written by K. A. and all authors commented on previous versions of the manuscript (K. A. and M. H.). The final revisions have been applied by K. A. and Moreover, all authors have read and approved the final manuscript.

Acknowledgement

The authors would like to thank all participants of the present study, especially the teachers and personal of agriculture engineering department of the Isfahan University of technology which made this research possible.



© 2026, 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/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.371801.1637>

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی

کیما اخوان و منوچهر حیدرپور✉

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۵ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴

چکیده

پرش یا جهش هیدرولیکی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در آن، جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی تغییر حالت می‌دهد. گنجاندن بسترهای زیر در کف کانال، به حداکثرسازی اتلاف انرژی منجر می‌شود که نتیجه آن کاهش قابل توجه در عمق متوالی و طول غلتاب پرش است. این نتایج پیامدهای مهمی برای طراحی مقرون به صرفه حوضچه‌های آرامش دارد که معمولاً با پرش‌های هیدرولیکی مواجه می‌شوند. یکی از ویژگی‌هایی که توجه محققان پرش بر بستر زیر را جلب کرده است نیمرخ سرعت پرش است. در این پژوهش اثر آرایش صفحات مستغرق بر نیمرخ‌های سرعت پرش هیدرولیکی حوضچه آرامش در دامنه اعداد فرود $4/8$ تا $9/14$ اندازه‌گیری شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد مقدار پارامتر بی بعد ضخامت لایه مرزی δ/b ، $0/72$ است که در آرایش موازی صفحات مستغرق با زاویه برخورد 75° نسبت به زاویه 45° و 90° بیشترین مقدار را داشته است، درحالیکه این مقدار در آرایش پروانه‌ای با زاویه برخورد 45° بدست می‌آید و از $0/56$ تا $0/1$ نسبت به نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران افزایش داشته است. بنابر این بهترین مشخصه پارامتر بی بعد ضخامت لایه مرزی δ/b روی زبری مصنوعی با آرایش پروانه‌ای و زاویه برخورد 45° صفحات مستغرق با یک عامل تاثیرگذار بوده است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، نیمرخ‌های سرعت، آرایش پروانه‌ای

مقدمه

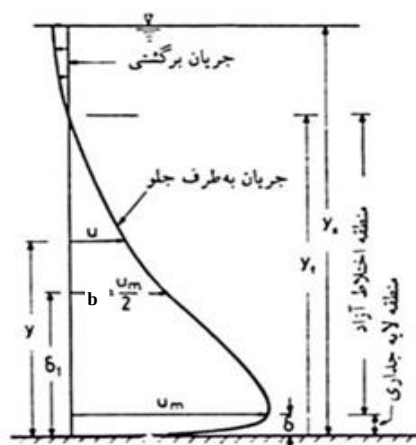
سرعت زیاد آب در کانال یا رودخانه طبیعی فرسایش بستر و جدارهای کانال را به همراه دارد. چنانچه آب در قسمتی از مسیر حالت فوق بحرانی داشته باشد و بنا به مشخصات و موقعیت خاص کانال بخواهد تغییر حالت دهد، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاه به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت نیز به اندازه قابل توجه کاسته می‌شود. این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در کانالهای باز است و از ابتدا تا انتهای آن تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد و پرش هیدرولیکی یا پرش آبی نام دارد. پرش یا جهش هیدرولیکی، از نوع جریانهای متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی دیده می‌شود و آن عبارت

از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی است. در پرش هیدرولیکی روی بستر زیر، لایه سطحی آب (که اغلب با هوا مخلوط می‌شود و چگالی کمتری دارد) نسبت به توده آب زیرین (با جرم بیشتر و اینرسی بالاتر) با سرعت بیشتری حرکت می‌کند. این اختلاف سرعت ناشی از کاهش اصطکاک در سطح آزاد و افزایش اتلاف انرژی در لایه‌های نزدیک بستر زیر است. لغزش شدید در سطح آب، باعث ایجاد لایه لغزشی آزادی خواهد شد که از بخش مایع فوقانی وارد می‌شود. لایه لغزشی کف بستر باعث کند شدن سرعت در لایه جدار می‌گردد، در نتیجه این اعمال توزیع سرعت در مقطعی به فاصله x از پاشنه پرش به صورت شکل (۱) خواهد بود (Farhoudi, 1993). نیمرخ سرعت

^۱ دانشجوی دکترای علوم و مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.^۲ دانش آموخته سازه‌های آبی گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

تولید غلتاب می‌شود. از دیگر اجزای نیمرخ سرعت می‌توان به ضخامت لایه مرزی، سرعت بیشینه و پارامتر b اشاره کرد، b ارتفاع نقطه‌ای است که سرعت در آن نقطه، نصف سرعت بیشینه نیمرخ باشد. نیمرخ سرعت به طرف جلو دارای سرعت صفر در بستر و سرعت بیشینه در فاصله δ است و به تدریج کاهش می‌یابد و در فاصله y_f از بستر به صفر می‌رسد. می‌توان ناحیه $y > \delta$ را منطقه آزاد نامید. جدار و ناحیه $y_f < y < \delta$ را منطقه اختلاط آزاد نامید.

اجزایی دارد با دو بخش متمایز: یکی جریانی به طرف جلو در جسم اصلی تحتانی و دیگری منطقه‌ای با سرعت منفی در بخش فوقانی. مطابق شکل (۱) در جریان به طرف جلو، کل میزان حجمی جریان بیش از جریان ورودی در پاشنه پرش خواهد بود. این امر به دلیل ورود جریان به لایه لغزشی است. برای برقراری پیوستگی جریان یک جریان برگشتی در قسمت فوقانی وجود خواهد داشت که در این شرایط باعث تشکیل گرداب می‌گردد. جریان برگشتی برای برقراری پیوستگی به وجود می‌آید این جریان برگشتی باعث



شکل ۱- توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی (Farhoudi, 1993)

Fig. 1 – Velocity distribution in a hydraulic jump (Farhoudi, 1993)

برای مقاطع مختلف در طول پرش با عدد فرود $7/04$ در ناحیه جریان جلو رونده اندازه‌گیری کرد و نشان داد که زبری بستر تاثیر محسوسی بر تغییر سرعت بیشینه در نیمرخ‌های سرعت نسبت به بستر صاف نمی‌گذارد. مطالعه داده‌های اوتسو و همکاران (Ohtsu et al., 1990) روی پرش هیدرولیکی و داده‌های آزمایش هاگر (Hager, 1992) با عدد فرود $4/59$ که در آن پرش آزاد تشکیل شده است نشان می‌دهد که یکنواختی توزیع سرعت در جریان فوق بحرانی پیش از پرش تأثیر نامحسوسی بر روند کاهش اندازه سرعت دارد. نتایج مطالعات وو و راجاراتنام (Wu & Rajaratnam, 1995) نیز نشان داد که یکسان نبودن توزیع سرعت در جریان فوق بحرانی پیش از پرش، تاثیر بسیار نامحسوسی بر روند کاهش سرعت دارد.

بختف و ماتزکه (Bakhmeteff & Matzke, 1936) راهنمایی‌هایی درخصوص اندازه‌گیری‌های سرعت ارائه دادند و راس و همکاران (Rouse et al., 1959) میدان سرعت را برای سه عدد فرود رسم کردند. شرودر (Schroder, 1963) و راجاراتنام (Rajaratnam, 1967) الگوی جریان را به‌طور کامل تشریح کردند و میدان متوسط زمانی سرعت و فشار را ارائه دادند راجاراتنام (Rajaratnam, 1967) نشان داد که نیمرخ توزیع سرعت در پرش با کمی اصلاح شبیه به نیمرخ سرعت در جت دیواری کلاسیک است. او دلیل افت انرژی در پرش هیدرولیکی را تبدیل میانگین انرژی جنبشی به وسان‌های سرعت و سپس اتلاف گرمایی آن بر اثر لزوجت دانست. اولین بار سرعت روی بسترهای زبر را راجاراتنام (Rajaratnam, 1968) اندازه‌گیری کرد. وی در مطالعات خود نمودار سرعت را

بی‌بعد را $0/71$ محاسبه کرده است که در مقایسه با بستر صاف قابل توجه است. تسلیمی (Taslimi, 2021) با بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با زبری دوزنقه‌ای و پله منفی ابتدایی و به این نتیجه دست یافت که مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در محدوده $0/3$ تا $0/95$ و به‌طور متوسط $0/63$ است، درحالی‌که این متغیر برای پرش کلاسیک به‌طور متوسط $0/16$ است. محمدزاده (Mohammadzadeh, 2021) روی تاثیر بلوک‌های زیگزگی شکل بر پرش هیدرولیکی مطالعه کرده و نتیجه گرفته است که افزایش ارتفاع و فاصله زبری‌های روی بستر باعث کاهش سرعت در نزدیکی بستر شده است و دلیل آن را افزایش تنش برشی و افزایش شیب خط توزیع سرعت می‌داند.

هدف این مطالعه، بررسی تاثیر زبری صفحات مستغرق بر نیمرخ سرعت در طول پرش هیدرولیکی و مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین است. همانگونه که در قسمت بررسی منابع گفته شد، کلیه مطالعات پیشین روی بستر صاف و زبر طبیعی هستند. این مطالعه به تاثیر صفحات مستغرق بر نیمرخ سرعت در طول پرش هیدرولیکی پرداخته است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان در کانالی با مقطع مستطیل شکل، با مشخصات فیزیکی طول 8 ، عرض $0/4$ ، و ارتفاع $0/6$ متر اجرا شده است. دیواره‌ها و کف کانال از جنس ورق پلکسی‌گلس شفاف است که موجب سهولت در برداشت داده‌ها می‌شود. کانال دارای دو دریچه یکی در ابتدا و دیگری در انتهای دریچه ابتدایی (بالا دست)، میزان آب ورودی به کانال را تنظیم و عدد فرود اولیه لازم را برای اجرای هر آزمایش را ایجاد می‌کند. با استفاده از دریچه پایین‌دست کانال که به صورت مکانیکی و به‌واسطه چرخ‌دنده‌های تعبیه شده اطراف آن بالا و پایین می‌شود، پرش هیدرولیکی در محل دلخواه در طول کانال تثبیت می‌گردد.

از صفحات مستغرق به عنوان زبری در بستر کانال آزمایشگاهی استفاده شده است. هندسه یک صفحه

اید و همکاران (Ead et al., 2000) با آزمایش‌هایی در کالورت با بستر موج‌دار دریافتند که سرعت نزدیک مرز به‌طور قابل‌توجهی کوچک‌تر از سرعت متوسط جریان بوده است و کاویتاسیون نیز به دلیل هم‌ترازی کف کانال با تاج سطح موج‌دار کمی کاهش می‌یابد. اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002) با تحقیقات مفصل‌تر در زمینه نیمرخ سرعت پرش روی بستر زبر نشان دادند که نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت با هم مشابه‌اند اما با نیمرخ بی‌بعد سرعت روی بستر زبر متفاوت هستند تحقیقات آنان نشان داد که روی بستر زبر ضخامت لایه مرزی بی‌بعد اندازه بزرگتری نسبت به بستر صاف دارد و زبری‌ها میزان رشد لایه مرزی را افزایش می‌دهد، این محققان مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را $0/45$ گزارش کردند. عباسپور و همکاران (Ghazali et al., 2009) و غزالی و همکاران (Ghazali et al., 2012) با تائید نتایج تحقیقات اید و همکاران (Ead et al., 2000) ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را به‌ترتیب $0/57$ و $0/39$ گزارش کردند. توزیع بدون بعد سرعت در فاصله‌های مختلف در طول جهش آزاد و مستغرق شبیه هم است (Nasr Abadi et al., 2010).

اثر تغییر طول زبری در سه بازه کوتاه، متوسط و بلند در محدوده طول موثر روی نیمرخ‌های سرعت توسط بزاز و همکاران (Bazzaz et al., 2011) انجام شد. نتایج نشان داد که هرچند نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در بستر زبر مشابه هستند اما شکل آنها با نیمرخ بی‌بعد سرعت در بستر صاف متفاوت است. بنی‌طبا (Banitaba, 2018) به بررسی و تحلیل آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب معکوس و زبری مصنوعی دوزنقه‌ای با ارتفاع مختلف پرداخته و مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را $0/45$ گزارش کرده‌اند. باقری (Bagheri, 2018) پس از بررسی تاثیر شیب معکوس و ورقه‌های مستغرق روی مشخصات پرش هیدرولیکی، مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را $0/51$ گزارش کرده است. پورعبدالله (Pourabdollah Ghafarkhi, 2019) اثر همزمان سه شیب منفی سه قطر زبری و دو ارتفاع پله مثبت انتهایی بر نیمرخ سرعت و نوسان‌های فشار در اعداد فرود 4 تا 10 را بررسی و ضخامت لایه مرزی

مستغرق از جمله پارامترهای موثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی است و شامل عرض (w)، ضخامت (t)، زاویه حمله (θ) و طول ورقه‌ها (L) می‌شود. این صفحات از جنس تفلون هستند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده و هندسه و چیدمان آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از دستگاهی به نام لوله پیتوت استفاده شده است تا روش پژوهش برای مقایسه با نتایج پژوهش‌های قبلی یکسان باشد. اختلاف سطح آب بالا آمده در لوله‌های چسبیده به تخته نشان دهنده ارتفاع معادل سرعت در رابطه برنولی است. در پژوهش حاضر برای

جدول ۱- مشخصات صفحات مستغرق به کار رفته در بستر کانال
Table 1 - Specifications of the submerged plates used in the channel bed

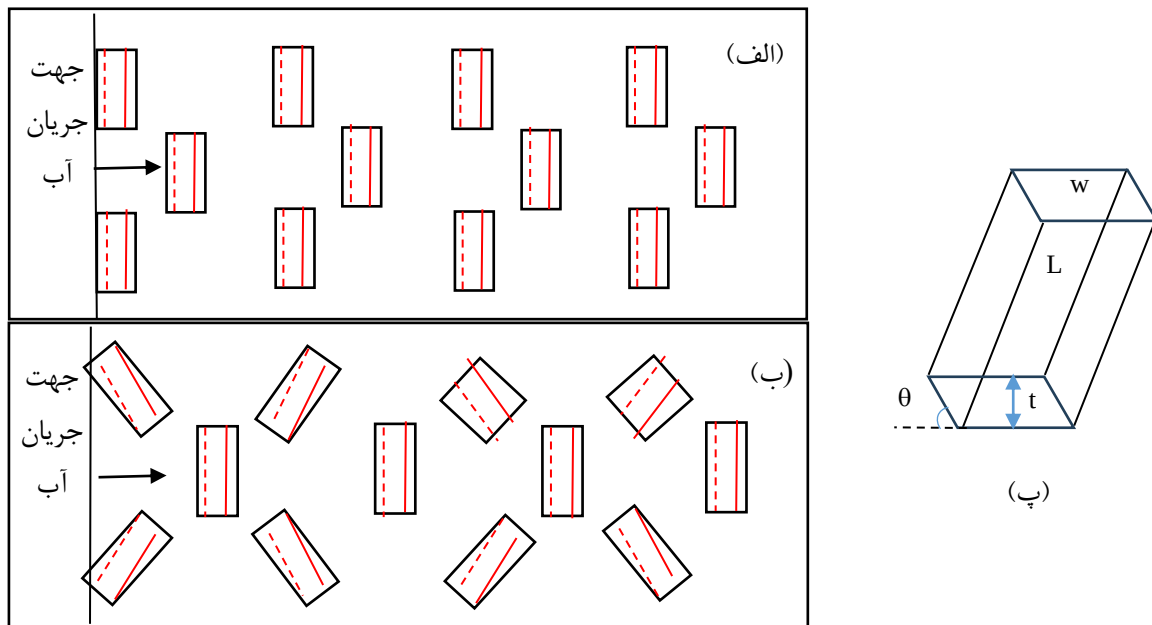
L (cm)	w (cm)	t (cm)	Z یا θ (°)
۱۲	۴	۱	۴۵، ۷۵ و ۹۰

مشخصات کلی آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای شماره‌گذاری انحصاری آزمایش‌ها از سیستم شماره‌گذاری چهاربخشی به روش زیر عمل شده است: بخش اول: برای آرایش اول حرف A و برای آرایش دوم حرف B بخش دوم: برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه عدد ۱، برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه عدد ۲ و برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه عدد ۳

بخش سوم: حرف a لاتین برای بیشترین مقدار بازشدگی دریچه بخش چهارم: مقدار زاویه حمله صفحات مستغرق به لاتین درج می‌شود. به طور مثال شماره آزمایش B2a75 آزمایشی است که صفحات مستغرق با آرایش دوم و زاویه حمله ۷۵ درجه در بستر قرار گرفته‌اند و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی دریچه ورودی ۵۰ میلی‌متر است.

جدول ۲- مشخصات کلی آزمایش‌ها
Table 2 - General specifications of the conducted experiments

ردیف	نوع آرایش	زاویه حمله صفحات (Deg)	دبی (lit/s)	بازشدگی دریچه بالادست (cm)	شماره آزمایش
۱	A	۰ (بستر صاف)	۳۰	۳/۴	A1a0
۲			۴۰	۵	A2a0
۳			۵۰	۶/۵	A3a0
۴		۴۵	۳۰	۳/۴	A1a45
۵			۴۰	۵	A2a45
۶			۵۰	۶/۵	A3a45
۷		۷۵	۳۰	۳/۴	A1a75
۸			۴۰	۵	A2a75
۹			۵۰	۶/۵	A3a75
۱۰		۹۰	۴۰	۵	A2a90
۱۱			۵۰	۶/۵	A3a90
۱۲	B	۴۵	۳۰	۳/۴	B1a45
۱۳			۳۰	۳/۴	B1a75
۱۴			۴۰	۵	B2a75
۱۵		۷۵	۵۰	۶/۵	B3a75



شکل ۲- صفحات مستغرق الف) آرایش اول ب) آرایش دوم پ) نمای سه بعدی
Fig. 2 – Submerged vanes a) First Configuration b) Second Configuration c) Three-Dimensional View

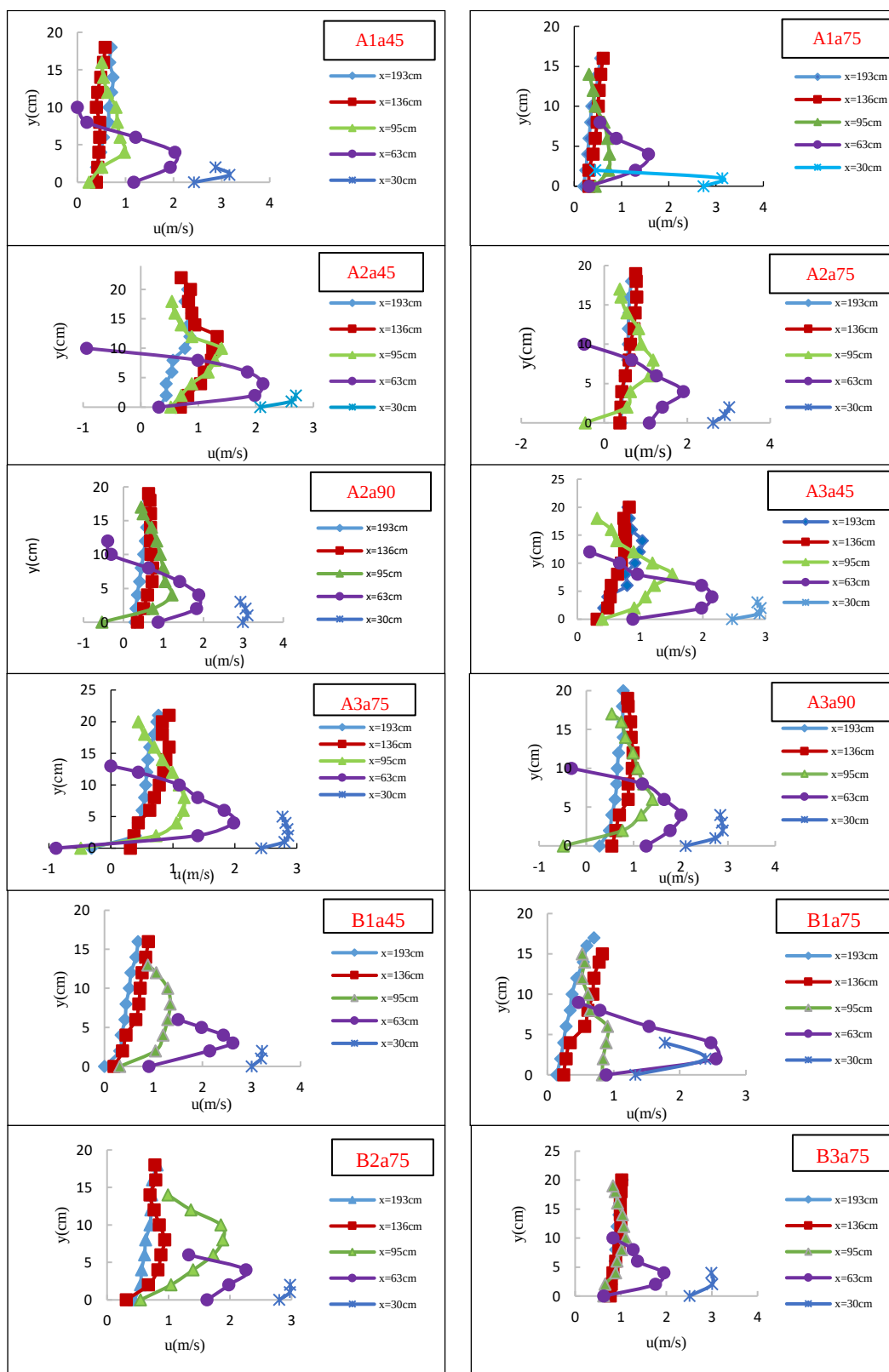
نتایج و بحث

نقاط بالاتر رخ می‌دهد. سرعت منفی در تعدادی از نمودارها به دلیل جابه‌جا شدن پیوسته جریان‌های غلتابی و وجود آشفتگی در جریان است. اهمیت نمودارهای بی‌بعد شده سرعت برای مقایسه میزان رشد لایه مرزی در مقاطع عرضی است.

نمودار بدون بعد سرعت شکل (۴) ترسیم تغییرات نسبت عمق جریان (D) به پارامتر b در مقابل نسبت سرعت جریان (U) به سرعت بیشینه در مقطع مورد نظر U_m است. U_m سرعت بیشینه و b عمقی است که در آن سرعت جریان برابر نصف سرعت بیشینه است. در شکل (۴) مختصات نقاط تجمعی بی‌بعد سرعت در تاج پرش آزمایش‌های مشخص شده با مختصات نقاط تاج پرش در آزمایش پرش کلاسیک مقایسه شده است همانطور که دیده می‌شود نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در پرش هیدرولیکی روی بستر صفحات مستغرق مشابه هستند اما با نیمرخ سرعت مربوط به بستر صاف در عمق بالاتری اتفاق افتاده‌اند.

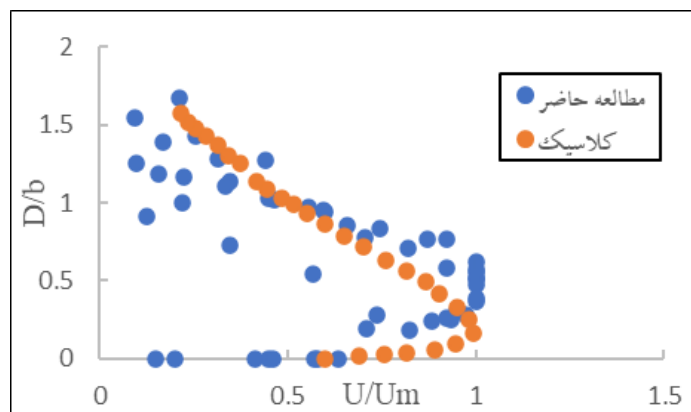
در این تحقیق نمودارهای عمقی سرعت برای ۱۲ آزمایش اندازه‌گیری و در نمودارهای ۳ رسم شده است. در هر شکل پنج نیمرخ رسم شده که نشان دهنده تغییرات سرعت از ابتدا تا انتهای پرش هستند. در هر نمودار سرعت، x فاصله مقطع عرضی از ابتدای پرش برحسب سانتی‌متر است. به دلیل ثبات بیشتر پرش، این نمودارها برای بیشترین بازشدگی درجه در هر دبی رسم شده است.

مطابق این نمودارها، مقدار بیشینه سرعت در آغاز پرش دیده می‌شود و هرچه به انتهای آن نزدیک می‌شویم مقدار آن کمتر می‌شود و یکنواخت‌تر می‌گردد که دلیل آن افت انرژی در طول پرش است. از طرفی در هر نمودار، سرعت از کف کانال به بالا افزایش می‌یابد تا به نقطه بیشینه برسد و دوباره به دلیل جریان‌های ثانویه سطحی روند کاهشی دارد. به‌طور کلی مقدار بیشینه سرعت با دور شدن از آغاز پرش کاهش می‌یابد و در عمق پایین‌تری از سطح آب رخ می‌دهد. بستر صفحات مستغرق موجب کاهش سرعت جریان می‌شود و مقدار بیشینه آن نسبت به پرش کلاسیک در



شکل ۳- نمودارهای عمقی سرعت در طول حوضچه آرامش در آزمایش‌ها
Fig. 3 - Depth-averaged velocity profiles along the stilling basin in the experiments

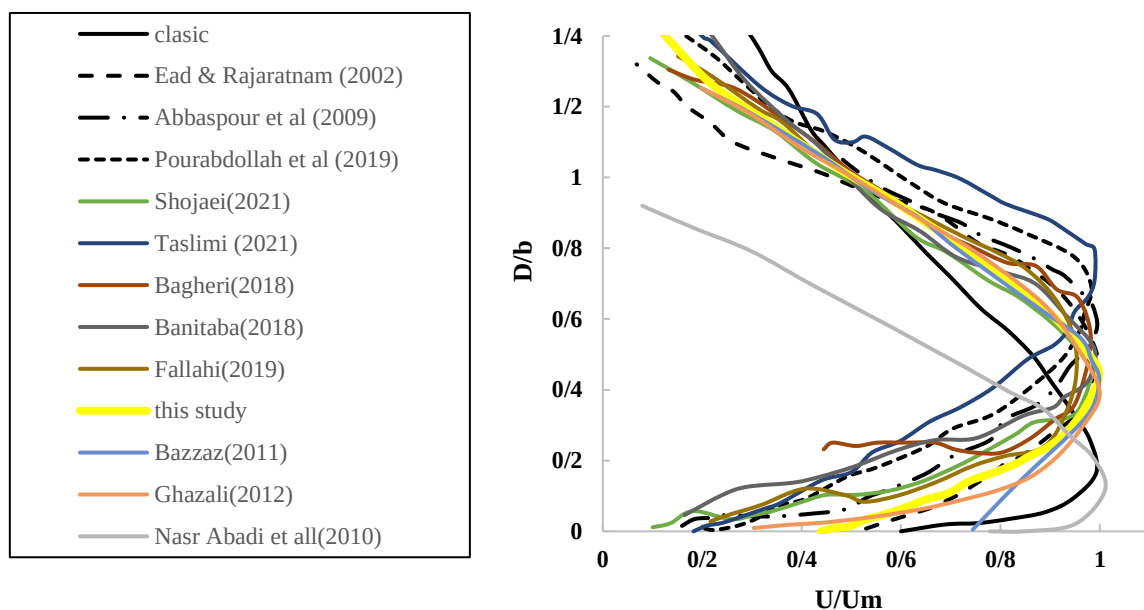
بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی



شکل ۴ - مقایسه نمودار بدون بعد سرعت با حالت کلاسیک

Fig. 4 - Comparison of the dimensionless velocity diagram with the classic case

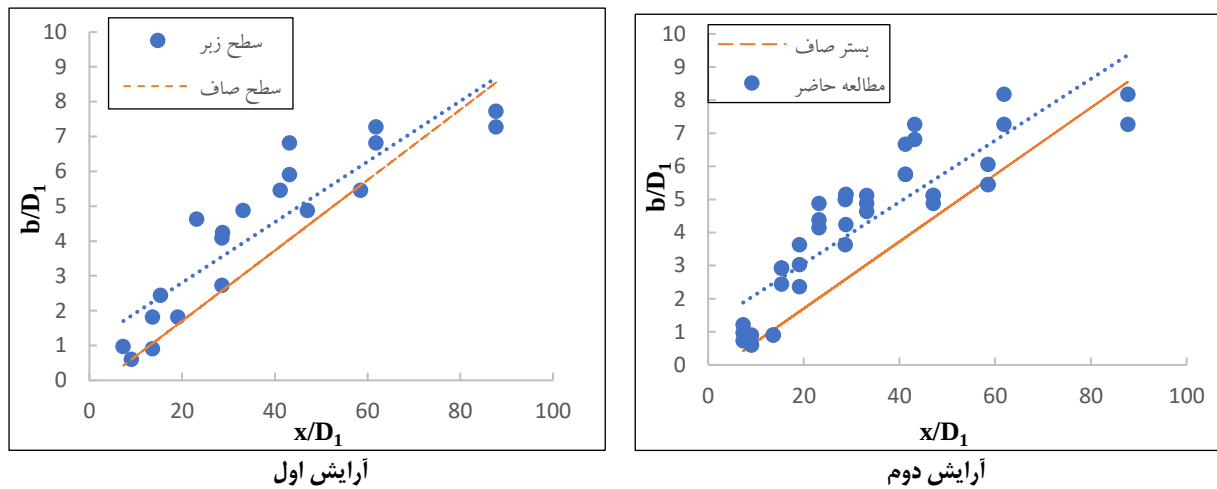
در شکل (۵) نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت برازش داده شده آزمایش‌های مطالعه حاضر با نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت برازش داده شده دیگر پژوهشگران مقایسه شده است، که توافق خوبی با نتایج دیگر پژوهش‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در این آزمایش‌ها فقط از صفحات مستغرق به تنهایی برای کنترل پرش هیدرولیکی استفاده شده است، افزایش قابل توجه عمق در بیشینه سرعت مشهود است، به‌گونه‌ای که نیمرخ‌های بالاتر از آن همگی از ترکیب دو یا چند عامل موثر برای کنترل پرش هیدرولیکی استفاده کرده‌اند. با این همه، اختلاف نتیجه ناچیز است.



شکل ۵ - مقایسه نمودار بدون بعد سرعت با نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران

Fig. 5 - Comparison of the dimensionless velocity diagram the results of other researchers

تغییرات معیار طولی بی‌بعد در فاصله‌های عرضی x ، مطابق شکل (۶) است.



شکل ۶- چگونگی تغییر معیار عمق b/D_1 در برابر معیار طول x/D_1
Fig. 6 - Variation of the depth criterion b/D_1 versus the length criterion x/D_1

x اندازه فاصله تا پاشنه پرش هیدرولیکی و معادله‌های پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و بستر دارای صفحات ۱ تا ۳ نشان‌دهنده ارتباط بین دو نسبت بی‌بعد b/D_1 در مستغرق است. برای بستر صاف:

$$\frac{b}{D_1} = 0.1011 \frac{x}{D_1} - 0.3161, \quad R^2 = 0.81 \quad (۱)$$

برای بستر زیر با آرایش اول :

$$\frac{b}{D_1} = 0.0992 \frac{x}{D_1} + 0.7324, \quad R^2 = 0.8097 \quad (۲)$$

برای بستر زیر با آرایش دوم :

$$\frac{b}{D_1} = 0.0883 \frac{x}{D_1} + 1.0459, \quad R^2 = 0.77 \quad (۳)$$

اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002)، عباسپور و همکاران (Abbaspour et al., 2009)، غزالی و همکاران (Ghazali et al., 2012) و باقری (Bagheri, 2018) به ترتیب از محققانی هستند که ارتباط دو نسبت b/D_1 و x/D_1 را توسط رابطه‌های ۴ تا ۷ ارائه کرده‌اند.

$$\frac{b}{D_1} = 0.17 \frac{x}{D_1} + 0.5, \quad R^2 = 0.91 \quad (۴)$$

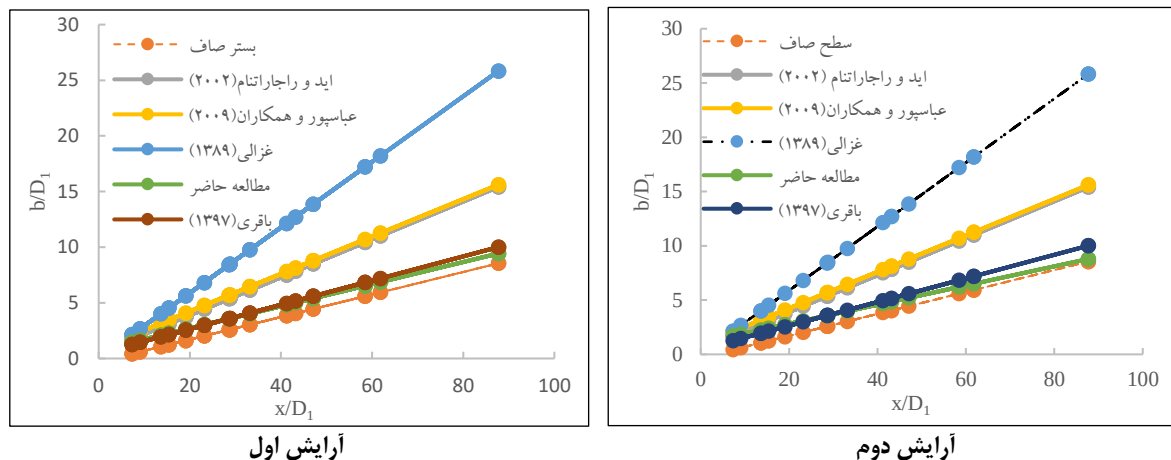
$$\frac{b}{D_1} = 0.168 \frac{x}{D_1} + 0.88, \quad R^2 = 0.83 \quad (۵)$$

$$\frac{b}{D_1} = 0.2945 \frac{x}{D_1} + 0.0017, \quad R^2 = 0.91 \quad (۶)$$

$$\frac{b}{D_1} = 0.1088 \frac{x}{D_1} + 0.4687, \quad R^2 = 0.8 \quad (۷)$$

تغییرات معیار طولی b/D_1 در برابر x/D_1 برای آزمایش حاضر و نتایج دیگر محققان در محدوده مورد نظر بسترهای صاف، بسترهای همراه با صفحات مستغرق در مطابق نمودار (۷) است.

بررسی تاثیر آرایش و زاویه برخورد بلوکهای مستغرق با جهت جریان در حوضچه‌های آرامش بر ضخامت لایه مرزی



شکل ۷- مقایسه نمودار تغییرات معیار عمق b/D_1 برحسب معیار طول x/D_1 با نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران
Fig. 7 - Comparison of the variation diagram of depth criterion b/D_1 versus length criterion x/D_1 with the results of other researchers

ارتباط بین δ/D_1 و x/D_1 با رابطه (۸) مشخص است. رابطه‌های ۸ تا ۱۱ ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در راستای طول پرش هیدرولیکی برای بستر صفحات مستغرق هستند. مطابق نمودار (۷) مقدار δ/b به‌طور میانگین برای آرایش اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۷۲ است و برای $x/D_1 > 50$ نسبت δ/b از خط میانگین بالاتر واقع

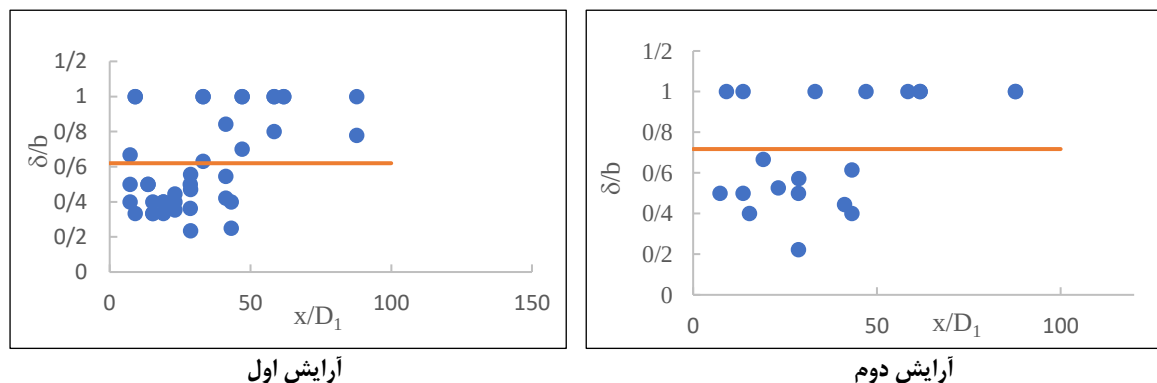
$$\frac{\delta}{D_1} = 0.0967 \frac{x}{D_1} - 0.3614, \quad R^2 = 0.81 \quad (8)$$

$$\frac{\delta}{b} = 0.62 \quad (9)$$

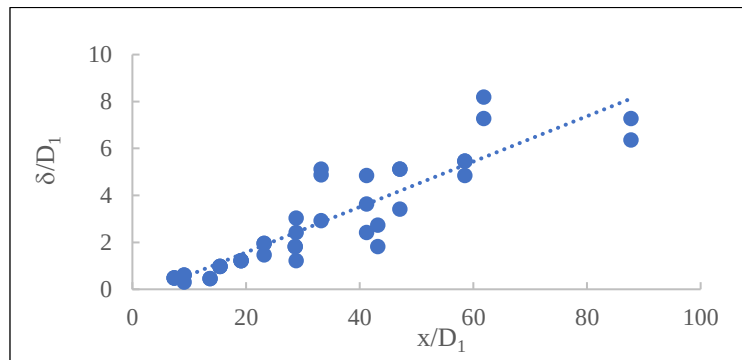
برای بستر زبر با آرایش دوم:

$$\frac{\delta}{D_1} = 0.0981 \frac{x}{D_1} - 0.4245, \quad R^2 = 0.87 \quad (10)$$

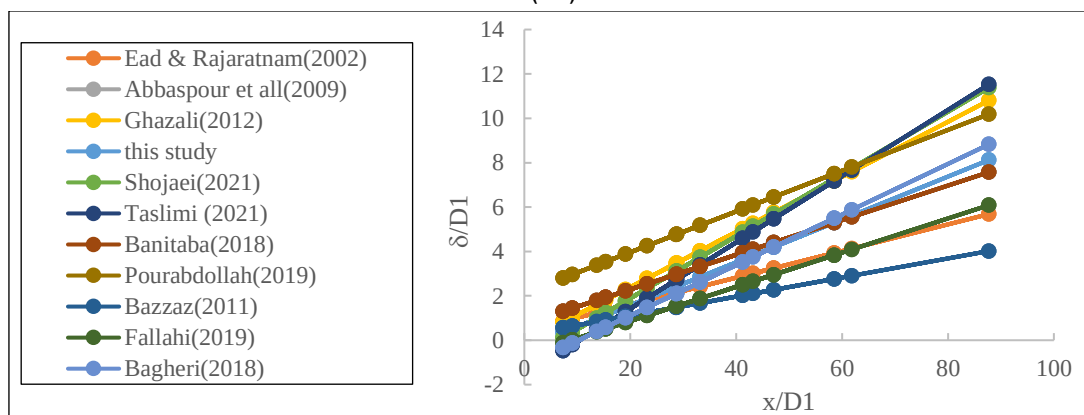
$$\frac{\delta}{b} = 0.72 \quad (11)$$



شکل ۸- تغییرات معیار ضخامت لایه مرزی δ/b برحسب معیار طول x/D_1
Fig. 8 - Variation of the boundary layer thickness criterion δ/b versus the length criterion x/D_1



(الف)



(ب)

شکل ۹- الف) تغییرات معیار ضخامت لایه مرزی δ/D_1 بر حسب معیار طول x/D_1 و ب) مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران
Fig. 9 – a) Variation of the boundary layer thickness criterion δ/D_1 versus the length criterion x/D_1 and b) comparison with the results of other researchers

نتیجه‌گیری

پروانه‌ای با زاویه برخورد 45° به دست می‌آید. بنابر این می‌توان گفت بهترین مشخصه پارامتر بی‌بعد ضخامت لایه مرزی، δ/b بر زبری مصنوعی با آرایش پروانه‌ای و زاویه برخورد 45° صفحات مستغرق نسبت به دیگر پژوهش‌ها با یک عامل تاثیرگذار بوده است.

در پژوهش‌های امروزی در موضوع پخش هیدرولیکی، استفاده از روش‌های پیشرفته، مانند ابزارهای یادگیری ماشین و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در حال افزایش است. شبیه‌سازی پخش‌های هیدرولیکی با CFD کاری پیچیده است و نیازمند توجه دقیق به مدل‌سازی آشفتگی، دقت شبکه، شرایط مرزی و عوامل مختلف دیگر است. ضروری است از روش‌های پیشرفته برای اندازه‌گیری سرعت سه‌بعدی (3D) و تنش برشی بستر یکپارچه استفاده شود.

در موضوع پخش بر بستر زبر، یکی از ویژگی‌هایی که توجه محققان را جلب کرده نیمرخ سرعت پخش بر بستر زبر است. در این پژوهش اثر آرایش صفحات مستغرق بر نیمرخ‌های سرعت پخش هیدرولیکی حوضچه آرامش در دامنه اعداد فرود $4/8$ تا $9/14$ اندازه‌گیری و با نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهشگران مقایسه شده است. نیمرخ‌های بی‌بعد سرعت در پخش هیدرولیکی روی بستر صفحات مستغرق مشابه هستند اما در بالای نیمرخ سرعت مربوط به بستر صاف واقع می‌شوند.

نتایج تحقیق نشان داد مقدار پارامتر بی‌بعد ضخامت لایه مرزی، δ/b ، $0/72$ است که در آرایش موازی صفحات مستغرق با زاویه برخورد 75° نسبت به زاویه 45° و 90° بیشترین مقدار را دارد، درحالی‌که این مقدار در آرایش

دسترسی به داده‌ها تحلیل آشفتگی به درک ظریف‌تر از دینامیک جریان زیرینایی کمک خواهد کرد. علاوه بر این، چالش پایداری پرش هیدرولیکی روی شیب‌های معکوس همچنان باقی است. معرفی زبری و آستانه‌ها (سیل) می‌تواند پایداری پرش هیدرولیکی روی شیب‌های معکوس را افزایش دهد.

مشارکت نویسندگان بررسی اثرهای احتمالی مقیاس در چنین شرایطی ضروری است.

تمامی نویسندگان در مطالعه و طراحی مقاله و حصول اطمینان از اعتبارسنجی در برابر داده‌های آزمایشگاهی و شناخت محدودیت‌های رویکرد CFD برای دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد، بسیار مهم است. بنابراین، به نظر می‌رسد فرا رسیدن زمانی که بتوانیم فیزیک جریان پیچیده پرش‌های هیدرولیکی را در سناریوهای عملی گوناگون به کمک این تکنیک‌های پیشرفته مشاهده و درک کنیم نزدیک است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

منابع

- Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A. A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. J. Hydro-environ Res. 3:109-117.
- Bagheri, H. (2018). Investigation of the Effect of Adverse Slope and Submerged Vanes on Hydraulic Jump Characteristics. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology
- Bakhmeteff, B. A and Matzke, A. E. (1936). The Hydraulic Jump in Terms of Hydraulic Similarity. Trans. Am. Soc. Civ.Eng. 101: 630-647
- Banitaba, Sh. (2018). Analysis of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Adverse Slope and Artificial Trapezoidal Roughness of Different Heights on a Laboratory Scale. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology.
- Bazzaz, M. , Ghorbani, B. and Samadi Brojeni, H. (2011). Assessment of Velocity Profile Variation of Hydraulic Jump in Relation to Changes in the length of Roughness. Journal of Hydraulics, 6(3), 13-24.
- Ead, S. A., Rajaratnam, N. and Katopodis, C. (2000). Turbulent open channel flow in circular corrugate culverts of hydraulic energy. ASCE, 126: 750-757.

- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. J. Hydraul. Eng. ASCE. 128: 656-663.
- Fallahi, B. (2019). An Experimental Study of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Adverse Slope, Rough Bed, and Sudden Channel Expansion. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Farhoudi, J. (1993). Flow in Open Channels. Urmia University Press.
- Ghazali, M. , Samadi brojni, H. , Ghorbani, B. and Rahmati, A. (2012). A Laboratory study of Velocity profile at Hydraulic Jump on Triangular Corrugated Bed. Irrigation and Water Engineering, 2(4), 117-128
- Hager, W. H. and Li, D. (1992). Sill-controlled energy dissipator. J. Hydraul. Res. 30: 165-181.
- Mohammadzadeh (2021). Investigation of the Effect of Zigzag-Shaped Blocks on Hydraulic Jump. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Madani University of Azerbaijan
- Nasr Abadi, Mohsen; Omid, Mohammad Hossein; Farhoudi, Javad (2010). A Comparison between Free and Submerged Hydraulic Jumps Downstream of Sluice Gates. 9th Iranian Hydraulic Conference, Tehran, Iran
- Ohtsu, I., and Yasuda, Y. and Awazu, S. (1990). Free and Submerged Hydraulic Jumps in Rectangular Channels, Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon University, No. 35, Feb. 50 p.
- Pourabdollah Ghafarkhi (2019). Comparison of Analytical, Numerical, and Laboratory Results of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Adverse Slope, Rough Bed, and End Sill. Doctoral Dissertation, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology.
- Rajaratnam, N. (1967). Advances in hydrosiences. In: hydraulic jumps. Department of Civil Engineering University of Alberta, Edmonton, Canada. 197-280.
- Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic jump on rough bed. Trans. Eng. Inst. Canada, 11: 1-8.
- Rouse, H. Siao, T. T. and Nagaratnam, S. (1959). Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump, Trans. ASCE, 124: 926-966.
- Schroder, R. (1963). Die turbulente Stromung im freien Wechselsprung, Habilitationsschrift, Mitteilung 59, Institut fur Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, Berlin.
- Shojaei, M. (2021). Experimental Study of Hydraulic Jump in Stilling Basin with Artificial Roughness and Sudden Expansion. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Taslimi (2021). Characteristics of Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Trapezoidal Roughness and Initial Negative Step on a Laboratory Scale. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology
- Wu S. and Rajaratnam N. (1995). Free jumps submerged jumps and wall jets, J. of Hydraulic Research, 33(2): 197-212.

Research Article

Determining the Amount of Applied Water, Water Productivity, and Yield of Forage Maize under Farmers' Management in Alborz Province Using the FAO-AquaCrop Model

Samad Hosseinzadeh Ajirlou^{1✉}, Bijan Nazari², Fariborz Abbasi³, Afshin Khorsand⁴

1. **Corresponding Author:** Researcher, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
2. Associate Professor of the Department of Irrigation and Development Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran & Faculty member of Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, Qazvin, Iran.
3. Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
4. Researcher, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
5. (✉ **Corresponding Author:** sa_hosseinzadeh@yahoo.com)

ARTICLE INFO

Received: 11 August 2025
Revised: 25 September 2025
Accepted: 24 February 2026
Available Online: 4 May 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Hosseinzadeh, S., Nazari, B., Abbasi, F., Khorsand, A., (2026). Determining the Amount of Applied Water, Water Productivity, and Yield of Forage Maize under Farmers' Management in Alborz Province Using the FAO-AquaCrop Model. V.26, No.100, P: 15-30
<https://doi.org/10.22092/idser.2026.370370.1627>

Extend Abstract

Intouduction

Water scarcity is one of the biggest challenges facing the agricultural sector in many parts of Iran, especially in arid and semi-arid regions. Increasing agricultural water productivity is not only a solution, but also an absolute necessity. Although solutions such as increasing the area under cultivation and increasing yield per unit area, optimizing agricultural inputs, controlling population and optimizing consumption, and increasing imports have been proposed to address the challenge of food security, each of these cases has its own implementation limits (Nouri *et al.*, 2023; Garofalo *et al.*, 2025). Crop models are considered a valuable tool for the integrated simulation of processes affecting crop growth and for the evaluation of crop management options (Mabhaudhi *et al.*, 2014; Wallach *et al.*, 2019). Crop models that can accurately estimate various parameters of crop growth, soil water dynamics, crop water use and expected yield under different irrigation levels can also be a fundamental aid for the successful implementation of irrigation management practises with limited and full irrigation (Sandhu & Irmak, 2019). Therefore, the aim of this study was to calibrate and then evaluate the AquaCrop model to simulate the yield and water productivity of forage maize under furrow and tape irrigation in the arid and semi-arid regions of Iran (Alborz province). In addition, the ability of the model to simulate the yield potential of forage maize under agricultural management in the study fields was evaluated.

Methodology

The data required for this study was collected in 2016 on farms in the province of Alborz. The farms were visited in coordination with the management of the Agricultural Jihad and were examined and selected taking into account the parameters required for the study. Three farms were selected in the city of Karaj, one in the Seifabad district, one in the city of Hashtgerd and one in the village of Haji Abad. The farm in Karaj was divided into three different sections due to its larger area, different cultivation dates and different irrigation schedules. Since understanding the current situation is one of the most fundamental planning steps for evaluating and providing solutions to improve any system, this study was conducted in the form of field experiments and field farms with the aim of investigating and estimating the current status of irrigation water productivity under farmers' management, and the potential for growing forage maize in Alborz province.

Water resources, the cultivated area, total irrigated land area, soil texture, soil salinity, and irrigation water salinity in each farm were investigated and measured. Additionally, some farm characteristics such as area, precise GPS location, irrigation method, irrigation water source, timing of water withdrawal and variations in withdrawal flow rate throughout the year, network type, and operator characteristics were recorded using compiled information recording forms.

Results and discussion

The results for the average yield of fresh forage corn were 49.12 tons per hectare using furrow irrigation method and 60 tons per hectare using tape irrigation method. In furrow irrigation, the highest fresh crop yield was obtained at Karaj farm (2) with 60 tons per hectare and an irrigation water productivity of 6.61 kg/m³. The lowest yield was recorded at Karaj farm (3) with 35 tons per hectare, while the lowest irrigation water productivity was at Karaj farm (1) with 4.24 kg m⁻³. The highest irrigation water productivity, 13.4 kg m⁻³, was observed at Hajiabad farm using tape irrigation. Therefore, tape irrigation is recommended for optimal water resource utilization. The study also showed that the RMSE index was 2.44 tons per hectare, and the d-agreement index was 0.947, indicating the AquaCrop model's ability to simulate corn fresh weight accurately in the study area. There was a strong correlation between simulated and measured crop yield values, with a coefficient of determination of approximately 0.95. The relative error (RE) was 3.7%, which is considered acceptable.

