



## Effect of sowing date and nitrogen fertilizer application on water use efficiency of Camelina (*Camelina sativa* L.)

Mohsen Pashaei<sup>1</sup> , Farzad Mondani<sup>2</sup>  , Danial Kahrizi<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> M.Sc. Student of Agroecology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: mohsen.p1996@gmail.com

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associated Professor, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: f.mondani@razi.ac.ir

<sup>3</sup> Professor, Department of Biotechnology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: dkahrizi@modares.ac.ir

### ABSTRACT

#### Introduction

Currently, oilseeds are of particular importance among crops and constitute the second food reserve in the world after cereals. The most produced oils are mainly obtained from oilseeds such as soybean, sunflower, cottonseed, peanut and rapeseed. In spite of these common oil crops such as soybean, sunflower and rapeseed, despite their many advantages, they have limitations from various aspects of cultivation and climatic conditions. Camelina is a new oil crop with a short growth period and high tolerance to drought and cold stress and excellent resistance to pests and plant diseases, which can play a role in oil production. Therefore, this research was conducted with the aim of investigating the cultivation of Camelina as a new and reliable source of oil production in supplementary irrigation conditions and also to study the water efficiency of this plant in the weather conditions of Kermanshah, Iran.

#### Methodology

This study was conducted to investigate the effect of sowing date and nitrogen fertilizer on growth and yield of Camelina in irrigated farms conditions under Kermanshah city climate in 2019-2020. A split plots experiment was conducted based on randomized complete blocks design with three replications at the experimental field of Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. The main factor was sowing dates (early November, mid-November and late November) and the sub factor was nitrogen fertilizer application (0, 100, 200, 300 kg ha<sup>-1</sup>).

#### Results and discussion

The results showed that the sowing date treatment had no significant effect on most of the evaluated characteristics. The highest water use efficiency of grain (0.96 kg/mm) and grain oil (0.15 kg/mm) in the treatment of 100 kg of urea he<sup>-1</sup> and the highest water use efficiency of grain protein (0.23 kg/mm) and total protein (0.53 kg/mm) was observed in the treatment of 300 kg of urea he<sup>-1</sup>.

#### Conclusions

In general, the results showed that the sowing date had no effect on the water productivity of the evaluated traits, however, the use of 100 kg of urea he<sup>-1</sup> due to the higher water efficiency, along with the benefits of preventing environmental hazards, due to the improvement of most of the examined characteristics, it is recommended.

**Keywords:** Irrigation, Water use efficiency of grain, Water use efficiency of grain oil, Water use efficiency of grain protein

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 14 January 2023 Revised: 05 April 2023 Accepted: 25 April 2023 e-Published: 27 June 2023

**Cite this article:** Pashaie, M., Mondani, M., & Kahrizi, D. (2023). Effect of sowing date and nitrogen fertilizer application on water use efficiency of Camelina (*Camelina sativa*), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(1), 1-8. DOI: 10.22126/ATWE.2023.8943.1047

**Publisher:** Razi University

© The Author(s).





## اثر تاریخ کاشت و کاربرد کود نیتروژن بر کارایی مصرف آب کاملینا (*Camelina sativa* L.)

محسن پاشایی<sup>۱</sup> ID، فرزاد مندنی<sup>۲</sup> ID، دانیال کهریزی<sup>۳</sup> ID

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد اگرواکولوژی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: mohsen.p1996@gmail.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار اکولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: f.mondani@razi.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد مهندسی ژنتیک و ژنتیک مولکولی، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: dkahrizi@modares.ac.ir