Conclusion

The results demonstrated that the AquaCrop model has a strong capability to analyze various management scenarios, predict performance under water-limited conditions, and optimize irrigation patterns. From a management perspective, the findings suggest that agricultural policies should shift focus from the "land productivity" index to the "water productivity" index. Additionally, providing practical training for farmers, promoting modern irrigation technologies, and utilizing simulation models like AquaCrop can play a crucial role in reducing water waste, enhancing crop yield, and ensuring sustainable production. Ultimately, implementing these strategies will not only improve water productivity but also serve as an effective step toward protecting water and soil resources and ensuring long-term food security.

Keywords: Crop yield potential, Furrow irrigation, Tape irrigation, Water productivity, Water use management

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

S.H.A.; conceived the idea and wrote the manuscript. B.N. and F.A.; reviewed the collected data, and prepared the equipment and materials. S.H.A. and A.K.; was responsible for editing, original data and text preparation. All authors took responsibility for the integrity of the data that is present in this study.

Acknowledgement

The authors are thankful to the Office of Vice Chancellor for Research and Technology, Imam Khomeini International University. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.



© 2026, 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/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

نوع مقاله: پژوهشی

تعیین میزان آب کاربردی، بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت مدیریت کشاورزان

استان البرز با استفاده از مدل FAO-AquaCrop

صمد حسین‌زاده اجیرلو^۱، بیژن نظری^۲، فربرز عباسی^۳، افشین خورسند^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴

چکیده

راهبرد اساسی حل بحران آب کشور، صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی از طریق افزایش بهره‌وری است. با توجه به اهمیت اقتصادی تولید ذرت علوفه‌ای در کشور، بررسی راهکارهای افزایش بهره‌وری آب برای تولید این محصول استراتژیک ضرورت دارد. به‌منظور آگاهی از نوع استفاده از سامانه‌های آبیاری، ابعاد مزرعه، منابع آبی مزارع، تاریخ کاشت و برداشت، اندازه‌گیری حجم آب آبیاری، عملکرد محصول تر و بهره‌وری آب در مزارع کشت دوم ذرت علوفه‌ای (کشت تابستانه) رقم سینگل کراس ۷۰۴ در شش مزرعه با سامانه‌های آبیاری جویچه‌ای و نواری تیپ با مدیریت کشاورزان، این مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۵ اجرا گردید. نتایج تحقیق نشان داد که متوسط حجم آب آبیاری در آبیاری جویچه‌ای و نواری تیپ به ترتیب ۱۰۶۷۰ و ۴۴۸۰ مترمکعب در هکتار و میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای به ترتیب ۴۹/۱۲ و ۶۰ تن در هکتار است. در روش آبیاری جویچه‌ای، بیشترین عملکرد محصول در مزرعه کرج (۲) به میزان ۶۰ تن در هکتار و با بهره‌وری آب آبیاری ۶/۶۱ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب و کمترین عملکرد محصول برای مزرعه کرج (۳) به میزان ۳۵ تن در هکتار و کمترین بهره‌وری آب برای مزرعه کرج (۱) به میزان ۴/۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. بیشترین بهره‌وری آب آبیاری، ۱۳/۴۰ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب، مربوط به مزرعه حاجی آباد با روش آبیاری نواری تیپ است. میانگین بهره‌وری آب مصرفی ذرت علوفه‌ای در آبیاری جویچه‌ای و نواری تیپ به ترتیب ۵/۶ و ۱۳/۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب تعیین شد. برای برآورد پتانسیل عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای از مدل AquaCrop استفاده شد. این مدل پیش از استفاده واسنجی و صحت‌سنجی گردید و قابل اتکا بودن نتایج آن در منطقه مورد مطالعه تأیید شد. خطای نسبی این مدل ۳/۷ درصد و ریشه میانگین مربعات خطا ۲/۴۴ تن در هکتار به‌دست آمد. این نتایج بیانگر قابلیت مدل در برآورد پتانسیل عملکرد و بهره‌وری آب تحت شرایط واقعی مزرعه است و روش آبیاری نواری تیپ به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای استفاده بهینه از منابع آبی منطقه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نواری تیپ، آبیاری جویچه‌ای، بهره‌وری آب، پتانسیل عملکرد محصول، مدیریت مصرف آب

مقدمه

کمبود آب یکی از چالش‌های عمده بخش کشاورزی مانند افزایش سطح زیرکشت و افزایش عملکرد در واحد در بسیاری از مناطق کشور، به‌ویژه مناطق واقع در اقلیم سطح، بهینه‌سازی نهاده‌های کشاورزی، کنترل جمعیت، خشک و نیمه‌خشک است. توجه به بالابردن بهره‌وری آب بهینه‌کردن مصرف، و افزایش واردات ارائه شده است، اما هر کشاورزی نه تنها راهکار بلکه ضرورتی است گریزناپذیر. گرچه یک از این موارد با محدودیت‌های اجرایی خاص خود مواجه برای غلبه بر چالش‌های مرتبط با امنیت غذایی راه‌حل‌هایی است (Nouri et al., 2023; Garofalo et al., 2025).

^۱ محقق، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
(Email: sa_hosseinzadeh@yahoo.com) نویسنده مسئول

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

^۳ استاد، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

^۴ محقق، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

بنابراین، برای فائق آمدن بر موضوع افزایش بهره‌وری آب آبیاری باید از هسته مرکزی این موضوع یعنی کشاورزان استفاده کرد که مصرف‌کننده اصلی نهاده‌های کشاورزی به‌ویژه آب آبیاری هستند. برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و افزایش بهره‌وری آب می‌توان از مدل‌های گیاهی استفاده کرد (Khorsand et al., 2024a; Garofalo et al., 2025).

ذرت گونه علوفه‌ای مهمی است که برای مصرف کردن آن به‌صورت سیلویی کل گیاه برداشت می‌شود. ذرت به‌دلیل ویژگی‌های خیلی زیاد، مخصوصاً قدرت سازگاری آن به شرایط اقلیمی گوناگون، خیلی زود در تمام دنیا گسترش یافت. گیاه ذرت مواد قندی و نشاسته زیادی دارد و عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای بیش از ۸۰ تن در هکتار است. این گیاه یکی از بهترین گیاهان برای تولید علوفه سبز، سیلو و دانه است. ذرت علوفه‌ای برای دام (گاو و گوسفند) بسیار خوش‌خوراک است، این گیاه شرایط مکانیزاسیون را به‌خوبی می‌پذیرد. ذرت علوفه‌ای، در مقایسه با موقعی که به‌صورت دانه مصرف می‌شود، مقادیر خیلی زیادی مواد معدنی مخصوصاً نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم دارد. علوفه ذرت غنی از مواد گلوئیدی و انرژی‌زا و فقیر از لحاظ پروتئین است. به همین دلیل این نوع علوفه را باید همراه با علوفه‌ای که غنی از پروتئین هستند، به‌صورت مخلوط در جیره غذایی دام وارد کرد. گوارش ذرت علوفه‌ای فوق‌العاده آسان است و سیلو کردن آن برای دام‌های پرواری عالی‌ترین غذاست (Khajepour, 2014).

مدل‌های گیاهی ابزارهایی ارزشمند برای شبیه‌سازی یکپارچه فرآیندهای مؤثر بر رشد محصول و ارزیابی گزینه‌های مدیریت محصول شناخته می‌شوند (Mabhaudhi et al., 2014; Wallach et al., 2019). مدل‌های گیاهی می‌توانند پارامترهای مختلف رشد محصول، پویایی آب خاک، میزان مصرف آب گیاه و عملکرد مورد انتظار را تحت سطوح مختلف آبیاری به‌طور دقیق تخمین بزنند و نیز می‌توانند به اجرای موفقیت‌آمیز شیوه‌های مدیریت آبیاری محدود و کامل نیز کمک اساسی کنند (Sandhu & Irmak, 2019). مدل‌های گیاهی مانند مدل AquaCrop می‌تواند ابزار مفید برای مدیریت کاراتر مصرف آب باشد (Khorsand et al., 2014a;)

Rezaverdinejad et al., 2014) و همچنین از مدل AquaCrop می‌توان در تعیین کاربرد آب بهینه، تحت شرایطی از مجموعه‌های متفاوت که تمامی جوانب موضوع را در نظر می‌گیرد، استفاده کرد (Steduto et al., 2009). این مدل آب مصرفی گیاه را بر اساس پایش رطوبت خاک در منطقه ریشه برآورد می‌کند (Raja & Parsinejad, 2023). مدل شبیه‌سازی AquaCrop در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی، از جمله پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی مانند گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، یونجه، گوجه‌فرنگی، کزلا تحت شرایط مختلف کم‌آبیاری، محیطی و مدیریتی (Khorsand et al., 2014b; Amiri et al., 2016; Bahrami et al., 2019; Eskandaripour et al., 2020; Khorsand et al., 2024b; Raja et al., 2024), برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی مصرف آب و کود (Amiri & Khorsand, 2018; Amiri et al., 2017; Liu et al., 2017; Fang et al., 2018;) و همچنین برای طیف وسیعی از محصولات از جمله علوفه، سبزی‌ها، غلات، میوه‌ها، روغن‌ها و غده‌ها (Raes et al., 2009;) به‌کار گرفته شده است. (Khorsand et al., 2024)

هسائو و همکاران (Hsiao et al., 2009) مدل AquaCrop را با استفاده از داده‌های شش‌ساله ذرت در دانشگاه دیویس کالیفرنیا آزمایش و پارامترهای ثابت آن را واسنجی کردند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد که AquaCrop می‌تواند پوشش تاجی، رشد وزنی زیست‌توده بخش هوایی و عملکرد دانه را برای چهار رقم ذرت در شش فصل رشد مختلف با تراکم، تاریخ کاشت و تعرق‌های مختلف با تیمارهای مختلف آبیاری (اعمال تنش تا زمان گل‌دهی، از زمان گل‌دهی به بعد، آبیاری یک در میان و آبیاری کامل) به‌صورت مناسبی شبیه‌سازی کند. برای واسنجی کامل مدل برای این محصول، از داده‌های اقلیمی و شرایط خاک مناطق مختلف جهان استفاده گردید. نتایج مطالعه‌ای در مزرعه پژوهشی دانشگاه تهران با هدف ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای در طول جویچه نشان داد تیمار آبیاری کامل کمترین ضریب تغییرات عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای و شبیه‌سازی شده را دارد. عملکرد بیوماس نیز در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌خوبی شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که می‌توان از مدل

- عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2024) در تحقیقی به تعیین شاخص‌های مدیریت مصرف گیاهان مختلف در ایران با هدف ارزیابی حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب ۳۵ محصول زراعی و باغی پرداختند. نتایج تحقیقات این محققان نشان داد میانگین حجم آب آبیاری محصولات مختلف از ۳۹۸۴ مترمکعب بر هکتار برای کلزا تا ۳۲۵۰۰ مترمکعب بر هکتار برای نیشکر متغیر است. میانگین وزنی حجم آب آبیاری (نسبت به سطح زیر کشت) ۳۵ محصول مورد مطالعه، ۸۰۳۲ مترمکعب تعیین گردید که این شاخص به تفکیک محصولات باغی، زراعی و سبزی و صیفی به ترتیب ۹۱۶۲، ۷۶۶۹ و ۷۲۴۷ مترمکعب بر هکتار است و میانگین بهره‌وری آب آبیاری و آب محصولات مورد مطالعه ۱/۹ و ۱/۵ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب آب تعیین گردید.
- براساس آمار رسمی وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳، سطح برداشت ذرت علوفه‌ای کشور حدود ۲۴۳ هزار هکتار برآورده شده است که ۲/۱۴ درصد از سطح برداشت محصولات زراعی را تشکیل می‌دهد. سطح زیرکشت این محصول در استان البرز ۱۰۰۴۸ هکتار و متوسط عملکرد آن ۵۴۶۸۱/۵ کیلوگرم در هکتار است (Agricultural Statistics, 2015). به دلیل کشت تابستانه (کشت دوم) (از منظر زمانی که دمای هوا در بیشینه و بارندگی در حداقل ممکن و بالطبع تبخیر و تعرق بسیار بالاست)، ۱۰۰ درصد سطح زیرکشت این محصول در استان البرز به صورت آبی است که تعیین وضع موجود آبیاری در مزارع تحت مدیریت زارعان و حداکثر میزان بهره‌وری آب کشاورزی ذرت علوفه‌ای ضروری به نظر می‌رسد.
- نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که برای بهبود عملکرد مدل در تخمین عملکرد محصول، مصرف آب، پارامترهای رشد محصول و ارزیابی شیوه‌های آبیاری محدود به منظور توسعه استراتژی‌های مدیریتی مؤثر نیاز خواهد بود AquaCrop برای مناطق خاص به شکلی مناسب واسنجی و اعتبارسنجی شود (Sandhu & Irmak, 2019). بنابراین، هدف از این تحقیق واسنجی و سپس ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای (کشت تابستانه)، تحت شرایط آبیاری عرف منطقه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران (استان البرز) است.
- AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد بیوماس ذرت علوفه‌ای در طول جوپچه استفاده کرد (Vatankhah & Ebrahimian, 2016). قربانیان کردآبادی و همکاران (Ghorbanian Kurbadi et al., 2013) دقت مدل AquaCrop را در برآورد وزن تر بیوماس و تبخیر-تعرق ذرت در شرایط متفاوت بافت و حاصلخیزی خاک ارزیابی کردند و نشان دادند این مدل در برآورد وزن تر بیوماس ذرت علوفه‌ای بسیار کارآمد است. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) در برآورد وزن تر بیوماس ذرت در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۶۷ درصد به دست آمد. رجا و همکاران (Raja et al., 2019) اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی را در استان فارس با استفاده از این مدل بررسی کردند و نشان دادند این مدل می‌تواند عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کمترین میزان خطای نسبی (RE) ۱/۱۲، ۰/۴۶، ۰/۰۴، ۱/۱۴، ۰/۹۶ و ۰/۵۵ درصد به ترتیب برای گیاهان گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای و چغندر قند برای شبکه مدرن درودزن و ۱/۳۶، ۰/۷۶، ۰/۸۲ درصد به ترتیب برای گندم، جو و ذرت علوفه‌ای برای شبکه کربال در مرحله واسنجی مدل شبیه‌سازی کند. محققان دیگر با استفاده از داده‌های برداشت شده در سال ۲۰۱۴ به واسنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی ذرت پرداختند و با استفاده از داده‌های برداشت شده منتهی به سال ۲۰۱۸ این مدل گیاهی تحت صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصول برابر با ۴/۱۳ درصد است (He et al., 2021). پژوهشگران در تحقیقی در سال ۲۰۲۲ به شبیه‌سازی ذرت در چین با استفاده از مدل AquaCrop تحت شرایط استفاده و عدم استفاده از مالچ پرداختند و برای واسنجی مدل از داده‌های برداشت شده از سال ۲۰۱۶ استفاده کردند. نتایج تحقیقات این پژوهشگران نشان داد که آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای این مدل گیاهی ۲-۰/۹ تن در هکتار متغیر است. افزایش خطای مدل AquaCrop به دلیل استفاده از مالچ گزارش شده است (Feng et al., 2022).

نواری تیپ انتخاب گردید. مزرعه کرج به دلیل سطح وسیع تر، تاریخ کشت‌های مختلف و نوبت‌های آبیاری متفاوت، به سه بخش مختلف تفکیک شد (جدول ۱). پارامترهای هواشناسی مورد نیاز برای ارزیابی مدل AquaCrop در جدول (۲) در دوره کشت ارائه شده است. منابع آبی، دبی منبع آبی، سطح زیرکشت هر محصول، سطح کل اراضی تحت آبیاری، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک و شوری آب آبیاری در هر یک از مزارع بررسی و اندازه‌گیری گردید. برخی از مشخصات مزارع مانند مساحت، موقعیت دقیق مکانی (با GPS، روش آبیاری، منبع آب آبیاری (چاه/ شبکه آبیاری)، زمان برداشت از منبع آبی و تغییرات دبی برداشتی در طول سال، نوع شبکه (مدرن/ سنتی)، مشخصات بهره‌برداران و ... با تدوین فرم‌های ثبت اطلاعات برداشت گردید. برای اندازه‌گیری دبی ورودی به مزارع منتخب از فلوم (WSC) تیپ پنج استفاده شد.

همچنین توانایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای کشت دوم (کشت تابستانه) رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت مدیریت کشاورزان در مزارع مورد مطالعه (کرج، سیف آباد، هشتگرد و حاجی‌آباد) نیز ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت محدوده مطالعه

داده‌های مورد نیاز این تحقیق در سال ۱۳۹۵ از مزارع کشاورزان استان البرز جمع‌آوری شد. مزارع با هماهنگی مدیریت‌های جهاد کشاورزی (مدیریت کشاورزی شهرستان‌های کرج، سیف آباد و هشتگرد) انتخاب گردید. سه مزرعه در شهرستان کرج، یک مزرعه در دهستان سیف آباد و یک مزرعه در شهرستان هشتگرد با روش آبیاری جویچه‌ای و یک مزرعه در روستای حاجی‌آباد به روش آبیاری

جدول ۱- مشخصات مزارع منتخب در استان البرز

Table 1- Specifications of selected farms in Alborz province

موقعیت مزارع Location of farms	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	تاریخ کاشت Planting date	تاریخ برداشت Harvesting date	طول دوره رشد (روز) Length of growth period (days)	نوع منبع آب Type of water source	میانگین دبی (لیتر بر ثانیه) Average flow (lit s ⁻¹)	نوع سامانه آبیاری Type of irrigation system	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)
کرج (۱) Karaj (1)	۵۱°۳۶'	۳۵°۴۸'	۹۵/۴/۱۵	۹۵/۷/۱۰	۸۸	چاه Well	۳۵/۶۸	سطحی Surface	۸
کرج (۲) Karaj (2)	۵۱°۳۶'	۳۵°۴۸'	۹۵/۴/۲۰	۹۵/۷/۲۲	۹۶	چاه Well	۳۵/۶۸	سطحی Surface	۱۶/۵
کرج (۳) Karaj (3)	۵۱°۳۶'	۳۵°۴۸'	۹۵/۴/۲۰	۹۵/۷/۲۲	۹۵	چاه Well	۳۵/۶۸	سطحی Surface	۴/۵
سیف آباد Saifabad	۵۰°۲۳'	۳۵°۴۳'	۹۵/۴/۲۵	۹۵/۷/۳۰	۹۷	چاه Well	۳۲/۲۷	سطحی Surface	۱۵
هشتگرد Hashtgerd	۵۰°۲۵'	۳۵°۴۵'	۹۵/۴/۲۱	۹۵/۷/۲۲	۹۳	شبکه آبیاری کردان Kurdan irrigation	۴۸	سطحی Surface	۴
حاجی آباد Hajiabad	۵۰°۲۶'	۳۵°۴۷'	۹۵/۴/۲۴	۹۵/۷/۳۰	۹۸	چاه Well	۲۸/۸۵	تیپ Tape	۴

تعیین میزان آب کاربردی، بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت مدیریت کشاورزان استان البرز...

جدول ۲- آمار ماهانه هواشناسی ایستگاه مرکزی کرج در دوره رشد محصول

Table 2- Meteorological statistics of Karaj Central Station during the crop growth period

Table 2: Meteorological statistics of Karaj Central Station during the crop growth period									
بارندگی (میلی متر) Prceipitation (mm)	ساعات آفتابی (ساعت) Sunlight Hours	حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه) Wind speed (ms ⁻¹)	رطوبت نسبی (درصد) Relative Humidity (%)			دما (سانتی گراد) Temperature (°C)			ماه months
			میانگین Average	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average	حداقل Min	حداکثر Max	
۰	۳۳۹	۱۱	۳۴	۹	۷۸	۲۷	۱۹	۳۶	تیر July
۰	۳۶۰	۱۰	۳۴	۸	۸۱	۲۸	۱۹	۳۵	مرداد August
۰	۳۳۳	۷	۳۰	۱۳	۶۸	۲۷	۱۸	۳۴	شهریور September
۰	۲۸۳	۱۰	۳۹	۸	۸۶	۱۸	۱۲	۲۶	مهر October
۴	۱۹۴	۱۵	۴۶	۱۸	۱۰۰	۱۳	۷	۱۹	آبان Noveber

دستگاه صفحات فشاری استفاده شد (Khorsand et al., 2019).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی‌های ثابت خاک که مربوط به وضعیت ذاتی خاک هستند و تحت تأثیر عوامل خارجی قرار نمی‌گیرد؛ مانند بافت خاک، دانه‌بندی خاک و سطح ویژه ذرات خاک و نیز ویژگی‌های متغیر خاک که تحت تأثیر عوامل خارجی است و در زمان‌های مختلف متفاوت است مانند رطوبت خاک، ساختمان خاک، تهویه خاک، و توزیع ذرات اولیه خاک با آزمایش هیدرومتری تعیین گردید و پس از مشخص شدن درصد اجزای تشکیل‌دهنده خاک (شن، رس و سیلت)، در هر لایه بافت خاک مشخص گردید. نتایج به‌دست آمده از آزمایش خاک نشان داد که خاک مورد مطالعه در منطقه کرج دارای بافت لوم، در منطقه سیف آباد دارای بافت لومی رسی، در منطقه هشتگرد دارای بافت لوم و در منطقه حاجی آباد دارای بافت لوم است. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول (۳) آمده است. برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت اشباع از مدل RETC استفاده گردید (Rawls et al., 1982; Khorsand et al., 2019). برای تعیین نقاط مهم پتانسیلی آب در خاک (ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی)، از

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب عبارت است از مقدار محصول تولید شده به ازای واحد حجم آب (رابطه ۱). ساده‌ترین روشی که در مزارع برای برآورد بهره‌وری فیزیکی آب گیاه می‌توان به کار برد، اندازه‌گیری سه عامل عملکرد، مقدار آب آبیاری و مقدار بارش در فصل زراعی است (Molden et al., 1998).

$$WP = \frac{Y}{CW} \quad (1)$$

در این رابطه: WP بهره‌وری آب در تولید ذرت علوفه‌ای (کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب آبیاری در فصل رشد)، Y عملکرد ذرت علوفه‌ای در فصل رشد (کیلوگرم در هکتار) و CW حجم آب آبیاری در تولید ذرت علوفه‌ای در فصل رشد (مترمکعب در هکتار) است. در تحقیق حاضر اندازه‌گیری دو شاخص اصلی، حجم آب آبیاری و میزان محصول ذرت علوفه‌ای مدنظر قرار گرفته است. لازم است گفته شود در فصل رشد (فصل تابستان) بارندگی رخ نداده است و به همین دلیل در محاسبات، بارندگی موثر صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع مورد مطالعه

Table 3- Physical and chemical properties of farms soil

محل نمونه برداری Sampling location	بافت خاک Soil texture	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) Bulk density (g cm ⁻³)	رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (درصد) Volumetric content of field capacity (%)	رطوبت حجمی نقطه پژمردگی (درصد) Volumetric content of wilting point (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر بر روز) Saturated hydraulic conductivity (cm day ⁻¹)	اسیدتیته خاک (-) Potential of Hydrogen (-)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS m ⁻¹)
کرج Karaj	لوم Loam	۱/۴	۲۷/۲۲	۱۵/۵۸	۱۸/۱۹	۷/۷۷	۰/۴۳
سیف آباد Saifabad	لومی رسی Clay loam	۱/۳۷	۲۷/۵۱	۱۷/۴۶	۱۴/۹۵	۷/۳۶	۰/۶۳
هشتگرد Hashtgerd	لوم Loam	۱/۴۳	۲۱/۷۱	۱۴/۳۴	۱۰/۵۸	۷/۹۵	۰/۴۷
حاجی آباد Hajiabad	لوم Loam	۱/۴۲	۲۴/۸	۱۵/۶۶	۲۰/۶۷	۷/۸۶	۰/۷۹

مدل AquaCrop

مدل گیاهی AquaCrop یکی از مدل‌های پرکاربرد است که از طریق مشورت با متخصصان سازمان‌های مهم علمی، دانشگاهی و دولتی جهان (Raja et al., 2024) توسط سازمان فائو برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی نسبت به مقدار آب آبیاری بسط داده شده است. داده‌های مورد نیاز برای استفاده از مدل AquaCrop به دو دسته ثابت و غیرثابت تقسیم می‌شوند. داده‌های ثابت در این مدل توسط بسط‌دهندگان آن تعیین و پیشنهاد شده که برای شبیه‌سازی تغییر نکنند. داده‌های غیرثابت در هر شبیه‌سازی باید به وسیله واسنجی برآورد شوند (Raes et al., 2012). با این همه، برخی تحقیقات نشان داده است که داده‌های ورودی مدل AquaCrop در شرایط محیطی مختلف ثابت نیستند و برای واسنجی باید تغییر داده شوند. بدین ترتیب، پیش از واسنجی این مدل گیاهی باید اثر تغییرات پارامترهای ورودی آن بر مقادیر خروجی از لحاظ حساسیت واسنجی شود. پارامترهای ورودی این مدل برای شبیه‌سازی شامل داده‌های مربوط به آب و هوای منطقه مورد مطالعه، ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مدیریت زراعی، وضعیت آب زیرزمینی و مدیریت آبیاری است. از ویژگی‌های بارز مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت تنش‌های کم‌آبی، شوری و

حاصلخیزی در شرایط متفاوت بافت خاک می‌توان به سناریوهای مدیریتی مزرعه و شرایط آب و هوایی مختلف اشاره کرد (Khorsand et al., 2024).

واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

هر مدل شبیه‌سازی برای اینکه بتواند نتایج مفید و واقعی‌تری بدهد باید با استفاده از اطلاعات و شرایط منطقه‌ای واسنجی گردد (Andarzian et al., 2011). واسنجی، عملیات تطبیق پارامترهای ورودی مدل برای سازگاری آن در تولید داده‌های خروجی مناسب است. به‌طور کلی، هدف از واسنجی هر مدل کمینه کردن اختلاف بین خروجی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده است. باید توجه داشت که در فرآیند واسنجی، بعضی از پارامترها نسبت به برخی دیگر حساس‌تر هستند. پارامتر حساس پارامتری است که تاثیر بیشتری بر خروجی‌های مدل دارد (Khorsand et al., 2024; Boulange et al., 2025). به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop و برای رسیدن به نتایج مورد انتظار و اینکه آیا خروجی مدل ریاضی رضایت بخش است یا خیر، ارزیابی دقت آنها ضروری است. بدین ترتیب، پس از واسنجی مدل از پارامترهای ورودی مدل و اجرای آن در شرایط خاص، مدل با پارامترهای واسنجی شده در شرایطی غیر از شرایط واسنجی ارزیابی می‌شود (Terán-Chaves et al., 2022; Garofalo et al., 2025).

شاخص‌های آماری

برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل با نتایج اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه (Bazane et al., 2016) از یک سری شاخص‌های آماری استفاده شد که در زیر توضیح داده شده است.

الف) شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): که با رابطه زیر قابل محاسبه است:

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

این شاخص متوسط پراکندگی اختلاف مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و نیز نشان‌دهنده خطای مدل است که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، آن مدل ایده‌آل‌تر است.

ب) میانگین خطای نسبی (RE): این شاخص نشان‌دهنده میزان خطای نسبی اتفاق افتاده در مقادیر شبیه‌سازی شده است.

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right)}{N} \times 100 \quad (3)$$

ج) شاخص سازگاری ویلموت (d): این شاخص به شکل وسیعی در بررسی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود، این شاخص نشان‌دهنده میزان انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده است. هر چه مقدار شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، میزان انطباق بالاتر خواهد بود.

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}| \right]^2}} \quad (4)$$

د) ضریب تبیین (R^2): این ضریب از شاخص‌های آماری رایج در عملکرد مدل‌هاست و نسبت پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در صورت تطابق کامل بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، مقدار این شاخص برابر یک خواهد بود.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

در همه این رابطه‌ها: O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i مقادیر تخمینی مدل، n تعداد مشاهدات، $\bar{P}$ میانگین مقادیر تخمینی، و $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

نتایج و بحث میزان آب مصرفی

نتایج مطالعات میدانی حجم آب آبیاری در جدول (۴) ارائه شده است. حجم آب آبیاری در آبیاری جویچه‌ای ۱۰۶۷۰ مترمکعب در هکتار نشان داده شده است. در روش آبیاری جویچه‌ای بیشترین مقدار آب آبیاری در مزرعه کرج (۱) است که این موضوع بیشتر مربوط است به بافت خاک مزرعه که خاک سبک است و زارع به همین دلیل دور آبیاری کمتری را انتخاب کرده و در نتیجه میزان آب مصرفی بیشتری داشته است. در مزرعه کرج (۳) کمترین میزان آب آبیاری در بین مزارع در روش آبیاری جویچه‌ای داشته است به این دلیل که زارع بعد از برداشت گندم و با رطوبت موجود در خاک به صورت مستقیم و بدون خاکورزی اقدام به کشت محصول کرده بود. در مطالعه‌ای که روی محصول ذرت صورت گرفت، در مزرعه با شخم حداقل، عملکرد دانه ذرت ۳/۷۸ درصد کاهش نشان داد ولی کشت در داخل بقایا باعث افزایش عملکرد دانه ذرت به میزان ۶/۶۱ درصد شد. به نظر می‌رسد کشت محصول در مزرعه با شخم حداقل به دلیل افزایش رقابت علف‌های هرز و کاهش تهویه، باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود و کشت محصول در داخل بقایا به دلیل حفظ بیشتر رطوبت خاک، توانسته باعث افزایش عملکرد دانه گردد (Mahrokh et al., 2021). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که کشت مستقیم می‌تواند راهکاری مدیریتی باشد برای استفاده از رطوبت موجود در خاک در کشت قبلی. سرانجام اینکه حداقل میزان آب آبیاری مربوط به روش آبیاری نواری تیپ است که این از ماهیت این روش آبیاری و مدیریت استفاده از منابع آب است. نتایج تحقیقات امیری و خورسند (Amiri & Khorsand, 2018) و قربانیان کردآبادی و همکاران (Ghorbanian Kurdabadi et al., 2013) با

بررسی اثر آبیاری برای محصول ذرت نشان می‌دهد با مصرف آب آبیاری، کارایی مصرف آب را افزایش داد که نتایج مدیریت بهینه آب می‌تواند با حفظ عملکرد مطلوب و کاهش این مطالعه با آن همخوانی دارد.

جدول ۴- حجم آب، عمق آبیاری، مساحت مزرعه و میزان برداشت عملکرد و بهره‌وری ذرت علوفه‌ای در مزارع انتخابی استان البرز

Table 4- The silage maize yield harvest rate in selected agricultural farms of Alborz Province

حاجی آباد Hajiabad	هشتگرد Hashtgerd	سیف آباد Saifabad	کرج (۳) Karaj (3)	کرج (۲) Karaj (2)	کرج (۱) Karaj (1)	مزارع انتخابی Selected farms
۱۷۹۱۲	۳۷۰۳۰	۱۴۳۶۵۰	۲۸۳۵۰	۱۴۹۶۵۵	۸۵۳۶۰	حجم آب آبیاری در کل مزرعه (مترمکعب) Volume of applied water used on the entire farm (m ³)
۴۴۸۰	۹۲۶۰	۸۹۷۰	۶۳۰۰	۹۰۷۰	۱۰۶۷۰	حجم آب آبیاری در هکتار (مترمکعب) Volume of applied water used per hectare (m ³)
۴۴۸	۹۲۶	۸۹۷	۶۳۰	۹۰۷	۱۰۶۷	عمق آب آبیاری (میلی‌متر) Depth of irrigation water (mm)
۴	۴	۱۶	۴/۵	۱۶/۵	۸	مساحت مزرعه (هکتار) Farm area (ha)
۲۴۰	۲۰۰	۸۹۰	۱۵۵	۱۰۰۰	۳۶۰	کل برداشت (تن) Total harvest (ton)
۶۰	۵۰	۵۵/۶	۳۵	۶۰	۴۵	عملکرد (تن در هکتار) Yield (ton ha ⁻¹)
۱۳/۴	۵/۴	۶/۲	۵/۵۵	۶/۶۱	۴/۲۴	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب) Water productivity (kg m ⁻³)

عملکرد محصول و بهره‌وری آب آبیاری

شبکه‌های مدرن و سنتی میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای به ترتیب ۵۰/۵۴ و ۵۴/۳۲ تن در هکتار و میانگین حجم آب آبیاری ۶۹۸۳ و ۹۰۸۵ مترمکعب بر هکتار و میانگین بهره‌وری آب به ترتیب ۷/۴۶ و ۶/۲۶ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب آب برآورد کردند. یافته این پژوهش نشان داد که توسعه شبکه‌های مدرن می‌تواند در بالابردن بهره‌وری آب در عملیاتی کردن برنامه‌های پنج ساله توسعه‌ای کشور و برنامه اقتصاد مقاومتی مفید باشد.

شاخص ارزیابی مدل و برآورد پتانسیل عملکرد محصول

پارامترهای واسنجی شده مدل برای دستیابی به عملکرد خشک محصول زراعی، شامل پارامترهای گیاهی مانند توسعه گیاه (پوشش تاج اولیه، میزان ضریب کاهش تاج گیاه)، اجزای تولید محصول (شاخص برداشت مرجع و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای CO₂ و ET₀)، عوامل مؤثر بر تنش آبی (عامل شکل منحنی برای ضریب تنش آبی و رشد برگ، آستانه بالایی تخلیه رطوبت خاک، آستانه پایینی

در جدول (۴) دیده می‌شود میزان متوسط عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای تر در روش آبیاری سطحی ۴۹/۱۲ تن در هکتار و در روش آبیاری نواری تیپ ۶۰ تن در هکتار است. در روش آبیاری جویچه‌ای بیشترین عملکرد محصول مزرعه کرج (۲) با عملکرد ۶۰ تن در هکتار و با بهره‌وری آب آبیاری ۶/۶۱ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب آب و کمترین عملکرد محصول برای مزرعه کرج (۳) با عملکرد ۳۵ تن در هکتار و کمترین بهره‌وری آب آبیاری برای مزرعه کرج (۱) به میزان ۴/۲۴ کیلوگرم به دست آمد. بیشترین بهره‌وری آب آبیاری، ۱۳/۴ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب آب، در مزرعه حاجی آباد دیده شده است که در آن از روش آبیاری نواری تیپ استفاده می‌شد. بنابراین، روش آبیاری نواری تیپ برای استفاده بهینه از منابع آبی توصیه می‌شود. عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2019) در پژوهشی تفاوت حجم آب مصرفی و بهره‌وری آب را در تولید محصول ذرت علوفه‌ای در پایاب

تعیین میزان آب کاربردی، بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت مدیریت کشاورزان استان البرز...

تخلیه رطوبت خاک برای رشد رویشی)، دمای پایه و دمای قطع رشد هستند (Raja et al., 2024). پارامترهای گیاهی پس از واسنجی مدل، در شبیه‌سازی رشد محصول ذرت علوفه‌ای به کار گرفته شد. پارامترهای مهم گیاهی به دست آمده در مرحله شبیه‌سازی و واسنجی مدل AquaCrop در مطالعه حاضر در جدول (۵) ارائه شده است. برخی از مقادیر ورودی به صورت پیش فرض در نظر گرفته شدند. این مقادیر

برای ذرت علوفه‌ای در شرایط اقلیمی و محیطی متفاوت باید یکسان باشد. برخی مقادیر ورودی نیز در شرایط مزرعه تعیین و به صورت پارامترهای اندازه‌گیری شده در مدل تعریف شدند. برای محاسبه و برآورد پتانسیل عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای در استان البرز و مقایسه آن با میزان محصول برداشته شده از مزارع مختلف از این مدل استفاده شد.

جدول ۵- ورودی‌ها و مقادیر پارامترهای گیاهی در واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای
Table 5- Inputs and values of crop parameters in the calibration and evaluation of the AquaCrop model for maize

توضیحات Remarks	واحد Unit	مقدار Amount	پارامتر Parameter
پیش فرض Default	°C	۱۰	دمای پایه Base temperature
پیش فرض Default	°C	۳۰	دمای بالا Upper temperature
محاسبه شد Calculated	cm ²	۶/۵	اندازه تاج پوشش هر نهال هنگام جوانه‌زنی Canopy size of each seedling at germination
پیش فرض Default	%	۹۶	بیشینه رشد کانوپی Maximum canopy cover
محاسبه شد Calculated	m	۰/۷	عمق موثر ریشه Effective rooting depth
پیش فرض Default	gr m ⁻²	۳۳/۷	ضریب بهره‌وری نرمال شده برای (ET ₀ و CO ₂) Normalized water productivity
واسنجی شد Calibrated	%	۵۲	شاخص برداشت Harvest Index
اندازه‌گیری شد Measured	ton	۶۰	تولید بیوماس Biomass production
اندازه‌گیری شد Measured	plants ha ⁻¹	۱۴۲۸۵۷	تراکم کاشت Plant density
پیش فرض Default	–	۱/۰۵	ضریب تعرق گیاه Crop transpiration (KcTrx)
اندازه‌گیری شد Measured	day	۶	مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی Time from planting to emergence
اندازه‌گیری شد Measured	day	۷۰	مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی Time from planting to max canopy
اندازه‌گیری شد Measured	day	۱۰۰	مدت زمان کاشت تا برداشت محصول Time from planting to maturity
اندازه‌گیری شد Measured Calibrated	day	۱۲۵	مدت زمان کاشت تا دوره پیری Time from planting to maturity
پیش فرض Default	dS m ⁻¹	۲	حد پایین آستانه شوری Lower limit of salinity threshold
پیش فرض Default	dS m ⁻¹	۱۰	حد بالای آستانه شوری Upper limit of salinity threshold
پیش فرض Default	–	۶	عامل ضریب شکل تنش برای بسته شدن روزنه Stress shape factor for stomatal closure
پیش فرض Default	–	۲/۹	عامل شکل برای ضریب تنش آبی Shape factor for water stress coefficient

در این مطالعه، از مزرعه کرج (۲) برای واسنجی و از مزارع کرج (۱)، کرج (۳)، سیف آباد، هشتگرد و حاجی آباد برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. بررسی‌ها نشان می‌دهند شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۲/۴۴ تن در هکتار و شاخص سازگاری ویلموت (d) برابر با ۰/۹۴۷ است که نشان‌دهنده توانا بودن مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی وزن تر ذرت در منطقه مورد مطالعه است. همبستگی خوبی نیز بین مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد محصول وجود دارد (ضریب تبیین تقریباً ۰/۹۵). مقدار خطای نسبی (RE) نیز برابر با ۳/۷ درصد به‌دست آمد که خطای قابل قبولی است. پس از تأیید کارایی مدل، پتانسیل محصول ذرت در مناطق مورد مطالعه برآورد شد. بیشترین پتانسیل در منطقه کرج دیده می‌شود (جدول ۶). وطن‌خواه و ابراهیمیان (Vatankhah & Ebrahimian, 2016) در تحقیقی در مورد ذرت علوفه‌ای در مزرعه پژوهشی دانشگاه تهران واقع در کرج مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده را در نقاط مختلف مزرعه به‌ترتیب ۱/۶ تن بر هکتار و ۱۰/۱ درصد در مرحله واسنجی و ۱/۵ تن بر هکتار و ۱۱/۹ درصد در مرحله اعتبارسنجی به‌دست آوردند. مطالعات دیگر محققان (Amiri et al., 2016; Bahrami et al., 2019; Eskandaripour et al., 2020; Khorsand et al., 2024; Raja et al., 2024) نیز نشان می‌دهد مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌توده محصولات زراعی و بررسی تأثیرات کمی آب بر عملکرد پذیرفته شده است و به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه تحت گزاره‌های مختلف شناخته شده است.

جدول ۶- مقایسه عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop
Table 6 - Comparison of measured and simulated crop yield with the AquaCrop model

مزارع Farms	عملکرد اندازه‌گیری شده (تن در هکتار) Measured yield (ton ha ⁻¹)	عملکرد شبیه‌سازی شده (تن در هکتار) Simulated yield (ton ha ⁻¹)	پتانسیل عملکرد برآورد شده با مدل (تن در هکتار) Model-estimated yield potential (ton ha ⁻¹)
کرج (۱) Karaj (1)	۶۰	۵۷/۵	۶۵/۴
کرج (۲) Karaj (2)	۴۵	۴۴/۳	۶۵/۴
کرج (۳) Karaj (3)	۳۵	۳۶/۵	۶۵/۴
سیف‌آباد Saifabad	۵۵/۶	۵۵/۹	۵۸
هشتگرد Hashtgerd	۵۰	۵۴/۲	۵۵/۶
حاجی‌آباد Hajiabad	۶۰	۵۸/۷	۶۵/۳
میانگین Average	۵۰/۹	۵۱/۲	۶۵/۳

نتیجه‌گیری

برابر ۲/۴۴ تن در هکتار و شاخص سازگاری ویلموت (d) برابر ۰/۹۴۷. این نتایج نشان می‌دهد که این مدل قابلیت بالایی در تحلیل سناریوهای مدیریتی مختلف، پیش‌بینی عملکرد تحت شرایط محدودیت آب، و بهینه‌سازی الگوهای آبیاری دارد. توسعه آموزش‌های کاربردی برای کشاورزان، ترویج فناوری‌های نوین آبیاری و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مانند AquaCrop می‌تواند نقش کلیدی در کاهش هدررفت آب، بهبود عملکرد محصول، و پایداری تولید داشته باشد. اجرای این راهبردها نه تنها موجب ارتقای بهره‌وری آب می‌شود، بلکه گامی مؤثر در جهت حفاظت از منابع آب و خاک و تضمین امنیت غذایی در بلندمدت خواهد بود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

ص.ح.ا؛ ایده‌پردازی کرده و متن را نوشت. ب.ن. و ف.ع؛ داده‌های جمع‌آوری شده را بررسی کردند و تجهیزات و مواد را آماده کردند. ص.ح.ا. و ا.خ؛ مسئول ویرایش متن، داده‌های اصلی و آماده‌سازی متن بودند. همه نویسندگان مسئولیت صحت و درستی داده‌های موجود در این مطالعه را بر عهده گرفتند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دفتر معاون تحقیق و فناوری دانشگاه بین‌المللی امام خمینی تشکر می‌کنند. این تحقیق از هیچ کمک مالی مشخصی از نهادهای مالی عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی برخوردار نبوده است.

مدل AquaCrop قابلیت شبیه‌سازی و پیش‌بینی مواردی از جمله شبیه‌سازی عملکرد، شبیه‌سازی بهره‌وری آب آبیاری در شرایط مدیریت‌های مختلف آبیاری، شبیه‌سازی عملکرد در شرایط تنش و مدیریت‌های کم‌آبیاری، شبیه‌سازی عملکرد در شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی، خاک و آب در راستای برنامه‌ریزی مناسب به‌منظور مدیریت بهتر آبیاری و ارتقای بهره‌وری آب را داراست. تحقیق حاضر به‌منظور بررسی عملکرد مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای مزرعه‌ای کشت تابستانه تحت مدیریت کشاورزان استان البرز به اجرا درآمد. بیشترین مقدار عملکرد محصول و بهره‌وری آب آبیاری در سامانه آبیاری جویچه‌ای، مزرعه کرج (۲) با عملکرد ۶۰ تن در هکتار و با بهره‌وری آب آبیاری ۶/۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین عملکرد محصول برای مزرعه کرج (۳) با عملکرد ۳۵ تن در هکتار و کمترین بهره‌وری آب آبیاری برای مزرعه کرج (۱) ۴/۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد. در سامانه آبیاری نواری تیپ با عملکرد بهره‌وری آب آبیاری مربوط به مزرعه حاجی آباد ۱۳/۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بود. نتایج این پژوهش نشان داد که بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای (کشت تابستانه) در استان البرز به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع سامانه آبیاری و مدیریت مزرعه قرار دارد. استفاده از سامانه آبیاری نواری تیپ موجب کاهش چشمگیر مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب نسبت به آبیاری جویچه‌ای شد، به‌طوری‌که بالاترین بهره‌وری آب (۱۳/۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب) و عملکرد محصول (۶۰ تن در هکتار) در این روش ثبت گردید. این امر اهمیت انتخاب روش آبیاری کارآمد را در افزایش بازده اقتصادی و حفظ منابع آبی برجسته می‌سازد. مدل AquaCrop پس از واسنجی و صحت‌سنجی با داده‌های میدانی، دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد و برآورد پتانسیل محصول نشان داد. به‌طوری‌که میانگین عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل مذکور ۰/۳ تن در هکتار است (میانگین خطای نسبی (RE) برابر ۳/۷ درصد، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

مراجع

- Abbasi, F., Akbari, M., Nasser, A., Abbassi, N., Baghani, J., Joleini, M., Shahrokhnia, M.A., Nakhjavanimoghaddam, M.M., Sepehri Sadeghian, S., Moayeri, M., Hassanoghli, A., Haghayeghi, A., Ghadami Firouzabadi, A., Mousavifazl, S.H. & Yazdani, M. (2024). A Review of water consumption management indicators of different crops in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25(94), 1-16. doi: 10.22092/idser.2024.364605.1569. (In Persian)
- Abbassi, F., Nasser, A., Nakhjavani Moghaddam, M.M., Salamati, N., Joleini, M., Khorramian, M., Dehghanian, S.E., Gomrokchi, A.Y., Eslami, A., Akhavan, K., Farzamnia, M., Baghani, J. & Akbari, M. (2019). Comparison of irrigation water management indices of silage maize in modern and conventional irrigation networks. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(73), 143-156. doi: 10.22092/idser.2018.121427.1313. (In Persian)
- Amiri, E., & Khorsand, A. (2018). Evaluation of Aquacrop model to predict maize total biomass and grain yield under different water regimes and fertilizer. *Plant Ecophysiology*, 10(33), 174-185. (In Persian)
- Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2016). Evaluating AquaCrop Model Performance to Predict Grain Yield and Wheat Biomass, Under Water Stress. *Water and Soil Science*, 25(4/2), 217-229. (In Persian)
- Amiri, E., Khorsand, A., Daneshian, J., & Yousefi, M. (2018). Predicting biomass and grain yield in canola under different water regimes and fertilizers using AquaCrop model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), 57-72. (In Persian)
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., & Rahnama. A., (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agriculture Water Management*, 100 (1), 1-8.
- Bahrani, C., Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., Besharat, S., & Majnooni-Heris, A. (2019). Assessment of AquaCrop model for simulating spring canola yield and soil water under water stresses. *Journal of Plant Ecophysiology*, 36(11), 53-66. (In Persian)
- Bazaneh, M., Khorsand, A., Zeinalzadeh, K., & Besharat, S. (2016). Evaluation of HYDRUS 2D software to estimate stored water and wetting pattern of surface drip irrigation. *Water and Soil Science*, 26(1-2), 287-301. (In Persian)
- Boulange, J., Nizamov, S., Nurbekov, A., Ziyatov, M., Kamilov, B., Nizamov, S., ... & Watanabe, H. (2025). Calibration and validation of the AquaCrop model for simulating cotton growth under a semi-arid climate in Uzbekistan. *Agricultural Water Management*, 310, 109360. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109360>
- Eskandaripour, R., Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Zeinalzadeh, K., & Norjoo, A. (2020). Investigation of polyethylene mulch on improvement of tomato water use efficiency using AquaCrop model. *Journal of Plant Ecophysiology*, 11(39), 71-85. (In Persian)
- Fang, Q., Ma, L., Ahuja, L.R., Trout, T.J., Malone, R., Zhang, H., & Yu, Q. (2017). Long-term simulation of growth stage-based irrigation scheduling in maize under various water constraints in Colorado, USA. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering (FASE)*, 4(2), 172.
- Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulazibieke, M., Cai, M., Kang, J., Yuan, Z., & Xu, H. (2022). Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 261, 107372.
- Garofalo, P., Riccardi, M., Di Tommasi, P., Tedeschi, A., Rinaldi, M., & De Lorenzi, F. (2025). AquaCrop model to optimize water supply for a sustainable processing tomato cultivation in the Mediterranean area: A multi-objective approach. *Agricultural Systems*, 223, 104198. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104198>
- Ghorbanian Kurdabadi, M., Liaghat, A.M, Vatankhah, E., & Noori, H. (2013). Simulation of yield and evapotranspiration of forage maize using AquaCrop model. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 4(1), 48-64. (In Persian)

- He, Q., Li, S., Hu, D., Wang, Y., & Cong, X. (2021). Performance assessment of the AquaCrop model for film-mulched maize with full drip irrigation in Northwest China. *Irrigation Science*, 39(2), 277-292.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459.
- Khajepour, M.R. (2014). Public Agriculture. Jahad Daneshgahi Publications (Isfahan University of Technology), Third edition. 658 p. (In Persian)
- Khorsand, A., Dehghanisani, H., Heris, A.M., Asgarzadeh, H., & Rezaverdinejad, V. (2024). Calibration and evaluation of the FAO AquaCrop model for canola (*Brassica napus*) under full and deficit irrigation in a semi-arid region. *Applied Water Science*, 14(3), 56.
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A. & Besharat, S. (2019). Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 224(105740), 1-11.
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Shahidi, A. (2014a). Comparison of Food and Agriculture Organization AquaCrop and SWAP agrohydrological models to simulate water and salt transport during growing season of winter wheat. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 4(11), 223-233.
- Khorsand, A., Verdinejad, V.R., & Shahidi, A. (2014b). Performance evaluation of AquaCrop model to predict yield production of wheat, soil water and solute transport under water and salinity stresses. *Water and Irrigation Management*, 4(1), 89-104. (In Persian)
- Liu, C., Qi, Z., Gu, Z., Gui, D., & Zeng, F. (2017). Optimizing irrigation rates for cotton production in an extremely arid area using RZWQM2-simulated water stress. *Transactions of the ASABE*, 60(6), 2041-2052.
- Mabhaudhi, T., Modi, A.T., & Beletse, Y.G. (2014). Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agricultural and Forest Meteorology*, 192, 132-139.
- Mahrokh, A., Golzardi, F., Azizi, F., mofidian, S.M.A., Zamanian, M., Rahjoo, V., Torabi, M. & soltani, E. (2021). Agronomical factors analysis on grain maize yield decreasing in Iran with meta-analysis method. *Journal of Crops Improvement*, 23(1), 73-86. doi: 10.22059/jci.2020.292889.2299
- Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., & De Fraiture, C. (1998). Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research Report No. 20, Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- 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, 108480. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108480>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Freres, E. (2012). Reference Manual Aquacrop, FAO, Land and Water Division, Rome Italy.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101, 438-447.
- Raja, O., & Parsinejad, M. (2023). Cost-effective strategies to improve crop water productivity—case study: Bakhtegan and Maharloo, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), 883-894.
- Raja, O., Parsinejad, M., & Sohrabi, T. (2019). Evaluation of management strategies to reduce water use in Marvdasht-Kharameh study area, *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 8(4), 67-86. (In Persian)
- Raja, O., Veysi, S. and Barzegar, A. (2024). Evaluation the effectiveness of management strategies to reduce agricultural water use by using the AquaCrop model (case study: Hashtgerd plain). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25(96), 26-1. doi: 10.22092/idser.2024.367320.1595
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., & Saxton, K.E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320.

- Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., & Shahidi, A. (2014). Evaluation and comparison of AquaCrop and FAO models for yield prediction of winter wheat under environmental stresses. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 4(6), 438-449.
- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy journal*, 101(3), 426-437.
- Terán-Chaves, C.A., García-Prats, A., & Polo-Murcia, S.M. (2022). Calibration and validation of the FAO aquaCrop water productivity model for perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Water*, 14(23), 3933. <https://doi.org/10.3390/w14233933>
- Vatankhah, I., & Ebrahimian, H. (2016). Assessment of AquaCrop model for simulating forage maize yield along the furrow. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 495-504. (In Persian)
- Wallach, D., Makowski D., Jones, J.W., & Brun, F. (2019). *Working with Dynamic Crop Models*, Chapter 6: Uncertainty and Sensitivity Analysis.

Research Article**Effect of Subsurface Drip Irrigation on the Fruit Yield, Water Productivity, and Growth Parameters of Grapevine****Seyed Hassan Mousavi Fazl**✉

***Corresponding Author:** Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research Center Semnan province (Shahrood), AREEO, Shahrood, Iran.

(✉ **Corresponding Author:** hmousavifazl@yahoo.com)

ARTICLE INFO	HOW TO CITE THIS ARTICLE
Received: 27 January 2026	Mousavifazl, S.H., (2026). Effect of subsurface drip irrigation on the fruit yield water productivity and growth parameters of grapevine.
Revised: 14 April 2026	V.26, No.100, P: 31-48
Accepted: 10 May 2026	https://doi.org/ 10.22092/idsr.2026.372100.1639
Available Online:30 May 2026	

Extend Abstract**Introduction**

Drip irrigation is recognized as one of the most efficient methods for irrigating orchards and vineyards in arid and semi-arid regions. This study investigated the effects of two irrigation methods, surface drip irrigation (DI) and subsurface drip irrigation (SDI), on yield, water productivity, growth parameters, and weed development in grapevines. The research was conducted in 2020 and 2021 at the Research Station of Bastam, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Shahrood, Iran.

Materials and Methods

The study was designed with two factors: irrigation method (surface and subsurface) and different irrigation water amounts (50%, 75%, and 100% of the plant's water requirement). A split-plot experiment based on a randomized complete block design with three replications was carried out. In the surface drip irrigation method, lateral pipes were placed 50 cm far from the tree trunk on the soil surface, while in the subsurface drip irrigation method, the lateral pipes were placed 50 cm far from the tree trunk and at a depth of 40 cm under the soil. Irrigation water was calculated using the Penman-Monteith method, and plants received irrigation every 3 days based on the designated water levels. The study examined the effects of experimental factors on crop yield, water productivity and growth characteristics of trees including the longitudinal growth of branches and their diameter were investigated in different treatments.

Results

The results showed that the effects of irrigation method and irrigation water amount, as well as their interaction effects, on fruit yield were significant at the 5% level. The effect of irrigation method on weed growth was also significant; however, the individual effect of irrigation water amount and its interaction with irrigation method did not significantly affect weed growth. The maximum fruit yield was obtained from the subsurface drip irrigation treatment combined with 75% and 100% of crop water requirement (51,600 and 53,080 kg ha⁻¹, respectively). The yield difference between these two treatments was not statistically significant. The yield difference between subsurface drip irrigation and surface drip irrigation methods was approximately 12%. This indicates that a portion of the water applied to the orchard is lost through surface evaporation and is also used by weeds.

Conclusion

Considering the performance of the treatments and the need to conserve water, the subsurface drip irrigation method with 75% irrigation water is recommended as the best treatment for grape orchards. This method ensures higher water use efficiency and reduced weed growth, while maintaining an adequate crop yield.

Key words: Drip irrigation, Grapevine, Irrigation management, Water productivity, Vineyard

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

The Author have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgement

The author wishes to express their sincere gratitude for the cooperation of the Vice Presidency for Research and other colleagues at the Semnan (Shahrud) Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, as well as the Agriculture Jihad Organization of Semnan Province.

اثر آبیاری قطره‌ای زیر سطحی بر عملکرد میوه، بهره‌وری آب و پارامترهای رشدی انگور

سید حسن موسوی‌فضل[✉]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

چکیده

به‌منظور بررسی و مقایسهٔ دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی و دستیابی به موانع احتمالی این روش‌ها در باغ‌های انگور، پژوهشی از سال ۱۳۹۹ به مدت دو سال در باغ‌های مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود) واقع در ایستگاه تحقیقات بسطام به‌اجرا درآمد. در این پژوهش اثر دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی و مقادیر مختلف آب آبیاری بر عملکرد میوه، بهره‌وری آب، ویژگی‌های رشدی انگور و رشد علف‌های هرز بررسی شد. این پژوهش به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده بر پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. روش آبیاری در دو سطح (قطره‌ای سطحی و قطره‌ای زیرسطحی) به‌عنوان عامل اصلی و مقادیر تأمین آب آبیاری در سه سطح (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی درخت) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. در روش آبیاری قطره‌ای سطحی، لوله‌های فرعی به فاصلهٔ ۵۰ سانتی‌متر از تنهٔ درخت روی سطح خاک و در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در فاصلهٔ ۵۰ سانتی‌متری از تنهٔ درخت و در عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک قرار گرفتند. تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن-مانیت و با در نظر گرفتن ضریب گیاهی (استخراج‌شده از نشریه ۵۶ فائو)، سطح سایه‌انداز، روش آبیاری و عمق آب آبیاری محاسبه گردید و بر اساس سطوح مختلف آب با دور آبیاری سه روز اعمال شد. در این پژوهش اثر فاکتورهای آزمایشی بر عملکرد میوه، ویژگی‌های رشدی درختان شامل رشد طولی و قطر شاخه‌ها، تعداد برگ در شاخه، بهره‌وری آب و رشد علف‌های هرز در تیمارهای مختلف بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد اثر روش و مقدار آب آبیاری و اثرهای متقابل آن‌ها بر عملکرد میوه در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. اثر روش آبیاری بر رشد علف‌های هرز نیز معنی‌دار شد ولی اثر جداگانهٔ آب آبیاری و اثر متقابل روش و آب آبیاری بر رشد علف‌های هرز معنی‌دار نشد. حداکثر عملکرد میوه از تیمارهای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و حجم آب آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی (به‌ترتیب ۵۱۶۰۰ و ۵۳۰۸۰ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. عملکرد این دو تیمار اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. اختلاف عملکرد در دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی حدود ۱۲ درصد شد. این امر نشان می‌دهد که بخشی از آب داده شده به باغ عملاً صرف تبخیر سطحی می‌شود و به مصرف علف‌های هرز می‌رسد. روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سطح آب آبیاری ۷۵ درصد بدون در نظر گرفتن نفوذ احتمالی ریشه به داخل قطره چکان‌ها و تجمع املاح در خاک به‌عنوان تیمار برتر پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: سیستم آبیاری، کارایی مصرف آب، مدیریت آبیاری، محصولات باغی

مقدمه

سطح زیرکشت در بین محصولات باغی در کشور رتبه اول،

انگور گیاهی است چند ساله که به تابستان‌های گرم و خشک طولانی و زمستان‌های سرد نیاز دارد. تاریخچه کشت آن در ایران به ۲۰۰۰ سال پیش از میلاد بر می‌گردد. ۵ هزار هکتار دارای رتبهٔ چهارم در بین محصولات باغی ایران با ۳۱۶ هزار هکتار سطح زیرکشت انگور در رتبهٔ هفتم جهان قرار دارد (Tafazoli et al. 1996). انگور از نظر و از نظر اقتصادی بعد از پسته و خرما قرار دارد. انگور در استان سمنان از نظر سطح زیرکشت (بیش از ۵ هزار هکتار) دارای رتبهٔ چهارم در بین محصولات باغی است. ارقام نسبتاً زیادی از انگور در استان کشت می‌شوند. بیشترین سطح زیرکشت انگور مربوط به شهرستان شاهرود

^۱ استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، شاهرود، ایران.

✉ نویسنده مسئول: hmousavifazl@yahoo.com (Email:)



است. رقم سرخ فخری (انگور شاهرودی) یکی از ارقام مهم این شهرستان است که بیش از ۹۰ درصد از ارقام انگور است. این رقم دیررس (پاییزه) با حبه‌های درشت و بیضی شکل، پوست ضخیم و خوشه‌هایی با تراکم متوسط، به دلیل سازگاری با شرایط خشک، خاک‌های کم‌عمق و ویژگی‌های مناسب حمل و نقل و انبارداری، انتخاب مناسبی است. برداشت این رقم معمولاً از شهریور ماه آغاز می‌شود و در صورت مساعد بودن هوا، تا اواخر مهرماه ادامه خواهد داشت. درخت انگور در شرایط کم آبی با تولید ریشه‌های عمیق با شرایط محیطی سازگار می‌شود اما تنش شدید خشکی باعث کندی رشد، تاخیر در رسیدگی، کاهش کیفیت میوه، به هم خوردن تناسب تعداد برگ و میوه و در نهایت کاهش رشد شاخه می‌شود. در مناطقی که تولید انگور وابسته به آبیاری است، آب عمده‌ترین عامل کنترل‌کننده کمیت و کیفیت میوه به ویژه در فصل تابستان تلقی می‌شود (Matthews and Nuzzo, 2007).

در حال حاضر در باغ‌های انگور برای حذف تبخیر از سطح خاک در روش‌های آبیاری سنتی و قطره‌ای سطحی^۱ (DI) و برخی مشکلات دیگر، از روش قطره‌ای زیرسطحی^۲ (SDI) استفاده می‌شود. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، لوله‌های آبد و قطره‌چکان‌ها در عمق ۳۵ تا ۴۰ سانتی‌متری زیرسطح خاک قرار می‌گیرند. آب و عناصر غذایی توسط این لوله‌ها به طور مستقیم در ناحیه ریشه در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط جغرافیایی سخت و نامناسب برای محصولات مختلف مناسب است. امروزه با طراحی نسل جدید قطره چکان‌های تنظیم‌کننده فشار و استانداردهای تصفیه و برنامه‌های نگهداری و تعمیرات، نگرانی در ارتباط با مسدود شدن قطره چکان‌ها وجود ندارد و فقط نگرانی در مورد ورود ریشه به داخل قطره‌چکان‌هاست (Lamm et al., 2016).

در روش آبیاری زیرسطحی، با توجه به اینکه قطره‌چکان‌ها در عمق خاک قرار می‌گیرند، نیاز رطوبتی به شکل کروی فرم می‌گیرد. در روش قطره‌ای سطحی، رطوبت در لایه‌های خاک به حالت نیم‌دایره است و فرم کلی آن پیاپی شکل است. بنابراین گیاه در حالت کروی شکل رطوبت داخل خاک، ۳۰ تا ۴۰ درصد دسترسی بیشتری به آب دارد (Lamm et al., 2007).

در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، به دلیل توزیع آب در زیر سطح خاک، رطوبت سطحی کاهش می‌یابد و در بسیاری از موارد رشد علف‌های هرز و شیوع برخی بیماری‌های برگ محدودتر می‌شود. این ویژگی، در مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی، می‌تواند منجر به کاهش برخی هزینه‌های مدیریتی گردد. در این سامانه، لوله‌ها و قطره‌چکان‌ها معمولاً از مواد پلیمری مقاوم ساخته می‌شوند و به دلیل استقرار در زیر خاک، در برابر تابش پرتو فرابنفش، نوسان‌های دمایی، آسیب‌دیدگی‌های مکانیکی ناشی از عملیات زراعی محافظت می‌شوند. با این حال، مدیریت صحیح بهره‌برداری و نگهداری این سامانه، به‌ویژه در زمینه کنترل گرفتگی و خسارت احتمالی جوندگان، برای حفظ عملکرد سامانه ضروری است (Lamm et al., 2007).

در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به دلیل استقرار قطره‌چکان‌ها در زیر سطح خاک، نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی، تبخیر مستقیم از سطح خاک کاهش می‌یابد، هرچند به‌واسطه حرکت مویینه آب در خاک، به‌ویژه در خاک‌های با درصد رس بالا، امکان انتقال رطوبت به سطح خاک و تبخیر وجود دارد. در این سامانه، الگوی توزیع املاح در پروفیل خاک تغییر می‌کند و معمولاً نمک‌ها در حاشیه جبهه خیس‌شدگی یا لایه‌های سطحی تجمع می‌یابند. بنابراین، پیش‌بینی برنامه مناسب آبیاری برای جلوگیری از تجمع املاح در ناحیه ریشه ضروری است. همچنین، به دلیل کاربرد موضعی آب و کاهش رواناب سطحی، کارایی مصرف

²Subsurface Drip Irrigation (SDI)¹Drip Irrigation (DI)

غربی اثر مقادیر مختلف آب آبیاری شامل ۱۵۰۰، ۳۵۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ مترمکعب در هکتار و وضعیت بدون آبیاری (شاهد) را بر عملکرد میوه بررسی کردند و نشان دادند با افزایش مقدار آب آبیاری تا ۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار عملکرد میوه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. دگاریس و همکاران (DeGaris et al., 2015) در پژوهشی با بررسی اثر کم‌آبیاری بر رقم انگور شیرازی نشان دادند کاهش ۲۱ درصد آب مصرفی در فصل رشد در مقایسه با شاهد، سبب کاهش معنی‌داری در وزن خوشه‌های انگور می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهند تاکنون پژوهش‌های چندانی در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای باغ‌های انگور کشور صورت نگرفته است. در استان سمنان بیش از ۵ هزار هکتار باغ انگور وجود دارد که بخش زیادی از آن‌ها با روش‌های سنتی آبیاری می‌شود. اما از روش آبیاری قطره‌ای سطحی نیز در سطح نسبتاً زیادی استفاده می‌شود. شرایط خشک استان و پتانسیل ۲۲۰۰ میلی‌متر تبخیر سبب شده تا بخش قابل توجهی از آب کاربردی در باغ‌ها از طریق تبخیر تلف شود. روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در باغ‌های استان نیز به دلیل مزیت‌های نسبی در حال گسترش است. اما به دلیل وجود برخی نگرانی‌ها و مشکلات احتمالی (محدودیت‌های موجود در کیفیت آب و خاک) در محصولات باغی و مخصوصاً انگور، نیازمند بررسی و رو آوردن به کارهای پژوهشی است. این پژوهش با هدف رفع این نگرانی‌ها و به‌عنوان طرح مقدماتی در باغ‌های انگور به‌اجرا در آمد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای پژوهش باغ‌های ایستگاه تحقیقات کشاورزی بسطام متعلق به مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود) واقع در کیلومتر ۳ شاهرود با متوسط بارندگی سالانه ۱۴۵ میلی‌متر بود. براساس آمار دراز مدت ۵۰ ساله، دوره خشک از اواسط اردیبهشت شروع و تا نیمه آبان ادامه دارد. بقیه ماه‌های سال

آب و راندمان کاربرد آب در مقایسه با روش‌های سطحی افزایش می‌یابد (Lamm et al., 2016).

در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، لوله‌ها در زیر سطح خاک قرار می‌گیرند، بنابراین هزینه‌های لوله‌گذاری ۳۳ تا ۶۰ درصد کل هزینه‌های خرید لوازم و نصب سیستم را شامل می‌شود. فاصله لوله‌های فرعی تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های اجرای سیستم دارد (Daller et al., 2013). در روش زیرسطحی، در صورت تعیین عمق مناسب نصب و فاصله مناسب لوله‌ها، می‌توان عملکرد میوه و بهره‌وری آب را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. عمق بهینه لوله‌های فرعی در این سامانه بر اساس عواملی مانند ویژگی‌های فیزیکی خاک، میزان آب مصرفی و عمق توسعه ریشه تعیین می‌شود (Finger et al., 2015).

در پژوهشی، مدیریت سیستم‌های آبیاری با هدف بهبود بهره‌وری آب باغ‌های انگور در شرایط کویری بررسی شد. این آزمایش طی دو فصل متوالی در مصر به‌اجرا درآمد. در این آزمایش فاکتورها شامل آب آبیاری (۶۰، ۸۰، ۱۰۰ درصد آب مورد نیاز) و سه روش آبیاری (قطره‌ای سطحی، قطره‌ای زیرسطحی و روش قطره‌ای آویزان^۱ به‌کار گرفته شد. نتایج تحقیق نشان داد که بیشترین مقدار رطوبت خاک در روش آبیاری زیرسطحی است. روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط آب و هوایی مصر (گرم و خشک) از نظر کاهش تلفات تبخیر و کارایی مصرف آب بهترین روش انتخاب شد. حداکثر عملکرد میوه از این روش به‌دست آمد. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مدیریت‌های زراعی و برنامه آبیاری نسبت به روش قطره‌ای سطحی آسان‌تر بوده است. عملکرد در سطح ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما در سطح ۶۰ درصد نیاز آبی کاهش یافت (Sheren et al., 2017).

دولتی بانه و نورجو (Dolati Baneh & Noorjoo 2011) در پژوهشی که در باغ‌های انگور استان آذربایجان

¹Suspended dripirrigation

جزو دوره مرطوب منطقه محسوب می‌گردد. اقلیم منطقه صفحات فشاری^۱ در مکش‌های ۰/۳ و ۱۵ بار تعیین شد. با مطابق طبقه‌بندی آمبروزه خشک و سرد است (Anon. 2019) هدایت الکتریکی خاک با دستگاه هدایت سنج اندازه‌گیری شد. فسفر خاک به روش اسپکتروفتومتر^۲، نیتروژن کل خاک به روش کج‌دال و پتاسیم با روش استات آمونیوم با دستگاه فلیم فتومتر^۳ مدل جنوی^۴ تعیین شد (جدول ۱). برای تعیین کیفیت آب آبیاری، نمونه‌ای از منبع آب تهیه و آزمایش شد. نتایج تجزیه کیفی آب در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک باغ آزمایشی

Table 1. Physical and chemical properties of the soil of the experimental orchard

عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)		ویژگی Properties
۳۰-۶۰	۰-۳۰	
لوم	لوم	۱- بافت خاک
۴۵	۴۵	الف- درصد شن
۳۴	۳۲	ب- درصد سیلیت
۲۱	۲۳	ج- درصد رس
۱/۵۹	۱/۴۶	۲- وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)
۱۹/۷	۲۰/۷	۳- رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه (درصد)
۹	۹/۵	۴- رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی (درصد)
۷/۸	۷/۹	۵- اسیدیته خاک (pH)
۱/۳	۱/۴	۶- هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی زیمنس بر متر)
		۷- عناصر غذایی
۱۵۰	۱۵۰	الف- پتاسیم قابل جذب (قسمت در میلیون)
۱۲	۱۶	ب- فسفر قابل جذب (قسمت در میلیون)
۰/۰۵	۰/۰۵	ج- نیتروژن کل (درصد)

جدول ۲- نتایج تجزیه کیفی آب مورد استفاده در پژوهش

Table 2. Results of the qualitative analysis of the water used in the research

SAR ^۵	آنیون‌ها (میلی اکی والان بر لیتر) Anions (meq/L)		کاتیون‌ها (میلی اکی والان بر لیتر) Cations (meq/L)				pH	هدایت الکتریکی (EC) (میکروموس بر سانتی‌متر) Electrical conductivity (umhos/cm)
	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺		
۲/۱	۲/۹۸	۰/۹۲	۵/۲	-	۳/۵	۵/۶	۸/۱	۱۱۵۱

^۴Jenway^۵Sodium adsorption ratio^۱Pressure Plate^۲Spectrophotometer^۳Flam Photometer

روش پژوهش

۵۰ سانتی‌متری از تنه درختان و به‌صورت یک ردیفه و قطره‌چکان‌ها با آبدهی ۴ لیتر در ساعت به فاصله ۵۰ سانتی‌متر روی لوله‌ها نصب شده‌اند. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی لوله‌های آبدی در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از تنه درخت و در عمق ۴۰ سانتی‌متری زیر خاک مدفون شدند. برای جلوگیری از ورود ذرات خاک و گرفتگی خروجی‌ها، قطره‌چکان‌ها در روش آبیاری زیرسطحی از نوع آنتی‌سیفون انتخاب شدند. برای جلوگیری از ورود ریشه‌ها به داخل لوله‌ها، در طول پژوهش هر ۳۰ روز یک بار، محلول اسید فسفریک یک درصد به داخل سیستم تزریق شد. محلول با استفاده از پمپ تزریق شیمیایی متصل به شبکه، وارد سیستم لوله‌ها شد تا از رشد ریشه و گرفتگی سیستم جلوگیری گردد.

طرح در قالب کرت‌های خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل: ۱- روش آبیاری قطره‌ای در دو سطح (الف- آبیاری قطره‌ای سطحی ب- آبیاری قطره‌ای زیرسطحی) ۲- مقادیر آب آبیاری در سه سطح ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد آب مورد نیاز درخت. در این پژوهش روش، آبیاری به‌عنوان عامل اصلی در کرت‌های اصلی و سطوح مختلف آب آبیاری به‌عنوان عامل فرعی در داخل هر کرت اصلی به‌طور تصادفی اعمال شدند (شکل ۱). در این پژوهش، از رقم انگور سرخ فخری (معروف به رقم شاه‌رود) استفاده شد. سن درختان این باغ ۲۰ سال و سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی ۱۰ سال پیش از شروع آزمایش در آن اجرا شده بود. آرایش لوله‌های فرعی با فاصله



شکل ۱- سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در باغ‌های انگور (ایستگاه تحقیقات کشاورزی بسطام)

Fig 1. Subsurface drip irrigation system in vineyards (Bastam Agricultural Research Station)

طبیعی استان سمنان (شاه‌رود))، با روش پنمن-مانتیت اصلاح شده توسط فائو (FAO-56) محاسبه شد. نیاز آبی انگور با در نظر گرفتن ضریب گیاهی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Alizadeh, 2006).

$$U_d = ET_0 \cdot K_c \quad (1)$$

فاصله ردیف‌ها و فاصله درختان روی ردیف‌ها به‌ترتیب ۳ و ۲ متر (عرف محل) و طول هر خط ۲۰ متر انتخاب شد. برای هر تیمار یک ردیف درخت به طول ۲۰ متر (۱۰ درخت روی هر ردیف) در نظر گرفته شد.

محاسبه آب آبیاری

نیاز آبی گیاه مرجع یا تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه (ET_0) براساس آمار روزانه هواشناسی (ایستگاه هواشناسی واقع در اراضی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاه‌رود))، با روش پنمن-مانتیت اصلاح شده توسط فائو (FAO-56) محاسبه شد. نیاز آبی انگور با در نظر گرفتن ضریب گیاهی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Alizadeh, 2006).

K_c = ضریب گیاهی است.

در این پژوهش دور آبیاری ۳ روز در نظر گرفته شد.

میزان متوسط تعرق روزانه گیاه در روش آبیاری قطره‌ای از رابطه ۲ محاسبه شد (Alizadeh, 2006).

$$T_d = U_d \cdot \left[\frac{P_s}{100} + 15 \left(1 - \frac{P_s}{100} \right) \right] \quad (2)$$

در این رابطه:

T_d = متوسط تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر)،

U_d = متوسط آب مصرفی روزانه گیاه (میلی‌متر)، و

P_s = سطح سایه‌انداز گیاه (درصد) است.

سطح سایه‌انداز درخت در زمان‌های مختلف در فصل

تعیین شد. برای این منظور در فصل و به فاصله‌های مشخص مساحت سایه اندازه چند درخت اندازه‌گیری و سپس با تقسیم مساحت سایه‌انداز هر درخت بر حاصل ضرب فاصله درختان، درصد سطح سایه‌انداز محاسبه می‌شود. عمق ناخالص آبیاری از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$I_g = \frac{T_d}{E} \quad (3)$$

در رابطه ۳، E راندمان آبیاری است.

راندمان آبیاری در این پژوهش ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. راندمان ۹۰ درصد در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به دلیل نصب لوله‌ها در عمق مناسب (عمق ۴۰ سانتی‌متر) است که موجب کاهش تبخیر و جلوگیری از رواناب می‌گردد، و نیز به دلیل به کارگیری قطره‌چکان‌های جبران‌کننده فشار است که توزیع یکنواخت آب را تضمین می‌کنند، و از طرفی گسترش عمقی و سطحی سیستم ریشه‌های درختان انگور به سهولت در دسترس است.

مقدار آب مورد نیاز هر درخت از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$G = I_g \times S_p \times S_r \quad (4)$$

در این رابطه:

S_p و S_r به ترتیب فاصله درختان روی ردیف و فاصله

ردیف‌ها (متر)، G حجم ناخالص آب آبیاری (لیتر) و I_g عمق ناخالص آب آبیاری (میلی‌متر) است.

حجم آب آبیاری با کنتورهای حجمی اندازه‌گیری شد که در تیمارهای مختلف تعبیه شده بودند. در هر تیمار چند درخت یکسان انتخاب و خصوصیات رشدی درختان شامل رشد طولی شاخه‌ها و قطر آن‌ها در فاصله‌های زمانی مشخص در فصل رشد اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد نیز در هر تیمار آزمایشی ۵ درخت با شرایط یکسان (از ردیف‌های وسط و با رعایت حذف اثرهای حاشیه‌ای) انتخاب و مقدار کل محصول آن‌ها برداشت و وزن شد. تراکم غلف‌های هرز در هر تیمار با روش‌های استاندارد تعیین و در تیمارهای مختلف بررسی شد. در پایان هر سال داده‌ها جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل گردید و در پایان سال دوم تجزیه مرکب داده‌ها اجرا شد.

بهره‌وری آب و تحلیل اقتصادی

بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه شد. بهره‌وری فیزیکی آب نسبت مقدار محصول تولید شده به مقدار آب داده شده است.

$$WP = \frac{Y}{I + P_e} \quad (5)$$

ممکن است شاخص بهره‌وری فیزیکی برای محصولی بزرگ‌تر باشد، اما این امر دلیلی بر سود اقتصادی بیشتر آن محصول نیست. بنابراین، شاخص بهره‌وری اقتصادی دقیق‌تر و توانمندتر است (Van Halsema & Vincent, 2012).

$$WPe = \frac{VA}{I + P_e} \quad (6)$$

در این رابطه‌ها:

WP بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم به ازای هر متر مکعب آب)، WPe بهره‌وری اقتصادی آب (ریال به ازای هر متر مکعب آب)، Y عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)، I و P_e به ترتیب حجم آب آبیاری و بارندگی موثر طی فصل رشد (متر مکعب در هکتار) و VA سود خالص (ریال در هکتار) است. برای محاسبه سود خالص، باید هزینه‌های پرداخت شده برای نهاده‌های کشاورزی مانند کود، سم،

ماشین‌ها و ادوات، نیروی کار و مقدار آب مصرفی از درآمد ناشی از تولید محصول کسر شود (Ghassab *et al.*, 2020). این ویژگی تا ۴۰ درصد دسترسی گیاه به آب را افزایش می‌دهد.

نتایج و بحث

از سوی دیگر، نبود تفاوت معنی‌دار بین عملکرد در سطوح ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در روش زیرسطحی، نشان‌دهنده پتانسیل صرفه‌جویی ۲۵ درصد آب بدون کاهش عملکرد است. این یافته با نتایج دگاریس و همکاران (DeGaris *et al.*, 2015) همخوانی دارد که کاهش ۲۱ درصدی آب را بدون افت عملکرد در انگور رقم شیرازی امکان‌پذیر دانستند.

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS تجزیه و تحلیل آماری شدند. نتایج تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثر روش آبیاری (فاکتور A)، مقدار آب آبیاری (فاکتور B) و اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد میوه انگور معنی‌دار است (جدول ۳). این نتایج با گزارش‌های شرن و همکاران (Sheren *et al.*, 2017) در شرایط اقلیمی گرم و خشک مصر همسوست؛ این محققان عملکرد بالاتر و معنی‌دار روش قطره‌ای زیرسطحی و برهمکنش آن را با سطوح میانی و بالای آب آبیاری (۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) تأیید کرده‌اند.

در این پژوهش، برتری معنی‌دار اثر متقابل روش قطره‌ای زیرسطحی با سطوح ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی را که منجر به حداکثر عملکرد شد می‌توان به افزایش دسترسی ریشه به رطوبت در عمق بیش از ۳۵ سانتی‌متری خاک و شکل‌گیری پیاز رطوبتی کروی در روش قطره‌ای زیرسطحی نسبت داد. به گفته لام و همکاران (Lamm *et al.*, 2007)

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب داده‌های عملکردی انگور
Table 3. Combined analysis of variance of grape yield

میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Sources of variation
۶۳۶۰۰۶۲۵ ^{ns}	۱	سال (y)
۷۳۳۵۶۲۵	۴	تکرار × سال (R×y)
۲۰۰۹۲۸۰۶۲۵ *	۱	روش آبیاری (A)
۶۸۰۶۲۵	۱	روش آبیاری × سال (y × A)
۹۲۳۲۳۰۰۰۰ **	۲	مقدار آب آبیاری (B)
۱۲۱۰۰۰۰	۲	مقدار آب آبیاری × سال (y×B)
۱۱۱۰۱۷۵۰۰ *	۲	اثر متقابل روش آبیاری × مقدار آب آبیاری (A×B)
۲۷۲۲۵۰۰	۲	اثر متقابل روش آبیاری × مقدار آب آبیاری × سال (y×A×B)
۱۸۱۳۴۸۷۵	۲۰	خطا
	۳۵	کل
		۸/۷۱ ضریب تغییرات

ns، ** به ترتیب بیانگر معنی‌دار بودن در سطح یک و پنج درصد و ns و معنی‌دار نبودن داده‌ها.

اثر روش آبیاری بر طول شاخه، قطر شاخه و تعداد برگ در شاخه معنی‌دار نشد (جدول ۴). اما اثر مقدار آب آبیاری بر پارامترهای رشدی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر طول و قطر شاخه معنی‌دار شد. انگور به دلیل داشتن سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده، قادر به تحمل تنش خشکی تا حد زیادی است و در برخی منابع به عنوان گیاهی ذاتاً دیم معرفی شده است؛ با این حال، این گیاه به تأمین آب مورد نیاز خود واکنش نشان می‌دهد. بنابراین در شرایط رطوبت کافی، عملکرد، پارامترهای رشدی و بهره‌وری مصرف آب افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش با یافته‌های پیسیوتا (Pisciotta, 2017) و جلینی (Jolini, 2006) همسوست.

اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر طول و قطر شاخه‌ها معنی‌دار شد، اما این اثر بر تعداد برگ در شاخه معنی‌دار نگردید. از نظر فیزیولوژیکی، این الگو را می‌توان به

حساسیت متفاوت فرآیندهای رشدی انگور به کمبود آب نسبت داد (Lebon *et al.*, 2006). رشد طولی و قطری شاخه‌ها به فرآیندهای تقسیم و طول‌شدن سلولی وابسته هستند که به سرعت تحت تأثیر کاهش پتانسیل آب سلول ناشی از خشکی قرار می‌گیرند (Kozlowski & Pallardy, 2002). در مقابل، تعداد برگ در شاخه عمدتاً توسط تعداد گره‌های تعیین‌شده در مراحل اولیه رشد و الگوی فیلولتاکسی کنترل می‌شود و تغییرات کوتاه‌مدت رطوبت خاک طی فصل رشد تأثیر کمتری بر آن دارد. این یافته با گزارش‌های چاوس و همکاران (Chaves *et al.*, 2010) همسو است که نشان دادند انگور در شرایط کم‌آبی رشد رویشی را به قیمت حفظ سطح برگ کاهش می‌دهد. بنابراین، طول و قطر شاخه به عنوان شاخص‌های حساس‌تر، برای ارزیابی پاسخ به تنش خشکی مناسب‌تر از تعداد برگ هستند.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب داده‌های رشدی انگور (میانگین مربعات)

Table 4. Combined analysis of variance of grape growth data (mean squares)

تعداد برگ در شاخه Number of leaves per shoot	قطر شاخه Shoot diameter	طول شاخه Shoot length	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Sources of variation
۰/۰۰۰ ns	۰/۰۰۰ ns	۱۴/۰۶۳ ns	۱	سال (y)
۱/۸۷۲	۱/۴۸۷	۲۹۷/۱۳	۴	تکرار × سال (R×y)
۰/۰۷۱ ns	۲۱/۱۶۰ ns	۲۷۸/۳۳ ns	۱	روش آبیاری (A)
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۷۲۲	۱	روش آبیاری × سال (y × A)
۱۸/۱۲ **	۲۸/۰۶۸ **	۱۵۶۹/۹ *	۲	مقدار آب آبیاری (B)
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۴/۰۶۳	۲	مقدار آب آبیاری × سال (y×B)
۲/۹۶۸ ns	۲/۵۴۳ *	۲۸/۶۷۹ *	۲	اثر متقابل روش آبیاری × مقدار آب آبیاری (A×B)
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۷۲۲	۲	اثر متقابل روش آبیاری × مقدار آب آبیاری × سال
۴/۸۰۷	۳/۵۶	۱۹۸/۸۱	۲۰	خطا
			۳۵	کل
۱۱/۶	۱۱/۴	۱۳		ضریب تغییرات

*, ** به ترتیب بیانگر معنی‌دار بودن در سطح یک و پنج درصد و ns و معنی‌دار نبودن داده‌ها.

اثر روش آبیاری بر رشد علف‌های هرز در باغ (وزن تر ۲۰۲۲ مبنی بر کاهش ۱/۶ برابری رشد علف‌های هرز در و خشک) معنی‌دار شد (جدول ۵). این یافته‌ها با نتایج تحقیقات شاتکوفسکی و همکاران (Shatkovskyi *et al.*, 2022) همسوست. این محققان گزارش داده‌اند که آبیاری قطره‌ای

اثر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد میوه، بهره‌وری آب و پارامترهای رشدی انگور

زیرسطحی با تأمین آب در عمق خاک (بیش از ۳۵ سانتی‌متر) و خشک نگه داشتن سطح خاک، آب محدودی برای جوانه‌زنی بذر علف‌های هرز فراهم می‌کند. بنابراین بذر علف‌های هرز با شرایط سخت‌تری برای سبز شدن مواجه می‌شوند. در روش آبیاری قطره‌ای سطحی، پخش آب روی سطح خاک موجب افزایش رطوبت لایه‌های سطحی می‌شود و شرایط مساعدی برای جوانه‌زنی و استقرار بذر علف‌های هرز ایجاد می‌کند.

جدول ۵ - تجزیه واریانس داده‌های رشد علف‌های هرز (میانگین مربعات)
Table 5. Analysis of variance of weed growth data (mean squares)

وزن خشک (گرم) Dry weight (g)	وزن تر (گرم) Fresh weight (g)	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Sources of variation
۰/۱۱۱ ns	۸۴/۰۲۸ ns	۱	سال (y)
۴۰۷/۴۳۹	۱۶۶۵/۸۳	۴	تکرار × سال (R×y)
۲۰۸۸۰/۲۵۰ **	۱۹۲۶۹۱/۷۳ **	۱	روش آبیاری (A)
۰/۱۱۱	۹۳/۴۴	۱	روش آبیاری × سال (y × A)
۱۸۶۰/۵۵ ns	۱۴۷۷۷/۲۷ ns	۲	مقدار آب آبیاری (B)
۰/۱۱۱	۲۱۷/۰۲۸	۲	مقدار آب آبیاری × سال (y×B)
۳۵۱۶/۲۱ ns	۲۸۱۴۲/۱۹۴ ns	۲	اثر متقابل روش آبیاری × مقدار آب آبیاری (A×B)
۰/۱۱۱	۲۰۷/۴۴	۲	اثر متقابل روش آبیاری × مقدار آب آبیاری × سال (y×A×B)
۱۳۱۷/۲۵۵	۱۱۷۰۶/۶۹۹	۲۰	خطا
		۳۵	کل
۲۲/۸۸	۲۰/۲		ضریب تغییرات

ns، ** به ترتیب بیانگر معنی‌دار بودن در سطح یک و پنج درصد و ns و معنی‌دار نبودن داده‌ها.

اثر تیمارها بر عملکرد میوه (مقایسه میانگین‌ها) جدول (۶) مقایسه میانگین‌های عملکرد میوه در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. براساس نتایج این جدول، بین عملکرد تیمارها با مقدار آب آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (سال اول، دوم و تجزیه مرکب). هرچند با افزایش مقدار آب آبیاری از ۷۵ به ۱۰۰ درصد عملکرد افزایش یافته است. عملکرد در تیمار با مقدار ۵۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌داری با دو تیمار ۷۵ و ۱۰۰ درصد دارد. این کاهش عملکرد در تنش‌های زیاد، شدت بیشتری دارد. جلینی (Jolani 2006) و شرن و همکاران (Sheren et al., 2017) نیز نتایج مشابهی گرفتند. این محققان می‌گویند با افزایش آب آبیاری در باغ‌های انگور عملکرد افزایش می‌یابد.

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که عملکرد میوه در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به روش قطره‌ای سطحی حدود ۱۲ درصد افزایش دارد. این افزایش عملکرد در روش قطره‌ای زیرسطحی احتمالاً به دلیل حذف تلفات تبخیر، کاهش تراکم علف‌های هرز، فراهم‌بودن آب بیشتر و شرایط رشد بهتر برای انگور است. نتایج این پژوهش با یافته‌های دیگر پژوهشگران همخوانی دارد. برخی پژوهشگران گفته‌اند استفاده از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در باغ‌های انگور کالیفرنیا سبب افزایش بهره‌وری آب، کاهش تلفات تبخیر، کاهش رشد علف‌های هرز و افزایش عملکرد و کیفیت محصول می‌شود (Pisciotta, 2017).

جدول ۶- اثر تیمارها بر عملکرد میوه

Table 6. Effect of treatments on fruit yield

تیمار Treatment	سطوح تیمارها Treatment levels	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield (kg/ha)		
		سال اول	سال دوم	تجزیه مرکب (میانگین دو سال)
مقدار آب آبیاری	۵۰	۴۰۱۵۰ ^a	۳۸۲۲۵ ^a	۳۹۱۸۷ ^a
	۷۵	۵۰۸۰۰ ^b	۴۹۷۷۵ ^b	۵۰۲۸۷ ^b
	۱۰۰	۵۲۷۵۰ ^b	۵۰۷۲۵ ^b	۵۱۲۳۷ ^b
روش آبیاری	قطره‌ای سطحی	۴۲۹۰۰ ^a	۳۹۹۶۷ ^a	۴۱۴۳۳ ^a
	قطره‌ای زیرسطحی	۴۷۵۶۷ ^b	۴۶۱۸۳ ^b	۴۶۳۷۵ ^b

**در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر عملکرد میوه

جدول (۷) مقایسه میانگین اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری را بر عملکرد میوه نشان می‌دهد. نتایج تجزیه مرکب داده‌های دو سال نشان می‌دهد اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر عملکرد معنی‌دار است. حداکثر عملکرد میوه در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با دو حجم آب آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی، به‌ترتیب ۵۱۶۰۰ و ۵۳۰۸۰ کیلوگرم در هکتار، حاصل شد. عملکرد این دو تیمار اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. روش آبیاری قطره‌ای

سطحی با مقدار آب آبیاری ۱۰۰ درصد آب مورد نیاز در سطح پایین‌تری قرار دارد (۴۸۴۰۰ کیلوگرم در هکتار). اختلاف عملکرد میوه در دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی (۱۲ درصد) قابل توجه است. این امر نشان می‌دهد که بخشی از آب داده شده به باغ عملاً صرف تبخیر سطحی و علف‌های هرز می‌گردد. بنابراین، با توجه به عملکرد تیمارها و لزوم صرفه‌جویی در مصرف آب، روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سطح آب آبیاری ۷۵ درصد به‌عنوان تیمار برتر پیشنهاد می‌گردد.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر عملکرد میوه

Table 7. Mean comparison of the interaction effect of irrigation method and water amount on fruit yield

ردیف Row	تیمار Treatment	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield (kg/ha)		
		سال اول	سال دوم	تجزیه مرکب (دو سال)
۱	روش آبیاری قطره‌ای سطحی و مقدار آب ۵۰ درصد	۳۶۶۰۰ ^d	۳۳۵۵۰ ^d	۳۴۹۳۰ ^d
۲	روش آبیاری قطره‌ای سطحی و مقدار آب ۷۵ درصد	۴۲۹۰۰ ^c	۳۹۰۵۰ ^c	۴۰۹۸۰ ^c
۳	روش آبیاری قطره‌ای سطحی و مقدار آب ۱۰۰ درصد	۴۹۵۰۰ ^b	۴۷۳۰۰ ^b	۴۸۴۰۰ ^b
۴	روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقدار آب ۵۰ درصد	۴۴۰۰۰ ^{bc}	۴۲۹۰۰ ^{bc}	۴۳۴۵۰ ^{bc}
۵	روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقدار آب ۷۵ درصد	۵۲۷۰۰ ^a	۵۰۵۰۰ ^a	۵۱۶۰۰ ^a
۶	روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقدار آب ۱۰۰ درصد	۵۴۰۰۰ ^a	۵۲۱۵۰ ^a	۵۳۰۸۰ ^a

**در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

اثر تیمارها بر ویژگی‌های رشدی

رشد طولی شاخه‌ها

جدول (۸) مقایسه میانگین اثر روش و مقدار آب آبیاری بر رشد طولی سالیانه شاخه‌ها را نشان می‌دهد. اگرچه اثر روش آبیاری بر رشد طولی شاخه‌ها معنی‌دار نیست، اما رشد طولی شاخه‌ها در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (۱۱۱/۶ سانتی‌متر) بیشتر از رشد طولی شاخه‌ها در روش آبیاری قطره‌ای سطحی (۱۰۶ سانتی‌متر) است. از سوی

اثر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد میوه، بهره‌وری آب و پارامترهای رشدی انگور

دیگر، اثر مقدار آب آبیاری بر رشد طولی شاخه‌ها معنی‌دار است. با افزایش مقدار آب آبیاری، رشد طولی شاخه‌ها افزایش یافته است. در مقابل، افزایش مقادیر آب آبیاری به طور معنی‌داری رشد طولی شاخه‌ها را افزایش داده است به طوری که بیشترین رشد طولی (۱۲۰/۷ سانتی‌متر) در بالاترین سطح آبیاری مشاهده شده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که تأمین کافی آب، عامل اصلی محرک رشد رویشی در شاخه‌هاست.

اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر رشد طولی شاخه‌ها نیز معنی‌دار است (جدول ۹). حداکثر رشد طولی سالیانه شاخه‌ها، ۱۲۲، ۱۱۹ و ۱۱۲ سانتی‌متر، به ترتیب در سه تیمار روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی با مقدار آب ۱۰۰ درصد و قطره‌ای زیرسطحی با مقدار آب آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی به‌دست آمده است. اندازه شاخه‌ها در این سه تیمار اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. تیمار آبیاری قطره‌ای سطحی با مقدار آب آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی، کمترین رشد طولی (۹۵/۸ سانتی‌متر) را داشته است.

جدول ۸- اثر تیمارها بر رشد سالیانه شاخه‌ها (طول شاخه)

Table 8. Effect of treatments on annual shoot growth (shoot length)

تیمار Treatment	سطوح تیمارها Treatment levels	طول شاخه (سانتی‌متر) Shoot length (cm)	سال اول	سال دوم	تجزیه مرکب (میانگین دو سال)
مقدار آب آبیاری	۵۰	۹۸ ^a	۹۷ ^a	۹۸ ^a	۹۸ ^a
	۷۵	۱۰۷/۸ ^a	۱۰۸ ^a	۱۰۷/۸ ^a	۱۰۷/۸ ^a
	۱۰۰	۱۲۲/۶ ^b	۱۱۸/۸ ^b	۱۲۰/۷ ^b	۱۲۰/۷ ^b
روش آبیاری	قطره‌ای سطحی	۱۰۶/۵ ^a	۱۰۵/۵ ^a	۱۰۶ ^a	۱۰۶ ^a
	قطره‌ای زیرسطحی	۱۱۲/۴ ^a	۱۱۰/۸ ^a	۱۱۱/۶ ^a	۱۱۱/۶ ^a

در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر رشد طولی شاخه‌ها

Table 9. Mean comparison of the interaction effect of irrigation method and water amount on shoot length growth

ردیف Row	تیمار Treatment	طول شاخه (سانتی‌متر) Shoot length (cm)	سال اول	سال دوم	تجزیه مرکب
۱	روش آبیاری قطره‌ای سطحی و مقدار آب ۵۰ درصد	۹۷ ^c	۹۵/۵ ^c	۹۵/۸ ^c	۹۵/۸ ^c
۲	روش آبیاری قطره‌ای سطحی و مقدار آب ۷۵ درصد	۱۰۳ ^{bc}	۱۰۲/۸ ^{bc}	۱۰۳/۲ ^{bc}	۱۰۳/۲ ^{bc}
۳	روش آبیاری قطره‌ای سطحی و مقدار آب ۱۰۰ درصد	۱۲۰/۵ ^{ab}	۱۱۷/۶ ^{ab}	۱۱۹ ^{ab}	۱۱۹ ^{ab}
۴	روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقدار آب ۵۰ درصد	۱۰۱ ^c	۹۸/۵ ^c	۱۰۰ ^c	۱۰۰ ^c
۵	روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقدار آب ۷۵ درصد	۱۱۲/۳ ^{abc}	۱۱۳ ^{abc}	۱۱۲/۳ ^{abc}	۱۱۲/۳ ^{abc}
۶	روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقدار آب ۱۰۰ درصد	۱۲۴/۷ ^a	۱۲۰ ^a	۱۲۲/۴ ^a	۱۲۲/۴ ^a

در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

رشد قطر شاخه‌ها

نتایج تجزیه داده‌ها نشان داد که اثر مستقل روش آبیاری (قطره‌ای سطحی در مقایسه با قطره‌ای زیرسطحی) بر رشد قطری سالیانه شاخه‌ها معنی‌دار نیست؛ یعنی هر دو روش احتمالاً با فراهم‌سازی شرایط رطوبتی مشابه در منطقه ریشه، به یک سطح یا نزدیک به یک سطح از رشد قطری منجر شده‌اند. در مقابل، اثر معنی‌دار مقدار آب آبیاری نشان می‌دهد که با افزایش مقدار آب و تأمین آب کافی برای فعالیت‌های فیزیولوژیکی درخت، شرایط بهتری برای رشد رویشی انگور فراهم شده است. از طرف دیگر، معنی‌دار بودن اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری نیز بیانگر این است که پاسخ رشد قطر شاخه به افزایش مقدار آب، در دو روش

یکسان نیست و مزیت احتمالی روش زیرسطحی (کاهش خاک) می‌تواند در سطوح مشخصی از آب آبیاری خود را بهتر تلفات تبخیر و بهبود یکنواختی توزیع رطوبت در پروفیل نشان دهد (جدول‌های ۱۰ و ۱۱).

جدول ۱۰- اثر تیمارها بر رشد سالیانه قطر شاخه‌ها

Table 10. Effects of treatments on annual growth of shoot diameter

تیمار Treatment	سطوح تیمارها Treatment levels	قطر شاخه (میلی‌متر) Shoot diameter (mm)	سال اول	سال دوم	تجزیه مرکب (دو سال)
مقدار آب آبیاری	۵۰	۷/۲ ^b	۷/۴ ^b	۷ ^b	۷/۲ ^b
	۷۵		۸/۸ ^a	۹ ^a	۹/۳ ^a
	۱۰۰		۱۰/۴ ^a	۱۰/۱ ^a	۱۰/۳ ^a
روش آبیاری	قطره ای سطحی	۹/۴ ^a	۹/۴ ^a	۹/۸ ^a	۹/۶ ^a
	قطره ای زیرسطحی		۷/۸ ^a	۸/۴ ^a	۸/۱ ^a

در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

جدول ۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل روش و مقدار آب آبیاری بر قطر شاخه‌ها

Table 11. Mean comparison of the interaction effect of irrigation method and water amount on shoot diameter

ردیف Row	تیمار Treatment	قطر شاخه (میلی‌متر) Shoot diameter (mm)	سال اول	سال دوم	تجزیه مرکب
۱	روش آبیاری قطره ای سطحی و مقدار آب ۵۰ درصد	۷/۸ ^{bc}	۷/۹ ^{bc}	۸ ^{bc}	۷/۸ ^{bc}
۲	روش آبیاری قطره ای سطحی و مقدار آب ۷۵ درصد		۹/۶ ^{ab}	۹/۷ ^{ab}	۹/۶ ^{ab}
۳	روش آبیاری قطره ای سطحی و مقدار آب ۱۰۰ درصد		۱۱/۵ ^a	۱۱/۶ ^a	۱۱/۴ ^a
۴	روش آبیاری قطره ای زیرسطحی و مقدار آب ۵۰ درصد		۷ ^c	۶/۲ ^c	۶/۵ ^c
۵	روش آبیاری قطره ای زیرسطحی و مقدار آب ۷۵ درصد		۸/۷ ^{bc}	۸/۹ ^{bc}	۸/۸ ^{bc}
۶	روش آبیاری قطره ای زیرسطحی و مقدار آب ۱۰۰ درصد		۸/۸ ^{bc}	۸/۶ ^{bc}	۸/۹ ^{bc}

در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

تعداد برگ در شاخه

در شاخه افزایش یافته است (جدول ۱۲). این امر نشان تجزیه داده‌ها نشان می‌دهد اثر جداگانه روش آبیاری (قطره‌ای سطحی و زیرسطحی) بر تعداد برگ در شاخه معنی‌دار نیست. اما مقدار آب آبیاری بر تعداد برگ در شاخه موثر و معنی‌دار است. با افزایش مقدار آب آبیاری، تعداد برگ می‌گردد.

جدول ۱۲- اثر تیمارها بر تعداد برگ در شاخه

Table 12. Effects of treatments on leaves per shoot

تیمار Treatment	سطوح تیمارها Treatment levels	تعداد برگ در شاخه Number of leaves per shoot	سال اول	سال دوم	تجزیه مرکب (دو سال)
مقدار آب آبیاری	۵۰	۱۸ ^b	۱۷ ^a	۱۸ ^b	۱۸ ^b
	۷۵		۱۹ ^a	۲۰ ^a	۲۰ ^a
	۱۰۰		۲۱ ^b	۲۰ ^a	۲۱ ^a
روش آبیاری	قطره ای سطحی	۱۸/۸ ^a	۱۹/۵ ^a	۱۸/۲ ^a	۱۹ ^a
	قطره ای زیرسطحی		۱۸/۵ ^a	۱۹/۳ ^a	۱۸/۸ ^a

در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

اثر تیمارها بر رشد علف‌های هرز

زنی بذر کاهش می‌یابد. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی این امر به کاهش تراکم علف‌های هرز (مخصوصاً علف‌های یکساله) کمک می‌کند.

اثر مقدار آب بر رشد علف‌های هرز معنی‌دار است. با افزایش مقدار آب، وزن علف‌های هرز روند افزایشی نشان داده‌است. بین وزن علف‌های هرز در تیمارهای ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. با افزایش سطح آب از ۷۵ درصد به ۱۰۰ درصد، وزن علف‌های هرز افزایش یافته است. کمترین وزن تر و خشک علف‌های هرز در تیمار ۵۰ درصد مشاهده می‌شود (جدول ۱۳).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد اثر روش آبیاری (قطره‌ای سطحی و زیرسطحی) بر رشد علف‌های هرز معنی‌دار است. وزن تر علف‌های هرز در روش آبیاری قطره‌ای سطحی ۶۰۹/۹ و در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۴۶۳/۶ گرم در هر متر مربع است (جدول ۱۳). روش آبیاری قطره‌ای سطحی شرایط مناسب‌تری برای رشد و تراکم علف‌های هرز فراهم می‌کند که یکی از معایب این روش محسوب می‌شود. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی چون قطره‌چکان‌ها خیلی پایین‌تر از بذر علف‌های هرز قرار دارند، قدرت جوانه

جدول ۱۳- اثر تیمارها بر رشد علف‌های هرز
Table 13. Effect of treatments on weed growth

وزن علف‌های هرز (گرم در متر مربع) Weed weight (g/m ²)		سطوح تیمارها Treatment levels	تیمار Treatment
وزن خشک Dry weight	وزن تر Fresh weight		
۱۴۴/۳ ^b	۴۹۷/۵ ^b	۵۰	مقدار آب آبیاری
۱۶۶/۹ ^a	۵۶۵ ^a	۷۵	
۱۶۴/۶ ^a	۵۴۷/۷ ^a	۱۰۰	
۱۸۲/۷ ^a	۶۰۹/۹ ^a	قطره‌ای سطحی	روش آبیاری
۱۳۴/۵ ^b	۴۶۳/۶ ^b	قطره‌ای زیرسطحی	

در هر ستون اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌هاست

حجم آب کاربردی

کاربردی در هر دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی در تیمارهای مشابه یکسان است (آبدهی قطره‌چکان‌ها در هر دو روش برابر ۴ لیتر در ساعت). اختلاف حجم آب کاربردی در سال‌های اجرای پژوهش به دلیل اختلاف در بارندگی و پارامترهای هواشناسی است.

در منطقه، آبیاری از اول اردیبهشت ماه آغاز می‌شود و معمولاً تا اواسط مهر ماه ادامه می‌یابد. حجم کل آب داده شده به تیمارها (با لحاظ کردن بارندگی موثر) در سال‌های اجرای پژوهش در جدول (۱۴) ارائه شده است. حجم آب

جدول ۱۴- حجم آب کاربردی در طول سال‌های پژوهش (مترمکعب در هکتار)

Table 14. Applied water volume (m³/ha)

سال (Year)		سطح آب آبیاری (درصد) Irrigation level (%)
۱۴۰۰	۱۳۹۹	
۳۰۷۵	۲۸۸۰	۵۰
۴۶۱۲	۴۳۲۰	۷۵
۶۱۵۰	۵۷۶۰	۱۰۰

بهره‌وری فیزیکی آب

درصد به‌ترتیب برابر با ۱۱/۴ و ۱۴/۳ کیلوگرم به‌ازای هر جدول (۱۵) بهره‌وری فیزیکی آب را در تیمارهای مترمکعب آب به‌دست آمد. تیمار آبیاری قطره‌ای سطحی با مختلف نشان می‌دهد. حداکثر بهره‌وری آب از تیمارهای ۱۰۰ درصد نیاز آبی، کمترین مقدار بهره‌وری فیزیکی آب (۸) روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سطوح آب ۵۰ و ۷۵ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب) را به‌دست داده است.

جدول ۱۵- بهره‌وری آب در تیمارها

Table 15. Water productivity under different treatments

ردیف Row	تیمار Treatment	حجم آب (مترمکعب در هکتار) Water volume (m ³ /ha)		عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield (kg/ha)		بهره‌وری (کیلوگرم بر مترمکعب) Productivity (kg/m ³)	
		۱۴۰۱	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۰
۱	آبیاری قطره‌ای سطحی و آب ۵۰ درصد	۳۱۷۵	۳۰۷۵	۳۶۶۰۰	۳۳۵۵۰	۱۱/۹	۱۰/۶
۲	آبیاری قطره‌ای سطحی و آب ۷۵ درصد	۴۷۶۳	۴۶۱۲	۴۲۹۰۰	۳۹۰۵۰	۹/۳	۸/۲
۳	آبیاری قطره‌ای سطحی و آب ۱۰۰ درصد	۶۳۵۰	۶۱۵۰	۴۹۵۰۰	۴۷۳۰۰	۸	۷/۵
۴	آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آب ۵۰ درصد	۳۱۷۵	۳۰۷۵	۴۴۰۰۰	۴۲۹۰۰	۱۴/۳	۱۳/۵
۵	آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آب ۷۵ درصد	۴۷۶۳	۴۶۱۲	۵۲۷۰۰	۵۰۵۰۰	۱۱/۴	۱۰/۶
۶	آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آب ۱۰۰ درصد	۶۳۵۰	۶۱۵۰	۵۴۰۰۰	۵۲۱۵۰	۸/۸	۸/۲

بهره‌وری اقتصادی آب

و محاسبات سود حاصل از مصرف ۲۵ درصد آب بیشتر (سطح آب ۷۵ درصد نسبت به ۵۰ درصد)، درآمد سطح آب ۷۵ درصد تفاوت قابل توجهی نسبت به سطح آب ۵۰ درصد دارد (قیمت هر کیلو انگور ۲۰ هزار تومان بوده و هزینه‌های تولید منظور نشده زیرا تأثیری در مقایسه تیمارها نداشت). به عبارت دیگر، اختلاف سود عملکرد سطح آب ۷۵ درصد نسبت به آب ۵۰ درصد ۱۵۲ میلیون تومان بیشتر و از سطح آب ۱۰۰ درصد، ۳۳ میلیون تومان کمتر است. با توجه به ارزش آب و ملاحظات اقتصادی، سطح آب ۷۵ درصد نیاز آبی (با پذیرش ۳۳ میلیون تومان سود کمتر و صرفه جویی ۲۵ درصدی آب مصرفی) اقتصادی‌تر از دو سطح دیگر است.

جدول ۱۶- بهره‌وری اقتصادی آب در تیمارهای پژوهشی در سال ۱۴۰۰

Table 16. Economic water productivity under the research treatments in 2021

تیمار Treatment	حجم آب (مترمکعب در هکتار) Water volume (m ³ /ha)	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield (kg/ha)	بهره‌وری (کیلوگرم بر مترمکعب) Productivity (kg/m ³)	درآمد ناخالص (میلیارد تومان در هکتار) Gross revenue (billion Tomans/ha)
قطره‌ای زیرسطحی و آب ۵۰ درصد	۳۱۷۵	۴۲۹۰۰	۱۴/۳	۰/۸۵۸
قطره‌ای زیرسطحی و آب ۷۵ درصد	۴۷۶۳	۵۰۵۰۰	۱۱/۴	۱/۰۱۰
قطره‌ای زیرسطحی و آب ۱۰۰ درصد	۶۳۵۰	۵۲۱۵۰	۸/۸	۱/۰۴۳

نتیجه‌گیری

داخل لوله‌های فرعی و قطره‌چکان‌ها وجود دارد. از طرف دیگر، این روش آبیاری با توجه به ماهیت خود و نحوه توزیع آب می‌تواند توزیع نمک را در پروفیل خاک تحت تاثیر قرار دهد. این وضعیت مخصوصا در مناطقی که آب و خاک شور دارند، بیشتر خود را نشان می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد پژوهش‌هایی در خصوص توزیع نمک‌ها و تجمع آن در لایه‌های مختلف خاک و نیز وضعیت ریشه‌ها و حرکت آن‌ها به سمت لوله‌های فرعی برای یک دوره نسبتا طولانی‌تر (۵ ساله) صورت پذیرد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسنده این مقاله اعلام می‌دارد که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارد.

منابع مالی

نویسنده هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده مقاله نسخه منتشر شده آنرا خوانده و با آن موافقت کرده است.

تقدیر و تشکر

نویسنده مقاله از همکاری‌های معاونت پژوهشی و سایر همکاران مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود) و سازمان جهاد کشاورزی استان سمنان تقدیر و تشکر می‌نماید.

روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در باغ‌ها یکی از روش‌های کارآمد و مناسب در مناطق گرم و خشک است. این روش به دلیل کاهش تلفات تبخیر در مناطق خشک، کارایی بسیار بالایی دارد. از طرف دیگر، تداخل‌ناشتن این روش با تردد ماشین‌ها و ادوات کشاورزی، مانع از آسیب دیدگی لوله‌ها می‌شود. این عامل بر توانایی و قابلیت این روش آبیاری می‌افزاید. اما از مهم‌ترین مشکلات آن، گرفتگی خروجی‌هاست که از عملکرد ضعیف سیستم فیلتراسیون ناشی می‌شود. احتمال نفوذ ریشه به داخل و اطراف لوله‌های فرعی نیز در این روش وجود دارد. براساس منابع علمی موجود، این موانع با تزریق اسید و علف‌کش به صورت دوره‌ای و منظم به داخل سامانه آبیاری قابل کنترل است. اما لازم است در خصوص نوع اسید، غلظت و نحوه تزریق اسید و علف‌کش‌ها به سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پژوهش‌هایی بشود. علاوه بر آن، به دلیل مقدور نبودن بررسی دراز مدت پایداری سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خصوص انگور و احتمال تجمع ریشه‌ها و خطر گرفتگی خروجی‌ها و نیز تجمع نمک‌ها در دراز مدت در منطقه ریشه، توصیه می‌شود که پژوهش‌های تکمیلی صورت پذیرد.

در این پژوهش بیشترین بهره‌وری فیزیکی آب از روش آبیاری زیرسطحی با مصرف آب ۵۰ درصد به دست آمد. در بهره‌وری اقتصادی و محاسبات سود ناشی از مصرف ۲۵ درصد آب بیشتر (سطح آب ۷۵ نسبت به ۵۰ درصد)، درآمد سطح آب ۷۵ تفاوت قابل توجهی نسبت به سطح آب ۵۰ درصد داشت. بنابراین تیمار آبیاری زیرسطحی با سطح آبی ۷۵ درصد نیاز آبی قابل توصیه است.

در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای درختانی که سیستم ریشه‌ای قوی دارند، خطر حرکت و نفوذ ریشه‌ها به

مراجع

- Alizadeh, A. (2006). *Pressurized Irrigation Systems Design* (Vol. 2, 368 pp.). Imam Reza University Press. (In Persian)
- Anon. (2018). *Agricultural Statistics (Horticultural Products) for the 2017–2018 Agricultural Year*. Ministry of Agriculture-Jahad, Deputy of Planning and Economics, Information and Communication Technology Center. (In Persian)
- Anon. (2019). *Komash Analytical Report for the 2017–2018 Agricultural Year*. Semnan Province Meteorological Organization. (In Persian)
- Chaves MM., Zarrouk O., Francisco R., et al. (2010). Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany*, 105(5), 661-676.
- Daller, D., Stamm, P., & Roth, H.-R. (2013). Economic evaluation of subsurface drip irrigation systems as a function of lateral spacing. *Agricultural Water Management*, 128, pp.1–10.
- DeGaris, K. A., Walker, R. R., Loveys, B. R., & Tyerman, S. D. (2015). Impact of deficit irrigation strategies in a saline environment on Shiraz yield, physiology, water use and tissue ion concentration. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21(3), pp.468–478.
- Dolati Baneh, H., & Noorjoo, A. (2011). Effect of deficit irrigation on quantitative and quality traits of fruit and water productivity of three grapevine cultivars. *Seed and Plant Production Journal*, 27(3), pp.435–450.
- Finger, S., Lamm, F. R., & Stone, L. R. (2015). Subsurface drip irrigation management effects on crop yield and water productivity. *Applied Engineering in Agriculture*, 31(2), pp.189–201.
- Ghassab, M. R., Abdshahi, A., & Marzban, A. (2020). Determination of physical and economic agricultural water productivity (Case Study: Dezful County). *Journal of Agricultural Economics Research*, 12(3), pp.42–79. (In Persian)
- Jolini, M. (2006). Investigating the effect of drip irrigation method and different water levels on yield and water use efficiency in grapes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(28), pp.69–78. (In Persian)
- Kozłowski TT., & Pallardy SG. (2002). Acclimation and Adaptive Responses of Woody Plants to Environmental Stresses. *The Botanical Review*, 68(2), 270-334.
- Lamm, F. R., Ayars, J. E., & Nakayama, F. S. (2007). *Microirrigation for crop production – Design, operation, and management* (pp.618). Elsevier, Amsterdam.
- Lamm, F. R. (2016). Subsurface drip irrigation and possibilities in alfalfa. In *Proceedings of the California Alfalfa and Forage Symposium* (November, Reno, Nevada).
- Lebon E., Pellegrino A., Tardieu F., & Lecoœur J. (2006). Branch development controls leaf area dynamics in grapevine (*Vitis vinifera*) growing in drying soil. *Annals of Botany*, 98(1), 175-185.
- Matthews, M. A., & Nuzzo, V. (2007). Berry size and yield paradigms on grapes and wines. *BioScience*, 57(1), pp.41–52.
- Pisciotta, A. (2017). Subsurface drip irrigation in vineyards: effects on yield, grape quality and water productivity. *Scientia Horticulturae*, 225, pp.85–92.
- Sheren A. Abed El-Hamied, A., Zaen El-Deen, E. M. A., & El-Hagarey, M. E. (2017). Management of irrigation systems to improve productivity and quality of grapevine under desert conditions. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)*, 10, pp.77–90.
- Shatkovskiy, A., Melnychuk, F., Retman, M., Gulenko, O., & Kaliley, V. (2022). Weed development in sunflower and chickpea crops depending on micro-irrigation methods. *Land Reclamation and Water Management*, (1), 97-103.
- Tafazoli, A., Hekmati, J., & Firoozeh, P. (1996). *Grape* (343 pp.). Shiraz University Press.
- Van Halsema, G. E., & Vincent, L. (2012). Efficiency and productivity terms for water management: A matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management*, 108, pp.9–15.

Research Article**Impact of Water Consumption Management on Yield and Yield Components of Wheat****Nader Naderi^{1✉}**

Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Semnan (Shahrood), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrood, Iran.

(✉ **Corresponding Author:** Naderi7367@yahoo.com)

ARTICLE INFO

Received: 26 March 2026

Revised: 30 April 2026

Accepted: 14 May 2026

Available Online: 30 May 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Naderi, N., (2026). Impact of water consumption management on yield and yield components of wheat. V.26, No.100, P: 49-64
[https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.372463.1645](https://doi.org/10.22092/idser.2026.372463.1645)

Extend Abstract**Introduction**

In order to increase water productivity, the use of modern methods of pressurized irrigation is one of the effective solutions. These methods can play an important role in conserving water resources by reducing water losses, increasing irrigation efficiency and allowing more accurate management of time and amount of applied water. Sprinkler irrigation is one of the suitable options for wheat fields in semi - arid regions. The Rain flat sprinkler irrigation system as a relatively new sprinkler method, requires less work pressure than conventional sprinkler methods and therefore energy consumption decreases. In addition, installation and operation of this system is simpler and faster and can be an appropriate option for irrigation management in water deficit conditions. Therefore, due to the limited water resources in Semnan province and the importance of wheat production and also for introducing the Rain flat sprinkler irrigation system, this study was conducted to investigate the effect of irrigation interval and different levels of water supply on yield and yield components of wheat.

Methodology

The aim of this study was to investigate the effect of irrigation interval and different water levels on yield and yield components of wheat in Rain flat sprinkler irrigation method for two years. The experiment was conducted as a split plot in randomized complete block design with three replications in Shahrud Agricultural Research and Education Center. Three irrigation intervals (4, 5 and 6 days) were allocated to main plots and three irrigation levels (100, 80 and 60 %) in sub plots. Sprinkler irrigation pipes were placed at 4-meter intervals between planting rows. The length of planting rows was 8m. By using the Penman - Monteith method, water requirement of the plant was determined. At the end of growing season, wheat was harvested and yield was measured in each plot. Yield components including plant height, thousand grain weight and grains number per spike were determined for all treatments. Harvest index was calculated from the division of seed weight to total weight of vegetative and reproductive organs.

Results and Discussion

Results showed that the highest grain yield was achieved in irrigation interval of 4 and 5 days whereas irrigation interval of 6 days decreased yield. The effects of water supply, the treatments of 100 % and 80 % water supply had the highest yield and the 60 % water supply had the lowest yield. Therefore, it is possible to reduce water supply from 100 to 80 percent without significant reduction of yield, but decreases from 80 to 60 percent decrease grain yield by 39.17%. The interaction of interval and water supply showed that 4 days with 100 % water, 4 days with 80 % water and 5 days with 100 % water had the highest yield. The

lowest yield belonged to 6 days with 60 % water, indicating a decrease of up to 60.35 % in adverse irrigation management. The highest plant height, grains number per spike and thousand grain weight was obtained in 4 days irrigation interval, but there was no significant difference between 4 and 5 days in grain yield and harvest index. Also, plant height, grains number per spike, thousand grain weight and harvest index were in the treatment 100 and 80 percent of water supply in the top group, while reducing water supply to 60 percent reduced the yield and its components significantly. The results show that in Rain flat sprinkler irrigation system, with appropriate management of irrigation interval and irrigation interval equal to 5 days and supplying 80 % water requirement, both yield and yield components can be maintained in desirable condition, while increasing irrigation interval or severe water reduction, both lead to significant decrease in yield and yield components.

Conclusions

The results of combined analysis showed that irrigation interval and its combined effect with water supply level had a significant effect on most of traits. The highest plant height, grains number per spike and thousand grain weight was recorded in 4 days irrigation interval, but there was no significant difference between 4 and 5 days in grain yield and harvest index. Also, plant height, grains number per spike, thousand grain weight, grain yield and harvest index were in 100% and 80% water supply in a statistical group, while reducing water supply to 60% reduced grain yield by 17.39%. Based on results, irrigation interval of 4 and 5 days with 80% water supply was the most suitable management to maintain wheat yield by reducing water use. The results of this study indicate that optimal water management in wheat cultivation can be achieved without yield reduction by reducing irrigation water by 20 percent and adopting a 5-day irrigation interval.

Keywords: Deficit irrigation, Harvest index, Irrigation interval, Plant height, Rain flat

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article

Author contribution

The Author have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgement

The author would like to thank and appreciate all participants in this study



© 2026, 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/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.372463.1645](https://doi.org/10.22092/idser.2026.372463.1645)

نوع مقاله: پژوهشی

اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم

نادر نادری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۸ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

چکیده

به منظور ارزیابی تأثیر مدیریت‌های کاهش مصرف آب آبیاری (دور و درصد آبیاری) بر ویژگی‌های عملکردی گندم، آزمایشی طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی سمنان (شاهرود) به‌اجرا در آمد. طرح آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده و در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در نظر گرفته شد. تیمارها شامل سه دور آبیاری (چهار، پنج و شش روز) در کرت‌های اصلی و سه سطح تأمین آب شامل آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و کم‌آبیاری (۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی) در کرت‌های فرعی بودند. تمامی مدیریت‌های به‌زرایی در تیمارها یکسان و آبیاری با سامانه بارانی تاشو اجرا شد. نتایج تجزیه مرکب نشان داد که دور آبیاری و اثر ترکیبی آن با سطح تأمین آب بر بیشتر صفات مورد بررسی اثر معنی‌دار دارد. بیشترین ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه در دور آبیاری چهار روز ثبت شد، اما در عملکرد دانه و شاخص برداشت تفاوت معنی‌داری بین دوره‌های چهار و پنج روز مشاهده نشد. صفات ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت در تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی در یک گروه آماری قرار گرفتند، در حالی که کاهش تأمین آب به ۶۰ درصد سبب کاهش ۱۷/۳۹ درصد در عملکرد دانه شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، تیمارهای دور آبیاری چهار و پنج روز همراه با ۸۰ درصد تأمین آب، مناسب‌ترین مدیریت برای حفظ عملکرد گندم با کاهش مصرف آب بودند. نتایج تحقیق نشان داد که اعمال ۸۰ درصد تأمین نیاز آبی همراه با دور آبیاری پنج روزه می‌تواند با حفظ عملکرد دانه در سطح آماری مشابه آبیاری کامل، گزینه‌ای مناسب برای مدیریت بهینه مصرف آب در کشت گندم باشد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع بوته، بارانی تاشو، دور آبیاری، شاخص برداشت، کم‌آبیاری

مقدمه

زیرزمینی سبب افت شدید سطح آب سفره‌ها شده و بسیاری از زمین‌های کشاورزی به دلیل کم‌آبی با محدودیت بهره‌برداری پایدار از این منابع ارزشمند امری ضروری است. بهره‌برداری‌های مکرر سال‌های اخیر موجب تشدید کمبود آب شده و اهمیت مدیریت بهینه مصرف آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی، را دوچندان کرده است. استان سمنان به دلیل پایین بودن میانگین بارندگی سالانه (حدود ۱۱۰ میلی‌متر) و توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارش‌ها، در زمره مناطق نیمه‌خشک کشور قرار دارد (Anonymous 2017). میانگین دمای سالانه این استان حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد و دامنه تغییرات دما از ۱۸- تا ۴۷ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. در دهه‌های اخیر برداشت بی‌رویه از منابع آب

زیرزمینی سبب افت شدید سطح آب سفره‌ها شده و بسیاری از زمین‌های کشاورزی به دلیل کم‌آبی با محدودیت بهره‌برداری مواجه شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد بیلان اکثر دشت‌های استان منفی است، به‌گونه‌ای که بسیاری از آن‌ها در وضعیت ممنوعه یا ممنوعه بحرانی قرار دارند (Anonymous 2017). در چنین شرایطی، صرفه جویی در مصرف آب در کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد. در استان سمنان برای تأمین نیاز آبی گیاهان، آبیاری مکرر ضروری است و حدود ۹۲ درصد آب مصرفی کشاورزی از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. در عین حال، استفاده گسترده از روش‌های آبیاری سطحی موجب کاهش راندمان مصرف آب می‌شود و بخش قابل توجهی از آب به‌صورت تلفات تبخیر،

^۱ استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شاهرود، ایران.
(نویسنده مسئول: Email: Naderi7367@yahoo.com)

کم‌آبیاری در مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود. آبیاری قطره‌ای تیپ اگرچه راندمان مصرف آب بالاتری دارد، اما به دلیل تراکم بالای کشت گندم و نیاز به استقرار دقیق و فاصله‌های کم خطوط تیپ، هزینه اولیه و نگهداری بیشتری نیز دارد. تیپ‌های رایج معمولاً تنها یک فصل زراعی قابل استفاده‌اند، در حالی‌که نوارهای آبیاری تاشو بیش از پنج سال دوام دارند و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از باقی‌ماندن نوارهای تیپ در مزرعه را نیز ندارند. ابراهیمی پاک و همکاران (Ebrahimipak et al., 2022) مقدار آب آبیاری برآورد شده برای گندم را با استفاده از سامانه نیاز آب و مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه مقایسه کردند و نشان دادند میانگین مقدار آب آبیاری گندم در روش اندازه‌گیری شده و سامانه نیاز آب به ترتیب برابر ۵۷۳۴/۶، ۵۹۷۰/۲ مترمکعب در هکتار است و میانگین عملکرد گندم در روش اندازه‌گیری مزرعه و سامانه نیاز آب به ترتیب برابر با ۵۲۱۶/۵ و ۴۹۵۰/۶ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری آب گندم در روش اندازه‌گیری مزرعه و سامانه نیاز آب به ترتیب برابر ۱ و ۰/۹ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب آب است. افشار (Afshar 2025) با مقایسه آرایش کاشت‌های مختلف گندم در آبیاری قطره‌ای نواری در خراسان رضوی نتیجه گرفت فاصله ۶۰ سانتی‌متر برای نوارها با آرایش کاشت منظم ردیف‌های گندم به فاصله ۱۵ سانتی‌متر بهترین آرایش است. نخجوانی و همکاران (Nakhjavani et al., 2024) با ارزیابی دو سامانه آبیاری سطحی و بارانی روی گندم در لرستان نشان دادند مدیریت زراعی، آبیاری و کوددهی بر تولید گندم تأثیرگذار است و سامانه آبیاری بارانی باعث افزایش عملکرد و کاهش آب مصرفی می‌شود و بهره‌وری آب را بهبود می‌بخشد. نیسی و همکاران (Neysi et al., 2026) تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی را بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد گندم بررسی کردند. در این مطالعه، بوته‌های گندم تحت سه سطح تنش خشکی، شامل ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد تنش خشکی در تمامی

نفوذ عمقی یا رواناب از دست می‌رود به گونه‌ای که تنها بخشی از آب مصرفی برای گیاه مفید خواهد بود (Naderi & Ghadami 2022). گندم مهم‌ترین محصول زراعی ایران محسوب می‌شود و سالانه حدود پنج تا شش میلیون هکتار از زمین‌های کشور به کشت این محصول اختصاص می‌یابد. بالابردن بهره‌وری آب در تولید این محصول استراتژیک، به‌ویژه در مناطق کم‌آب، از موضوع‌های اساسی بخش کشاورزی است (Mohtadi et al., 2017). در استان سمنان گندم با حدود ۲۲ هزار هکتار سطح زیر کشت، بیشترین سهم را در میان محصولات آبی دارد و سالانه حدود ۱۰۵ هزار تن گندم تولید می‌شود (Anonymous 2024). با این حال، مزارع گندم در اواخر دوره رشد اغلب با تنش خشکی مواجه می‌شوند که ناشی از کمبود منابع آب یا رقابت با دیگر محصولات آبی است. به‌منظور افزایش بهره‌وری آب، استفاده از روش‌های نوین آبیاری تحت فشار یکی از راهکارهای مؤثر مطرح شده است. این روش‌ها با کاهش تلفات آب، افزایش راندمان آبیاری و امکان مدیریت دقیق‌تر زمان و مقدار آب کاربردی، می‌توانند نقش مهمی در حفظ منابع آب داشته باشند (Naderi et al., 2018). در این میان، آبیاری بارانی یکی از گزینه‌های مناسب برای مزارع گندم در مناطق نیمه‌خشک است. سامانه آبیاری بارانی تاشو^۱ فناوری نسبتاً جدیدی است. این روش آبیاری، نسبت به روش‌های متداول بارانی، به فشار کاری کمتری نیاز دارد و در نتیجه مصرف انرژی در آن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نصب و بهره‌برداری از این سامانه ساده‌تر و سریع‌تر است و می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای مدیریت آبیاری در شرایط کم‌آبی باشد.

آبیاری بارانی با ایجاد شبکه انتقال و توزیع آب، امکان مدیریت دقیق زمان و مقدار آبیاری را فراهم می‌کند و نسبت به روش‌های سطحی، تلفات ناشی از رواناب و نفوذ عمقی را کاهش می‌دهد. این روش به دلیل قابلیت تنظیم دور و مقدار آبیاری متناسب با نیاز گیاه، گزینه‌ای مناسب برای مدیریت

¹ Rain Flat

تأمین آب در سامانه‌های کم‌فشار و نوینی مانند سامانه بارانی تاشو کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به محدودیت منابع آب در استان سمنان و اهمیت تولید گندم، در این پژوهش تلاش شده است تا با بررسی هم‌زمان این دو عامل مدیریتی در شرایط واقعی مزرعه، پاسخ عملکردی گندم و اجزای آن در سامانه نوین با مصرف انرژی کمتر ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف بررسی اثر دور آبیاری و مقادیر مختلف آب بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (رقم پیشگام) با سامانه بارانی تاشو به مدت دو سال زراعی اجرا گردید. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار به اجرا در آمد. سه دور آبیاری (چهار، پنج و شش روز) در کرت‌های اصلی و سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. معیار انتخاب دوره‌های آبیاری در این پژوهش بر پایه شرایط اقلیمی منطقه، ویژگی‌های خاک، نیاز آبی گیاه و مدیریت رایج کشاورزان تعیین شد. در اقلیم خشک و نیمه‌خشک سمنان با تبخیر و تعرق بالا و محدودیت منابع آب، لازم بود دوره‌های آبیاری در بازه‌ای انتخاب شوند که هم از تنش شدید رطوبتی جلوگیری کند و هم امکان کم‌آبیاری مدیریت شده را فراهم سازد. بر این اساس، بازه چهار تا شش روز به عنوان دامنه‌ای عملیاتی و قابل اجرا در شرایط مزرعه‌ای انتخاب شد. با توجه به بافت لومی شنی خاک و ظرفیت پایین نگهداری آب، این بازه به گونه‌ای در نظر گرفته شد که از بروز تنش شدید برای گیاه جلوگیری شود. لوله‌های آبیاری بارانی با فاصله‌های چهار متر در بین ردیف‌های کشت جاسازی و ردیف‌های کشت به طول هشت متر در نظر گرفته شدند.

مشخصات جغرافیایی و اقلیمی محل اجرای آزمایش

این آزمایش در زمین‌های ایستگاه بسطام واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود) اجرا گردید. ایستگاه بسطام در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول ۵۴ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و ارتفاع از سطح دریا برابر ۱۳۶۶ متر قرار گرفته است. بر اساس آمار بلند مدت هواشناسی میانگین حداقل، متوسط و حداکثر

سطوح تأثیر معنی‌داری بر صفات مورفولوژیکی و عملکرد گندم داشته است. در شرایط تنش خشکی شدید (۳۰ درصد ظرفیت زراعی)، ویژگی‌های مرتبط با برگ و وزن صد دانه مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد گندم بودند، در حالی که در شرایط تنش متوسط، صفات رویشی و زایشی تأثیر بیشتری بر عملکرد داشته‌اند.

کیانی و کلاته عربی (Kiani & kalateharabi 2009) در بررسی توابع تولید آب گندم تحت آبیاری بارانی نشان دادند بیشترین عملکرد مربوط به آبیاری کامل و کمترین عملکرد مربوط به کم‌آبیاری شدید است، اما راهبرد کم‌آبیاری در شرایط محدودیت منابع آب می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب باشد. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مقدار و زمان آبیاری تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد محصولات زراعی دارد و کاهش بیش از حد آب مصرفی می‌تواند موجب افت عملکرد شود (Kamkar et al., 2011). مطالعات در ایران نشان می‌دهد بهره‌وری آب گندم در سامانه‌های آبیاری بارانی معمولاً بیشتر است تا در آبیاری سطحی (Gholami et al., 2016). نتایج پژوهش‌ها همچنین نشان می‌دهد که آبیاری بارانی در ترکیب با خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند عملکرد اقتصادی و بهره‌وری انرژی را در مناطق نیمه‌خشک افزایش دهد (Naseri 2018). بررسی‌ها در چین نشان داده است اعمال تنش آبی باعث کاهش شاخص سطح برگ، زیست‌توده (بیوماس)، وزن هزار دانه و عملکرد گندم می‌شود، در حالی که آبیاری بیش از نیاز نیز می‌تواند اثر منفی بر عملکرد داشته باشد (Liu et al., 2011). دامنه بهره‌وری آب گندم در مطالعات مختلف بین ۰/۳ تا ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده است که نشان‌دهنده تأثیر شدید شرایط محیطی و مدیریت آبیاری بر این شاخص است (Azizi Zehan et al., 2014). در مورد سامانه بارانی تاشو، مطالعات نشان داده‌اند که این روش می‌تواند عملکرد و بهره‌وری آب را نسبت به برخی روش‌های سنتی افزایش دهد و از نظر اقتصادی نیز باصرفه باشد (Roodbarani et al., 2021). در اغلب مطالعات پیشین، تمرکز عمدتاً بر سطوح کم‌آبیاری بوده است و اثر متقابل دور آبیاری و میزان

دمای سالانه به ترتیب ۸/۷، ۱۴/۷ و ۲۰/۶ درجه سلسیوس است و از نظر پهنه‌بندی اقلیمی جزو اقلیم‌های خشک و نیمه خشک سرد طبقه‌بندی می‌شود (IMO 2022).

کیفیت آب مورد استفاده

برای آبیاری مزرعه از آب چاه‌های ایستگاه استفاده شده است. بر اساس دستورالعمل فائو، کیفیت آب مورد استفاده نسبتاً خوب است و برای استفاده در کشاورزی محدودیت جزئی دارد (جدول ۱).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

پس از نمونه‌برداری از خاک مزرعه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در آزمایشگاه خاک و آب مرکز تعیین شد. بافت خاک، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، pH، هدایت الکتریکی (EC) و عناصر شیمیایی خاک شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در آزمایشگاه مشخص شد (جدول ۲).

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی آب آبیاری
Table 1- Chemical analysis of irrigation water

SAR	آنیون‌ها (meq/lit) Anions		کاتیون‌ها (meq/lit) Cations				pH	هدایت الکتریکی EC (mmhos/cm)
	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$	SO_4^{2-}	Cl^-	K^+	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	Na^+		
۴/۳۲	۳/۱۴	۰/۹۶	۵/۶۴	-	۴/۷۶	۶/۶۷	۸/۳	۰/۹۸۵

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه
Table 2- Physical and chemical properties of the farm soil

pH	Ece (ds/m)	PWP (%) (cm ³ /cm ³)	FC (%) (cm ³ /cm ³)	بافت خاک Soil texture	مشخصات بافت Texture characteristics			عمق ریشه Soil depth (cm)
					Silt	Clay	Sand	
۷/۹۰	۳/۹۹	۱۴/۳۸	۳۰/۱۴	لومی شنی Loam sandy	۳۲	۱۵	۵۳	۰-۳۰
۸/۰۸	۱/۶۸	۱۴/۲۲	۲۹/۳۹	لومی شنی Loam sandy	۳۳	۱۳	۵۵	۳۰-۶۰

حجم آب آبیاری

با استفاده از روش پنمن مانیتس و داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی موجود در مرکز و با احتساب راندمان آبیاری ۸۰ درصد، نیاز آبی کامل گیاه (۱۰۰ درصد نیاز آبی) تعیین شد (Zarei et al., 2018). نیاز آبی برای تیمارهای با سطوح آبی ۸۰ و ۶۰ درصد نیز محاسبه و با استفاده از کنتور حجمی، حجم آب مورد نیاز به مزرعه داده شد.

برداشت و اندازه‌گیری پارامترها

در پایان فصل زراعی، گندم برداشت شد و پس از جدا کردن دانه‌ها و توزین آنها، عملکرد گندم در هر کرت اندازه‌گیری گردید. اجزای عملکرد گندم شامل ارتفاع بوته، وزن هزار دانه و تعداد دانه در سنبله نیز برای کلیه تیمارها تعیین

عملیات کاشت و داشت

پس از آماده‌سازی زمین، عملیات کاشت آغاز شد. در فصل زراعی نیز عملیات داشت شامل کوددهی و مبارزه با علف‌های هرز بطور یکسان برای همه تیمارها صورت گرفت. براساس آزمون خاک کودهای شیمیایی شامل فسفات آمونیوم، سولفات پتاسیم و اوره به زمین اضافه شد. در زمان کاشت کودهای فسفاته و پتاسیم به صورت پایه و کود اوره در پاییز و بهار به صورت سرک استفاده شد. پیش از کاشت، از قارچ کش کاربوکسین تیرام (ویتاواکس) به نسبت دو در هزار برای ضدعفونی کردن بذر آزمایشی استفاده شد. برای مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ، کل مزرعه با استفاده از علف‌کش توفوردی به میزان یک لیتر در هکتار (در ۴۰۰ لیتر آب) سمپاشی شد.

می‌شود، به‌طوری‌که افزایش فاصله آبیاری به شش روز موجب کاهش ۳۰/۴۸ درصد در عملکرد دانه گردید. بافت خاک مزرعه از نوع لومی شنی بوده است. این نوع خاک دارای ظرفیت نگهداری آب متوسط تا نسبتاً پایین و هدایت هیدرولیکی نسبتاً بالاست، بنابراین توانایی ذخیره‌سازی آب آبیاری برای دوره‌های طولانی محدود است. در نتیجه، هرچند در تیمار دور آبیاری شش روزه عمق آب کاربردی در هر نوبت آبیاری برای جبران تبخیر و تعرق افزایش یافته است، اما به دلیل ظرفیت محدود نگهداری آب در خاک لومی شنی، بخش قابل توجهی از رطوبت به‌سرعت از ناحیه ریشه خارج شده یا در فاصله بین آبیاری‌ها کاهش یافته است. این موضوع باعث ایجاد تنش رطوبتی در برخی مراحل حساس رشد گندم شده است. بنابراین، کاهش مشاهده‌شده عملکرد در تیمار شش روزه (حدود ۳۰ درصد نسبت به تیمارهای کوتاه‌تر) از نظر فیزیولوژیکی قابل توجیه است و با ویژگی‌های خاک منطقه و پاسخ شناخته‌شده گندم به تنش آبی دوره‌ای همخوانی دارد. نتایج تحقیقات صنوبر و همکاران (Senobar *et al.*, 2011) نیز نشان می‌دهد در بررسی دوره‌های آبیاری ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ روز در در آبیاری سطحی ژنوتیپ‌های مختلف گندم، دوره‌های ۸ و ۱۰ روز بیشترین عملکرد دانه را تولید کردند که مؤید اهمیت مدیریت مناسب فاصله آبیاری است. اثر تأمین نیاز آبیاری بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). تیمارهای تأمین ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی به‌ترتیب با میانگین عملکرد ۵۵۲۰/۷ و ۵۲۱۸/۴ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری برتر قرار گرفتند، در حالی که تیمار ۶۰ درصد تأمین آب با عملکرد ۳۱۷۴/۳ کیلوگرم در هکتار کمترین مقدار را نشان داد (جدول ۴). بررسی صفات رشدی نشان داد تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد تأمین آب دارای بیشترین ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه بودند که با توجه به همبستگی مثبت این صفات با عملکرد دانه (Eidizadeh *et al.*, 2016)، افزایش آن‌ها منجر به بهبود عملکرد نهایی شد. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که کاهش تأمین آب از ۱۰۰ به ۸۰ درصد

شد. شاخص برداشت نیز از تقسیم وزن دانه به وزن کل اندام رویشی و زایشی محاسبه شد. نتایج با استفاده از نرم افزار SAS تجزیه و تحلیل آماری گردید و میانگین‌ها مقایسه شدند.

نتایج و بحث

عملکرد دانه گندم

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر سال بر عملکرد و دیگر صفات مورد بررسی معنی‌دار نیست و بنابراین تفاوت قابل توجهی بین دو سال زراعی از نظر شرایط مؤثر بر صفات اندازه‌گیری‌شده مشاهده نشد. این موضوع احتمالاً ناشی از مشابه بودن شرایط اقلیمی دو سال آزمایش (از نظر بارش، دما و تبخیر و تعرق) و نیز یکسان بودن عملیات مدیریتی شامل آبیاری، کوددهی و مدیریت مزرعه بوده است؛ در نتیجه، تغییرپذیری بین‌سالی کاهش یافته‌است و نتایج عمدتاً تحت تأثیر تیمارهای آبیاری قرار گرفته‌اند. عملکرد دانه گندم در سطح احتمال یک درصد به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر دور آبیاری قرار گرفت (جدول ۳). هدف از انتخاب دوره‌های آبیاری چهار، پنج و شش روز شبیه‌سازی شرایط مدیریتی رایج و قابل اجرا در منطقه و ایجاد دامنه‌ای عملی از مدیریت آبیاری بود. بر این اساس، دور چهار روز به‌عنوان شرایط مطلوب، دور پنج روز به‌عنوان حالت میانی و دور شش روز به‌عنوان شرایط کم‌آبی ملایم تا متوسط در نظر گرفته شد. مقایسه میانگین‌ها بیانگر آن است که تیمارهای دور آبیاری چهار و پنج روزه به‌ترتیب با عملکرد ۵۴۱۰/۶ و ۵۰۱۶/۱ کیلوگرم در هکتار در بالاترین گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴). بررسی صفات زراعی مرتبط نیز نشان داد این تیمارها بیشترین ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه را دارد که نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش عملکرد نهایی داشته‌اند (جدول ۴). در مقابل، تیمار دور آبیاری شش روز با میانگین عملکرد ۳۴۸۶/۸ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری پایین‌تری قرار گرفت. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که دور آبیاری پنج روزه بیشترین فاصله زمانی قابل قبول بین آبیاری‌ها بدون افت محسوس عملکرد محسوب

نیاز آبی بدون ایجاد کاهش معنی‌دار در عملکرد امکان‌پذیر است، اما کاهش بیشتر تا سطح ۶۰ درصد سبب افت ۳۹/۱۷ درصد در عملکرد می‌شود. در همین راستا، کیخایی و گنجی‌خرمدل (Keykhaei & Ganji Khorramdel 2017) بر عملکرد دانه گندم معنی‌دار است (جدول ۳). دامنه کاربرد آبیاری معادل ۷۵ درصد نیاز آبی را در سامانه آبیاری نواری برای گندم مناسب گزارش کردند. حاجی‌آبادی و همکاران (Hajiabadi et al., 2021) می‌گویند کاهش تأمین آب به کمتر از ۷۵ درصد نیاز آبی موجب افت معنی‌دار عملکرد می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر متقابل دور آبیاری و درصد تأمین آب در سطح احتمال یک درصد تغییرات عملکرد در تیمارهای مختلف از ۲۵۱۸/۴ تا ۶۳۵۲/۴ کیلوگرم در هکتار متغیر است و میانگین کلی ۴۶۳۷/۸ کیلوگرم در هکتار به دست آمد.

جدول ۳ - تجزیه واریانس مرکب عملکرد و اجزای عملکرد

Table 3 - Combined analysis of variance for grain yield and yield components

میانگین مربعات Average of squares					درجه آزادی Degree of freedom	منبع تغییر Source of variation
شاخص برداشت Harvest index	وزن هزار دانه Thousand grain weight (gr)	تعداد دانه در سنبله Grains number per spike	ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد دانه Yield (kg/ha)		
۲۴/۰۲ ^{ns}	۳۸۹/۶۷ ^{ns}	۱۸۶۰/۵۰ ^{ns}	۳۳۱/۶۳ ^{ns}	۲۱۵۱۷۰/۰ ^{ns}	۱	سال (Y)
۲۲/۷۱	۰/۰۸	۲۲/۵۱	۶/۴۷	۳۰۲۲۵۵/۲۹	۴	تکرار × سال (Y×R)
۴۸۵/۴۶ ^{***}	۱۳۵/۰۹ ^{***}	۴۰۴/۶۸ ^{***}	۱۴۶/۳۵ ^{***}	۱۸۵۸۵۹۴۸/۷۴ ^{***}	۲	روش آبیاری (A)
۰/۱۱ ^{ns}	۹/۷۳ ^{ns}	۲۱/۲۹ ^{ns}	۱۵/۷۴ ^{ns}	۲۸/۱۹ ^{ns}	۲	سال × روش آبیاری (Y×A)
۹/۲۷ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۹/۳۰ ^{ns}	۱/۳۷ ^{ns}	۱۲۷۳۴/۵۹ ^{ns}	۸	روش آبیاری × سال × تکرار (A×Y×R)
۱۵۹۱/۹۵ ^{ns}	۳۴۲/۵۹ ^{ns}	۱۲۶۶/۳۵ ^{ns}	۳۰۰/۹۵ ^{ns}	۲۹۳۲۵۱۹۹/۳۴ ^{ns}	۲	سطح آبیاری (B)
۲۸/۷۷ ^{**}	۶/۹۳ ^{**}	۱۳/۷۶ ^{**}	۵/۱۹ ^{**}	۸۵۸۶۹۲/۴۸ ^{**}	۴	روش آبیاری × سطح آبیاری (A×B)
۰/۰۷ ^{**}	۴۴/۴۳ ^{**}	۷/۸۸ ^{**}	۲۶/۸۸ ^{**}	۱۲۲/۶۶ ^{**}	۲	سال × سطح آبیاری (Y×B)
۰/۲۴ ^{ns}	۵/۶۳ ^{ns}	۱/۲۹ ^{ns}	۱/۱۸ ^{ns}	۱۸۴/۷۴ ^{ns}	۴	سال × روش آبیاری × سطح آبیاری (Y×A×B)
۹/۲۹	۰/۱۶	۸/۳۷	۱/۶۱	۱۸۵۶۱/۴	۲۴	خطا

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده نبود تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

جدول ۴ - مقایسه میانگین عملکرد و اجزای عملکرد در تیمارهای مختلف

Table 4- Comparison of the average grain yield and yield components

شاخص برداشت Harvest index	وزن هزار دانه Thousand grain weight (gr)	تعداد دانه در سنبله Grains number per spike	ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد دانه Yield (kg/ha)	تیمارها Treatments
دور آبیاری:					
۴۳/۸ ^a	۳۷/۵ ^a	۴۴ ^a	۷۴/۸ ^a	۵۴۱۰/۶ ^a	۴
۴۱/۳ ^a	۳۵/۲ ^b	۴۰ ^b	۷۰/۷ ^b	۵۰۱۶/۱ ^a	۵
۳۵/۲ ^b	۳۱/۹ ^c	۳۵ ^c	۶۷/۰ ^c	۳۴۸۶/۸ ^b	۶
درصد آب:					
۴۶/۰ ^a	۳۷/۸ ^a	۴۵ ^a	۷۴/۹ ^a	۵۵۲۰/۷ ^a	۱۰۰
۴۳/۲ ^a	۳۶/۴ ^a	۴۲ ^a	۷۲/۳ ^a	۵۲۱۸/۴ ^a	۸۰
۳۱/۱ ^b	۳۰/۴ ^b	۳۱ ^b	۶۵/۲ ^b	۳۱۷۴/۳ ^b	۶۰

** در هر ستون حروف متفاوت روی اعداد به معنای وجود اختلاف معنا دار است

این دامنه نوسان بیانگر آن است که در صورت مدیریت تیمارهای دور آبیاری چهار روز همراه با ۱۰۰ درصد تأمین نامناسب آبیاری، امکان کاهش عملکرد تا حدود ۶۰/۳۵ نیاز آبی، دور چهار روز با ۸۰ درصد تأمین آب و دور ۵پنج درصد وجود دارد (جدول ۵). بیشترین عملکرد دانه در روز با ۱۰۰ درصد تأمین آب دیده می‌شود که به ترتیب مقادیر

مدیریت بهینه آب باشد. این توصیه به عنوان راهکار مدیریتی منطقه‌ای قابل تفسیر است، نه یک قاعده عمومی و ثابت برای تمامی شرایط زراعی. میزان کاهش عملکرد در تیمار ۶۰ درصد نسبت به ۸۰ درصد تأمین آب در دوره‌های چهار، پنج و شش روزه به ترتیب ۳۹/۹۴، ۴۱/۵۸ و ۳۴/۳۷ درصد برآورد شد. روند تغییرات عملکرد دانه در تیمارهای مختلف با الگوی تغییرات ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه همسوست که بیانگر نقش تعیین‌کننده این صفات در شکل‌گیری عملکرد نهایی است.

به‌طور کلی، افزایش فاصله بین آبیاری‌ها همراه با کاهش میزان تأمین آب موجب تشدید تنش خشکی و در نتیجه افت شاخص‌های رشدی و عملکردی شده است. نتایج این پژوهش با یافته‌های بهداد و همکاران (Behdad et al., 2022) همخوانی دارد؛ این محققان در یک فرائتحلیل ملی گزارش کردند که تنش خشکی اثر منفی و معنی‌داری بر عملکرد دانه گندم در ایران دارد.

۶۳۵۲/۴، ۶۱۷۲/۵ و ۶۱۰۵/۵ کیلوگرم در هکتار را تولید کردند و در گروه آماری برتر قرار گرفتند.

در مقابل، کمترین عملکرد مربوط به تیمار دور شش روز با ۶۰ درصد تأمین نیاز آبی است که با ۲۵۱۸/۴ کیلوگرم در هکتار در پایین‌ترین گروه آماری قرار دارد. سایر ترکیب‌های تیماری در سطوح میانی طبقه‌بندی شدند (جدول ۵)، بر اساس نتایج به‌دست آمده، در یک دور آبیاری ثابت می‌توان میزان آب مصرفی را تا سطح ۸۰ درصد نیاز آبی کاهش داد بی‌آنکه افت محسوسی در عملکرد دانه مشاهده شود؛ اما کاهش بیشتر آب آبیاری تا ۶۰ درصد نیاز، افت شدید عملکرد را به دنبال دارد. به‌طور کلی در مدیریت مزرعه دور آبیاری می‌تواند تابع شرایط اقلیمی، بافت خاک و نوع گیاه باشد. بر این اساس، نتیجه‌گیری مطالعه نیز به شرایط همین آزمایش محدود است و نشان می‌دهد که در محدوده مورد بررسی، ترکیب دور آبیاری پنج روزه با تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی می‌تواند بدون افت معنی‌دار عملکرد، گزینه‌ای مناسب برای

جدول ۵ - حجم آب مصرفی و مقایسه میانگین اثر متقابل دور و سطح آبیاری بر عملکرد دانه

Table 5- Water consumption and comparison of the average interaction effect of irrigation interval and water supply level on grain yield (kg/ha)

سطح آبیاری Water level (%)						دور آبیاری Irrigation interval (day)
60		80		100		
حجم آب مصرفی Water consumption (m ³ /ha)	عملکرد Yield (kg/ha)	حجم آب مصرفی Water consumption (m ³ /ha)	عملکرد Yield (kg/ha)	حجم آب مصرفی Water consumption (m ³ /ha)	عملکرد Yield (kg/ha)	
۳۴۶۱/۰	۳۷۰۶/۸ ^d	۴۶۲۰/۰	۶۱۷۲/۵ ^a	۵۷۷۴/۰	۶۳۵۲/۴ ^a	۴
۳۴۶۱/۰	۳۲۹۷/۷ ^c	۴۶۲۰/۰	۵۶۴۵/۰ ^b	۵۷۷۴/۰	۶۱۰۵/۵ ^a	۵
۳۴۶۱/۰	۲۵۱۸/۴ ^f	۴۶۲۰/۰	۳۸۳۷/۷ ^{cd}	۵۷۷۴/۰	۴۱۰۴/۳ ^c	۶

در هر ستون حروف متفاوت روی اعداد به معنای وجود اختلاف معنا دار است

۷۰/۷ و ۶۷/۰ سانتی‌متر است (جدول ۴). درصد کاهش ارتفاع بوته در تیمارهای دور آبیاری پنج و شش روز آبیاری، نسبت به تیمار دور آبیاری چهار روز، به ترتیب برابر ۵/۴۸ و ۱۰/۴۲ درصد است. بنابراین افزایش فاصله بین آبیاری‌ها سبب کاهش ارتفاع بوته شده است. برای هر روز افزایش دور آبیاری کاهش تقریباً پنج درصد گزارش شد که ناشی از

ارتفاع بوته تأثیر سال بر ارتفاع بوته گندم معنادار نیست، اما دوره‌های آبیاری، درصد تأمین آب و اثر متقابل آنها در سطح احتمال یک درصد مؤثرند (جدول ۳). بیشترین ارتفاع بوته (۷۴/۸ سانتی‌متر) مربوط به دور آبیاری چهار روزه است در حالی که میانگین ارتفاع در دوره‌های پنج و شش روز به ترتیب

افزایش تنش خشکی و کاهش رشد سلولی گیاه است (Ehdaie et al., 1994). اثر درصد تأمین آب نشان داد که تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد آبیاری بیشترین ارتفاع (۷۴/۹ و ۷۲/۳ سانتی‌متر) را دارند و کاهش تأمین آب تا ۲۰ درصد تأثیر معناداری ندارد. کمترین ارتفاع (۶۵/۲ سانتی‌متر) در تیمار ۶۰ درصد تأمین آب مشاهده شد و کاهش ارتفاع نسبت به آبیاری کامل و ۸۰ درصد به ترتیب ۱۲/۹۵ و ۹/۸۲ درصد است (Shahbaz Panahi et al., Hajiabadi et al., 2021). Keykhaei & Ganji Khorramdel 2017. 2012.

بررسی اثر متقابل دور آبیاری و درصد تأمین آب نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته (۷۹/۸ سانتی‌متر) در دور چهار روزه با تأمین آب ۱۰۰ درصد دیده می‌شود در حالی که کوتاه‌ترین بوته (۶۲/۶ سانتی‌متر) مربوط به دور شش روزه با ۶۰ درصد تأمین آب است و کاهش ۲۱/۵۵ درصد را نشان می‌دهد (جدول ۶). کاهش تأمین آب در دورهای مختلف با افزایش فاصله بین آبیاری‌ها، منجر به کاهش ارتفاع بوته شده است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که رژیم‌های آبیاری به طور معناداری بر ارتفاع گندم تأثیر می‌گذارند (Thompson & Chase 1992 Eidizadeh et al., 2016).

جدول ۶ - مقایسه میانگین اثر متقابل دور و سطح آبیاری بر ارتفاع بوته گندم (سانتی‌متر)

Table 6- Comparison of the average interaction effect of irrigation interval and water supply level on plant height (cm)

سطح آبیاری Water level (%)		دور آبیاری Irrigation interval (day)	
100	80	100	
۶۷/۸ ^f	۷۷/۰ ^b	۷۹/۸ ^a	۴
۶۵/۵ ^g	۷۱/۸ ^d	۷۴/۹ ^c	۵
۶۲/۶ ^h	۶۸/۱ ^f	۷۰/۱ ^e	۶

در هر ستون حروف متفاوت روی اعداد به معنای وجود اختلاف معنا دار است

درصد تأمین آب نیز به طور معناداری (یک درصد) بر تعداد دانه مؤثر است (جدول ۳). تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد آبیاری با ۴۵ و ۴۲ دانه در سنبله بیشترین تعداد را داشتند و تفاوت آماری معناداری نداشتند، در حالی که تیمار ۶۰ درصد آبیاری با ۳۱ دانه کمترین مقدار را نشان داده است (جدول ۴). کاهش ۲۰ درصد تأمین آب نسبت به آبیاری کامل از لحاظ آماری اثر معنی‌داری نداشته است، اما کاهش به ۶۰ درصد موجب کاهش چشمگیر تعداد دانه شده است (Hajiabadi et al., 2021 & Ebrahimi et al., 2018). این اثر ناشی از کاهش رشد ریشه، کاهش هدایت آب، محدود شدن فتوسنتز و کاهش گلچه‌های بارور است (Martinez et al., 2007). بررسی اثر متقابل دور و درصد تأمین آب نشان می‌دهد که بیشترین تعداد دانه در سنبله مربوط به تیمارهای دور چهار روزه با ۱۰۰ و ۸۰ درصد تأمین آب و دور پنج روزه با ۱۰۰ درصد آب است (به ترتیب ۴۹، ۴۷ و ۴۶ دانه) و کمترین تعداد دانه مربوط به دورهای پنج و شش روزه با ۶۰

تعداد دانه در سنبله

تجزیه واریانس نشان داد که تعداد دانه در سنبله به طور معنادار (یک درصد) تحت تأثیر دورهای آبیاری قرار دارد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمارها در سه گروه آماری قرار دارند. بیشترین تعداد دانه (۴۴ عدد) مربوط به دور آبیاری چهار روزه و کمترین تعداد دانه (۳۵ عدد) مربوط به دور شش روزه است (جدول ۴). کاهش تعداد دانه در دورهای پنج و شش روز نسبت به دور چهار روز به ترتیب ۹/۱۵ و ۱۹/۹ درصد و کاهش دور شش روز نسبت به ۵ روز ۱۱/۸۳ درصد است؛ به طور متوسط هر روز افزایش فاصله آبیاری منجر به کاهش سه دانه در سنبله (معادل ۶/۱۸ درصد) می‌شود. افزایش فاصله آبیاری محدودیت رطوبتی خاک را شدت می‌بخشد و طول دور تنش خشکی را افزایش می‌دهد که در مراحل ساقه رفتن و پیش از لقاح سبب کاهش تعداد دانه و افزایش سنبله‌های عقیم می‌شود (Dolferus, et al., 2013 & Karimi Dastgerdi, et al., 2021).

درصد تأمین آب است (۳۱ و ۲۸ دانه) (جدول ۷). روند آب منجر به کاهش تعداد دانه می‌شود، که در تیمار ۶۰ تغییرات نشان می‌دهد در یک دور ثابت، کاهش درصد تأمین درصد آب شدت بیشتری دارد.

جدول ۷ - مقایسه میانگین اثر متقابل دور و سطح آبیاری بر تعداد دانه در سنبله

Table 7- Comparison of the average interaction effect of irrigation interval and water supply level on seed number per spike

سطح آبیاری Water level (%)			دور آبیاری Irrigation interval (day)
100	80	100	
۳۵ ^c	۴۷ ^a	۴۹ ^a	۴
۳۱ ^d	۴۲ ^b	۴۶ ^a	۵
۲۸ ^d	۳۶ ^c	۴۱ ^b	۶

در هر ستون حروف متفاوت روی اعداد به معنای وجود اختلاف معنا دار است

خاک در فاصله بین دو آبیاری به تدریج کاهش می‌یابد و در روزهای پایانی دوره، تنش موقت رطوبتی برای گیاه ایجاد می‌شود. این وضعیت لزوماً ناشی از کمبود کل آب مصرفی نیست، بلکه به نوسان بیشتر پتانسیل آب خاک مربوط می‌شود که می‌تواند فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، به دلیل بافت لومی شنی خاک و ظرفیت پایین نگهداری آب، بخشی از آب آبیاری سریع‌تر از ناحیه ریشه خارج می‌شود؛ در نتیجه در دوره‌های آبیاری طولانی‌تر، احتمال بروز تنش کوتاه‌مدت آبی افزایش می‌یابد و می‌تواند بر فتوسنتز، انتقال مواد فتوسنتزی و در نهایت وزن دانه اثرگذار باشد (Ahmadi Mondal et al., 1978 & Backer 2001).

درصد تأمین آب نیز به طور معنی‌دار (یک درصد) بر وزن هزار دانه تأثیر داشته است (جدول ۳). تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد تأمین آب با وزن هزار دانه ۳۷/۸ و ۳۶/۴ گرم بیشترین مقدار را داشتند و تفاوت آماری معنی‌داری نداشتند، هم‌ارزی آماری بین تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد تأمین آب از نظر وزن هزار دانه، نشان‌دهنده این موضوع است که گندم در شرایط این آزمایش دارای تحمل نسبی به کم‌آبی ملایم بوده است. این نتیجه را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که در سطح ۸۰ درصد تأمین نیاز آبی، اگرچه مقدار آب ورودی کاهش یافته است، اما این کاهش به حدی نبوده که منجر به ایجاد تنش شدید در مراحل حساس رشد (به‌ویژه گلدهی و پر شدن

افزایش فاصله آبیاری و کاهش تأمین آب تنش خشکی مستمر ایجاد می‌کند. این تنش در مرحله تقسیم میوز باعث افزایش سنبله‌های عقیم و کاهش سنبله‌های بارور می‌شود. در مرحله گرده‌افشانی، تنش خشکی باعث آسیب به غشای سلولی و افزایش سقط دانه گرده می‌شود (Mohammadi et al., 2006؛ Saneoka et al., 2004). کاهش رطوبت ریشه سبب فعال شدن هورمون آبسزیک اسید می‌شود و بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز را به دنبال دارد که در نهایت تعداد گلچه‌های بارور کاهش می‌یابد (Li et al., 2010).

وزن هزار دانه

وزن هزار دانه تحت تأثیر دوره‌های آبیاری در سطح احتمال یک درصد قرار گرفته است (جدول ۳). بیشترین مقدار این صفت مربوط به دور چهار روزه با میانگین ۳۷/۵ گرم است در حالی که دوره‌های پنج و شش روز به ترتیب با میانگین ۳۵/۵ و ۳۱/۹ گرم در گروه‌های آماری دیگر قرار دارند (جدول ۴). کاهش وزن هزار دانه در دور پنج روز نسبت به دور چهار روز ۲/۳ گرم (۶/۱۳ درصد) و در دور شش روز نسبت به دور پنج روز ۳/۳ گرم (۹/۳۷ درصد) است و به عبارتی هر روز افزایش فاصله آبیاری به طور متوسط ۱/۸۶ گرم (۴/۹۷ درصد) وزن دانه کاهش می‌یابد. اگرچه عمق آب آبیاری در هر نوبت بر اساس نیاز آبی گیاه تنظیم شد، اما تأمین آب در سامانه آبیاری به‌صورت دوره‌ای است. بنابراین در دوره‌های آبیاری طولانی‌تر، به‌ویژه تیمار شش‌روزه، رطوبت

دانه) شود. در حالی که تیمار ۶۰ درصد تأمین آب با میانگین گرم کمترین مقدار را نشان داده است (جدول ۴). کاهش درصد تأمین آب باعث کاهش سطح برگ، کاهش فتوسنتز و کوتاه شدن دوره پر شدن دانه می‌شود که کاهش وزن دانه را تشدید می‌کند (Hajiabadi et al., 2021 & Keykhaei & Ganji Khorramdel 2017). اثر متقابل دور و درصد تأمین آب نیز در سطح یک درصد بسیار معنی‌دار است (جدول ۳). میانگین وزن هزار دانه در کل تیمارها ۳۴/۸۷ گرم و در محدوده ۲۸/۴ تا ۴۰/۶ گرم است. بیشترین وزن مربوط به دور چهار روزه با ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی (۴۰/۶ و ۳۹/۸ گرم) و کمترین وزن مربوط به دور شش روزه با ۶۰ درصد نیاز آبی (۲۸/۴ گرم) است (جدول ۸). کاهش درصد تأمین آب تا ۸۰ درصد در یک دور ثابت اثر زیادی بر وزن نداشته است، اما کاهش به ۶۰ درصد موجب کاهش چشمگیر وزن شده است. کاهش وزن هزار دانه در تیمار ۸۰ درصد نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد در دوره‌های چهار، پنج و شش روز به ترتیب ۰/۸، ۱/۹ و ۱/۴ گرم (۱/۹۷، ۴/۹۴ و ۴/۰۶ درصد) و در تیمار ۶۰ درصد به ترتیب ۸/۶، ۷/۶ و ۶ گرم (۲۱/۱۸، ۱۷/۷۹ و ۱۷/۴۴ درصد) است. افزایش دور آبیاری و کاهش درصد تأمین آب شدت و مدت تنش خشکی را افزایش می‌دهد که موجب کاهش آماس سلولی و کاهش رشد برگ‌ها می‌شود. کاهش رشد سلول منجر به محدود شدن اندازه اندام و کاهش سطح برگ و در نتیجه کاهش تولید مواد فتوسنتزی می‌شود. وزن دانه تحت تأثیر مدت و سرعت پر شدن دانه قرار دارد و تنش خشکی از طریق تسریع پیری برگ و کاهش دوره پر شدن دانه باعث کاهش وزن می‌گردد (Hajiabadi et al., 2021 & Ahmadi & Backer 2001 & Senobar et al., 2011 & Royo et al., 2004).

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل دور و سطح آبیاری بر وزن هزار دانه (گرم)

Table 8- Comparison of the average interaction effect of irrigation interval and water supply level on thousand grain weight (gr)

سطح آبیاری Water level (%)			دور آبیاری Irrigation interval (day)
100	80	100	
۳۲/۰ ^e	۳۹/۸ ^a	۴۰/۶ ^a	۴
۳۰/۸ ^f	۳۶/۵ ^c	۳۸/۴ ^b	۵
۲۸/۴ ^g	۳۳/۰ ^e	۳۴/۴ ^d	۶

**در هر ستون حروف متفاوت روی اعداد به معنای وجود اختلاف معنا دار است

شاخص برداشت با ۳۵/۲ درصد مشاهده می‌شود (جدول ۴). کاهش شاخص برداشت با افزایش دور آبیاری ناشی از شدت و تداوم تنش خشکی است (Ebrahimi et al., & Senobar et al., 2011). بیشترین شاخص برداشت مربوط به دوره‌های چهار و پنج روزه با ۴۳/۸ و ۴۱/۳ درصد بود و کمترین مقدار در دور ۶ روزه

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل دور و سطح آبیاری بر شاخص برداشت

Table 9- Comparison of the average interaction effect of irrigation interval and water supply level on harvest index

سطح آبیاری Water level (%)			دور آبیاری Irrigation interval (day)
100	80	100	
۳۳/۰ ^{ef}	۴۸/۵ ^{ab}	۴۹/۹ ^a	۴
۳۲/۳ ^f	۴۴/۳ ^{bc}	۴۷/۴ ^{ab}	۵
۲۸/۱ ^f	۳۶/۸ ^{de}	۴۰/۸ ^{cd}	۶

**در هر ستون حروف متفاوت روی اعداد به معنای وجود اختلاف معنا دار است

است که نشان‌دهنده اثر منفی همزمان افزایش فاصله آبیاری و کاهش شدید آب مصرفی بر رشد و عملکرد گیاه است. نتایج اثر متقابل تیمارها نشان داد که ترکیب دور آبیاری کوتاه‌تر با سطوح مناسب تأمین آب، شرایط مطلوب‌تری برای رشد و تولید گندم فراهم می‌کند. همچنین مشخص شد که کاهش تأمین آب از ۱۰۰ به ۸۰ درصد نیاز آبی، افت عملکرد قابل توجهی ایجاد نمی‌کند، در حالی که کاهش بیشتر آب آبیاری تا ۶۰ درصد، سبب افت شدید عملکرد می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که اعمال کم‌آبیاری ملایم می‌تواند بدون کاهش محسوس عملکرد، در صرفه‌جویی مصرف آب مؤثر باشد. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که در سامانه بارانی تاشو، استفاده از دور آبیاری پنج روزه همراه با تأمین حدود ۸۰ درصد نیاز آبی، ضمن کاهش مصرف آب، قادر است عملکرد دانه و اجزای عملکرد را در سطح قابل قبول حفظ کند. بنابراین، این تیمار را می‌توان به‌عنوان راهکاری مناسب برای مدیریت بهینه مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب در شرایط محدودیت منابع آبی پیشنهاد کرد. با این حال، این نتایج محدود به شرایط این آزمایش است و تعمیم آن به سایر مناطق به خصوص با اقلیم و بافت خاک متفاوت نیازمند مطالعات تکمیلی است. تفاوت بین دوره‌های آبیاری چهار، پنج و شش‌روزه صرفاً ناشی از اختلاف زمانی یک تا دو روزه نیست، بلکه به تغییر در الگوی تأمین رطوبت و شدت تنش دوره‌ای خاک مربوط می‌شود. در خاک لومی شنی منطقه، با افزایش فاصله آبیاری، رطوبت قابل دسترس گیاه در روزهای پایانی دوره کاهش می‌یابد و نوسان‌های پتانسیل آب خاک بیشتر می‌شود. این شرایط، به‌ویژه در مراحل حساس رشد گندم مانند گلدهی و پر شدن دانه، می‌تواند فرآیندهایی مانند فتوسنتز، انتقال مواد فتوسنتزی و تشکیل دانه را تحت تأثیر قرار دهد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسنده این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

سطوح تأمین آب ۱۰۰ و ۸۰ درصد بیشترین شاخص برداشت (۴۶/۰ و ۴۳/۲ درصد) را داشته‌اند و تیمار ۶۰ درصد کمترین مقدار (۳۱/۳ درصد) را نشان داده است. کاهش شدید شاخص برداشت در تیمار ۶۰ درصد ناشی از کاهش تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و عملکرد دانه است. اثر متقابل دور و درصد تأمین آب نیز معنی‌دار است و بیشترین شاخص برداشت مربوط به دور چهار روز با ۱۰۰ و ۸۰ درصد و دور پنج روز با ۱۰۰ درصد نیاز آبی است در حالی که کمترین شاخص برداشت به دور شش روز با ۶۰ درصد نیاز آبی تعلق دارد (جدول ۹). نتایج این پژوهش در شرایط آزمایش نشان داد که افزایش فاصله آبیاری منجر به کاهش شاخص برداشت می‌شود. با این حال، در محدوده شرایط مورد بررسی، کاهش سطح تأمین آب از ۱۰۰ به ۸۰ درصد در یک دور آبیاری ثابت، تفاوت آماری معنی‌داری در شاخص برداشت ایجاد نکرد (Karimi Dastgerdi, et al., 2021). بنابراین می‌توان استنباط کرد که در شرایط اقلیمی و مدیریتی این آزمایش، امکان کاهش نسبی آب آبیاری بدون تغییر معنی‌دار در شاخص برداشت وجود داشته است؛ هرچند تعمیم این نتیجه به سایر شرایط نیازمند بررسی‌های تکمیلی در محیط‌های مختلف است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت دور آبیاری و سطح تأمین آب تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد گندم دارد. افزایش فاصله آبیاری و کاهش میزان آب مصرفی، به‌ویژه در سطح ۶۰ درصد نیاز آبی، موجب کاهش معنی‌دار عملکرد دانه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و سایر اجزای عملکرد شده که بیانگر حساسیت گندم به تنش آبی شدید است.

بیشترین عملکرد دانه در تیمارهای دور آبیاری چهار و پنج روزه همراه با تأمین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد نیاز آبی مشاهده شده است و این تیمارها از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشته‌اند. در مقابل، تیمار دور آبیاری شش روزه همراه با تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی کمترین عملکرد را داشته

منابع مالی

مشارکت نویسندگان

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند. نویسنده مقاله را خوانده و با انتشار آن موافقت کرده است.

دسترسی به داده‌ها

تقدیر و تشکر

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. نویسنده بر خود لازم می‌داند از تمامی شرکت‌کنندگان در مطالعه حاضر تشکر و قدردانی نماید.

منابع

- Afshar, H. (2025). Investigating the Yield and Water Productivity of Wheat in Different Planting Arrangements in Drip Irrigation (Case Study of Torbat Heydarieh). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 18(6): 963-970. (in Persian)
- Ahmadi, A., Backer, D.A. (2001). The effect of water stress on grain filling processes in wheat. *Journal of Agriculture Science*. 136: 257-269.
- Anonymous. (2017). Report on Semnan province agricultural water productivity, Semnan province agriculture-jahad organization. (in Persian)
- Anonymous. (2024). Statistics of the agricultural year 2022-2023. Volume one crops, Office of Statistics and information technology of the deputy minister of planning and economy of agriculture-jahad ministry. (in Persian)
- Azizi Zehan, A.A., Shahabifar, M. & Ebrahimipak, N.A. (2014). Evaluation of water use efficiency in Iran and the world. *The First National Soil and Water Management Conference in Wheat Production*. Soil and water research institute. Karaj, Iran. (in Persian)
- Behdad, M., Paknejad, F., Mahdavi Damghani, A., Vazan, S. & Moarrefi, M. (2022). Effects of drought stress on agronomical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analysis. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 15(1): 53-65. (in Persian)
- Dolferus, R., Powell, N., Ji, X., Ravash, R., Edlington, J., Oliver, S., Van Dongen, J. & Shiran, B. (2013). The physiology of reproductive-phenological stress tolerance in cereals. *Molecular Stress Physiology of Plants*. Springer India. 193-216.
- Ebrahimi, M., Dastan, S. & Yadi, R. (2018). Life cycle assessment of ecological footprint of water in wheat production under effect of irrigation regimes with application nano-silicon and nano-potassium chelate in Boushehr region. *Crop Production*. 11(4): 71-88. (in Persian)
- Ebrahimipak, N.A., Tafteh, A., Abbasi, F. & Baghani, J. (2022). Estimation of the Actual Amount of Wheat Irrigation Water Using the NIAZAB System and Comparing with the Farm Measurement. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 53(9): 2075-2092. (in Persian)
- Ehdaie, B., Nourmohamadi, GH. & Vala, A. (1994). Environmental sensitivity and correlation analysis of grain yield and its components in Khuzestan tetraploid genotypes under favorable and unfavorable environmental conditions. *The Scientific Journal of Agriculture*. 31(17): 15-17. (in Persian)
- Eidizadeh, Kh., Ebrahimpour, F. & Ebrahimi, M.A. (2016.). Effect of different irrigation regimes on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in Ramin climate. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 9(1): 29-36. (in Persian)
- Gholami, Z., Ebrahimi, H. & Noori, H. (2016). Investigation of irrigation water productivity in sprinkler and surface irrigation systems (Case study: Qazvin plain). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 39(3): 135-146. (in Persian)
- Hajjabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., Hammami, H. & Seyyedi, S.M. (2021). The effect of deficit irrigation and saline water treatments on growth and yield responses of Sirvan bread wheat cultivar. *Journal of Crop Production and Processing*. 11(2): 51-63. (in Persian)
- Iran Meteorological Organization (IMO). (2022). Long-term climatic statistics of Shahroud–Bastam synoptic station, Semnan Province. *Iran Meteorological Organization*. Tehran, Iran.

- Kamkar, B., Daneshmand, F., Ghooshchi, A.H. & SafahaniLangeroudi, A.R. (2011). The effect of irrigation regimes and nitrogen rates on some agronomic traits of canola under semiarid environment. *Agricultural Water Management*. 98: 1005-1012.
- Karimi Dastgerdi, Z., Mohammady, SH., Hoshmand, S. & Rabiei, M. (2021). Effects of water stress conditions on Yield, Harvest Index, and Sterility in Wheat Genotypes (*Triticum aestivum*). *Crop Production*. 4(3): 27-42. (in Persian)
- Keykhaei, F. & Ganji Khorramdel, N. (2017). Effect of Deficit Irrigation in Corrugation and Border Methods on Yield and Water Use Efficiency of Wheat cv. Hamoon. *Journal of Water Research in Agriculture*. 3(2): 139-149. (in Persian)
- Kiani, A.R. & kalateharabi, M. (2009). Assessment of water production function of wheat under supplementary irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 3(2): 112-122. (in Persian)
- Li, F., Wei, C., Zhang, F., Zhang, J., Nong, M. & Kang, S. (2010). Water use efficiency and physiological responses of maize under partial root-zone irrigation. *Agricultural Water Management*. 97:1156-1164.
- Liu, H., Yu, L., Luo, Y., Wang, X. & Huang, G. (2011). Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes. *Agricultural Water Management*. doi:10.1016/j. agwat.2010.09.006.
- Martinez, J.P., Silva, H., Ledent, J. F. & Pinto, M. (2007). Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy*. 26: 30- 38.
- Mohammadi, Sh., Sadatinejad, S.J. & Shiran B.B. (2006). Which one is responsible for apical sterility in wheat under water–stress conditions, ovule or pollen. *Pakistan Journal of Biological Science*. 15(9): 2808- 2811.
- Mohtadi, M., Albaji, M. & Broomand nasab, S. (2017). Investigation of Water Productivity of Wheat in Some Irrigation and Drainage Networks of Khuzestan. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 40(1): 239-248. (in Persian)
- Mondal, M.H., Burn, W.A., Brenner, M.L. (1978). Effects of sink removal on photosynthesis and senescence in leaves of soybean plants. *Plant Physiol*. 61:394-397.
- Naderi, N. & Ghadami Firouzabadi, A. (2022). Irrigation Efficiency, Water Requirement and Water Productivity in Surface Irrigation Method in Apricot and Grape Gardens. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 12(4): 125-140. (in Persian)
- Naderi, N., Ghadami Firouzabadi, A. & Froumadi, M. (2018). Technical Evaluation of Different Sprinkler Irrigation Systems in Field Condition. *Journal of Water Research in Agriculture*. 32(3): 429-439. (in Persian)
- Nakhjavanimoghaddam, M.M., Ashrafi, S. & Sepehri, S. (2024). Wheat Water Management Indicators in Both Surface and Sprinkler Irrigation Systems (Case Study Upstream of Karkheh Basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 18(2): 217-225. (in Persian)
- Nasseri, A. (2018). Energy use and economic analysis for wheat production by conservation tillage along with sprinkler irrigation. *Science of the total Environment*. 648 (15): 450-459.
- Neysi, B., Ranjbar, GH. & Najafi Zarini, H. (2026). The Evaluation of Yield and Some Morphological Traits in the Double Haploid Line of Bread Wheat Genotypes (*Triticum aestivum* L.) under Drought Stress Conditions. *Journal of Crop Breeding*. 18(1): 163-176. (in Persian)
- Roodbarani, J., Mozaffari, J. & Mohseni Movahed, S.A. (2021). Comparison of bean yield in Furrow, Tape and Rain flat irrigation systems. *Journal of Water and Soil Conservation*. 28(2): 195-210. (in Persian)
- Royo, C., Aparicio, N., Blanco, R., Villegas, D. (2004). Leaf and green area development of durum wheat genotypes grown under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*. 69: 231-233
- Saneoka, H., Moghaieb, R.E.A., Premachandra, G.S. & Fujita, K. (2004). Nitrogen nutrition and water stress effects on cell membrane stability and leaf water relations in *Agrostis palustris* Huds. *Environmental and Experimental Botany*. 52: 131–138.
- Senobar, A., Tabatabayi, S.A. & Dehghani, F. (2011). Effect of irrigation intervals on grain yield, yield components and harvest index of bread wheat cultivars in Yazd region. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 3(2): 95-104. (in Persian)

- Shahbaz Panahi, B., Paknejad, F., Habibi, D., Sadegh Shoaee, Nasri, M & Pazoki, A. (2012). Evaluation of irrigation regimes on yield and yield components in different cultivars of wheat. *Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding*. 8(2): 185-197. (in Persian)
- Thompson, J.A. & Chase, D.L. (1992). Effect of limited irrigation on growth and yield of semi dwarf wheat in Southern New South Wales. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 32, 725-730 (Field Crop Abstracts. 4721; 1994).
- Zarei, G., Salemi, H.R. & Sharifi, H.R. (2018). Optimal nitrogen fertilizer consumption under sprinkler irrigation system in different seeding density and wheat cultivars in Karaj. *Journal of water and soil resources conservation*. 8(1): 89-103. (in Persian)

Research Article

Water Productivity and of Water Deficit Tolerance Evaluation in High-Yielding Potato Cultivars and Genotypes in Ardabil Region

Keramat Akhavan Gigloo¹, Davoud Hassanpanah², Ahmad Mousavipoor Gorji³, Yuosef Jahani Jelodar⁴

¹Engineering Technical Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research Centre, AREEO, Ardabil, Iran

²Horticulture Crops Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research Centre, AREEO, Ardabil, Iran

³Vegetable Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, AREEO, Ardabil, Iran

⁴Horticulture Crops Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research Centre, AREEO, Ardabil, Iran

(✉ **Corresponding Author:** D.Hassanpanah@areeo.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 4 February 2026

Revised: 31 May 2026

Accepted: 3 June 2026

Available Online: 20 June 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Akhavan Gigloo, K., Hassanpanah, D., Mousavipoor Gorji, A., Jahani Jelodar, Y., (2026). Water productivity and of water deficit tolerance evaluation in high-yielding potato cultivars and genotypes in Ardabil region. V.26, No.101, P: 65-82

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.372199.1642>

Extended Abstract

Introduction

Water deficit is a common stress in potato production that leads to a decrease in tuber quality and yield. Potato plants are sensitive to water deficit stress, and sufficient water availability is essential to increase the quality and quantity of potato tubers, so the aim of this study was to achieve superior cultivars in terms of agronomic traits, marketability, adaptation to regional climatic conditions, and water deficit stress tolerance, and to determine water use efficiency in potato cultivars under low irrigation conditions in Ardabil region.

Methodology

In order to evaluate a number of superior potato cultivars, an experiment was conducted in 2024 and 2025 at the National Potato Research Station farm located in Ardabil. A total of 16 high-yielding genotypes and cultivars with different uses (Chips, French fries, Starch and Fresh consumption) were investigated in this experiment. The experiment was split-block based on a randomized complete block design with three replications. The horizontal plot included three irrigation levels (100, 80, and 60 percent of crop water requirement) and the vertical plot included 16 potato genotypes and cultivars. The tubers were planted in rows with 75 cm spacing and 25 cm plant spacing, and a planting depth of 10 cm. The irrigation method was drip (tape) and according to the schedule based on the desired treatments. The amount of water entering each experimental plot was measured with a water meter. The water deficit stress tolerance index (STi) was calculated in potato cultivars.

Results

The results of the analysis of variance of the studied traits showed that there were significant differences between the levels of water deficit stress, genotypes, the interaction of genotypes and year. Also, the interaction of water deficit stress and genotypes, and the three-way interaction of water deficit stress, genotypes and year in terms of the traits of tuber yield, tuber weight per plant, and water use

efficiency, and between the levels of water deficit stress, genotypes were significant. The highest tuber yield, tuber weight per plant, and water use efficiency under normal, mild stress, and severe stress conditions were found in genotypes 1043, Eurostarch, and Javid. The decrease in tuber yield under mild stress conditions was 12 percent and 28 percent under severe stress conditions.

Conclusion

Water deficit stress tolerant cultivars had fewer tubers but larger tuber sizes. Tuber dry matter percentage and water use efficiency increased in water deficit tolerant cultivars under mild and severe stress conditions. Based on the stress tolerance index (STi), G1043 genotype, Eurostar, and Javid cultivars were selected as tolerant genotypes to mild and severe stress .

Keywords: Potato, Water use efficiency, Water deficit, Quality traits

Conflict of Interest

The financial support of this research has been provided from the research credit of the Ardabil Agriculture Jihad Organization and we hereby thank the management of the Ardabil Agricultural Jihad Organization for their support.

Funding

The financial support of this research has been provided from the research credit of the Ardabil Agriculture Jihad Organization and we hereby thank the management of the Ardabil Agricultural Jihad Organization for their support.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation and data collection and by all authors (K.A.G.; D.H.; A.M.G.; Y.J.J.) and analysis were performed by D.H. The first draft of the manuscript was written by D.H. and all authors (K.A.G.; D.H.; A.M.G.; Y.J.J.) commented on previous versions of the manuscript. The final revisions have been applied by D.H. and Moreover, all authors have read and approved the final manuscript.

Acknowledgement

The authors are thankful to the management of Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Ardabil Agricultural Jihad Organization and Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. This research has been provided with the financial support the Ardabil Agriculture Jihad Organization.

نوع مقاله: پژوهشی

بهره‌وری آب و ارزیابی تحمل به کم‌آبی در ارقام و ژنوتیپ‌های پرمحصول سیب‌زمینی در منطقه اردبیل

کرامت اخوان گیگلو^۱، داود حسن پناه^۲، احمد موسی‌پور گرجی^۳، یوسف جهانی جلودار^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

چکیده

گیاه سیب‌زمینی حساس به تنش کم‌آبی است و در دسترس بودن آب کافی برای افزایش کیفیت و کمیت غده سیب‌زمینی ضروری خواهد بود. هدف از این تحقیق دستیابی به ارقام برتر از نظر صفات زراعی، بازاریابی، سازگاری با شرایط اقلیمی منطقه اردبیل و متحمل‌بودن به تنش کم‌آبی و تعیین کارایی مصرف آب در ارقام سیب‌زمینی در شرایط کم‌آبیاری در منطقه اردبیل است. به‌منظور ارزیابی تعدادی از ارقام برتر سیب‌زمینی، در سال ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ پژوهشی در مزرعه ایستگاه تحقیقات سیب‌زمینی کشور مستقر در شهرستان اردبیل به‌اجرا در آمد. شانزده ژنوتیپ و رقم پرمحصول و با مصارف مختلف (چیپس، خلال، نشاسته، سرخ کردن و تازه‌خوری) در این آزمایش بررسی شدند. آزمایش به‌صورت اسپلیت بلوک بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. کرت افقی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد آب قابل استفاده) و کرت عمودی شامل ۱۶ ژنوتیپ و رقم سیب‌زمینی بودند. روش آبیاری به‌صورت قطره‌ای (تیپ) و طبق برنامه براساس تیمارهای مورد نظر انتخاب شد. مقدار آب ورودی به هر کرت آزمایشی با کنتور آب اندازه‌گیری گردید. شاخص تحمل به تنش کم‌آبی (STi) در ارقام سیب‌زمینی محاسبه شد. نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه نشان داد بین سطوح تنش کم‌آبی، ژنوتیپ‌ها، اثرمتقابل ژنوتیپ‌ها و سال، اثرمتقابل تنش کم‌آبی و ژنوتیپ‌ها و اثرمتقابل سه جانبه تنش کم‌آبی، ژنوتیپ‌ها و سال از لحاظ صفات عملکرد غده، وزن غده در بوته و کارایی مصرف آب و بین سطوح تنش کم‌آبی، ژنوتیپ‌ها و اثرمتقابل تنش کم‌آبی و ژنوتیپ‌ها از لحاظ صفات تعداد غده در بوته، ارتفاع بوته، تعداد ساقه اصلی در بوته، درصد ماده خشک غده و شاخص سطح برگ اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. بیشترین عملکرد غده، وزن غده در بوته و کارایی مصرف آب در شرایط نرمال، تنش ملایم و تنش شدید مربوط به ژنوتیپ ۱۰۴۳ و ارقام یورواستارچ و جاوید بودند. میزان کاهش عملکرد غده در شرایط تنش ملایم ۱۵ درصد و در شرایط تنش شدید ۳۲ درصد مشاهده شد. ارقام متحمل به تنش کم‌آبی تعداد غده کمتر داشتند اما اندازه غده آنها بیشتر بود. درصد ماده خشک غده و کارایی مصرف آب در ارقام متحمل به کم‌آبی در شرایط تنش ملایم و شدید افزایش نشان داد. در زمینه تحمل به تنش (STi)، ژنوتیپ ۱۰۴۳ و ارقام یورواستارچ و جاوید به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش ملایم و شدید انتخاب شدند.

واژه‌های کلیدی: سیب‌زمینی، کارایی مصرف آب، کمبود آب، صفات کیفی

^۱ استادیار بخش تحقیقات فنی مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

^۲ استاد بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران. (Email: D.Hassanpanah@areeo.ac.ir) نویسنده مسئول

^۳ دانشیار بخش تحقیقات سبزی، صیفی و حبوبات آبی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

^۴ محقق بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

مقدمه

تنش کم‌آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا و ایران است. پاسخ گیاهان به تنش کم‌آبی بستگی به نوع، شدت و مدت تنش و نیز گونه گیاهی و مرحله وقوع تنش دارد (Farooq et al., 2009). بسیاری از صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی در سیب‌زمینی تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار می‌گیرند و می‌توانند به‌عنوان شاخصی برای اثر کم‌آبی استفاده شوند. در استان اردبیل، مقدار آب کاربردی زراعت سیب‌زمینی به شیوه آبیاری سطحی و در دوره رشد و نمو براساس عواملی مانند شرایط آب و هوایی منطقه، فصل کاشت و نوع خاک متغیر است و به‌طور متوسط ۱۲ هزار مترمکعب در هکتار برآورد شده است (Hassanpanah et al., 2008). کمبود و کاهش تدریجی منابع آب، از مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولیدات کشاورزی در منطقه اردبیل به‌ویژه زراعت سیب‌زمینی با سطحی حدود ۲۰ هزار هکتار به شمار می‌رود. یکی از راه-کارهای مهم به‌منظور پیشگیری از مشکلات گفته‌شده معرفی ارقام سیب‌زمینی با پتانسیل عملکرد بالا و متحمل به تنش کم‌آبی است.

براساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، سطح زیرکشت سیب‌زمینی کشور در سال ۱۴۰۳، حدود ۱۴۲ هزار هکتار با تولید حدود ۵/۲ میلیون تن و میانگین تولید حدود ۳۷ تن در هکتار است (Anonymous, 2025). در حال حاضر، سرانه مصرف سیب‌زمینی برای هر نفر ۵۶ کیلوگرم است که برنامه‌ریزی شده است که تا سال ۱۴۰۶ به ۶۳ کیلوگرم برسد (Kazemi et al., 2016).

سیب‌زمینی معمولاً گیاهی حساس به کم‌آبی شناخته می‌شود و به همین دلیل پژوهش‌های مختلف با استفاده از شاخص‌هایی مانند عملکرد غده، عملکرد بیولوژیکی و شاخص‌های فیزیولوژیکی تحمل ارقام مختلف سیب‌زمینی

را از این نظر بررسی می‌کنند (Mohammadkhani and Sharifi, 2016).

احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2014) در تحقیقی با عنوان کم‌آبیاری تنظیم شده و خشکی موضعی ریشه بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در دو رقم سیب‌زمینی نشان دادند که بین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در رژیم‌های آبیاری تفاوت معنی‌داری وجود دارد و با اعمال کم‌آبیاری بهره‌وری مصرف آب افزایش پیدا می‌کند. در بررسی تأثیر تحمل خشکی بر چهار رقم سیب‌زمینی گزارش شد کشت رقم‌هایی با دوره رشد طولانی نه تنها عملکرد را در شرایط خشکی افزایش نمی‌دهد، بلکه برتری بر رقم‌های زودرس ندارد (Baciu, 2013). در آزمایشی دیگر، کاهش عملکرد غده قابل فروش تحت شرایط تنش کم‌آبی تأیید شده است. افزایش طول دوره تنش آبی، تشکیل غده روی استولون را کاهش و ادامه کمبود آب در زمان پر شدن غده، اندازه و عملکرد قابل فروش را نیز کاهش می‌دهد. (استولون ساقه‌ای است که به طور افقی در زیرزمین رشد می‌کند و در انتهای آن غده تشکیل می‌شود) (Anithakumari, 2011). نتیجه آزمایشی دیگری نشان داد عملکرد غده قابل فروش ارقام سیب‌زمینی به‌طور معنی‌داری نسبت به آب قابل دسترس اختلاف دارد و بالاترین عملکرد سیب‌زمینی در رقم اسپونتا در زمان تأمین آب آبیاری کامل (۴۰/۹ تن در هکتار) به‌دست آمد. این رقم با عملکرد قابل فروش در شرایط تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی (۳۰/۳ تن در هکتار) اختلاف معنی‌داری نشان داد، کمترین مقدار این صفت را در تیمار بدون آبیاری (۱۴/۹ تن در هکتار) نشان داد (Cantore et al., 2014). سمائی و همکاران (Samaee et al., 2017) طی دو سال تحقیق روی ژنوتیپ‌های مختلف سیب‌زمینی گزارش کردند عملکرد بیولوژیکی، وزن تر غده قابل فروش، تبخیر و تعرق و مصرف آب در ژنوتیپ‌های تحت شرایط تنش نسبت به شاهد کاهش نشان

داده‌اند. شاخص سطح بهره‌وری آب بر مبنای عملکرد غده در واحد سطح (کیلوگرم در هکتار) به‌ازای مقدار آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) در اکثر ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش کم‌آبی کمتر بوده است. بالاترین سطح بهره‌وری آب در شرایط تنش در ژنوتیپ ۲-۳۹۷۰۶۹ مشاهده شد. این محققان گزارش کردند بین ژنوتیپ‌ها و سطوح آبیاری از لحاظ صفت تعداد غده‌های با قطر کوچک‌تر از ۳۵ میلی‌متر (غده غیرقابل فروش)، بین ۵۵ تا ۳۵ میلی‌متر (غده بذری) و بزرگ‌تر از ۵۵ میلی‌متر مانی و حناچی (Mani and Hannachi, 2015) اعلام کردند خشکی باعث کاهش رشد گیاه، دوره رشد و اندازه غده‌ها می‌شود. در آزمایشی گزارش شده است که مقدار ماده خشک غده سیب‌زمینی با افزایش تنش رطوبتی افزایش می‌یابد (Vasiter, 2014).

هدف از این تحقیق انتخاب ارقام پرمحصول و برتر از نظر صفات زراعی، کیفیت، بازارپسندی و متحمل به تنش کم‌آبی و تعیین کارایی مصرف آب در ارقام سیب‌زمینی در شرایط کم‌آبیاری در منطقه اردبیل است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور ارزیابی تعدادی از ارقام برتر سیب‌زمینی در سال ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ در مزرعه ایستگاه تحقیقات سیب‌زمینی کشور مستقر در شهرستان اردبیل اجرا شد. تاریخ کشت آزمایش، اوایل اردیبهشت و زمان برداشت اواخر مرداد تا اوایل شهریور بود. شانزده ژنوتیپ پرمحصول (شامل ارقام ملی و بین‌المللی تجاری) و با مصارف مختلف (چیپس، خلال، نشاسته، سرخ کردن، تازه‌خوری و چندمنظوره) در این آزمایش بررسی شدند (جدول ۱). آزمایش به‌صورت اسپلیت بلوک بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. کرت افقی شامل سه سطح آبیاری (۸۰، ۱۰۰، ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه) و کرت عمودی شامل ۱۶ ژنوتیپ سیب‌زمینی به شرح جدول ۱ بودند.

محل اجرای آزمایش (ایستگاه تحقیقات ملی سیب‌زمینی اردبیل) اقلیم معتدل و نیمه‌سردسیر دارد و آب و هوای آن تا حد کمی مرطوب است. ارتفاع محل آزمایش از سطح دریا ۱۳۹۲ متر و طول و عرض جغرافیایی آن به ترتیب ۴۸° ۲۰ و ۱۵° ۳۸ است. متوسط حداکثر و حداقل دمای سالانه و حداکثر دمای مطلق به ترتیب ۱۸/۱۵ و ۲۱/۵۸ درجه سانتی‌گراد است. این منطقه دارای زمستان‌های بسیار سرد و تابستان‌های معتدل است. میزان بارندگی در سال ۱۴۰۲ به مقدار ۳۸۶/۴ میلی‌متر (نسبت به میانگین بلندمدت، ۷/۳ درصد بیشتر) و در سال ۱۴۰۳، به مقدار ۲۲۶/۵ میلی‌متر (نسبت به میانگین بلندمدت در این بازه زمانی، ۱۸ درصد کمتر) بوده است (Anonymous, 2024). میزان بارندگی در دوره رشد سیب‌زمینی در سال ۱۴۰۴ در جدول ۴ ارائه شده است.

غده‌ها روی ردیف‌هایی به فواصل ۷۵ سانتی‌متر، فاصله بوته‌های ۲۵ سانتی‌متر و به عمق ۱۰ سانتی‌متر کشت شدند. برای نمونه‌برداری و ثبت صفات ردیف وسط استفاده شد. کلیه عملیات داشت شامل وجین علف‌های هرز، خاک‌دهی پای بوته و سمپاشی علیه آفت سوسک کلرادو و بیماری‌های مهم سیب‌زمینی به‌طور یکنواخت در کلیه کرت‌ها اعمال شد.

روش آبیاری به‌صورت قطره‌ای (تیپ) و طبق برنامه براساس تیمارهای موردنظر بوده است. مقدار آب ورودی به هر کرت آزمایشی با کنتور آب اندازه‌گیری شد (شکل ۱). برای مبارزه با علف‌های هرز بعد از کاشت و پیش از سبز شدن بوته‌های سیب‌زمینی از سم سنکور به مقدار ۷۵۰ گرم در هکتار و برای مبارزه با آفت سوسک کلرادو از سم کنفیدور به مقدار ۲۵۰ میلی‌لیتر در هکتار در یک نوبت استفاده شد.

خاک‌دهی پای بوته در دو مرحله اجرا شد، یکی بین ۱۵ تا ۲۰ روز بعد از سبز شدن بوته‌ها (وقتی ارتفاع بوته‌ها حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر است) و دیگری حدود ۲۵ تا ۳۰

روز بعد از سبز شدن (زمانی که بوته‌ها به ارتفاع ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر برسند و غده‌ها در حال شروع تشکیل هستند). (۵۰ درصد در زمان کاشت و ۵۰ درصد در مرحله کود اوره در سه مرحله (یک سوم در زمان کاشت، یک سوم در زمان وجین علف‌های هرز و یک سوم در زمان خاک‌دهی پای بوته)، کود فسفات آمونیوم در دو مرحله (۵۰ درصد در زمان کاشت پتاسیم در زمان کاشت براساس آزمایش خاک (جدول ۲) مصرف گردید.



شکل ۱- مزرعه آزمایش سیب‌زمینی با آبیاری قطره‌ای (تیپ)

Figure 1- Potato experimental farm with drip irrigation (tape)

برای تعیین حجم آب مصرفی در هر آبیاری، پیش از آبیاری از خاک کرت مورد نظر تا عمق توسعه ریشه نمونه‌برداری شد و درصد رطوبت خاک محل آزمایش در دوره رشد سیب زمینی با استفاده از دستگاه رطوبت سنج پرتابل PMS-714 اندازه گیری شد. حجم آب آبیاری با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) محاسبه و تیمارها بر اساس آن اعمال گردید.

شاخص بهره‌وری آب (WP):

$$WP = Y / (W_{irr} + P_e) \quad (4)$$

Y: عملکرد سیب‌زمینی (کیلوگرم در هکتار)؛ W_{irr}: مقدار کل آب آبیاری اعمال شده (مترمکعب در هکتار) و P_e: مجموع بارش‌های موثر در طول دوره رشد (مترمکعب در هکتار)

در دوره رشد و پس از برداشت صفات عملکرد غده، ارتفاع بوته، تعداد ساقه اصلی در بوته، تعداد و وزن غده در بوته و متوسط وزن غده، درصد ماده خشک غده، مقدار آب مصرفی و کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شد.

تجزیه واریانس با نرم‌افزار آماری SAS 9.1 صورت گرفت. میانگین صفات با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شد. سرانجام ارقام پرمحصول و متحمل به تنش کم‌آبی و مناسب برای مصارف مختلف برای منطقه اردبیل معرفی شدند.

از آبیاری از خاک کرت مورد نظر تا عمق توسعه ریشه نمونه‌برداری شد و درصد رطوبت خاک محل آزمایش در دوره رشد سیب زمینی با استفاده از دستگاه رطوبت سنج پرتابل PMS-714 اندازه گیری شد. حجم آب آبیاری با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) محاسبه و تیمارها بر اساس آن اعمال گردید.

$$H = p_b (\theta_{FC} - \theta_m) D \quad (1)$$

$$V = H \times A \quad (2)$$

H: ارتفاع آب داخل کرت، p_b: جرم مخصوص ظاهری خاک، θ_{FC}: رطوبت در حد ظرفیت مزرعه، θ_m: رطوبت جرمی کرت مورد نظر در زمان آبیاری، D: عمق توسعه ریشه، V: حجم آب آبیاری در کرت و A: مساحت کرت.

برای محاسبه بارش موثر و شاخص بهره‌وری آب، از معادله (۳) و معادله (۴) استفاده شد:

$$P_e = P \times \alpha \quad (3)$$

P: مجموع بارش‌های دوره (مترمکعب).

بهره‌وری آب و ارزیابی تحمل به کم‌آبی در ارقام و ژنوتیپ‌های پرمحصول سیب‌زمینی در منطقه اردبیل

جدول ۱- ژنوتیپ‌های سیب‌زمینی مورد بررسی و ویژگی‌های مهم آنها
Table 1- Studied potato genotypes and their important characteristics

ژنوتیپ (Genotypes)	شکل غده (Tuber Shape)	دوره خواب ^۲ (Dormancy)	زمان رسیدگی ^۲ (Maturity)	رنگ گوشت (Flesh Color)	رنگ پوست (Skin color)	عملکرد غده قابل فروش ^۱ (Marketable Tuber Yield)	انبارداری (Storage)	کیفیت فراوری (Processing quality)	مناسب برای (Suitable for)
لاریسا (Larissa)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط زودرس Medium Early	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	متوسط Medium	چیپس Chips
آگریا (Agria)	بیضی کشیده Elongated Oval	بالا High	متوسط دیررس Medium Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خوب Good	خلال Sliced
جلی (Jelly)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط دیررس Medium Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خوب Good	خلال Sliced
ساوالان (Savalan)	گرد بیضی Round Oval	متوسط Medium	متوسط دیررس Medium Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	متوسط Medium	عالی Excellent	چیپس Chips
آتوسا (Atosa)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط دیررس Medium Late	زرد روشن Light Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خوب Good	سرخ کردن Frying
رزا (Roza)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط دیررس Medium Late	زرد Yellow	قرمز Red	بالا High	خوب Good	متوسط Medium	خلال Sliced
ریلانا (Rilana)	بیضی Oval	خوب Good	متوسط زودرس Medium Early	زرد Yellow	زرد Yellow	خیلی بالا Very high	خوب Good	خوب Good	تازه خوری Fresh food
بابلون (Babylon)	بیضی کشیده Elongated Oval	خوب Good	متوسط زودرس Medium Early	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	طولانی Long	عالی Excellent	خلال Sliced
آرسنال (Arsenal)	گرد بیضی Round Oval	خوب Good	متوسط زودرس Medium Early	زرد روشن Light Yellow	زرد Yellow	خیلی بالا Very high	خوب Good	عالی Excellent	چیپس Chips
پرینس (Prince)	کشیده Elongated	عالی Excellent	متوسط دیررس Medium Late	سفید White	زرد Yellow	بالا High	طولانی Long	عالی Excellent	خلال Sliced
یورواستارچ (Eurostarch)	گرد بیضی Round Oval	عالی Excellent	متوسط دیررس Medium Late	سفید White	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	عالی Excellent	نشاسته Starch
سرگا (Serga) (به زبان مجارستانی)	گرد بیضی Round Oval	خوب Good	متوسط دیررس Medium Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خوب Good	سرخ کردن Frying
تکتا (Takta)	بیضی کشیده Elongated Oval	خوب Good	متوسط دیررس Medium Late	کرمی Cream	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خوب Good	تازه خوری Fresh food
جاوید (Javid)	گرد بیضی Round Oval	خوب Good	متوسط دیررس Medium Late	زرد Yellow	زرد Yellow	بالا High	خوب Good	خوب Good	تازه خوری Fresh food
ژنوتیپ ۱۰۴۳ (مجارستانی)	بیضی کشیده Elongated Oval	بالا High	متوسط زودرس Medium Early	زرد روشن Light Yellow	زرد Yellow	خیلی بالا Very high	طولانی Long	خوب Good	سرخ کردن Frying

۱- عملکرد غده قابل فروش: این شاخص نشان‌دهنده میزان محصولی است که از واحد سطح زمین قابل برداشت و قابل فروش است. به غده‌های با قطر بزرگ‌تر از ۳۵ میلی‌متر غده‌های قابل فروش و غده‌های با قطر کمتر از ۳۵ میلی‌متر غده‌های غیرقابل فروش گفته می‌شود.

۲- زمان رسیدگی: از زمان کاشت تا زمان برداشت محصول است. این زمان بسته به رقم سیب‌زمینی، شرایط آب و هوایی و منطقه کشت متفاوت است. زمان رسیدگی برای سیب‌زمینی‌های زودرس، متوسط دیررس و دیررس متفاوت است.

۳- دوره خواب: به مدت زمانی اشاره دارد که غده‌های سیب‌زمینی پس از برداشت برای انبارداری نیاز به استراحت دارند تا جوانه‌زنی آنها به تأخیر افتد. این دوره برای حفظ کیفیت و جلوگیری از کاهش وزن غده‌ها طی انبارداری اهمیت دارد. طول دوره خواب بسته به رقم سیب‌زمینی و شرایط انبارداری متفاوت است.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2- Chemical properties of the soil at the test site

ویژگی‌های شیمیایی (Chemical properties)	مقدار (Amount)	ویژگی‌های شیمیایی (Chemical properties)	مقدار (Amount)
شوری (ds/m) Salinity	1.36	فسفر قابل جذب (ppm) Absorbable Phosphorus	4.72
pH	7.4	پتاسیم قابل جذب (ppm) Absorbable Potassium	274
درصد اشباع (Saturation Percent)	42	روی (ppm) Zinc	6.88
درصد آهک (Lime Percent)	4.05	آهن (ppm) Iron	6.92
درصد کربن آلی (Organic Carbon Percent)	0.78	مس (ppm) Copper	7.4
درصد نیتروژن کل (Total Nitrogen Percent)	0.07	منگنز (ppm) Manganese	15.04
		-	-
بافت (Texture)	Clay loam	لومی رسی (Clay loam)	

نتایج و بحث

آبی گیاه بیشتر بود. در مقابل، در سال ۱۴۰۳ که بارش کمتر بود، گیاه به آبیاری تکمیلی بیشتری وابسته بود (جدول ۴).

نتایج میانگین مربعات مرکب براساس امیدریاضی صفات مورد مطالعه (جدول ۶) نشان می‌دهد بین سطوح تنش کم‌آبی، ژنوتیپ‌ها، اثرمتقابل ژنوتیپ‌ها و سال، اثرمتقابل تنش کم‌آبی و ژنوتیپ‌ها و اثرمتقابل سه جانبه تنش کم‌آبی، ژنوتیپ‌ها و سال از لحاظ صفات عملکرد غده، وزن غده در بوته و کارایی مصرف آب و بین سطوح تنش کم‌آبی، ژنوتیپ‌ها و اثرمتقابل تنش کم‌آبی و ژنوتیپ‌ها از لحاظ صفات تعداد غده در بوته، ارتفاع بوته، تعداد ساقه اصلی در بوته، درصد ماده خشک غده و شاخص سطح برگ اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد وجود دارد (جدول ۶).

براساس جدول ۳، حجم آب مصرفی در مرحله "شروع غده‌زایی تا برداشت غده‌ها" بیشترین مقدار است. این موضوع نشان می‌دهد سبب‌زمینی در این مرحله (غده‌زایی و پر شدن غده) بیشترین حساسیت و نیاز آبی را دارد و کم‌آبی در این مرحله بیشترین افت عملکرد را ایجاد می‌کند (جدول ۳). جدول ۴ میزان بارش موثر را در بازه زمانی رشد گیاه (اردیبهشت تا شهریور) نشان می‌دهد. اوج بارش‌ها در اردیبهشت و خرداد بود. این بارش‌ها همپوشانی با مراحل "کاشت تا شروع غده‌زایی" دارند. بارش در تیر ماه کاهش نشان می‌دهد که این ماه همپوشانی با "شروع غده‌زایی" دارد. بارش موثر در مرداد و شهریور ماه صفر است یعنی تمام نیاز آبی در دو ماه آخر رشد (که بسیار حساس است) باید صرفاً توسط آبیاری تامین شود. در سال ۱۴۰۴ به دلیل بارش موثر بیشتر، سهم باران در تامین نیاز

جدول ۳- میزان آب کاربردی در مراحل رشد سبب‌زمینی و تیمارهای آبیاری (متر مکعب در مساحت ۱۱/۲۵ مترمربع)

Table 3- Applied water at different potato growth stages and irrigation treatments (m³ per 11.25 square meter area)

60%	80%	100%	مراحل آبیاری Irrigation stages
60	80	100	کاشت (planting)
90	120	150	کاشت تا شروع غده‌زایی در هر نوبت Planting till beginning of tuberization
120	160	200	شروع غده‌زایی تا برداشت غده‌ها Beginning of tuberogenesis till the harvesting of the tuber

بهره‌وری آب و ارزیابی تحمل به کم‌آبی در ارقام و ژنوتیپ‌های پرمحصول سیب‌زمینی در منطقه اردبیل

جدول ۴- مقدار بارندگی موثر (متر مکعب در مساحت ۱۱/۲۵ مترمربع)
Table 4- Effective rainfall (m³ per 11.25 square meter area)

2025	2024	Month ماه
0.67	0.58	May اردیبهشت
0.47	0.35	June خرداد
0.32	0.20	July تیر
0.00	0.00	August مرداد
0.00	0.00	September شهریور

جدول ۵- امید ریاضی میانگین مربعات منابع تغییر
Table 5- Expected mean square of variation sources

منبع تغییر Source of Variation	امید ریاضی میانگین مربعات - Expected mean square
y	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*r^*b) + 9 \text{Var}(y^*b) + 16 \text{Var}(y^*r^*a) + 48 \text{Var}(y^*a) + 48 \text{Var}(y^*r) + 144 \text{Var}(y)$
y*r	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*r^*b) + 16 \text{Var}(y^*r^*a) + 48 \text{Var}(y^*r)$
a	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*a^*b) + 16 \text{Var}(y^*r^*a) + 48 \text{Var}(y^*a) + Q(a, a^*b)$
y*a	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*a^*b) + 16 \text{Var}(y^*r^*a) + 48 \text{Var}(y^*a)$
y*r*a	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 16 \text{Var}(y^*r^*a)$
b	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*r^*b) + 9 \text{Var}(y^*b) + Q(b, a^*b)$
y*b	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*r^*b) + 9 \text{Var}(y^*b)$
y*r*b	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*r^*b)$
a*b	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*a^*b) + Q(a^*b)$
y*a*b	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b) + 3 \text{Var}(y^*a^*b)$
y*r*a*b	$\text{Var}(\text{Error}) + \text{Var}(y^*r^*a^*b)$

ارقام و سطوح تنش کم‌آبی به‌عنوان متغیر ثابت و سال به‌عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است.

Cultivars and water deficit stress are considered as fixed variables and year as random variable

جدول ۶- میانگین مربعات صفات مورد مطالعه ارقام سیب‌زمینی در تیمارهای تنش کم‌آبی طی دو سال آزمایش

Table 6- Mean squares of studied traits of potato cultivars in water deficit stress treatments during two years of experiment

منابع تغییر Source of Variation	درجه آزادی Degree of Freedom	میانگین مربعات Meen Square			
		عملکرد غده Tuber yield	وزن غده در بوته Tuber weight per plant	تعداد غده در بوته Number of tubers per plant	ارتفاع بوته Plant height
سال Year (Y)	1	348.3	238116.15	0.011	245.68
Error 1	4	435.6	106783.68	0.056	1492.26
تنش Water Deficit Stress (A) کم‌آبی	2	6422.1**	353726.93**	16.89**	2244.1**
Y × A	2	27.8	18119.21*	0.037	43.38
Error 2	8	16.8	3844.57	0.377	238.87
ارقام Cultivars (B)	15	10179.1**	282070.49**	28.934**	1892.31**
Y × B	15	58.5*	24780.70*	0.020	0.498
Error 3	60	32.8	13577.14	0.149	3.317
A × B	30	20.5**	8064.14**	21.44**	234/00**
Y × A × B	30	15.5*	6018.63*	0.122	1.97
Error 4	120	9.6	3813.00	0.998	15.39
Coefficient of variation (%) ضریب تغییرات (درصد)	-	10.21	10.8	10.41	6.57

* و **: معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد * and **: significance at the five and one percent probability levels

ادامه جدول ۶- میانگین مربعات صفات مورد مطالعه ارقام سیب‌زمینی در تیمارهای تنش کم‌آبی طی دو سال آزمایش
Continued Table 6- Mean squares of studied traits of potato cultivars in water deficit stress treatments during two years of experiment

منابع تغییر Source of Variation (S.O.V.)	درجه آزادی (D.F.) Degree of Freedom	میانگین مربعات (M.S.)			
		تعداد ساقه اصلی در بوته Number of main stems per plant	کارایی مصرف آب Water use efficiency	درصد ماده خشک غده Tuber dry matter percentage	شاخص سطح برگ Leaf area index
سال Year (Y)	1	0.003	10.79	0.021	0.013
Error 1	4	0.055	14.64	0.072	4.187
تنش Water Deficit Stress (A) کم‌آبی	2	25.323**	11.11**	19.68**	208.107**
Y × A	2	0.022	0.22	0.021	0.165
Error 2	8	0.49	0.31	0.013	0.128
ارقام Cultivars (B)	15	3.987**	24.34**	17.07**	31.47**
Y × B	15	0.011	2.25*	0.017	0.294**
Error 3	60	0.077	1.15	0.022	0.115
A × B	30	1.899**	0.99**	1.193**	3.525**
Y × A × B	30	0.012	0.23**	0.017	0.260**
Error 4	120	0.101	0.36	0.034	0.109
Coefficient of variation (%) ضریب تغییرات (درصد)	-	7.51	10.69	5.86	8.35

* و **: معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد * and **: significance at the five and one percent probability levels

در این آزمایش اثر متقابل سه جانبه (سال، رقم و سطوح آبیاری) بر صفات عملکرد غده، وزن غده در بوته و کارایی مصرف آب اختلاف معنی‌داری دارند (جدول ۶). مقایسه میانگین عملکرد غده و وزن غده در بوته نشان می‌دهد بیشترین مقدار در ژنوتیپ ۱۰۴۳ مربوط به ژنوتیپ ۱۰۴۳ و رقم یوروآستارچ (گروه a) و رقم جاوید در گروه مشترک b هستند. از لحاظ صفت تعداد غده در بوته، ارقام یوروآستارچ، لاریسا، آتوسا، جاوید و ریلانا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد در سال ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ و رقم جاوید در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد در سال ۱۴۰۳ است و در گروه مشترک آماری قرار دارند. ارقام یوروآستارچ و لاریسا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ و ۸۰ درصد، ارقام جاوید و آتوسا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد و ارقام رونا و ریلانا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد، ارقام رونا و ریلانا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد، ارقام ساوالان و آتوسا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد، رقم آگریا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد، رقم آگریا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد و ارقام ساوالان و آتوسا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد مشاهده می‌شود (جدول ۷). از لحاظ صفت تعداد ساقه اصلی در بوته، ارقام لاریسا و جلی در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد، ارقام لاریسا و

بهره‌وری آب و ارزیابی تحمل به کم‌آبی در ارقام و ژنوتیپ‌های پرمحصول سیب‌زمینی در منطقه اردبیل

تکتا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۸۰ درصد و رقم لاریسا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۶۰ درصد دارای بیشترین تعداد هستند. بیشترین درصد ماده خشک غده در ارقام ساوالان و رونا در تیمارهای مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد به‌دست آمده است. کارایی مصرف آب در ژنوتیپ ۱۰۴۳ و رقم یورواستارچ در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد، ژنوتیپ ۱۰۴۳، ارقام یورواستارچ و جاوید در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۸۰ درصد و ژنوتیپ ۱۰۴۳، ارقام یورواستارچ، آتوسا و جاوید در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۶۰ درصد دارای بیشترین مقدار

هستند. از لحاظ صفت شاخص سطح برگ، ارقام رزا و جاوید در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۱۰۰ درصد، ارقام جاوید، لاریسا و رزا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۸۰ درصد و ارقام رزا، آتوسا، لاریسا و رونا در تیمار مقدار آب قابل استفاده ۶۰ درصد بیشترین مقدار را دارند (جدول ۷). از لحاظ شاخص تحمل به تنش کم‌آبی (STi) در ارقام سیب‌زمینی در شرایط تنش ملایم و تنش شدید نسبت به شرایط نرمال ژنوتیپ ۱۰۴۳ و ارقام یورواستارچ و جاوید در گروه برتر قرار دارند و به عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به تنش ملایم و شدید انتخاب شده‌اند (جدول ۸).

جدول ۷- مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه در تیمار تنش کم‌آبی و ارقام سیب‌زمینی
Table 7. Mean comparison of studied traits in water deficit stress treatments and potato cultivars

Table 7: Mean comparison of salinity traits in water deficit stress treatments and potato cultivars									
ارتفاع بوته Plant height		تعداد غده در بوته Number of tubers per plant		وزن غده در بوته Tuber weight per plant		عملکرد غده Tuber yield		ارقام Cultivars	سطح آبیاری Irrigation level
82.26	ab	10.46	ghi	953.00	a	48.62	Ab	1043 ۱۰۴۳	۱۰۰ درصد آب قابل استفاده 100% of the plant's available water
71.35	ef	8.610	klmn	750.30	cd	37.29	Efg	Savalan ساوالان	
60.21	lm	7.990	mnpq	637.00	fghijk	31.02	ijklmno	Rona رونا	
84.60	a	11.07	bcdefgh	708.60	de	34.60	Fgh	Agria آگریا	
80.02	bc	12.20	ab	977.40	a	47.90	A	Eurostarch یورواستارچ	
65.80	ghi	12.47	a	656.70	efghij	32.00	hijklm	Larisa لاریسا	
59.77	lm	7.790	nopq	788.40	c	38.59	E	Takta تکتا	
76.43	cd	12.07	abc	792.60	c	38.80	De	Atoosa اتوسا	
68.04	efg	10.42	ghi	656.40	efghij	37.20	hijkl	Prince پرنس	
53.98	opq	11.81	abcde	880.20	b	43.89	Bc	Javid جاوید	
61.20	jkl	10.60	fgh	875.80	b	43.74	Bc	Roza رزا	
50.25	qrs	7.190	opqr	617.50	ghijklm	30.77	jklmnop	Jely جلی	
54.49	opq	8.190	lmno	633.90	ghijkl	31.28	hijklmn	Serga شرگا	
54.70	nopq	8.610	klmn	561.50	mn	27.90	nopqrs	Arsenal آرسنال	
51.25	pqrs	10.21	hij	588.80	jklm	29.05	mnpq	Babylon بابیلون	
54.94	nop	11.35	abcdefg	564.90	lmn	28.02	nopqrs	Rilana ریلانا	
59.04	lmn	11.00	cdefgh	869.90	b	42.13	Cd	1043 ۱۰۴۳	۸۰ درصد آب قابل استفاده 80% of the plant's available water
62.52	ijkl	7.790	nopq	679.70	efg	24.05	ghij	Savalan ساوالان	
52.19	opqrs	12.00	abcd	665.40	efgh	33.04	hijkl	Rona رونا	
77.75	c	9.410	ijk	559.30	mn	27.64	opqrst	Agria آگریا	
72.12	de	12.41	a	812.20	bc	40.49	Cde	Eurostarch یورواستارچ	
60.40	klm	11.81	abcde	594.00	ijklm	28.90	mnpq	Larisa لاریسا	
64.96	ghij	11.00	cdefgh	660.60	efghi	33.01	hijkl	Takta تکتا	
69.23	efg	11.00	cdefgh	705.20	def	34.43	fghi	Atoosa اتوسا	
68.56	efg	4.790	s	581.70	klm	28.25	nopqr	Prince پرنس	
54.12	opq	7.790	nopq	752.70	cd	37.60	Ef	Javid جاوید	
55.95	Mno	9.000	klm	646.70	efghijk	32.29	hijklm	Roza رزا	
38.91	Wx	11.01	cdefgh	436.80	qrst	21.59	wxy	Jely جلی	
61.14	Jkl	11.22	bcdefgh	471.90	pqrs	23.53	uvw	Serga شرگا	
55.96	Mno	7.400	opqr	483.10	opqr	23.79	uvw	Arsenal آرسنال	
53.58	Opqr	6.80	qr	500.40	nopqr	24.76	rstuvw	Babylon بابیلون	
54.49	Opq	6.99	pqr	487.70	opqr	24.28	tuvw	Rilana ریلانا	

ادامه جدول ۷- مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه در تیمار تنش کم آبی و ارقام سیب‌زمینی

ارتفاع بوته Plant height		تعداد غده در بوته Number of tubers per plant		وزن غده در بوته Tuber weight per plant		عملکرد غده Tuber yield		ارقام Cultivars	سطح آبیاری Irrigation level
63.02	hijkl	10.80	efgh	686.90	defg	33.27	hijkl	1043 ۱۰۴۳	۶۰ درصد آب قابل استفاده 60% of the plant's available water
76.69	c	10.41	ghi	584.00	klm	28.96	mnpopq	Savalan ساوالان	
49.43	rst	11.24	bcdefgh	507.20	nopq	25.20	rstuv	Rona رونا	
64.80	ghijk	7.690	nopqr	434.80	rst	21.85	vwxy	Agria آگریا	
67.02	fgh	10.49	ghi	674.00	efgh	33.60	hijk	Eurostarch یورو استارچ	
53.64	opqr	8.190	lmno	495.00	nopqr	24.70	stuvw	Larisa لاریسا	
50.67	pqrs	10.87	defgh	510.80	nop	25.47	qrst	Takta تکتا	
83.95	ab	11.73	abcdef	604.20	hijklm	29.88	lmnop	Atoosa اتوسا	
54.11	opq	8.00	mnp	444.00	pqrs	21.37	wxy	Prince پرنس	
45.19	tuv	10.80	efgh	605.40	hijklm	30.30	klmnop	Javid جاوید	
40.85	vw	9.200	jkl	548.00	mno	27.40	pqrst	Roza رزا	
45.52	tu	7.400	opqr	369.80	tu	18.48	Yz	Jely جلی	
48.28	st	5.190	s	402.40	st	20.02	Xy	Serga شرگا	
36.85	x	8.800	klmn	321.70	uv	16.08	Z	Arsenal آرسنال	
41.48	uvw	6.590	r	366.70	tu	18.33	Yz	Babylon بابیلون	
53.41	opqr	10.70	efgh	293.00	v	14.63	Z	Rilana ریلانا	
5.318	fgh	6.850	cdef	20.64	nopq	5.14	Bcd	1043 ۱۰۴۳	۱۰۰ درصد آب قابل استفاده 100% of the plant's available water
3.878	no	5.456	jklm	22.13	fgh	5.34	Bc	Savalan ساوالان	
5.645	ef	4.538	opqrst	22.95	c	5.34	Bc	Rona رونا	
6.128	d	5.062	lmnopq	20.58	opqr	4.27	Hij	Agria آگریا	
5.379	fg	7.008	cde	21.13	lm	4.54	Ghi	Eurostarch یورو استارچ	
6.932	c	4.682	nopqrs	20.55	pqr	5.80	A	Larisa لاریسا	
7.520	b	5.646	ijkl	18.81	v	4.74	Efg	Takta تکتا	
4.840	ij	5.676	ijkl	21.62	ijk	4.27	Hij	Atoosa اتوسا	
3.780	no	4.784	mnpq	20.23	rst	5.07	Bcde	Prince پرنس	
7.922	a	6.422	efgh	20.64	nopq	4.61	Fgh	Javid جاوید	
7.924	a	6.400	efgh	20.97	lmn	4.80	Defg	Roza رزا	
4.911	i	4.502	pqrst	20.97	lmn	6.14	A	Jely جلی	
4.360	lm	4.577	opqrst	22.52	de	4.80	Defg	Serga شرگا	
2.705	q	4.082	stu	19.67	u	4.20	Ij	Arsenal آرسنال	
2.608	qr	4.251	rst	21.06	lm	3.80	Klm	Babylon بابیلون	
4.765	ijk	4.099	stu	20.11	st	4.54	Ghi	Rilana ریلانا	
4.506	jkl	7.706	ab	21.31	kl	2.74	r	1043 ۱۰۴۳	۸۰ درصد آب قابل استفاده 80% of the plant's available water
3.647	op	6.228	fghi	22.78	cd	3.54	mno	Savalan ساوالان	
4.420	klm	6.043	ghij	23.82	b	3.54	mno	Rona رونا	
5.810	de	5.055	lmnopq	20.45	qrs	4.27	hij	Agria آگریا	
4.410	klm	7.406	bc	21.83	ghij	4.20	ij	Eurostarch یورو استارچ	
5.840	de	5.286	klmn	20.78	mnpq	5.00	cde	Larisa لاریسا	
5.002	ghi	6.038	ghij	20.90	mnp	5.00	cde	Takta تکتا	
4.760	ijk	6.298	fghi	22.14	fgh	4.00	jkl	Atoosa اتوسا	
2.495	qr	5.168	lmnop	20.06	t	4.00	jkl	Prince پرنس	
6.788	c	6.878	cdef	20.83	mnp	3.40	nop	Javid جاوید	
5.820	de	5.907	hijk	21.00	lmn	3.80	klm	Roza رزا	
3.350	p	3.949	tu	21.02	lm	3.80	klm	Jely جلی	
3.510	op	4.304	rst	22.33	ef	4.00	jkl	Serga شرگا	
1.240	vw	4.352	rst	20.23	rst	4.61	fgh	Arsenal آرسنال	
1.908	st	4.529	opqrst	20.95	lmn	3.00	qr	Babylon بابیلون	
3.540	op	4.442	qrst	20.55	pqr	4.07	jk	Rilana ریلانا	

بهره‌وری آب و ارزیابی تحمل به کم‌آبی در ارقام و ژنوتیپ‌های پرمحصول سیب‌زمینی در منطقه اردبیل

ادامه جدول ۷- مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه در تیمار تنش کم‌آبی و ارقام سیب‌زمینی

ارتفاع بوته Plant height		تعداد غده در بوته Number of tubers per plant		وزن غده در بوته Tuber weight per plant		عملکرد غده Tuber yield		Cultivars ارقام	سطح آبیاری Irrigation level
1.981	st	7.056	a	21.89	ghi	3.30	opq	۱۰۴۳1043	۶۰ درصد آب قابل استفاده 60% of the plant's available water
2.261	rs	6.139	bcde	23.05	c	3.66	lmn	Savalan ساوالان	
3.371	p	5.323	ghij	24.84	a	3.40	nop	Rona رونا	
2.610	qr	8.189	klmn	21.50	jk	4.00	jkl	Agria آگریا	
2.261	rs	6.018	a	22.03	fgh	4.90	def	Eurostarch یوروستارچ	
3.670	op	6.206	ghij	20.93	mno	5.36	b	Larisa لاریسا	
1.895	st	7.281	fghi	21.00	lmn	5.00	cde	Takta تکتا	
4.126	mn	5.207	bcd	22.78	cd	4.27	hij	Atoosa اتوسا	
1.750	tu	7.383	lmno	20.93	mno	4.10	jk	Prince پرنس	
2.590	qr	6.677	bc	20.94	mno	4.80	defg	Javid جاوید	
4.0965	hi	4.504	defg	21.05	lm	3.30	opq	Roza رزا	
1.860	tu	4.877	pqrst	21.78	hij	3.49	mno	Jely جلی	
1.110	w	3.918	mnopqr	22.17	efg	4.10	jk	Serga شرگا	
1.000	w	4.467	tu	22.11	fgh	3.30	opq	Arsenal آرسنال	
1.490	uv	3.565	Qrst	21.05	lm	3.10	pq	Babylon بابیلون	
1.030	w	7.056	U	20.98	lmn	3.30	opq	Rilana ریلانا	

جدول ۸- شاخص تحمل به تنش کم‌آبی (STi) در ارقام سیب‌زمینی در شرایط تنش ملایم و شدید نسبت به شرایط نرمال

Table 8- Water deficit stress tolerance index in potato cultivars under mild and severe stress conditions compared to normal condition

تحمل به تنش Stress Tolerance (STi)	تنش ملایم (۶۰٪) درصد آب قابل استفاده Severe stress (80% available water)	تحمل به تنش Stress Tolerance (STi)	تنش ملایم (۸۰٪) درصد آب قابل استفاده Mild stress (80% available water)	نرمال (۱۰۰٪) درصد آب قابل استفاده Normal (100% available water)	ارقام Cultivars
0.505	33.27	0.639	42.13	46.82	۱۰۴۳ 1043
0.350	28.96	0.411	34.05	37.29	Savalan ساوالان
0.253	25.20	0.332	31.02	33.04	Rona رونا
0.245	21.85	0.310	27.64	34.60	Agria آگریا
0.522	33.60	0.629	40.49	47.90	یوروستارچ Eurostarch
0.256	24.70	0.300	28.90	32.00	Larisa لاریسا
0.319	25.47	0.413	33.01	38.59	Takta تکتا
0.376	29.88	0.433	34.43	38.80	Atoosa اتوسا
0.226	21.37	0.299	28.25	32.70	Prince پرنس
0.431	30.30	0.535	37.60	43.89	جاوید Javid
0.388	27.40	0.458	32.29	43.74	Roza رزا
0.184	18.48	0.215	21.59	30.77	Jely جلی
0.203	20.02	0.239	23.53	31.28	Serga شرگا
0.145	16.08	0.215	23.79	27.90	Arsenal آرسنال
0.173	18.33	0.233	24.76	29.05	Babylon بابیلون
0.133	14.63	0.220	24.28	28.02	Rilana ریلانا
	۲۴/۳۵		۳۰/۴۹	۳۶/۰۲	میانگین عملکرد
	درصد ۳۲/۴		درصد ۱۵/۴		درصد کاهش عملکرد

در این آزمایش، ارقام متحمل به تنش کم‌آبی تعداد غده کمتر اما اندازه غده بیشتر دارند. آل‌محمود و همکاران (Al-Mahmud *et al.*, 2014) نتیجه گرفتند ارقامی که تعداد غده کمتر تولید می‌کنند می‌تواند موجب برقراری تعادل در توزیع مواد پرورده به غده‌ها شوند و بنابراین اندازه غده‌ها بزرگ‌تر می‌شود. ایاز و کوروکچو (Ayas and Korukcu, 2010) گزارش کردند تعداد غده در بوته بستگی دارد به میزان آب آبیاری. درصد ماده خشک غده در شرایط تنش کم‌آبی نیز نسبت به شرایط نرمال بیشتر است. واسیتر (Vasiter, 2014) در پژوهش‌های خود نتیجه گرفت مقدار ماده خشک غده‌های سیب‌زمینی با افزایش تنش رطوبتی افزایش می‌یابد مستعلیزاده و همکاران (Mastalizadeh *et al.*, 2020) گزارش دادند با کاهش عملکرد غده تحت تنش کم‌آبی، درصد ماده خشک، درصد نشاسته و مقدار پروتئین افزایش می‌یابد.

در این تحقیق، کارایی مصرف آب در ارقام متحمل به کم‌آبی در شرایط تنش ملایم و شدید افزایش نشان داده است. احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2014) گزارش کردند با اعمال کم‌آبیاری بهره‌وری مصرف آب افزایش پیدا می‌کند. باسیو (Baciu, 2013) می‌گوید ارقام دیررس نسبت به ارقام متوسط زودرس در شرایط خشکی افزایش عملکرد نشان نمی‌دهند. سمائی و همکاران (Samaee *et al.*, 2017) گزارش داده‌اند بیشترین میزان بهره‌وری آب بر مبنای عملکرد غده قابل فروش در تیمار تنش در ژنوتیپ ۲-۳۹۷۰۶۹ مشاهده شده است. احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2014) اعلام کردند کم‌آبیاری موجب افزایش جذب آب و افزایش کارایی و بهره‌وری مصرف آب می‌شود

تنش آبی تشکیل برگ‌های جدید و گسترش آن را تا اندازه کامل متوقف می‌کند و در نتیجه باعث کاهش عملکرد و حجیم شدن غده‌ها می‌شود (Anithakumari, 2011). از سوی دیگر، راهبردهای مختلفی می‌تواند توسط گیاه سیب‌زمینی برای سازگاری با شرایط خشکی و تنش آبی اتخاذ شود (Al-Mahmud *et al.*, 2014). تنش خشکی موجب توقف تشکیل غده همسان، تشکیل استولون

بیشترین عملکرد غده، وزن غده در بوته و کارایی مصرف آب در شرایط نرمال (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی)، تنش ملایم (تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی) و شدید (تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی) در ژنوتیپ ۱۰۴۳، ارقام یورواستارچ و رقم جاوید دیده می‌شود. متوسط کاهش عملکرد غده در ارقام سیب‌زمینی در شرایط تنش ملایم ۱۵ درصد و در شرایط تنش شدید ۳۲ درصد است. برای جلوگیری از کاهش عملکرد غده، استفاده از ژنوتیپ ۱۰۴۳، ارقام یورواستارچ و رقم جاوید در شرایط کم‌آبیاری در مناطق معتدل و سردسیر مناسب است. کانتوری و همکاران (Cantore *et al.*, 2014) میزان کاهش عملکرد در شرایط تنش شدید نسبت به نرمال را ۲۵ درصد گزارش کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند رقم اسپونتا در شرایط نرمال دارای عملکرد ۴۰/۹ تن در هکتار و در شرایط تنش شدید (تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی) ۳۰/۳ تن در هکتار است. کاهش عملکرد و اجزای آن در اثر تنش کم‌آبی در سیب‌زمینی را برخی از محققان از جمله دانلی و همکاران (Donnelly *et al.*, 2003) و شیتنهلما و همکاران (Schittenhelma *et al.*, 2006) در ارتفاع بوته، شیتنهلما و همکاران (Schittenhelma *et al.*, 2006) و بادارو و همکاران (Badarau *et al.*, 2013) تعداد غده در بوته، شاک و فیبرت (Shock and Feibert, 2002)، شیتنهلما و همکاران (Schittenhelma *et al.*, 2006)؛ ایرنا و موروماکال (۲۰۰۶)؛ حسن‌پناه (Hassanpanah, 2009)؛ بادارو و همکاران (Badarau *et al.*, 2013)؛ اوبیدیگان و همکاران (Obidiegwu *et al.*, 2013)؛ محمدخانی و شریفی (Mohammadkhani and Sharifi, 2016)؛ دراپال و همکاران (Drapal *et al.*, 2019)؛ کوین و همکاران (Qin *et al.*, 2019)؛ آلیچه و همکاران (Aliche *et al.*, 2020)؛ نصرالله‌زاده و صداقت (Nasrollahzadeh and Sedaghat, 2017)؛ حمیدی (Sobhani and Hamidi, 2013)؛ حقیقتی و همکاران (Haghighati *et al.*, 2016)؛ فریدی مایوان و همکاران (Faridi Myvan *et al.*, 2018)؛ در عملکرد غده گزارش شده است.

می‌شود، بنابراین خشکی با این روش تعداد غده‌های تشکیل شده را متناسب با نحوه برقراری تنش خشکی و طول مدت آن کاهش می‌دهد و هنگامی که آبیاری پس از اعمال تنش اجرا می‌شود، رشد غده‌ها دوباره از سر گرفته خواهد شد و غده‌های بدشکل، گلایی شکل و زنگوله‌ای تشکیل می‌شود و در نهایت ظرفیت عملکرد قابل فروش گیاه را کاهش می‌دهد (Vasiter, 2014).

اسکندری و همکاران (Eskandari et al., 2011) طی آزمایش‌هایی نشان دادند که کاهش حجم آبیاری در سیب‌زمینی به دلیل حساس بودن این گیاه به کمبود رطوبت خاک، به‌خصوص در آغاز غده‌بندی، باعث افت عملکرد غده می‌گردد. قطع آبیاری در مرحله حجیم شدن غده‌ها باعث کاهش فتوسنتز می‌شود و در اثر آن ماده غذایی کمتری به غده‌ها منتقل خواهد شد و اندازه غده‌ها کاهش می‌یابد. مرحله غده‌بندی در سیب‌زمینی کوتاه‌مدت و حدود دو هفته است، بنابراین هر گونه تنش خشکی در این مرحله می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری وارد سازد و تعداد غده در بوته را که یکی از اجزا مهم عملکرد سیب‌زمینی است کاهش دهد. بنابراین، کاهش تعداد غده در بوته می‌تواند به‌طور مؤثری عملکرد غده را کاهش دهد.

اسکندری و همکاران (Eskandari et al., 2011) اعلام کردند که نیاز آبی سیب‌زمینی در مراحل مختلف نمو یکسان نیست به‌طوری که این گیاه در اوایل رشد رویشی احتیاج چندانی به رطوبت زیاد ندارد، ولی نیاز رطوبتی گیاه در مرحله گل دادن که همزمان با تشکیل غده است به حداکثر می‌رسد. نتیجه تحقیق دیگری مشخص کرد به دلیل تحمل پایین گیاه سیب‌زمینی به تنش آبی، کمبود آب منجر به کاهش عملکرد سیب‌زمینی از طریق کاهش رشد کانوپی و زیست‌توده (بیوماس) تولیدی می‌گردد (Abubaker et al., 2014).

تنش خشکی در مراحل مختلف فنولوژیکی سیب‌زمینی می‌تواند موجب تأخیر در استقرار اولیه گیاه، کاهش تولید استولون، کاهش غده‌دهی و ممانعت از حجیم شدن غده‌ها باشد (Obidiegwu et al., 2015). برای غده‌دهی مناسب، پیش از غده‌دهی و حین غده‌دهی پتانسیل آب در خاک

نباید کمتر از ۲۵ کیلوپاسکال باشد (Drupal et al., 2019). تنش‌های شدید و دراز مدت در اوایل فصل رشد ممکن است تسهیم مواد را به نفع اندام‌هایی به‌جز غده‌ها تغییر دهد (Aliche et al., 2020). نصرالله‌زاده و صداقت (Nasrollahzadeh and Sedaghat, 2017) طی آزمایشی اعلام کردند در مرحله حجیم شدن غده‌ها تنش خشکی باعث کاهش فتوسنتز و انتقال کمتر مواد فتوسنتزی به غده‌ها می‌شود و در اثر آن وزن غده‌ها کاهش می‌یابد. این محققان همچنین گزارش کردند، تیمار تنش خشکی در مرحله غده‌بندی موجب کاهش معنی‌دار تعداد غده، اندازه غده، میانگین وزنی غده و عملکرد غده سیب‌زمینی می‌شود.

حسن‌پناه و همکاران (Hassanpanah et al., 2008) و حسن‌پناه (Hassanpanah, 2009) به این نتیجه رسیدند که مراحل ابتدایی تشکیل غده و حجیم شدن غده حساس‌ترین مرحله رشد سیب‌زمینی به تنش کم‌آبی است. برای غربال کردن ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم‌آبی در سیب‌زمینی، از این موضوع‌ها استفاده می‌شود: چگونگی توزیع مواد پرورده (آسیمیلاتا) و کل وزن زنده تولید شده تحت شرایط تنش (Coleman, 2008)، توانایی بقا در شرایط تنش شدید خشکی بدون از بین رفتن برگ‌ها (Coleman, 2008)، حداکثر شاخص سطح برگ (Deshi et al., 2015)، ریزش دیرتر برگ‌ها در شرایط خشکی (Lahlou et al., 2003) حداکثر شاخص سطح برگ و دوره دوام برگ (Al-Mahmud et al., 2014)، حداکثر شاخص سطح برگ و مدت زمان حفظ آن (Deshi et al., 2015) و بیشترین میزان نسبی آب و میزان و شاخص کلروفیل و کمترین میزان نشت الکترولیت‌ها.

سیب‌زمینی در دوره استولون‌زایی و تشکیل غده نسبت به خشکی حساس است و خشکی زیاد تعداد غده در بوته را کاهش می‌دهد. خشکی زیاد همچنین بر عملکرد غده کل، عملکرد غده قابل فروش، کیفیت غده مانند: شکل، غده‌های غیرعادی، مقدار ماده خشک غده، اندازه و ترکیب‌های شیمیایی آن مؤثر است (Al-Mahmud et al., 2014). در حقیقت می‌توان گفت که وزن تر غده‌های سالم و اندازه

ژنوتیپ‌های متحمل می‌توانند با افزایش اندازه غده و وزن مخصوص، کیفیت محصول را حفظ کنند. درصد ماده خشک غده نیز در شرایط تنش افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده غلظت بیشتر مواد پرورده در حجم آب کمتر است. نکته مهم افزایش کارایی مصرف آب در ژنوتیپ‌های متحمل است. به علاوه، در شرایط تنش ملایم و شدید، کارایی مصرف آب به ترتیب ۷ و ۱۳ درصد افزایش نشان داده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که محدود کردن آبیاری در کنار استفاده از ارقام متحمل، نه تنها باعث تلفات شدید نمی‌شود، بلکه راندمان استفاده از آب را بهبود می‌بخشد. با توجه به پایداری عملکرد غده، حفظ کیفیت غده و افزایش کارایی مصرف آب، کشت ژنوتیپ‌های ۱۰۴۳، یورواستارچ و جاوید تحت رژیم آبیاری تنش ملایم (۸۰ درصد نیاز آبی) به عنوان بهترین راهکار برای مدیریت منابع آب و تولید پایدار سیب‌زمینی در مناطق معتدل و سردسیر با محدودیت آبی توصیه می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت مدیریت سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل تقدیر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در مطالعه و طراحی مقاله و تحقیق مشارکت داشته‌اند. جمع‌آوری داده‌ها و پیاده‌سازی توسط تمامی نویسندگان (ک.ا.گ؛ د.ج؛ ا.م.گ؛ ی.ج.ج.)

غده‌ها تعیین کننده عملکرد قابل فروش سیب‌زمینی است که به شدت تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرد (Samaee et al., 2017). در تحقیقات اسکندری و همکاران (Eskandari et al., 2011) با بررسی اثر رژیم آبیاری بر عملکرد و برخی ویژگی‌های کیفی ارقام سیب‌زمینی گزارش شد که با افزایش حجم آب آبیاری، همه صفات کمی و کیفی مورد مطالعه به جز وزن مخصوص غده بهبود می‌یابد و از نظر درصد ماده خشک و نشاسته غده، رژیم آبیاری تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی نسبت به سایر رژیم‌های آبیاری برتری دارد. ایاز و کوروکچو، (Ayas and Korukcu, 2010) گزارش کردند تعداد غده در بوته به شدت وابسته به میزان آب آبیاری است، به طوری که در آبیاری کامل میانگین تعداد غده قابل فروش در بوته ۷/۳۵ و در تیمار ۵۰ درصد تأمین نیاز آبی ۳/۵۵ عدد است.

نتیجه گیری

تنش کم آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان است. نتایج این پژوهش نشان داد که تنش کم آبی تأثیر معنی‌داری بر رشد رویشی و کیفیت غده سیب‌زمینی دارد، اما پاسخ این صفات وابسته به ژنوتیپ و شدت تنش است. تحلیل‌های آماری حاکی از آن است که اثر متقابل ژنوتیپ، سال کشت و رژیم آبیاری بر عملکرد غده و کارایی مصرف آب معنی‌دار است. براساس شاخص تحمل به تنش (STi)، ژنوتیپ ۱۰۴۳ و ارقام یورواستارچ و جاوید به عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها در برابر تنش‌های ملایم (۸۰ درصد نیاز آبی) و شدید (۶۰ درصد نیاز آبی) شناسایی شدند. این ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش شدید، کمترین افت عملکرد را نسبت به دیگر ارقام نشان دادند. به طور میانگین، اعمال تنش ملایم و شدید منجر به کاهش ۱۵ درصد و ۳۲ درصد عملکرد غده می‌شود. مطالعه تغییرات ریخت‌شناسی نشان داده است گیاه سیب‌زمینی تحت تنش آبی استراتژی سازگاری متفاوتی را اتخاذ می‌کند، به طوری که تعداد غده در بوته و شاخص سطح برگ به دلیل توقف رشد رویشی کاهش می‌یابد (حدود ۱۸ و ۵۵ درصد کاهش در تنش شدید)، اما

و تجزیه و تحلیل و جمع‌بندی نتایج توسط د.ح. انجام شده تقدیر و تشکر

است. نسخه اولیه مقاله توسط د.ح. نوشته شده و تمامی نویسندگان (ک.ا.گ؛ د.ح؛ ا.م.گ؛ ی.ج.ج.) پیشنهادات خود را بر روی نسخه اولیه ارائه شده اعمال نموده‌اند. اصلاحات و ویرایش نهایی توسط د.ح. در متن نهایی اعمال شده و تمامی نویسندگان نسخه نهایی را بررسی نموده‌اند. نویسندگان از مدیریت موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (SPII)، سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل تشکر و قدردانی می‌کنند. این تحقیق با حمایت مالی سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل انجام شده است.

مراجع

- Abubaker, B. M. A., Shuang-En, Y., Guang-Cheng, S., Alhadi, M. & Elsiddig, A. (2014). Effect of irrigation levels on the growth, yield and quality of potato. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20(2), 303-309.
- Ahmadi, S. H., Agharezaee, M., Kamgar-Haghighi, A. & Sepaskhah, A. R. (2014). Effects of dynamic and static deficit and partial root zone drying irrigation strategies on yield, tuber sizes distribution and water Productivity of two field grown potato cultivars. *Agricultural Water Management*, 134, 126-136. doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.015.
- Aliche, E. B., Theeuwien, T. P., Oortwijn, M., Visser, R. G. & Van der Linden, C. G. (2020). Carbonpartitioning mechanisms in potato underdrought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 146, 211-21.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Al-Mahmud, A., Hossain, A., Al-Mamun, A., Ebna Habib, S. H., Rahaman, S. H., Ali Khan, S. H. & Bazzaz, M. (2014). Plant canopy, tuber yield and growth analysis of potato under moderate and severe drought condition. *Journal of Plant Sciences*, 25, 201-208.
- Anithakumari, A. M. (2011). Genetic dissection of drought tolerance in potato (Ph. D. Thesis), Wageningen University, Netherlands.
- Anon. 2025. Ministry of Agricultural Jihad, Deputy for planning and economy, information and communication technology center.
- Anonymous. 2024. Bulletin of the Iranian Meteorological Society.
- Ayas, S. & Korukcu, A. (2010). Water-yield relationships in deficit irrigated potato. *Journal of Agriculture Faculty of Uludag University*, 24 (2), 23-36.
- Baciu, A. (2013). Reaction of native potato varieties to water stress. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology.*, 17(2), 80-86.
- Badarau, C. L., Marculescu, A. & Chiru, N. (2013). The effects of new treatments on PVY infected potato plants under drought conditions. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry & Wood Industry & Agricultural Food Engineering*, 6(55), 99-104.
- Boyd, N. S., Gordon, R. & Martin, R. C. (2002). Relationship between leaf area index and ground cover in potato under different management conditions. *Potato Research*, 45, 117-129.
- Cantore, C., León-Ledesma, M., McAdam, P. & Willman, A. (2014). Breeding potato for quality improvement. *Journal of the European Economic Association*, 12(1), 108-128.
- Coleman, W. K. (2008). Evaluation of wild *Solanum* species for drought resistance *Solanum gandarillasii* Cardenas. *Environmental and Experimental Botany Journal*, 62, 221-230.
- Debiao, F., Jianying, J., Qiaozhen, L., Huarong, R., Xin, W. & Xingguo, Y. (2012). A determination method of correction coefficient of potato leaf area. *Resources Science*, 34(8), 1533-1537.
- Deshi, K. E., Obasi, M. O., Odiaka, N. I., Kalu, B. A. & Ifenkwe, O. P. (2015). Leaf area index values of potato (*Solanum tuberosum* L.) stored for different periods in different kinds of stores. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 81, 9-19.
- Donnelly, D. J. Coleman, W. K. & Coleman, S. E. (2003). Potato micro-tuber production and performance. *A Review American Journal of Potato Research*. 80, 103-115.

- Drapal, M., Farfan-Vignolo, E. R., Gutierrez, O. R., Bonierbale, M., Mihovilovich, E. & Fraser, P. D. (2019). Identification of metabolites associated with water stress responses in *Solanum tuberosum* L. clones. *Phytochemistry*, 135, 24-33.
- Eskandari, A., Khazaie, H., Nezami, A. & Kafi, M. (2011). Study the effects of irrigation regimes on yield and some qualitative characteristics of three cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Water and Soil*, 25(2), 240-247. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9299.
- Faridi Myvan, F., Jami Al-Ahmadi, M., Eslami, S. V. & Shojaei Noferest, K. (2018). Studying the effect of planting pattern and potassium fertilizer levels on some physiological characteristics and yield of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) under different irrigation levels. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(3), 547-560. doi: 10.22077/escs.2018.895.1178
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress effect mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185-212.
- Frenandez, G. C. J. (1992). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: Proceedings of the international symposium on adaptation of vegetables and other food crops in temperature and water stress. Taiwan. pp 257-270.
- Haghighati, B., Bromand Nasab, S. & Naseri, A. 2016. Effect of irrigation water amount on yield, some qualitative characteristics and water productivity of two potato cultivars. *Crop Physiology Journal*, 28(7), 45-60.
- Hassanpanah, D. (2009). Effects of water deficit and potassium humate on tuber yield and yield. *Iranian Research Journal of Environmental Sciences*, 3, 351-356.
- Hassanpanah, D., Gurbanov, E., Gadimov, A. & Shahriari, R. (2008). Determination of yield stability in advanced potato cultivars as affected by water deficit and potassium humate in Ardabil region, Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 15, 1354-1359.
- Kazemi, M., Banayan Aval, M. & Ghorbani, R. (2016). Quantitative analysis of food security in Khorasan razavi province based on potato production. *Applied Field Crops Research*, 29(3), 63-75. doi: 10.22092/aj.2016.112699
- Lahlou, O., Ouattar, S. & Ledent, J. F. (2003). The effect of drought and cultivar on growth parameters, yield and yield components of potato. *Agronomie*, 23(3), 257-268.
- Mani, F. & Hannachi, C. (2015). Physiology of potato sprouting. *Journal of new science*, 17(2), 591- 602.
- Mastalizadeh, B., khajoei-Nejad, G. & Moradi, R. (2020). Assessing physico-chemical properties of potato as affected by different irrigation methods. *Plant Process and Function*; 9 (36), 33-48
- Mohammadkhani, N. and P. Sharifi. (2016). Anti-oxidative response of different wheat genotypes to drought during anthesis. *Iranian Journal of Plant Physiology*. 6(4): 1845-1854.
- Nasrollahzadeh, A. & Sedaghat, G. (2017). Effects of planting depth and irrigation disruption on yield and yield components in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Crop Science Research in Arid Regions*, 1(1), 109-119. doi: 10.22034/csrar.01.01.09
- Obidiegwu, J. E., Bryan, G. J., Jones, H. G. & Prashar, A. (2015). Coping with drought stress and adaptive responses in potato, perspectives for improvement. *Frontiers in plant science*, 6(542), 1-23.
- Qin, J., Bian, C., Liu, J., Zhang, J. & Jin, L. (2019). An efficient greenhouse method to screen potato genotypes for drought tolerance. *Scientia Horticulturae*, 253, 61-69.
- Samaee, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mousapour Gorji, A. & Zand, E. (2017). The study of potato genotypes (*Solanum tuberosum* L.) tolerance to water deficit stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 47(4), 527-540. doi: 10.22059/ijfcs.2017.128238.653902
- Schittenhelma, S., Sourell, H. & Lopmeierc, F. J. (2006). Drought resistance of potato cultivars with contrasting canopy architecture. *European Journal Agronomy*, 24, 193-202.
- Shock, C. C. & Feibert, E. B. G. (2002). *Deficit irrigation of potato*. In P. Moutonnet (Ed.) Deficit Irrigation Practices (pp 47-55). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Sobhani, A. R. & Hamidi, H. (2013). Effects of water deficit stress and potassium on yield and water use efficiency of potato by line source sprinkler irrigation. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 6(1), 1-15. doi: 10.22077/escs.2013.133
- Vasiter, K. E. (2014). Inheritance of tolerance to drought from selected (*Solanum tuberosum*) cultivars in Uganda (M.Sc. Thesis), Plant breeding and seed systems of makerere, Uganda.
- Villa, P. M., Sarmiento, L., Rada, F. J., Machado, D. & Rodrigues, A. C. (2017). Leaf area index of potato (*Solanum tuberosum* L.) crop under three nitrogen fertilization treatments. *Agronomía Colombiana*, 35(2), 171-175.

Research Article**Numerical Evaluation of the Performance of Protective Steel Beams in Reducing Bridge Opening Blockage Risk Caused by Floating Woody Debris in Mountainous Forested Rivers****Mohammad Rostami^{1✉}, Amir Hossein Rahimi²****Corresponding Author:** Faculty Member, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization(✉ **Corresponding Author:** m_rostami@areeo.ac.ir)

ARTICLE INFO	HOW TO CITE THIS ARTICLE
Received: 2 June 2026	Rostami, M., Rahimi, A.H., (2026). Numerical Evaluation of the Performance of Protective Steel Beams in Reducing Bridge Opening Blockage Risk Caused by Floating Woody Debris in Mountainous Forested Rivers. V.26, No.100, P: 83-107
Revised: 22 June 2026	https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.373001.1649
Accepted: 25 June 2026	
Available Online: 12 July 2026	

Extended Abstract**Introduction**

Rivers in mountainous forested regions transport not only water and sediment during flood events, but also large amounts of woody debris, including tree trunks, branches, and vegetation residues. These debris materials accumulate around hydraulic crossing structures such as bridges, reducing flow conveyance capacity, increasing water levels, intensifying local scour, and consequently increasing the risk of flooding. In recent years, steel guiding beams installed upstream of bridges have been considered as an effective countermeasure to modify the movement path of woody debris and reduce bridge blockage probability. These beams alter the orientation of floating logs and facilitate their passage through bridge openings. Despite the promising results of laboratory investigations, uncertainties still remain regarding the optimal arrangement of guiding beams and their performance under different hydraulic conditions. Furthermore, the high cost and limitations of experimental studies have highlighted the necessity of numerical modeling approaches. Therefore, in this study, the performance of steel guiding beams in reducing bridge blockage probability was investigated using the FLOW-3D software and Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques. The effects of beam arrangement and flow discharge on the movement and passage behavior of woody debris under flood conditions were evaluated.

Methodology

In this study, numerical simulations of woody debris behavior and the performance of steel guiding beams were carried out using FLOW-3D software. Model calibration, validation, and scenario analyses were performed based on the laboratory experiments of Harada *et al.*, (2018). First, the geometry of the channel, bridge, and steel beam arrangements were reconstructed according to the experimental setup. The model consisted of an open channel with a specified slope, bridge piers, and different arrangements of steel guiding beams installed upstream of the bridge.

Three scenarios were simulated: (1) bridge condition without guiding beams, (2) bridge condition with the beam arrangement proposed by Harada *et al.*, (2018) (Type B), and (3) bridge condition with the new arrangement proposed in the present study (Type C). In addition, the effects of woody debris introduction mode (individual and simultaneous entry) and the number of logs on bridge blockage probability were investigated.

Woody debris pieces were modeled as floating rigid bodies with identical geometric and physical properties, including length, diameter, and density. The logs entered the flow from upstream, and their

movement, rotation, collision with steel beams, passage through bridge openings, and accumulation around bridge piers were analyzed. The interaction *between* flow, woody debris, and steel beams was simulated using the moving rigid body capability of FLOW-3D.

In each simulation, parameters such as the number and percentage of logs passing through the bridge openings were extracted and compared with laboratory data. While the reference experiments were conducted within a discharge range of 1 to 2.3 L/s, the discharge range in this study was extended to 0.5–3.5 L/s. Finally, the numerical simulation results were compared with experimental observations and previous studies to evaluate the accuracy and capability of FLOW-3D in simulating woody debris behavior and assessing the performance of steel guiding beams.

Results and Discussion

The numerical simulation results showed that the use of steel guiding beams upstream of the bridge effectively modified the movement path of woody debris and reduced bridge blockage probability. In the absence of guiding beams, debris accumulation upstream of the bridge caused opening blockage, flow backwater effects, and reduced flood conveyance capacity. In contrast, the guiding beams changed the orientation of the logs and facilitated their passage through the bridge openings.

For the simultaneous entry of 50 logs, the passage percentage without guiding beams ranged from 0 to 60%, whereas it increased to 20–75% in the presence of Type B guiding beams. In the case of individual log entry, the passage efficiency increased by an average of 35% with Type B beams. To improve system performance, a new beam arrangement (Type C) was proposed and evaluated. Under a discharge of 2.3 L/s and simultaneous entry of 20 logs, the passage percentage was 78% for Type B and 94% for Type C. Furthermore, when the number of logs increased from 1 to 20, the average passage percentages for the no-beam, Type B, and Type C conditions were 51%, 87%, and 95%, respectively. The results demonstrated that the proposed Type C arrangement can effectively reduce bridge blockage risk and improve flood conveyance safety in mountainous forested rivers.

Conclusion

The numerical simulation results demonstrated that the accumulation of woody debris at bridge openings can significantly reduce bridge conveyance capacity and increase the risk of flooding and associated damages in forested mountainous rivers. In the absence of guide piles, a considerable portion of the logs accumulated upstream of the bridge, causing blockage of the bridge opening, flow backwater effects, and a reduction in flood conveyance efficiency. This phenomenon became more pronounced under conditions of higher flow discharge and the simultaneous introduction of a large number of woody debris elements. The results further indicated that the installation of steel guide piles upstream of the bridge effectively improved the movement path of woody debris, reduced direct impacts on bridge piers, and increased the probability of debris passing through the bridge opening. Comparison of different pile configurations revealed that the Type B arrangement proposed by Harada *et al.*, (2018) performed better than the condition without guide piles; however, approximately 13% of the woody debris still accumulated around the bridge piers. In contrast, the Type C arrangement proposed in the present study provided more efficient debris guidance by improving the approach angle of the debris toward the bridge opening. As a result, only about 5% of the woody debris failed to pass through the bridge opening, while the average passage efficiency reached approximately 95%. The analysis also showed that increasing the number of woody debris elements entering the flow substantially increased the likelihood of bridge blockage under conditions without guide piles. However, the use of steel guide piles, particularly the Type C configuration, maintained a high debris passage efficiency even under conditions of high debris concentration. Furthermore, the validation results confirmed that FLOW-3D is capable of accurately simulating the hydrodynamic behavior of woody debris, its interaction with flow, and the performance of debris-guiding structures. Therefore, the model can serve as an effective tool for the design, assessment, and optimization of mitigation measures aimed at reducing bridge blockage hazards in mountainous river systems.

Keywords: Flood hazard, Bridge hydraulic capacity, Woody debris, guide beam, FLOW-3D model

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest. All authors have read and approved the final manuscript.

Funding

The corresponding author conducted this study as an extension of the research project entitled “Experimental Investigation of the Effects of Hydraulic Crossing Structure Geometry on the Trapping of Large Woody Debris and the Aggravation of Flood Hazards,” carried out at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. The present research was undertaken to develop practical measures for reducing flood risks associated with woody debris accumulation at bridges. No financial support was received from any public, commercial, or non-profit organization for conducting, writing, or publishing this study.

Data Availability Statements

All relevant data and results supporting the findings of this study are presented within the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contribution

All authors contributed to the conception and design of the study, the conduct of the research, and the preparation of the manuscript. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript..

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere appreciation to all individuals who contributed to this research, particularly the management of the River Engineering and Coastal Engineering Department at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, for their valuable support and cooperation throughout the study.



© 2026, 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/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.373001.1649>

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی شناور در رودخانه‌های کوهستانی جنگلی

محمد رستمی^۱، امیرحسین رحیمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

چکیده

تجمع واریزه‌های چوبی در دهانه پل‌ها یکی از عوامل اصلی کاهش ظرفیت عبور سیلاب و افزایش خطر آب‌گرفتگی در رودخانه‌های کوهستانی جنگلی است. در این پژوهش، عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در کاهش احتمال گرفتگی دهانه پل‌ها با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی گردید. تأثیر آرایش تیرک‌ها و شرایط جریان بر نحوه حرکت و عبور واریزه‌های چوبی در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در شرایط بدون استفاده از تیرک‌های هدایت‌کننده، به‌طور متوسط حدود ۴۹ درصد از الوارها در بالادست پل تجمع می‌کنند و موجب کاهش ظرفیت عبور جریان می‌شوند. در آرایش پیشنهادی مطالعه پیشین، میزان تجمع واریزه‌ها به حدود ۲۳ درصد کاهش یافت، در حالی که آرایش پیشنهادی این پژوهش با هدایت موفق بیش از ۹۴ درصد واریزه‌ها از دهانه پل و کاهش تجمع به کمتر از ۵ درصد، بالاترین کارایی را در جلوگیری از انسداد دهانه‌ها نشان داد. اعتبارسنجی مدل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که میانگین خطای نسبی پیش‌بینی‌ها حدود ۱۸ درصد است که بیانگر دقت قابل قبول مدل در بازتولید فرآیند انتقال و تجمع واریزه‌های چوبی است. بر این اساس، استفاده از تیرک‌های هدایت‌کننده با آرایش پیشنهادی می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش خطر گرفتگی پل‌ها و افزایش ایمنی عبور سیلاب در رودخانه‌های جنگلی باشد.

واژه‌های کلیدی: خطر سیلاب، آبگذری پل، واریزه‌های چوبی، تیرک هدایت‌کننده، مدل FLOW-3D

مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های حدی اقلیمی است که بر اساس شواهد تاریخی و دیرینه اقلیمی همیشگی محیط فیزیکی و اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده باعث ضعیف شدن درختان و افزایش آسیب‌پذیری آنها در برابر وقوع بارش‌ها با شدت زیاد و سیلاب‌ها و همچنین افزایش احتمال ورود آنها به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها می‌شود. ورود تنه درختان به رودخانه‌ها و انتقال آنها به پایین‌دست، باعث تجمع در سازه‌های تقاطعی همچون پل‌ها و انسداد دهانه‌های آنها می‌شود (شکل ۱). این امر باعث کاهش ظرفیت عبور سیلاب می‌شود و شرایط را برای طغیان سیلاب به اراضی حاشیه رودخانه و ایراد خسارت به مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی فراهم می‌کند. جلوگیری از ورود تنه درختان به رودخانه‌ها نیازمند آبخیزداری در حوضه آبخیز است، اما در شرایط ورود آنها به رودخانه‌ها، نیازمند

^۱ عضو هیات علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
([✉] نویسنده مسئول: Email: m_rostami@areeo.ac.ir)

^۲ دانش‌آموخته سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

شناخت مکانیزم انتقال و عملکرد آنها در مواجهه با سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی و در نهایت ارائه راهکارهایی برای جلوگیری از تجمع واریزه‌های چوبی در دهانه سازه‌هاست. برای بررسی چگونگی تقابل واریزه‌های چوبی با سازه پل‌ها، احتمال گرفتگی دهانه‌ها، تأثیر این پدیده بر طغیان سیلاب و مدیریت بحران در شرایط مواجهه با این واریزه‌ها مطالعات متعددی شده است. فلوسبائو (Flussbau, 2009) با بررسی حوضه آبریز رودخانه زیل^۱ واقع در زوریخ سوئیس که مستعد انتقال الوارها و ایجاد انسداد در پایه‌های پل است، نتیجه‌گیری کرد که در سیل‌های با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله به مقدار ۶۰۰۰ متر مکعب و در سیل‌های با دوره بازگشت ۳۰۰ ساله به مقدار ۱۲۰۰۰ متر مکعب الوار وجود خواهد داشت. این الوارها به دلیل آسیب شدیدی که به پایین‌دست می‌زنند نیاز به محافظت بسیار زیادی خواهند داشت. با این توضیح، وجود سازه‌های نگهدارنده الوار، مولفه ضروری در مدیریت سیل است.

شناخت مکانیزم انتقال و عملکرد آنها در مواجهه با سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی و در نهایت ارائه راهکارهایی برای جلوگیری از تجمع واریزه‌های چوبی در دهانه سازه‌هاست. برای بررسی چگونگی تقابل واریزه‌های چوبی با سازه پل‌ها، احتمال گرفتگی دهانه‌ها، تأثیر این پدیده بر طغیان سیلاب و مدیریت بحران در شرایط مواجهه با این واریزه‌ها مطالعات متعددی شده است. فلوسبائو (Flussbau, 2009) با بررسی حوضه آبریز رودخانه زیل^۱ واقع در زوریخ سوئیس که



شکل ۱- انسداد دهانه پل توسط واریزه‌های چوبی

Fig. 1- Blockage of a bridge opening by woody debris

چوب‌های شناور و در نتیجه افزایش تراز آب در بالادست پل را افزایش می‌دهد. شموکر و هاگر (Schmocker & Hager, 2011) با ارائه چارچوبی جامع برای تحلیل خطر چوب‌های شناور در رودخانه‌ها، فرآیند تولید، انتقال، تجمع و مدیریت چوب‌های شناور را در جریان‌های سیلابی بررسی کردند و نشان دادند تجمع چوب‌های شناور در محل پل‌ها، آبگذرها و دیگر سازه‌های عرضی می‌تواند موجب کاهش ظرفیت عبور جریان، افزایش تراز آب بالادست، تشدید آب‌شستگی موضعی و سرانجام افزایش خطر سیلاب‌گرفتگی شود. این پژوهش

سندلهوفر (Sendlhofer, 2010) یک پل واقع در شهر تیرول در اتریش را مورد توجه قرار داد و خطرهای ناشی از گرفتگی پل را در این منطقه بررسی کرد. این محقق فرآیندهای انسداد ناشی از چوب‌های شناور بزرگ را با استفاده از یک مدل فیزیکی از یک پل واقع بر رودخانه اوتس‌تالر^۲ در اتریش بررسی کرد. در این مطالعه، احتمال گیر افتادن چوب‌ها در سازه پل و همچنین اثر پس‌زدگی جریان تحت شرایط سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ تا ۱۰۰ سال محاسبه و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که وجود پایه‌های میانی پل به طور قابل توجهی احتمال انسداد توسط

² Ötztaler Ache

¹ Sihl

می‌تواند به مراتب بزرگ‌تر از بارهای معمول هیدرولیکی باشد و بنابراین لازم است در طراحی، ارزیابی ایمنی و مدیریت ریسک پل‌ها در شرایط سیلابی، به نیروهای ناشی از برخورد و تجمع واریزه‌ها به‌طور ویژه توجه شود

پوپما و همکاران (Poppema *et al.*, 2022) با بررسی گرفتگی پل‌ها در سیلاب‌های مخرب اروپا در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که حدود نیمی از حجم تجمعات را آوارهای انسان‌ساخت تشکیل می‌دهد و پل‌های با فاصله کم بین پایه‌ها بیشترین خطر انسداد را دارند. نتایج این پژوهش بر اهمیت در نظر گرفتن آوارهای مختلط و ویژگی‌های هندسی پل در ارزیابی خطر گرفتگی و مدیریت سیلاب تأکید دارد. برای جلوگیری از این مخاطرات باید چاره‌اندیشی که واریزه‌های چوبی پیش از رسیدن به پل‌ها یا سازه‌های تقاطعی، توسط سازه‌های مکمل دیگری جمع‌آوری شوند یا با کمترین احتمال گرفتگی از داخل دهانه پل‌ها عبور کنند (شکل ۲).

در زمینه جمع‌آوری الوارها توسط سازه‌های مکمل، تحقیقاتی به اجرا در آمده است. بزولا (Bezzola, 2006) در یک مدل آزمایشگاهی به بررسی تأثیر سازه‌های تله‌انداز و جمع‌آوری کننده الوارها پرداخت و گزارش داد طول الوارها باید حداقل به میزان ۱/۵ برابر فاصله بین دندانه‌ها باشد تا راندمان تله اندازی افزایش یابد. برابر تحقیقات فلوسبائو (Flussbau, 2005)، طول حدود دو سوم الوارهای منتقل شده به داخل رودخانه‌ها بیش از ۵ متر است که در این شرایط باید فاصله بین دندانه‌های سازه جمع‌کننده الوارها معادل ۳/۳ متر انتخاب شود. این محقق نشان داد ارتفاع دندانه‌ها تأثیر مستقیم بر حداکثر ارتفاع برگشت آب دارد. برای استفاده از تیرهای فولادی به عنوان تدابیر مقابله‌ای برای مسدود کردن واریزه‌های چوبی در سدهای صلب سابو^۲ (نوعی سازه کنترل رسوب و مهار جریان‌های واریزه‌ای) ارائه شده است. برای طراحی مؤثر چنین تدابیر مقابله‌ای، داشتن شناخت کافی از مکانیزم به دام افتادن واریزه‌های چوبی

همچنین برای برآورد حجم بالقوه چوب‌های شناور در حوضه آبریز، ارزیابی احتمال انسداد سازه‌ها و انتخاب محل مناسب برای احداث سازه‌های نگهدارنده چوب روش‌هایی ارائه داده است. از مهم‌ترین دستاوردهای این مطالعه، معرفی سامانه‌های نوین کنترل و انحراف چوب‌های شناور در رودخانه‌های کوهستانی است که امکان کاهش خطرهای هیدرولیکی ناشی از تجمع چوب را فراهم می‌کند.

گشنیتزر و همکاران (Gschneider *et al.*, 2015)، در آزمایشگاه دانشگاه اینسبروک^۱ مدلی مقیاس‌شده از یک رودخانه را تهیه و با استفاده از الوارهای با شاخه و بدون شاخه و مخاطرات ناشی از آن به بررسی انسداد پل موجود در آن پرداختند. پارامترهای بحرانی پل، هندسه کانال آزمایشگاهی، شیب کانال، سطح آب و پارامترهای مربوط به الوارها از ویژگی‌های مورد بررسی در مطالعه یادشده است. نتایج تحقیق نشان داد که احتمال انسداد پل‌ها و مخاطرات ناشی از آن با افزایش طول و با وجود شاخه‌ها زیاد می‌شود. به‌علاوه، تأثیر شیب کانال و سطح آب بر احتمال گرفتگی و مخاطرات آن نیز بررسی گردید.

منصوری و احدیان (Mansouri and Ahadian, 2016) با اجرای آزمایش، پدیده گرفتگی سرریزهای کلید پیاپویی را در شرایط وجود واریزه بررسی کردند و نشان دادند ویژگی‌های هندسی سازه و مشخصات واریزه‌ها تأثیر قابل توجهی بر میزان انسداد و کاهش ظرفیت عبور جریان دارند. همچنین مشخص شد که تجمع واریزه‌ها در نواحی ورودی سرریز می‌تواند عملکرد هیدرولیکی سازه را به‌طور محسوسی کاهش دهد؛ موضوعی که ضرورت بررسی راهکارهای کنترل و هدایت واریزه‌ها را در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد.

موجتان و همکاران (Mojtan *et al.*, 2022) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی، اثر برخورد واریزه‌های چوبی بزرگ شناور را با یک پل قوسی ساخته شده با مصالح بنایی بررسی کردند و نشان دادند اثر برخورد واریزه‌های شناور بر سازه پل

^۲ SABO Dams

^۱Innsbruck

جانمایی آنها تأثیر پارامترهای چون جهت حرکت واریزه‌های چوبی، قطر واریزه‌ها و اثر دبی جریان بررسی شده است. این محققان مشاهده کردند الوارها ابتدا با تیرک‌های فولادی برخورد می‌کنند و با چرخش و تغییر زاویه حرکت، به راحتی از بین پایه‌های پل عبور می‌کنند. این محققان جانمایی مناسبی از تیرک‌های فولادی را در بالادست پل‌ها برای افزایش راندمان عبور واریزه‌ها و کاهش احتمال گرفتگی دهانه ارائه دادند. اما همچنان ابهام‌هایی در خصوص جانمایی تیرک‌ها یا تأثیر دیگر پارامترها وجود دارد و لازم است تحقیقات در این زمینه ادامه یابد. از آنجاکه مطالعات آزمایشگاهی هزینه بر و زمان‌بر است بنابراین می‌توان از مدل‌های ریاضی برای توسعه تحقیقات در این زمینه استفاده کرد.



توسط این تدابیر ضروری است. در مطالعات هارادا و همکاران (Harada et al., 2017)، ساختاری متشکل از تیرهای فولادی برای استفاده در سدهای سابو ارائه می‌شود. این پیشنهاد در نتیجه اجرای آزمایش‌هایی که چرخش واریزه‌ها در داخل مخزن سدهای سابو و مکانیزم به دام افتادن آنها توسط تیرک‌های فولادی را در نظر می‌گیرد، پیگیری شد. در زمینه اصلاح رفتار و جهت حرکت الوارها پیش از رسیدن به پل‌ها برای کاهش انسداد دهانه‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های جمع‌آوری الوارها نیز محققان ژاپنی مطالعات محدود و جدیدی کرده‌اند. هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) در یک کانال آزمایشگاهی، اثر وجود لوله‌های فولادی را در اصلاح رفتار واریزه‌های چوبی و جهت حرکت آنها به سمت پل‌ها بررسی کردند. در مطالعات این محققان، موقعیت پایه‌های فولادی در بالادست و تیپ



شکل ۲- استفاده از تیرک‌های فولادی هدایت کننده واریزه چوبی پیش از پل‌ها در ژاپن

Fig 2- Use of steel guide beams for directing woody debris upstream of bridges in Japan

افزایش نسبت طول الوار به عرض دهانه، احتمال گیر افتادن الوارها و در نتیجه خطر انسداد پل افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت عبور جریان و افزایش خطر سیلاب گرفتگی در بالادست سازه شود. یافته‌های این تحقیق بر ضرورت لحاظ کردن انتقال مواد شناور، به‌ویژه الوارهای چوبی، در طراحی هیدرولیکی پل‌ها و دیگر سازه‌های تقاطعی رودخانه‌ها تأکید دارد.

در ادامه این تحقیقات و با هدف شناخت دقیق‌تر مکانیزم انتقال و تجمع الوارهای شناور در شرایط سیلابی، رستمی و

از مطالعات محدود در کشور که به‌طور اختصاصی به بررسی پدیده انسداد دهانه پل‌ها توسط الوارهای شناور پرداخته است، پژوهش رستمی و همکاران (Rostami et al., 2018) است. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل فیزیکی و اجرای آزمایش‌های کنترل شده، تأثیر ویژگی‌های هندسی پل را بر احتمال گیر افتادن الوارهای چوبی در دهانه پل ارزیابی می‌کند. نتایج تحقیق نشان داده است که وجود پایه‌های میانی و کاهش عرض مؤثر دهانه پل نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش احتمال انسداد و تشکیل تجمعات چوبی دارد. با

توجه قرار گرفته است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که این سازه‌ها می‌توانند با تغییر زاویه حرکت الوارها و هدایت مناسب آنها احتمال تجمع و انسداد را در پایه‌ها و دهانه پل کاهش دهند (Harada et al., 2018). با این حال، همچنان ابهام‌هایی در خصوص عملکرد این تدابیر تحت شرایط مختلف هیدرولیکی، جانمایی بهینه تیرک‌ها و اثر پارامترهای مختلف جریان وجود دارد. از سوی دیگر، مطالعات آزمایشگاهی گسترده به دلیل هزینه و زمان زیاد، همواره با محدودیت همراه است. در این شرایط، مدل‌های عددی سه‌بعدی می‌توانند ابزاری مناسب برای تحلیل رفتار واریزه‌های چوبی و ارزیابی عملکرد سازه‌های حفاظتی باشند. بر این اساس، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLOW-3D به بررسی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده و حفاظتی در کاهش خطر گرفتگی دهانه پل‌ها می‌پردازد و تلاش می‌کند ضمن استفاده از قابلیت مدل عددی، زمینه توسعه مطالعات آینده را فراهم آورد و راهکارهای مؤثرتر برای مدیریت خطرهای ناشی از واریزه‌های چوبی در رودخانه‌ها ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، رفتار واریزه‌های چوبی و عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی عددی شد. برای ارزیابی دقت مدل عددی، فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی و همچنین تحلیل سناریوها از نتایج مشاهدات آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) استفاده شد. ابتدا هندسه کانال، پل و آرایش تیرک‌های فولادی بر اساس شرایط آزمایشگاهی در محیط نرم‌افزار اتوکد ساخته شد. مدل شامل یک کانال با شیب مشخص، پایه‌های پل و مجموعه‌ای از تیرک‌های فولادی است که در بالادست پل و با آرایش‌های مختلف قرار گرفتند. به‌کارگیری تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در بالادست پل تحت سه سناریو: (۱) حالت بدون تیرک‌های هدایت‌کننده در بالادست پل، (۲) حالت دارای تیرک‌های هدایت‌کننده بر اساس آرایش پیشنهادی هارادا و همکاران

گودرزی (Rostami, & Goodarzi, 2019) با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D به شبیه‌سازی عددی این پدیده پرداختند. در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی الوارهای شناور با شکل‌های هندسی مختلف در هنگام نزدیک شدن به پل و فرآیند گیر افتادن آنها در شرایط بود یا نبود پایه‌های میانی بررسی گردید. نتایج تحقیق نشان داد که نرم‌افزار FLOW-3D می‌تواند با دقتی مناسب حرکت و اندرکنش اجسام شناور با جریان آب و سازه‌های هیدرولیکی را شبیه‌سازی کند و تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی ارائه دهد. همچنین مشخص شد که حضور پایه‌های پل و ویژگی‌های هندسی الوارها تأثیر قابل توجهی بر مسیر حرکت، نحوه چرخش و احتمال انسداد آنها دارد. بر اساس نتایج این مطالعه، پیشنهاد گردید که راهکارهای نوآورانه و سازه‌های کمکی به منظور هدایت، انحراف یا جلوگیری از تجمع الوارها در دهانه پل‌ها بررسی و توسعه داده شوند تا خطر انسداد و پیامدهای ناشی از آن در هنگام وقوع سیلاب کاهش یابد.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که انتقال و تجمع واریزه‌های چوبی در رودخانه‌ها، یکی از عوامل مهم در کاهش ظرفیت عبور سیلاب و افزایش خطر انسداد دهانه پل‌ها در زمان وقوع سیلاب‌های شدید است. تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های متوالی، ضعف پوشش گیاهی و وقوع سیلاب‌های پرانرژی، احتمال ورود تنه درختان و بقایای چوبی را به رودخانه‌ها افزایش می‌دهد و در نتیجه، مخاطرات ناشی از گرفتگی سازه‌های تقاطعی را تشدید می‌کند. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در کشورهای مختلف نشان داده‌اند که مشخصات هندسی الوارها، شرایط هیدرولیکی جریان، هندسه پل و نحوه جانمایی سازه‌های حفاظتی، تأثیر مستقیمی بر احتمال انسداد و میزان خطرپذیری سازه‌ها دارند.

در سال‌های اخیر استفاده از تیرک‌ها و پایه‌های فولادی محافظ به‌عنوان راهکاری برای کنترل مسیر حرکت واریزه‌های چوبی و کاهش احتمال گرفتگی دهانه پل‌ها مورد

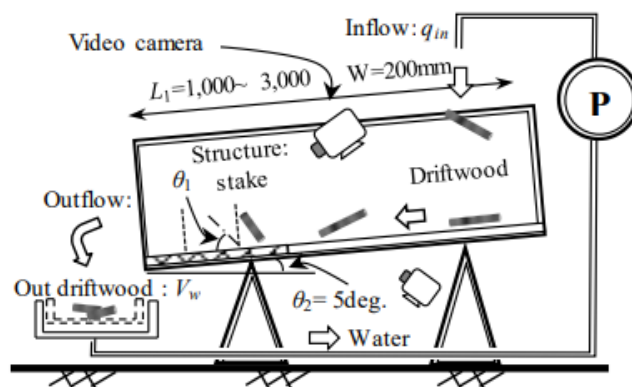
گرفتگی دهانه پل‌ها بررسی شود. در ادامه، به مشخصات مدل آزمایشگاهی، مدل عددی و روش ساخت مدل عددی پرداخته شده است.

معرفی مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) در آزمایشگاه کبوتو ساخته‌اند. این مدل شامل یک کانال مستطیلی با ابعاد ۲۰ سانتی متر ارتفاع، ۲۰ سانتی متر عرض و ۳۰۰ سانتی متر طول و زاویه شیب ۵ درجه است. از این کانال برای ارزیابی گرفتگی دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی و بررسی تاثیر به کارگیری تیرک‌های فولادی در بالادست پل در تغییر جهت و هدایت واریزه‌های چوبی از دهانه‌ها استفاده شده است. سازه پل توسط سه پایه پلی کربناتی به قطر ۱ سانتی-متر به فاصله ۵ سانتی-متر از یکدیگر در بخش انتهایی کانال نصب شده است. تیرک‌های فولادی نیز هم قطر پایه‌های پل هستند و در آزمایش‌هایی که نیاز به استفاده از آنها بوده با جانمایی تعریف شده‌ای به فاصله ۱۵ سانتی-متری از پایه‌های پل قرار دارند. در این مطالعه، از واریزه‌های چوبی به قطر ۳ میلی-متر و طول ۱۰ سانتی-متر استفاده شده است. دبی جریان (q_{IN}) و واریزه‌های چوبی از بالادست وارد کانال آزمایشگاهی می‌شوند. شکل (۳) نمایی شماتیک از مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

(Harada et al., 2018) و (۳) حالت دارای آرایش پیشنهادی محققان این مطالعه شبیه‌سازی گردید. علاوه بر این، تاثیر نحوه ورود واریزه‌های چوبی به جریان، شامل ورود منفرد (تک‌تک) و ورود همزمان چند الوار، و همچنین اثر تعداد الوارها بر احتمال گرفتگی دهانه‌های پل بررسی و تحلیل شد. واریزه‌های چوبی به صورت اجسام صلب شناور با مشخصات هندسی و فیزیکی یکسان شامل طول، قطر و چگالی ثابت در مدل تعریف شدند. این الوارها از بالادست وارد جریان می‌شوند و نحوه حرکت، چرخش، برخورد با تیرک‌های فولادی، عبور از دهانه‌های پل یا تجمع در اطراف پایه‌ها ارزیابی شد. اندرکنش میان جریان، الوارها و تیرک‌های فولادی با استفاده از قابلیت شبیه‌سازی اجسام صلب متحرک در نرم‌افزار FLOW-3D مدل‌سازی شد.

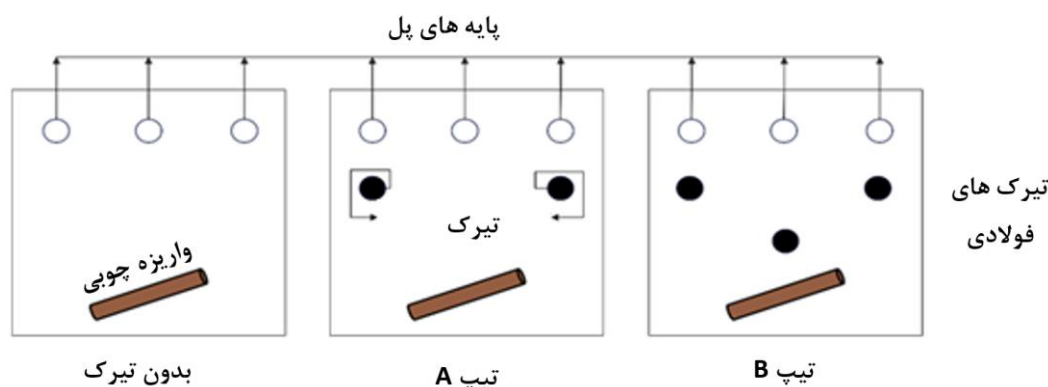
در هر شبیه‌سازی، پارامترهایی مانند تعداد و درصد الوارهای عبوری از دهانه‌های پل استخراج و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. آزمایش‌های مرجع در دامنه دبی ۱ تا ۲/۳ لیتر بر ثانیه اجرا شده‌اند و در این مطالعه، دامنه دبی گسترش یافت و محدوده دبی بین ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده گردید. سرانجام، نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی و یافته‌های مطالعات پیشین مقایسه شد تا قابلیت و دقت نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی رفتار واریزه‌های چوبی و ارزیابی عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در کاهش احتمال



شکل ۳- نمودار شماتیک مدل آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada et al., 2018)

Fig. 3- Schematic diagram of the experimental model used by Harada et al., (2018)

در تحقیق گفته شده، تغییر جانمایی تیرک‌ها در بالادست پل، تغییر دبی جریان ورودی به کانال و نحوه ورود واریزه‌های چوبی به داخل کانال آزمایش شدند. مطابق شکل (۴)، آزمایش‌ها در دو حالت بدون تیرک و با تیرک دنبال شده و حالت با تیرک نیز به دو تیپ A و B تقسیم شده است. کلیه آزمایش‌ها با دو دبی ۱ و $\frac{2}{3}$ لیتر بر ثانیه اجرا شده‌اند. زمانی که دبی آب کانال ۱ لیتر بر ثانیه باشد، عمق جریان $\frac{1}{1}$ سانتی‌متر و عدد فرود برابر با $\frac{1}{3}$ و زمانی که میزان دبی آب $\frac{2}{3}$ لیتر بر ثانیه باشد، عمق جریان $\frac{1}{9}$ سانتی‌متر و عدد فرود $\frac{1}{4}$ بوده است. در این آزمایش از ۵۰ الوار استفاده شده است که یک‌بار برای ۵۰ ثانیه و در هر ثانیه یک الوار (جمعاً ۵۰ الوار) و یک‌بار نیز ۵۰ الوار به‌طور همزمان وارد جریان شده‌اند. در هر آزمایش درصد عبور الوارها از سازه پل محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. در مطالعه حاضر و در راستای ارزیابی عملکرد نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی حرکت اجسام شناور در آب، حالت بدون تیرک و حالت تیپ B آزمایش‌های هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) انتخاب شده است.



شکل ۴- تیپ آرایش تیرک‌های فولادی پیش از پایه‌های پل در مدل آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada et al., 2018)

Fig. 4- Configuration of steel guide beams installed upstream of bridge piers in the experimental model of Harada et al., (2018)

معرفی مدل عددی

و سایر موانع موجود در مسیر جریان را شبیه‌سازی نماید. در این نرم‌افزار، معادلات حاکم بر جریان با استفاده از روش حجم محدود و روی شبکه‌های منظم مستطیلی گسسته‌سازی می‌شوند. اگرچه مبنای حل عددی در FLOW-3D روش حجم محدود است، اما به دلیل استفاده از شبکه‌های ساخت‌یافته، فرم ظاهری معادلات گسسته‌شده شباهت زیادی به روابط حاصل از روش تفاضل محدود دارد. بر این اساس، FLOW-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. در این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتگی^۱، مدل‌های مختلف آشفتگی استفاده می‌شوند که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل‌های

نرم‌افزار FLOW-3D یکی از مدل‌های عددی قدرتمند برای شبیه‌سازی مسائل پیچیده هیدرودینامیکی است و در تحلیل جریان‌های سه‌بعدی، ناپایا، دارای سطح آزاد و هندسه‌های پیچیده کاربرد گسترده‌ای دارد. از قابلیت‌های مهم این نرم‌افزار می‌توان به شبیه‌سازی حرکت انواع اجسام شناور در محیط‌های آبی، از جمله الوارهای چوبی، زباله‌ها و شناورها اشاره کرد. FLOW-3D قادر است اثر نیروهای مختلف مانند نیروهای هیدرودینامیکی، نیروی باد و نیروهای اصطکاکی را بر حرکت اجسام شناور لحاظ کند و همچنین اندرکنش آنها با سازه‌های هیدرولیکی مانند پل‌ها، سرریزها

¹ Turbulent Flow

و نیاز به سرعت محاسبات مناسب‌تر است، در حالی که LES برای مطالعات دقیق هیدرودینامیکی و تحلیل رفتار موضعی جریان، به‌ویژه در مسائل مرتبط با حرکت و تجمع واریزه‌های چوبی، دقت بالاتری ارائه می‌دهد. در پژوهش حاضر، استفاده همزمان از مدل‌های RNG و LES در نرم‌افزار FLOW-3D این امکان را فراهم می‌کند تا ضمن مقایسه دقت و عملکرد آنها، قابلیت هر مدل در شبیه‌سازی رفتار واریزه‌های چوبی و ارزیابی خطر گرفتگی دهانه پل‌ها بررسی گردد.

به طور کلی حرکت جسم صلب با شش درجه آزادی، به حرکت انتقالی و حرکت چرخشی تحت مرکزیت جرم تقسیم می‌شود که FLOW-3D قادر مدلسازی آن است. این تقسیم بندی حرکت با معادلات نیرو و گشتاور به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$F = m \frac{d\vec{U}_G}{dt} \quad (1)$$

$$\vec{T}_G = [j] \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times ([j] \cdot \vec{\omega}) \quad (2)$$

که در آن، (F) نیروی کل وارد بر جرم، (M) جرم جسم متحرک، ($\vec{U}_G$) سرعت مرکز جرم جسم متحرک، ($\vec{T}_G$) گشتاور کلی تحت مرکزیت جرم جسم متحرک، ([j]) تانسور ممان اینرسی، ($\vec{\omega}$) سرعت زاویه ای است.

معادلات پیوستگی و مومنوم حاکم بر حرکت اجسام متحرک در نرم‌افزار Flow-3D به صورت زیر هستند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{V_f}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \vec{u} A_f) = - \frac{\partial V_f}{\partial t} \quad (3)$$

که در آن، (V_f) نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و (A_f) نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان و (ρ) چگالی سیال و ($\vec{u}$) سرعت سیال است.

از آنجایی که سمت راست معادله (۴) به هنگام حرکت جسم متحرک از یک حجم کنترل دقت بیشتری دارد، بهتر است با عبارت فوق در معادله (۳) جایگزین شود.

k-ε، RNG¹ و LES² اشاره کرد. هر یک از این مدل‌ها مبانی تئوری، دقت و هزینه محاسباتی متفاوتی دارد و انتخاب آنها به نوع مسئله، مقیاس جریان و هدف مطالعه بستگی دارد. مدل RNG در واقع نسخه توسعه‌یافته‌ای از مدل آشفتگی-k-ε است. در این مدل، اثرهای آشفتگی با استفاده از معادلات میانگین‌گیری شده ناویر-استوکس شبیه‌سازی می‌شود. مدل RNG نسبت به مدل استاندارد k-ε در شبیه‌سازی جریان‌های دارای انحنا، جدایش جریان، گردابه‌های قوی و تغییرات شدید سرعت، توانایی بیشتری دارد. این مدل به دلیل پایداری مناسب، زمان محاسبات کمتر و نیاز پایین‌تر به توان پردازشی، در بسیاری از مسائل مهندسی هیدرولیک و شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌ها و اطراف سازه‌ها به کار می‌رود. با این حال، از آنجا که مدل RNG مبتنی بر میانگین‌گیری زمانی است، قادر به نمایش مستقیم ساختار واقعی گردابه‌های بزرگ و رفتار لحظه‌ای آشفتگی نیست. در مقابل، مدل LES یا شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، یکی از دقیق‌ترین روش‌های مدلسازی آشفتگی محسوب می‌شود. در این روش، گردابه‌های بزرگ و اصلی جریان به صورت مستقیم حل می‌شود و تنها گردابه‌های کوچک مقیاس مدل‌سازی می‌شوند. به همین دلیل، LES توانایی بالایی در بازنمایی رفتار واقعی جریان‌های پیچیده، ناپایدار و سه‌بعدی دارد. این مدل به‌ویژه در بررسی حرکت اجسام شناور، اندرکنش جریان با موانع، تشکیل گردابه‌ها و تحلیل پدیده‌هایی مانند تجمع واریزه‌های چوبی در دهانه پل‌ها عملکرد بسیار مناسبی دارد. با این همه، LES به شبکه‌بندی بسیار ریز، گام زمانی کوچک و توان پردازشی بالا نیاز دارد و هزینه محاسباتی آن نسبت به مدل RNG بسیار بیشتر است. به طور کلی، تفاوت اصلی این دو مدل در نحوه شبیه‌سازی آشفتگی است. مدل RNG آشفتگی را به صورت میانگین‌گیری شده و ساده‌تر حل می‌کند، در حالی که LES بخش عمده‌ای از ساختار واقعی گردابه‌ها و نوسان‌های جریان را مستقیماً شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین، مدل RNG برای مطالعات مهندسی با مقیاس بزرگ

² Large Eddy Simulation

¹ Re-Normalization Group

که در آن، (V_F) نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و (ρ) چگالی سیال است. مولفه‌های سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) هستند. (A_x) نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت (x) است، (A_z) و (A_y) به طور مشابه نسبت سطوح جریان در جهات (z) و (y) هستند. (R) و (ξ) مربوط به نوع سیستم مختصات هستند در مختصات کارتزین $R=1$ و $\xi=0$ است.

روش شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، از نرم‌افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان در یک کانال مستطیلی، انتقال الوارهای شناور و نحوه تعامل آنها با پل در دو حالت بدون تیرک و مجهز به تیرک‌های هدایت‌کننده تیپ B استفاده شد. هندسه کانال، پل و تیرک‌ها بر اساس مدل آزمایشگاهی و با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD ترسیم و سپس به محیط FLOW-3D منتقل گردید (شکل ۵). خواص فیزیکی سیال (آب)، ویژگی‌های الوارها از جمله چگالی، و همچنین شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان تعریف شدند.

$$\frac{\partial V_f}{\partial t} = \vec{U}_{obj} \cdot (\vec{n} S_{obj}) / V_{cell} \quad (4)$$

که در آن، $(\vec{U}_{obj})$ بردار سرعت جسم متحرک در سلول مش‌بندی شده، $(\vec{n})$ بردار واحد نرمال بر سطح جسم، (S_{obj}) مساحت مؤثر بخش از سطح جسم واقع در سلول محاسباتی و V_{cell} حجم سلول محاسباتی است. این رابطه بیان می‌کند که تنها مؤلفه سرعت عمود بر سطح جسم در تغییر حجم اشغال‌شده توسط جسم و در نتیجه تغییر کسر حجمی سیال نقش دارد.

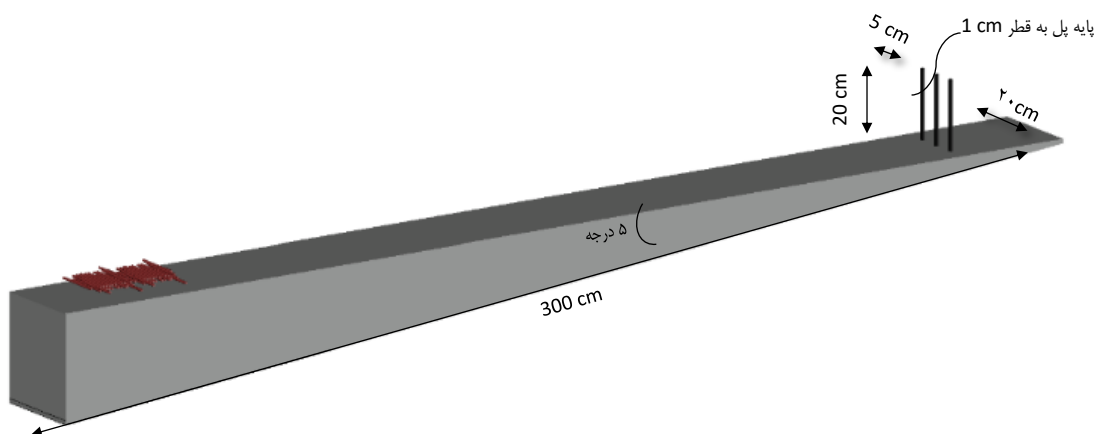
معادله مومنوم:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (\vec{u} A_f \cdot \nabla u) = -\frac{1}{\rho} [\nabla p + \nabla \cdot (\tau A_f)] + \vec{G} \quad (5)$$

که در آن، (p) فشار، (τ) تانسور تنش، $(\vec{G})$ گرانش و $(\vec{u})$ سرعت مرزی دیواره‌های جسم در حال حرکت است.

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم پیروی می‌کند و با نوشتن معادله تعادل جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. به صورت کلی معادله ۶ به دست می‌آید:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\partial \rho u A_x}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

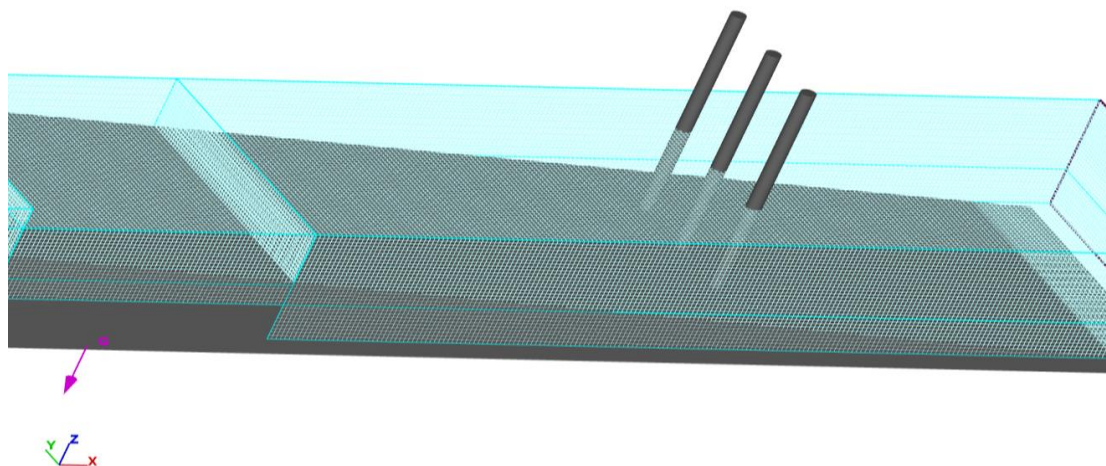


شکل ۵ - نمایش شماتیک مدل آزمایشگاهی مدل شده در نرم افزار اتوکد و معرفی شده به مدل FLOW-3D

Fig. 5- Schematic representation of the laboratory model, modeled in AutoCAD and imported into the FLOW-3D model

شبیه‌سازی عددی انتقال واریزه‌های چوبی در جریان آزاد مستلزم استفاده از شبکه‌بندی مناسب به منظور حل دقیق معادلات حاکم و بازنمایی صحیح هندسه اجسام شناور است. در این مطالعه، از چندین بلوک شبکه محاسباتی با ابعاد

سلول $3 \times 3 \times 3$ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۶). انتخاب این اندازه شبکه با توجه به ضخامت ۳ میلی‌متری الوارها بود که کوچک‌ترین بعد هندسی مدل محسوب می‌شد. استفاده از سلول‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر از ۳ میلی‌متر منجر به نمایش نامناسب هندسه الوارها و کاهش دقت شبیه‌سازی شد، در حالی که استفاده از شبکه‌های ریزتر، اگرچه دقت محاسبات را اندکی افزایش داد، اما موجب افزایش چشمگیر حجم محاسبات و زمان شبیه‌سازی شد. نتایج حساسیت سنجی شبکه محاسباتی مدل تهیه شده به ابعاد سلول‌های شبکه در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۶- نمایی از مش بندی کانال مدل سازی شده در نرم افزار FLOW-3D
Fig. 6- View of the meshed channel model in FLOW-3D software

نتایج تحلیل استقلال شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان با دبی ۱ لیتر بر ثانیه و ورود همزمان ۵۰ واریزه چوبی نشان داد که با کاهش اندازه سلول از ۳ به ۲ میلی‌متر، میزان عبور واریزه‌های چوبی تنها حدود ۱ درصد افزایش یافت، در حالی که تعداد سلول‌های محاسباتی از حدود ۱/۱ میلیون به ۲/۲ میلیون سلول افزایش یافت و در نتیجه، زمان اجرای شبیه‌سازی و هزینه محاسباتی به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد. از سوی دیگر، استفاده از شبکه با اندازه

سلول ۴ میلی‌متر، به دلیل بزرگ‌تر بودن ابعاد سلول نسبت به کوچک‌ترین بعد هندسی الوارها، موجب بازنمایی نامناسب هندسه اجسام شناور، کاهش دقت در شبیه‌سازی اندرکنش جریان و واریزه‌ها و در نهایت کاهش دقت نتایج گردید. بنابراین، با توجه به تعادل مناسب میان دقت شبیه‌سازی و هزینه محاسباتی، شبکه با ابعاد سلول $3 \times 3 \times 3$ میلی‌متر به‌عنوان شبکه بهینه برای شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب شد.

جدول ۱ - نتایج تحلیل حساسیت شبکه محاسباتی نسبت به اندازه سلول

Table 1- Results of the Grid Sensitivity Analysis for Different Cell Sizes

زمان محاسبات (ساعت) Computational Time(hr)	درصد عبور واریزه‌های چوبی Percentage of Woody Debris Passage	تعداد سلول Number of cells	اندازه سلول Cell Size
۲/۳	۱۴	۶۴۰۰۰۰	۴
۵/۱	۲۰	۱۱۰۰۰۰۰	۳
۱۷/۸	۲۲	۲۲۰۰۰۰۰	۲

شایان ذکر است، به دلیل شیب نسبتاً زیاد کانال و یک بلوک شبکه یکنواخت برای کل دامنه محاسباتی، تعداد سلول‌ها را به حدود ۲/۶ میلیون افزایش می‌داد. در چنین اختلاف ارتفاع قابل توجه بین ابتدا و انتهای مدل، استفاده از

شرایطی بخش قابل توجهی از سلول‌ها در نواحی فاقد جریان قرار می‌گرفتند و عملاً نقشی در محاسبات نداشتند. بنابراین، به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی و زمان شبیه‌سازی، دامنه محاسباتی به چندین بلوک شبکه تقسیم شد تا ضمن حفظ دقت نتایج، کارایی محاسبات نیز افزایش یابد.

• برای مرزهای نفوذناپذیر (دیواره‌ها و کف کانال) از شرط مرزی دیوار^۱ استفاده شد.

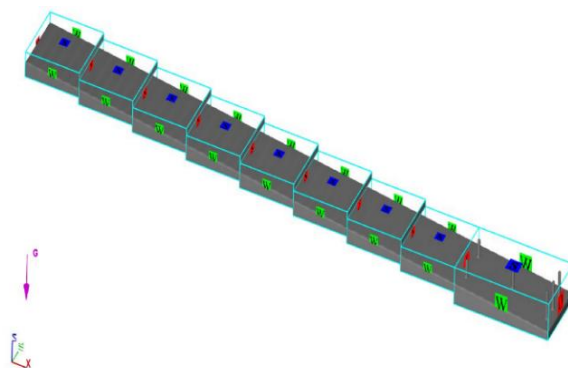
• برای مرز ورودی از شرط مرزی نرخ جریان^۲ با معرفی دبی جریان و عمق آب مطابق جدول (۲) استفاده شد.

جدول ۲ - مشخصات جریان معرفی شده به مرز ورودی مدل عددی

Table 2- Flow Conditions Assigned to the Numerical Model Inlet Boundary

دامنه دبی جریان معرفی شده به مرز ورودی مدل Range of Flow Discharge Applied at the Model Inlet Boundary	دامنه عمق جریان معرفی شده به مدل Range of Flow Depth Applied to the Model
۱ تا ۲/۳ لیتر بر ثانیه	۱/۱ تا ۱/۹ سانتی‌متر

- برای مرز خروجی از شرط مرزی خروجی^۳ استفاده شد.
- برای مرز بالای شبکه محاسباتی مدل، شرط مرزی مرز متقارن^۴ اعمال شد. پروفیل سطح آب در کانال، توسط مدل و بر اساس روش حجم سیال^۵ تعیین خواهد شد.
- مرزهای مشترک مش بلوک‌ها از شرط مرزی متقارن به منظور تداوم و یکنواختی جریان در بین بلوک‌ها استفاده شد
- در شکل (۷)، نمایی از نحوه معرفی شرط مرزی‌ها در مدل عددی نشان داده شده است.



شکل ۷ - نمایی از شرایط مرزی معرفی شده به هر وجه مدل مورد بررسی در نرم افزار FLWO-3D

Fig. 7- View of the boundary conditions assigned to each face of the computational domain in the FLOW-3D model

مطابق شرایط مدل آزمایشگاهی، واریزه‌های چوبی در نزدیکی سطح آزاد آب رها شدند و همین شرایط در مدل اولیه واریزه‌ها نسبت به جهت جریان می‌تواند بر مسیر

⁴ Symmetry
⁵ Volum of Fluid (VOF)

¹ wall
² Volume Flow Rate
³ Outflow

این، بررسی عملکرد سامانه پیشنهادی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و شرایط نزدیک‌تر به نمونه واقعی می‌تواند موضوع تحقیقات آینده باشد.

واسنجی و صحت مدل عددی

به منظور ارزیابی دقت مدل عددی FLOW-3D و انتخاب مدل آشفتگی مناسب، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) مقایسه شد. معیار اصلی مقایسه، درصد عبور الوارهای چوبی از بین پایه‌های پل بود. برای این منظور، شبیه‌سازی‌ها برای دو دبی ۱ و ۲/۳ لیتر بر ثانیه و با ورود همزمان ۵۰ الوار به جریان، با استفاده از دو مدل آشفتگی RNG و LES صورت گرفت. شکل (۸) نمونه‌ای از فرآیند حرکت الوارها، تجمع آنها در بالادست پل و یا عبور آنها از دهانه پل را در شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار جانبی FLOW-3D به نام FLOW-3D POST نشان می‌دهد. پس از شبیه‌سازی‌ها، تعداد الوارهای عبور کرده از بین پایه‌های پل شمرده و درصد عبور آنها تعیین شد.

شکل (۹) مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی را برای شرایط ورود همزمان ۵۰ الوار نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها، درصد خطای نسبی ($\text{Error} = |P_{\text{num}} - P_{\text{exp}}|$) بین نتایج عددی و آزمایشگاهی محاسبه شد. نتایج نشان داد که در دبی ۱ لیتر بر ثانیه، خطای مدل LES حدود ۵ درصد و خطای مدل RNG حدود ۵۰ درصد است. در دبی ۲/۳ لیتر بر ثانیه، خطای مدل LES و RNG به ترتیب حدود ۳۰ و ۵۰ درصد به دست آمد. بنابراین، مدل LES در هر دو شرایط مورد بررسی تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی داشته‌است و به طور متوسط حدود ۳۳ درصد خطای کمتری نسبت به مدل RNG نشان می‌دهد. میانگین خطای نسبی مدل LES در دو حالت بررسی‌شده برابر با ۱۷/۵ درصد به دست آمد. اگرچه تعداد حالات موجود برای اعتبارسنجی محدود است، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل LES توانایی مناسبی در بازتولید روند کلی انتقال و عبور الوارهای شناور از دهانه پل را دارد و عملکرد آن نسبت به مدل RNG به‌طور

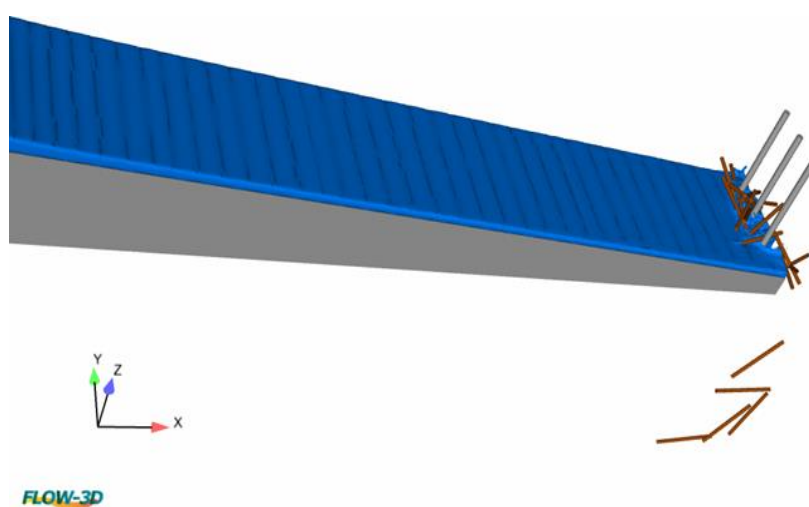
حرکت، احتمال برخورد با پایه‌های پل و در نهایت میزان انسداد تأثیرگذار باشد، چهار آرایش مختلف برای موقعیت زاویه‌ای اولیه واریزه‌ها در نظر گرفته شد. در این راستا، واریزه‌ها به ترتیب با زاویه‌های صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نسبت به جهت جریان وارد کانال شدند. برای هر یک از این حالات، شبیه‌سازی به صورت مستقل اجرا و درصد عبور واریزه‌ها از دهانه پل محاسبه گردید. به منظور کاهش اثر شرایط اولیه و افزایش قابلیت تعمیم نتایج، میانگین درصد عبور حاصل از تمامی تکرارها به عنوان نتیجه نهایی هر سناریو گزارش شد.

نتایج و بحث

در این بخش پس از تهیه هندسه مدل و معرفی خصوصیات جریان و الوارهای چوبی و همچنین شرایط مرزی، به تحلیل یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته می‌شود. هدف اصلی، بررسی تأثیر تیرک‌های فولادی بر بهبود عبور واریزه‌های چوبی از میان پایه‌های پل و کاهش احتمال انسداد دهانه‌ها است. این تحلیل شامل مقایسه میان آرایش‌های مختلف تیرک‌ها، بررسی دبی‌های متفاوت، نحوه ورود واریزه‌ها، و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی پژوهش هارادا و همکاران (Harada et al., 2018) است. یکی از محدودیت‌های این پژوهش، استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک برای واسنجی مدل عددی است. با توجه به عمق کم جریان (۱/۱ تا ۱/۹ سانتی‌متر) و قطر ۳ میلی‌متری واریزه‌های چوبی، احتمال تأثیرپذیری نتایج آزمایشگاهی از اثرهای مقیاس، نیروهای لزوجتی و کشش سطحی وجود دارد. با این حال، در مدل عددی حاضر از شبکه محاسباتی با ابعاد سلول $3 \times 3 \times 3$ میلی‌متر، معادل کوچک‌ترین بعد هندسی واریزه‌ها، استفاده شد تا هندسه و حرکت اجسام شناور با دقت مناسب بازنمایی شود. از آنجا که هدف اصلی پژوهش، مقایسه عملکرد نسبی آرایش‌های مختلف تیرک‌های هدایت‌کننده بوده است، انتظار می‌رود تأثیر این محدودیت بر روند کلی نتایج و مقایسه سناریوها محدود باشد. با وجود

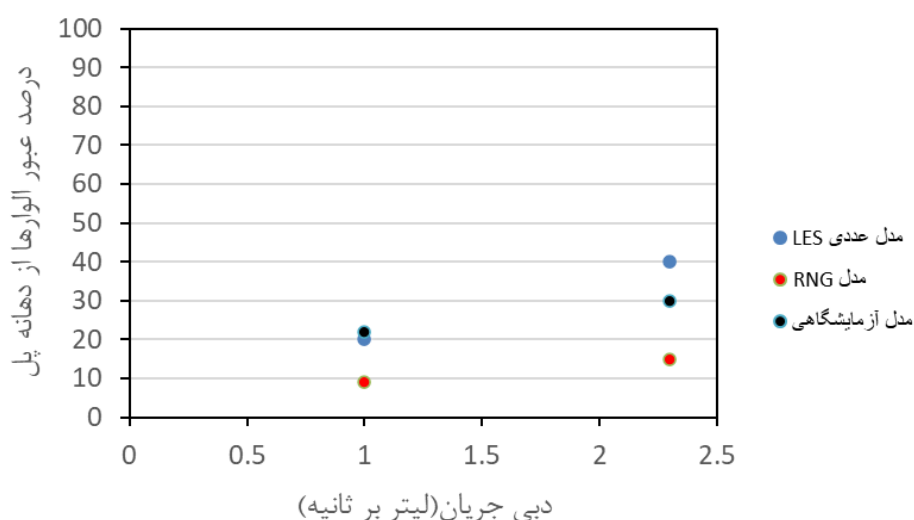
محسوسی بهتر است. بر این اساس، مدل LES به عنوان مدل آشفستگی برتر برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. برای صحت سنجی مدل LES، شبیه‌سازی‌ها برای ورود ۵۰ الوار به صورت تک به تک نیز به اجرا درآمد. نتایج این مرحله در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در دبی ۱ لیتر بر ثانیه، خطای مدل عددی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی در حدود ۳۰ درصد و در دبی

۲/۳ لیتر بر ثانیه، در حدود ۶ درصد است. متوسط خطای مدل در حدود ۱۸ درصد تعیین شده است. نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل نشان داد که خطای مدل LES در شبیه‌سازی حرکت الوارهای چوبی دامنه ۱۷ تا ۱۸ درصد نسبت به نتایج مشاهداتی متغیر است. بنابراین پارامترهای معرفی شده به مدل نیز برای مدل‌سازی‌های دیگر لحاظ شد.



شکل ۸- نمایی از شبیه‌سازی حرکت واریزه‌های چوبی از محدوده پل بدون استفاده از تیرک‌های حفاظتی

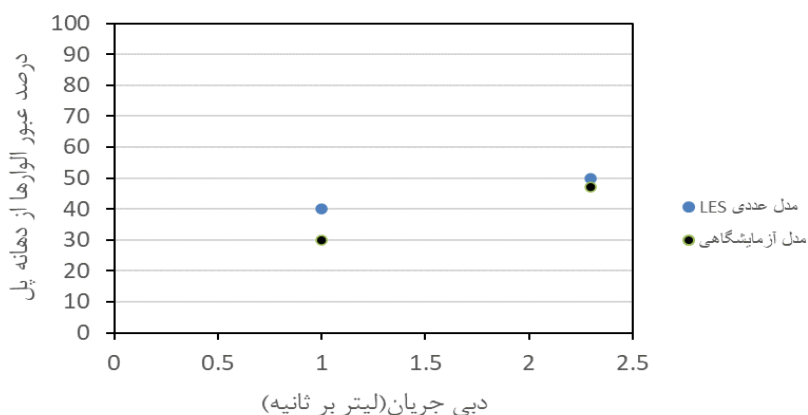
Fig. 8- View of the simulated movement of woody debris through the bridge opening without protective steel piles



شکل ۹- نمودار مقایسه بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای شرایط ورود ۵۰ الوار به صورت همزمان

Fig. 9- Comparison between numerical and experimental results for the simultaneous release of 50 logs

ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی...



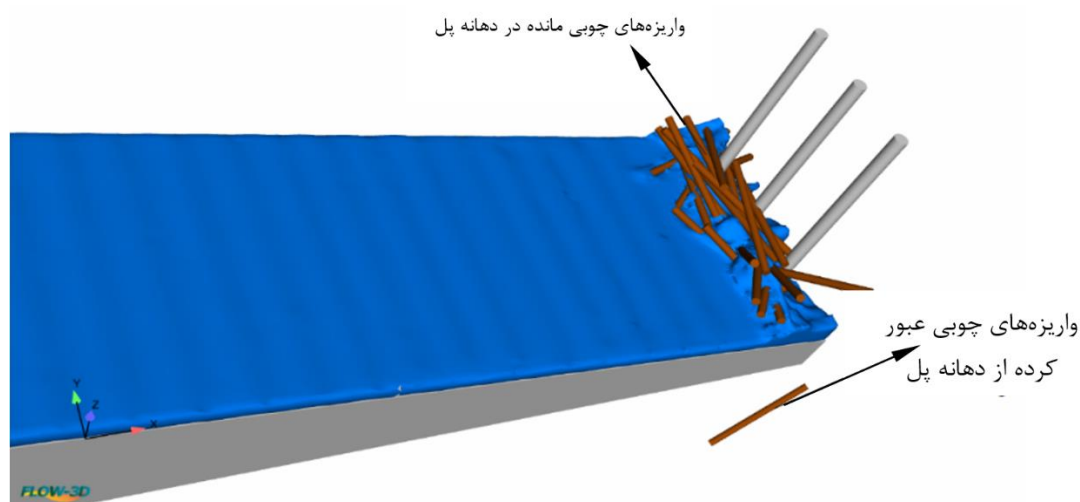
شکل ۱۰- نمودار مقایسه بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی برای شرایط ورود ۵۰ الوار به صورت تک‌به‌تک

Fig. 10- Comparison between numerical and experimental results for the sequential release of 50 logs

دهانه‌های پل و در نتیجه افزایش تراز آب و پس‌زدگی جریان در بالادست سازه شده‌اند. در مقابل، مطابق شکل (۱۲)، استفاده از تیرک‌های هدایت‌کننده با آرایش تیپ B موجب اصلاح مسیر حرکت الوارها و هدایت آنها به سمت دهانه‌های پل شده است. در این شرایط، الوارها با حداقل برخورد و گیر افتادگی در پایه‌های پل از دهانه‌ها عبور کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری تیرک‌های هدایت‌کننده نقش مؤثری در کاهش تجمع الوارها در بالادست پل و افزایش میزان عبور آنها از دهانه‌های پل دارد و در نتیجه خطر انسداد و پس‌زدگی جریان را به طور محسوسی کاهش می‌دهد.

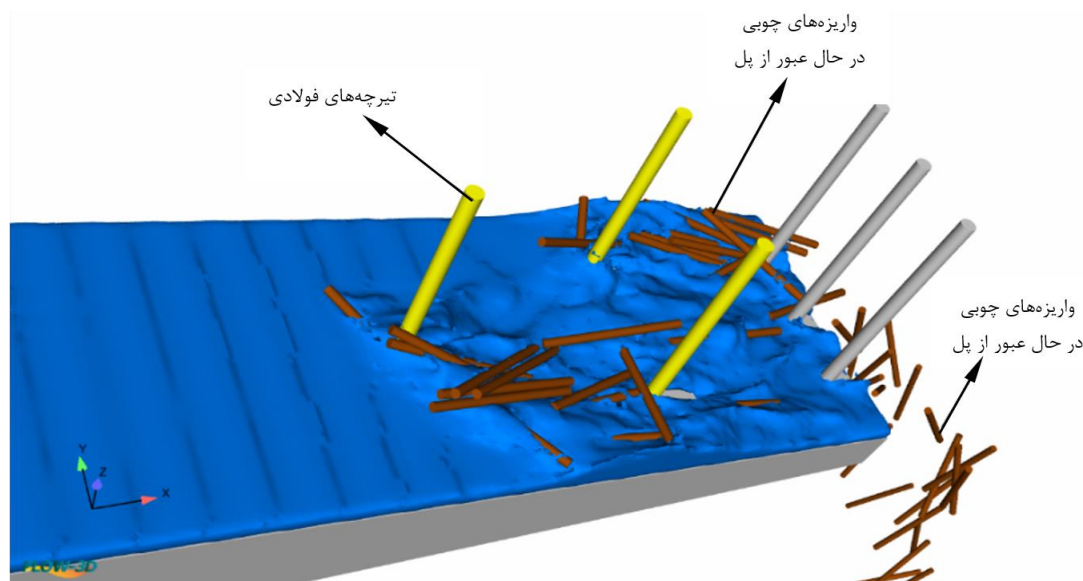
نتایج بررسی سناریوهای تعریف شده

به منظور بررسی اثر استفاده از تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده الوارهای چوبی در بالادست پل، شبیه‌سازی‌ها در دو سناریوی «بدون تیرک هدایت‌کننده» و «با تیرک هدایت‌کننده» اجرا شد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نتایج شبیه‌سازی حرکت همزمان ۵۰ الوار چوبی در کانال و نحوه مواجهه آنها با هر یک از سناریوهای مورد بررسی را در محیط نرم‌افزار FLOW-3D POST نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در حالت بدون تیرک‌های هدایت‌کننده (تیپ A)، تعداد قابل توجهی از الوارها در بالادست پل تجمع یافته و موجب انسداد



شکل ۱۱- نتیجه شبیه‌سازی حرکت واریزه‌های چوبی در کانال و عبور از محدوده پل در شرایط استفاده نکردن از تیرک‌های حفاظتی

Fig. 11- Simulation results of woody debris movement in the channel under bridge conditions without protective steel piles

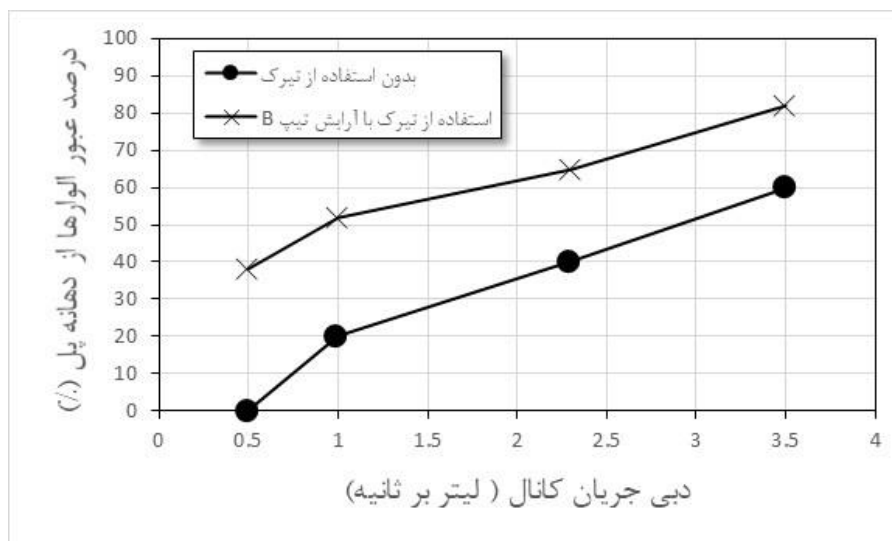


شکل ۱۲ - نتیجه شبیه‌سازی حرکت واریزه‌های چوبی در کانال و عبور از محدوده پل در شرایط وجود تیرک‌های حفاظتی با آرایش تیپ B
 Fig. 12- Simulation of woody debris movement in the channel and passage through the bridge reach in the presence of Type B protective pile arrangement

آنها در صورت ورود همزمان الوارها به داخل جریان می‌شود. شکل (۱۴) روند تغییرات درصد عبور الوارهای چوبی در دهانه‌های پل در شرایط بدون تیرک و با تیرک‌های هدایت کننده را برای ورود ۵۰ الوار به صورت منفرد (تک به تک) به داخل کانال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده نکردن از تیرک‌های هدایت کننده ۲۰ تا ۷۰ درصد برای دبی ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه است. در حالی که دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده از تیرک‌های هدایت کننده تیپ B، ۷۰ تا ۹۰ درصد است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از تیرک‌ها مطابق تیپ B باعث کاهش گرفتگی به میزان متوسط ۳۶ درصد بیشتر نسبت به حالت استفاده نکردن از آنها در صورت ورود منفرد الوارها به داخل جریان می‌شود.

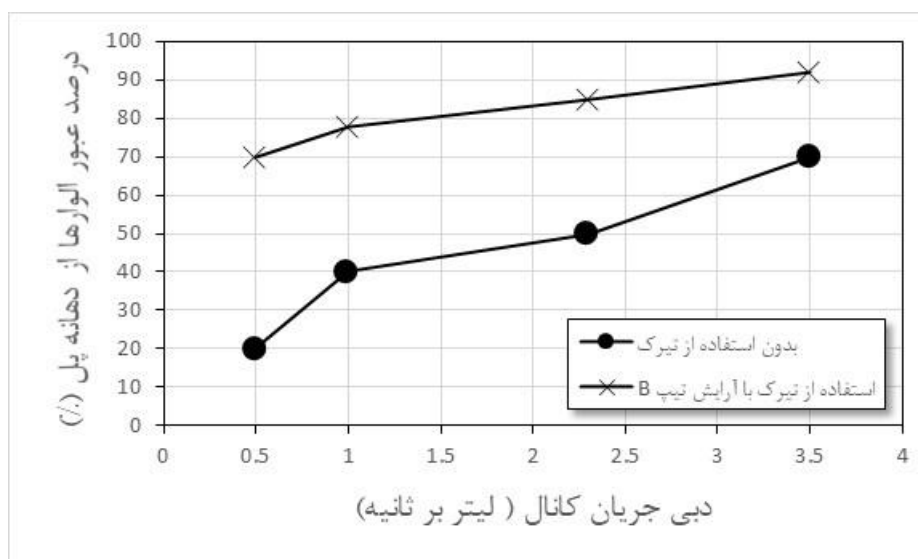
به منظور گسترش دامنه دبی‌های جریان نسبت به مدل آزمایشگاهی، دو دبی ۰/۵ و ۳/۵ مترمکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۳) روند تغییرات درصد عبور الوارهای چوبی در دهانه‌های پل در شرایط بدون تیرک و با تیرک‌های هدایت کننده را برای ورود ۵۰ الوار به صورت همزمان به داخل کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده نکردن از تیرک‌های هدایت کننده، صفر تا ۶۰ درصد برای دبی ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه است. در حالی که دامنه تغییرات درصد عبور الوارها از دهانه پل در شرایط استفاده کردن از تیرک‌های هدایت کننده تیپ B، ۳۸ تا ۸۲ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از تیرک‌ها مطابق تیپ B باعث کاهش گرفتگی به میزان متوسط ۲۹/۵ درصد بیشتر نسبت به حالت استفاده نکردن از

ارزیابی عددی عملکرد تیرک‌های فولادی حفاظتی در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها توسط واریزه‌های چوبی...



شکل ۱۳ - نمودار درصد عبور ۵۰ واریزه چوبی وارده شده به صورت همزمان به داخل جریان با دبی‌های مختلف و در شرایط استفاده کردن و یا استفاده نکردن از تیرک‌های فولادی

Fig. 13- Comparison of the passage percentage of 50 simultaneously introduced woody debris elements under different flow discharges, with and without steel guide piles.

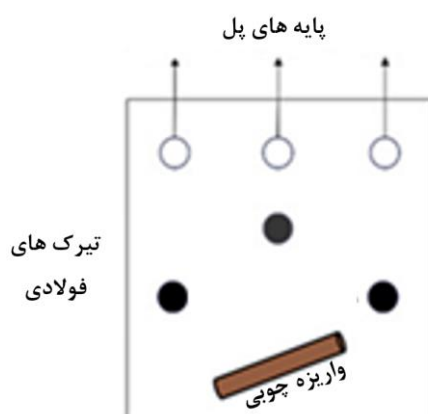


شکل ۱۴ - نمودار درصد عبور ۵۰ واریزه چوبی وارد شده به صورت منفرد (تک به تک) به داخل جریان با دبی‌های مختلف و در شرایط استفاده کردن و یا استفاده نکردن از تیرک‌های فولادی

Fig. 14- Comparison of the passage percentage of 50 individually introduced woody debris elements under different flow discharges, with and without steel guide piles.

در این مطالعه، آرایش جدیدی مطابق شکل (۱۵) و با پیشنهادی، آرایش تیرک‌ها به گونه‌ای نسبت به تیپ B نام تیپ C معرفی شد و با شبیه‌سازی عددی کارکرد آن جابه‌جا شده‌اند که دو تیرک در ردیف اول و یک تیرک تکی نسبت به تیپ B معرفی شده توسط هارادا و همکاران بین آن‌ها و پل قرار گرفته است. این تغییر آرایش به این دلیل بود که در تیپ B اولین برخورد واریزه‌های چوبی با یک (Harada et al., 2018) ارزیابی گردید. در تیپ C

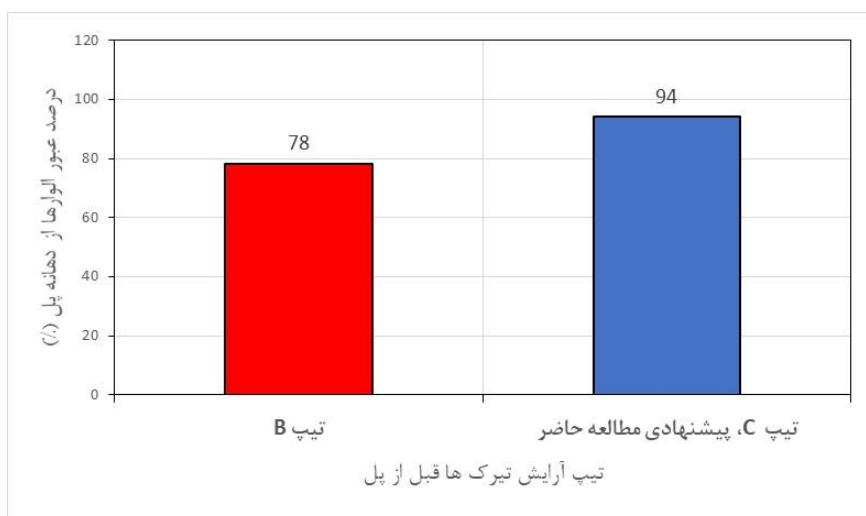
تیرک هدایت کننده منجر به تغییر زاویهٔ واریزه‌های چوبی می‌شود، اما ردیف بعدی تیرک‌ها به دلیل فاصلهٔ زیاد از همدیگر تأثیر کمی در تغییر جهت مطلوب‌تر آن‌ها داشت. بنابراین، با جابه‌جایی این دو ردیف برخورد اولیه با دو تیرک فولادی می‌تواند به تغییر جهت واریزه‌ها کمک کند و اگر واریزه چوبی زاویه مناسبی برای عبور از دهانه پل نداشته باشد، تیرک تکی در ردیف بعدی نقش مهمی در هدایت آن خواهد داشت.



شکل ۱۵- آرایش تیرک‌های فولادی در تیپ C (تیپ پیشنهادی مطالعه حاضر)

Fig. 15- Configuration of steel guide piles in Type C arrangement (proposed in the present study)

به منظور مقایسه دو تیپ B و C با یکدیگر، شبیه‌سازی عددی با دبی ۲/۳ لیتر بر ثانیه و در شرایط ورود ۲۰ الوار چوبی به صورت همزمان به داخل کانال جریان اجرا شد. مطابق شکل (۱۶)، میزان عبور الوارهای چوبی از دهانه‌های پل برای تیپ B برابر ۷۸ درصد و برای تیپ C برابر ۹۴ درصد به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تیپ C عملکرد بهتری (۱۶ درصد بیشتر) نسبت به تیپ B دارد و تنها ۶ درصد از الوارهای چوبی از داخل دهانه‌های پل عبور نکرده‌اند.



شکل ۱۶- مقایسهٔ درصد عبور ۲۰ الوار به صورت همزمان از دهانهٔ پل تحت آرایش‌های مختلف قرارگیری تیرک‌های فولادی

Fig. 16- Comparison of the percentage of successful passage of 20 simultaneously released logs through the bridge opening under different steel guide-pile arrangements.

تغییر الگوی جریان و جابه‌جایی نواحی بازچرخش، موجب توزیع مناسب‌تر الوارها در عرض کانال و افزایش قابلیت عبور آنها از دهانه‌های پل می‌شود

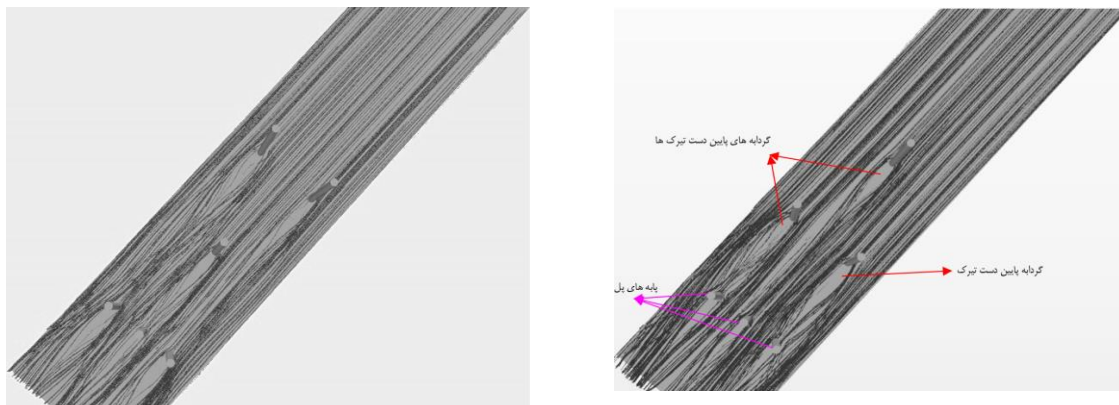
شکل (۱۸) میدان سرعت جریان در محدوده پل و تیرک‌های هدایت‌کننده را برای دو آرایش تیپ B و C به همراه مسیر حرکت واریزه‌های چوبی و نحوه عبور آنها از دهانه‌های پل نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱۸-الف) مشاهده می‌شود، در آرایش تیپ B فاصله نسبتاً زیاد گردابه تشکیل‌شده در پایین‌دست تیرک اول تا پایه میانی پل سبب شده است این ناحیه بازچرخشی نتواند تا مجاورت پایه توسعه یابد. در نتیجه، جریان با سرعت بیشتری در اطراف پایه میانی عبور می‌کند و ناحیه‌ای با فشار کمتر در بالادست آن ایجاد می‌شود. این شرایط موجب همگرایی خطوط جریان به سمت پایه میانی نیز می‌شود و بخشی از واریزه‌های چوبی تحت تأثیر این الگوی جریان به سمت پشت پایه هدایت خواهد شد. در نتیجه، احتمال برخورد، تجمع و گیر افتادن واریزه‌ها در مجاورت پایه میانی افزایش می‌یابد. در مقابل، مطابق شکل (۱۸-ب)، در آرایش تیپ C گردابه تشکیل‌شده در پایین‌دست تیرک میانی تا نزدیکی پایه میانی گسترش می‌یابد و موجب کاهش سرعت جریان در این ناحیه می‌شود. کاهش سرعت جریان با افزایش نسبی فشار در بالادست پایه میانی همراه است و از تمرکز خطوط جریان در اطراف پایه جلوگیری می‌کند. در این شرایط، گردابه ایجادشده بین تیرک میانی و پایه پل به‌عنوان ناحیه-ای انحراف‌دهنده عمل می‌کند و مانع نزدیک شدن مستقیم واریزه‌های چوبی به پایه میانی می‌شود. در نتیجه، واریزه‌ها تحت تأثیر جریان اصلی به سمت دهانه‌های باز پل هدایت می‌شود و احتمال برخورد و ماندگاری آنها در اطراف پایه میانی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

به منظور ارزیابی دلیل بهبود عملکرد آرایش تیپ C (پیشنهادی مطالعه حاضر) نسبت به آرایش تیپ B (پیشنهادی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018)، الگوی جریان در محدوده بالادست پل مورد شبیه‌سازی استخراج شد.

شکل (۱۷) الگوی خطوط جریان در اطراف تیرک‌های هدایت‌کننده و پایه‌های پل را برای دو آرایش B و C تیرک‌ها نشان می‌دهد. در هر دو حالت، عبور جریان از اطراف تیرک‌های فولادی موجب تشکیل نواحی جداسازی جریان و گردابه‌های بازچرخشی در پایین‌دست آنها شده است. این گردابه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت مسیر حرکت الوارهای شناور و نحوه توزیع آنها در عرض کانال دارند.

در آرایش تیپ B (یک تیرک در بالادست و دو تیرک در پایین‌دست)، گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت تیرک‌ها سبب تمرکز بخشی از خطوط جریان به سمت ناحیه مرکزی کانال و مجاورت پایه میانی پل شده‌اند (شکل ۱۷-الف). در نتیجه، احتمال هدایت الوارها به سمت پایه میانی پل افزایش یافته و برخورد آنها با پایه میانی و گیر افتادن در بالادست پل محتمل‌تر است. این وضعیت زمینه تجمع واریزه‌های چوبی در بالادست پل، کاهش سطح مؤثر عبور جریان و در نهایت افزایش خطر انسداد دهانه‌های پل را فراهم می‌کند.

در مقابل، در آرایش تیپ C (دو تیرک در بالادست و یک تیرک در موقعیت مرکزی و نزدیک به پایه میانی)، میدان جریان به گونه‌ای تغییر یافته است که گردابه تشکیل‌شده در پشت تیرک مرکزی به عنوان ناحیه محافظ عمل می‌کند و از تمرکز مستقیم خطوط جریان و الوارهای شناور در مجاورت پایه میانی جلوگیری خواهد کرد (شکل ۱۷-ب). در این حالت، مسیر حرکت الوارها به سمت دهانه‌های آزاد پل هدایت می‌شود و احتمال برخورد آنها با پایه میانی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، تیرک مرکزی با



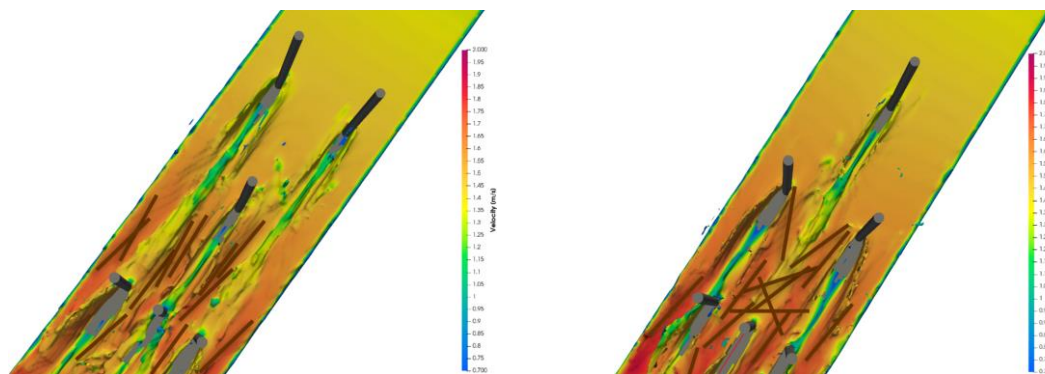
ب- الگوی خطوط جریان در مدل آرایش تیپ C تیرک‌های هدایت‌کننده

الف- الگوی خطوط جریان در مدل آرایش تیپ B تیرک‌های هدایت‌کننده

شکل ۱۷- مقایسه الگوی خطوط جریان در پایین دست تیرک‌های هدایت‌کننده واریزه‌های چوبی با آرایش مختلف

Fig. 17- Comparison of Streamline Patterns Downstream of Large-Wood Deflection Piles with Different Configurations

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که آرایش تیپ C با اصلاح ساختار میدان جریان و ایجاد ناحیه‌ای بازچرخشی محافظ در مقابل پایه میانی، عملکرد مؤثرتری در هدایت واریزه‌های چوبی به سمت دهانه‌های پل دارد و در مقایسه با آرایش تیپ B، خطر انسداد دهانه‌ها و تجمع واریزه‌ها در بالادست پل را کاهش می‌دهد.



ب- مدل آرایش تیپ C

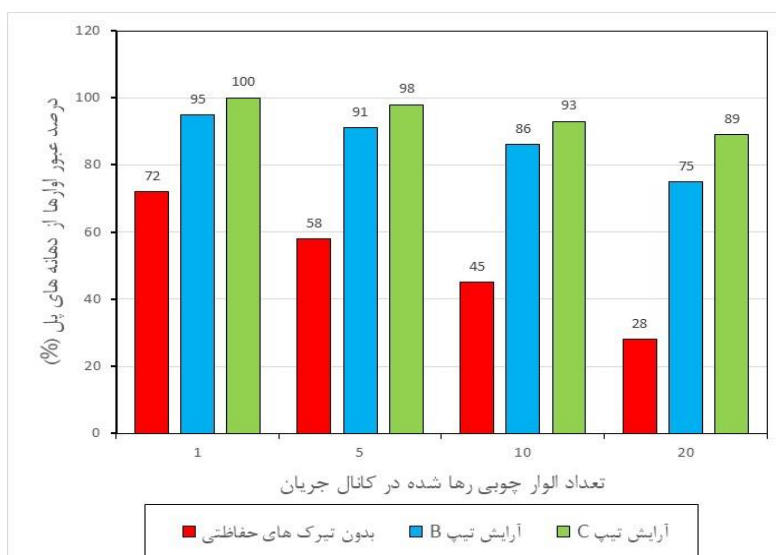
الف- مدل آرایش تیپ B

شکل ۱۸- مقایسه میدان سرعت جریان و الگوی حرکت واریزه‌های چوبی در محدوده پل و تیرک‌های هدایت‌کننده با آرایش‌های مختلف

Fig. 18- Comparison of Flow Velocity Distribution and Large-Wood Transport Patterns around the Bridge and Guiding Piles under Different Configurations

به منظور بررسی اثر تعداد الوارها بر عملکرد تیرک‌های هدایت‌کننده، چهار شبیه‌سازی دیگر برای پل بدون تیرک‌های هدایت‌کننده و با تیرک‌های هدایت‌کننده مطابق آرایش تیپ B و C اجرا شد. شبیه‌سازی‌ها برای دبی‌های ۰/۵ تا ۳/۵ لیتر بر ثانیه ورود همزمان ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ الوار چوبی در کانال طراحی شد. در مجموع ۱۶ شبیه‌سازی اجرا گردید و درصد عبور واریزه‌های چوبی از دهانه پل تعیین شد. متوسط درصد عبور الوارها برای تمامی دبی‌های شبیه‌سازی شده، در هر یک از سناریوهای مربوط به تعداد الوارهای رهاسده، محاسبه شد. شکل (۱۹) نتایج درصد عبور الوارها را برای هریک از سناریوهای، بر حسب تعداد الوارهای رهاسخ، را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با

افزایش تعداد الوارها از ۱ عدد به ۲۰ عدد، درصد عبور آن‌ها از میان پایه‌های پل بدون تیرک‌های حفاظتی به ترتیب از ۷۲ درصد به ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. در این حالت، به‌طور متوسط ۵۱ درصد واریزه‌های چوبی از دهانه‌های پل عبور کرده‌اند. با به‌کارگیری تیرک‌های هدایت‌کننده تیپ B پیشنهادی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018)، درصد عبور الوارها از داخل دهانه پل با افزایش تعداد الوارها از یک عدد به ۲۰ عدد، به ترتیب از ۹۵ درصد به ۷۵ درصد کاهش یافته است. در این حالت، به‌طور متوسط ۸۷ درصد واریزه‌های چوبی از دهانه‌های پل عبور کرده‌اند. با به‌کارگیری تیرک‌های هدایت‌کننده تیپ C، درصد عبور واریزه‌های چوبی از داخل دهانه پل با افزایش تعداد الوارها از یک عدد



شکل ۱۹- تاثیر نقش تعداد الوارها و آرایش تیرک‌های حفاظتی بر گذر واریزه‌های چوبی از دهانه پل

Fig. 19- Effects of log quantity and protective pile configuration on the passage of woody debris through the bridge opening

نتیجه‌گیری

دارد. بدین ترتیب، فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر قابلیت مدل‌سازی عددی سه‌بعدی برای تحلیل اندرکنش جریان، واریزه‌های شناور و سازه‌های هیدرولیکی تأیید گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که استفاده از تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در بالادست پل، با اصلاح مسیر حرکت واریزه‌ها و کاهش احتمال برخورد آن‌ها با پایه‌های پل، موجب افزایش قابل توجه درصد عبور الوارها و کاهش خطر گرفتگی دهانه‌ها می‌شود. همچنین مشخص شد که آرایش پیشنهادی تیپ

پژوهش حاضر با هدف بررسی قابلیت مدل عددی FLOW-3D در شبیه‌سازی انتقال واریزه‌های چوبی و ارزیابی عملکرد تیرک‌های فولادی هدایت‌کننده در کاهش خطر انسداد دهانه پل‌ها به‌اجرا در آمد. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که مدل LES با میانگین خطای حدود ۱۸ درصد، توانایی مناسبی در بازنمایی رفتار واریزه‌های چوبی و فرآیند عبور یا تجمع آن‌ها در محدوده پل

C ارائه شده در این پژوهش نسبت به آرایش مرجع تیپ B، پیشنهادی هارادا و همکاران (Harada *et al.*, 2018)، عملکرد بهتری دارد و با ایجاد ناحیه‌ای بازچرخشی محافظ در مجاورت پایه میانی پل، عبور واریزه‌های چوبی را تا ۱۶ درصد افزایش می‌دهد. این نتایج فرضیه دوم پژوهش را مبنی بر تأثیر آرایش تیرک‌ها بر عملکرد سامانه هدایت‌کننده نیز تأیید می‌کند. برای تحلیل انتقال واریزه‌های چوبی در مجاورت پل‌ها، تبیین هیدرودینامیکی عملکرد تیرک‌های هدایت‌کننده و ارائه آرایش جدید تیپ C به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش خطر انسداد پل‌ها است. نتایج نشان داد که علاوه بر تعداد تیرک‌ها، آرایش و جانمایی آن‌ها نسبت به پایه‌های پل نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار میدان جریان و عملکرد سامانه دارد؛ به گونه‌ای که آرایش پیشنهادی تیپ C با کاهش احتمال تجمع الوارها در اطراف پایه میانی و افزایش نرخ عبور آن‌ها از دهانه‌های پل، در مقایسه با حالت بدون تیرک و آرایش متداول، عملکرد هیدرولیکی مطلوب‌تری ارائه کرده و می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب برای طراحی یا بهسازی پل‌های واقع در رودخانه‌های مستعد انتقال واریزه‌های چوبی به کار گرفته شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، عملکرد این سامانه در مقیاس واقعی و تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف، همراه با ارزیابی هم‌زمان آب‌شستگی پایه‌ها، انتقال رسوب و پایداری هیدرولیکی سازه، بررسی شود تا زمینه تدوین دستورالعمل‌های جامع طراحی و مدیریت خطر انسداد پل‌ها فراهم گردد.

تعارض منافع نویسندگان
در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

منابع مالی
نویسنده مسئول تحقیق حاضر را در راستای توسعه نتایج طرح تحقیقاتی "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ابعاد هندسی سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی بر تله اندازی تنه درختان ورودی به رودخانه و تشدید خطرات سیلاب آزمایشگاهی" دفاع شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و ارائه راهکارهایی برای کاهش مخاطرات سیل انجام داده است و هیچ گونه حمایت مالی برای تالیف و انتشار آن دریافت نکرده است.

دسترسی به داده‌ها
همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول از نویسنده مسئول، در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان
تمامی نویسندگان در اجرای تحقیق و طراحی مقاله مشارکت داشته‌اند

تشکر و قدردانی
نویسندگان لازم می‌دانند از تمامی افرادی که در اجرای این پژوهش همکاری داشته‌اند، به ویژه مدیریت محترم بخش مهندسی رودخانه و سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، به دلیل حمایت‌ها و همکاری‌های ارزشمند، صمیمانه قدردانی نمایند.

منابع

- Bezzola, G.D. (2013), "management of driftwood during floods". Zurich, http://www.vaw.ethz.ch/people/fb/archive/fb_112_management_of_driftwood_during_floods.
- Flussbau, A. G. (2009). Schwemmh Holzstudie Sihl [Driftwood potential Sihl River]. Report Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kanton Zürichs, Zürich.
- Gschnitzer, T., Gems, B., Aufleger, M., Mazzorana, B., & Comiti, F. (2015). On the evaluation and modelling of wood clogging processes in flood related hazards estimation. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3: River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources* (pp. 139-142). Springer International Publishing.
- Harada, N., Takayama, S., Satofuka, Y., Mizuyama, T., & Nakatani, K. (2017). Fundamental experiment using steel stakes to capture driftwood on an impermeable type sabo dam. *Journal of Japan Society of Civil*

- Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering). 73(4): 1351- 1356
- Harada, N. Nakatani, k. Satofuka, Y. and Mizuyama, t. (2018), "Experimental Study of the Use of Stakes to Prevent Driftwood and Natural Debris from Blocking Bridges". Symposium Proceedings of the INTERPRAENENT.
- Hauer, C., & Habersack, H. (2009). Morphodynamics of a 1000-year flood in the Kamp River, Austria, and impacts on floodplain morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(5), 654-682.
- Majtan, E., Cunningham, L.S., & Rogers, B.D. (2022). Experimental and Numerical Investigation of Floating Large Woody Debris Impact on a Masonry Arch Bridge. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 911.
- Mansouri, K., Ahadian, J. (2016). Blockage of Piano Key Weirs in Debris Flow with Individual Experiments, *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), pp. 163-172. doi: 10.22055/ jise.2016.12352.
- Poppema, D. W., Burghardt, L., Benet, L., Wüthrich, D., Klopries, E.-M., Dewals, B., & Erpicum, S. (2025). Bridge clogging in Belgium and Germany during the 2021 floods. *Water Resources Research*, 61, e2024WR039218. <https://doi.org/10.1029/2024WR039218>
- Rostami, M., Rouhani, N., & Sheibani, H. R. (2018). Experimental investigation of the effect of bridge geometric configuration on the probability of blockage by floating woody debris. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(2), 171–181. (In Persian).
- Rostami, M., & Goodarzi, F. (2019). "Three-dimensional simulation of woody debris transport in rivers." Proceedings of the 15th Iranian Hydraulic Conference, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Iran.
- Sendlhofer, A. (2010). Physical Scale Model Investigations of Large Wood Clogging at a Bridge over the Ötztaler Ache River, Sölden, Tyrol, Austria. Institute of Hydraulic Engineering, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria.
- Schmocker, L., & Hager, W.H., (2011). Probability of Drift Blockage at Bridge Decks . *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(4), 470-479.
- Schalko, L , Schmocker L. (2015), "River Driftwood Management". Zurich, http://www.vaw.ethz.ch/people/fb/ischalko/projects/data/fb_870_River-Driftwood-Management
- Simizu, Y., Osada, K. (2007). Numerical experiments on the accumulation process of driftwoods around piers by using a DEM-flow coupling model. *PROCEEDINGS OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 51, 829-834.
- Shimizu, Y., & Osada, K. (2007). Numerical experiments on accumulation process of driftwoods around piers by using a DEM-flow coupling model. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 51, 829–834.



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. 101, Winter 2025

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

Contents

Research Article

Investigating the Influence of Submerged Block Arrangement and Angle of Incidence to Flow Direction on Boundary Layer Thickness in Stilling Basins

Manouchehr Heidarpour, Kimia Akhavan..... 1

Determining the Amount of Applied Water, Water Productivity, and Yield of Forage Maize under Farmers' Management in Alborz Province Using the FAO-AquaCrop Model

Samad Hosseinzadeh Ajirlou, Bijan Nazari, Fariborz Abbasi, Afshin Khorsand 15

Effect of Subsurface Drip Irrigation on the Fruit Yield, Water Productivity, and Growth Parameters of Grapevine

Seyed Hassan Mousavi Fazl 31

Impact of Water Consumption Management on Yield and Yield Components of Wheat

Nader Naderi 49

Water Productivity and of Water Deficit Tolerance Evaluation in High-Yielding Potato Cultivars and Genotypes in Ardabil Region

Keramat Akhavan Gigloo, Davoud Hassanpanah, Ahmad Mousavipoor Gorji, Yuosef Jahani Jelodar..... 65

Numerical Evaluation of the Performance of Protective Steel Beams in Reducing Bridge Opening Blockage Risk Caused by Floating Woody Debris in Mountainous Forested Rivers

Mohammad Rostami, Amir Hossein Rahimi 83

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

Vol. 26 No. 101 2025

Published by: Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

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

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

Editorial Board:

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

International Editorial

Board:

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

Text Editor: M. R. Dahi

English Editor: M. R. Dahi

Coordinating Manager: A. Uossef -Gomrokchi

Typesetting & Layout: Sh. Jabbari

Reviewers:

- Kh. Ahmad Ali	- M. Akbari	- S. Sepehri	- A. Naseri
- J. Ahadyan	- H. Ojaghloo	- N. Abbasi	- A. Uossef Gomrokchi
- A. Eslami	- F. Parchami Araghi	- M. Abedinpur	- H. Younesi
- M. Akbari	- O. Raja	- M. Godarzi	

AERI Site: www.aeri.ir

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

E-mail: aridsej@areeo.ac.ir