### چکیده

این مطالعه با هدف بررسی کشت گیاه کاملینا به عنوان یک منبع جدید و قابل اطمینان در تولید روغن در شرایط آبیاری تکمیلی و همچنین مطالعه بهره‌وری آب این گیاه در شرایط اقلیمی شهرستان کرمانشاه انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. فاکتور اصلی تاریخ کاشت (اوایل آبان، اواسط آبان و اواخر آبان ماه) و فاکتور فرعی کود نیتروژن (۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ کیلوگرم کود در هکتار) بود. نتایج نشان داد که تیمار تاریخ کاشت بر اکثر ویژگی‌های مورد ارزیابی اثر معنی‌داری نداشت. بیشترین کارایی مصرف آب دانه (۰/۹۶ کیلوگرم بر میلی‌متر) و روغن دانه (۰/۱۵ کیلوگرم بر میلی‌متر) در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و بیشترین کارایی مصرف آب پروتئین دانه (۰/۲۳ کیلوگرم بر میلی‌متر) و پروتئین کل (۰/۵۳ کیلوگرم بر میلی‌متر) در تیمار ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار مشاهده شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که تاریخ کاشت اثری بر بهره‌وری آب و ویژگی‌های مورد بررسی نداشت، با این حال مصرف ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به دلیل بهره‌وری بالاتر از آب در کنار فواید جلوگیری از خطرات زیست‌محیطی با توجه به بهبود اکثر صفات مورد بررسی توصیه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری، کارایی مصرف آب پروتئین دانه، کارایی مصرف آب دانه، کارایی مصرف آب روغن دانه

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۴ دی ۱۴۰۱ اصلاح: ۱۶ فروردین ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۱۳ خرداد ۱۴۰۲

**استناد:** پاشایی، محسن، مندنی، فرزاد، و کهریزی، دانیال. (۱۴۰۲). اثر تاریخ کاشت و کاربرد کود نیتروژن بر کارایی مصرف آب کاملینا (*Camelina sativa* L.)،

فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۱)، ۸-۱، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.8943.1047



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

در حال حاضر دانه‌های روغنی در بین محصولات زراعی اهمیت خاصی دارند و پس از غلات دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهند. روغن‌های نباتی تولیدشده به‌طور عمده از دانه‌های روغنی نظیر سویا، آفتابگردان، پنبه‌دانه، بادام‌زمینی و کلزا به دست می‌آیند. امروزه صنعت روغن‌کشی و تولید روغن نباتی در اغلب کشورهای جهان جزء صنایع راهبردی محسوب می‌شود. در ایران نیز اراضی قابل کشت وسیع و زمین‌های مساعدی برای کشت دانه‌های روغنی وجود دارد (صمدی، ۱۳۹۲). باوجوداین گیاهان روغنی رایج مانند سویا، آفتابگردان و کلزا علی‌رغم مزیت‌های فراوان، دارای محدودیت‌های از جنبه‌های مختلف کشت و شرایط اقلیمی می‌باشند. کاملینا (*Camelina sativa* L.) برای ایران یک گیاه دانه روغنی جدید و منحصره‌فرد محسوب می‌شود. این گیاه روغنی جزء خانواده براسیکاسه است و در آزمایش‌های مختلف نشان داده‌شده است که احتیاجات آبی بسیار کمتر و مقاومت به سرمای بهاره بیشتری نسبت به سایر گیاهان روغنی به‌خصوص کلزا دارد (قمرنیا و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین این گیاه مقاومت بسیار بالایی نسبت به آفات رایج در دانه‌های روغنی مانند سوسک‌های گرده‌خوار دارد. پتانسیل تولید عملکرد بالا در گیاه کاملینا در شرایط ایالت مونتانا آمریکا به اثبات رسیده و امکان قرار گرفتن آن به‌عنوان گزینه مناسب در تناوب با غلات دانه‌ریز نیز گزارش شده است (مکوی و لمب، ۲۰۰۸؛ پوتنام و همکاران، ۱۹۹۳). دوره رشد کاملینا حدود ۸۵ تا ۱۰۰ روز است و به آب‌وهوای معتدل سازگاری دارد و می‌تواند به‌خوبی رشد کند. این گیاه نسبت به دماهای پایین مقاوم بوده و می‌تواند تا دمای ۱۱- درجه سانتی‌گراد را تحمل کند، علاوه بر این قادر است در انواع خاک‌ها به‌خصوص خاک‌هایی با بافت سنی، کم‌عمق و حاصلخیزی کم عملکرد مناسبی ایجاد کند. کاملینا می‌تواند در تناوب با غلات و همچنین در بقایای به‌جامانده از گیاهانی مانند سویا و ذرت نیز کشت شود (حسینی فرد و قربانی جاوید، ۱۳۹۹).

پاولیستا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) نشان دادند که آبیاری رشد گیاه کاملینا را افزایش می‌دهد، به‌طوری‌که در تیمار آبیاری مطلوب در مقایسه با شرایط تنش کمبود آب وزن خشک کل ۵۰ درصد افزایش یافت. عملکرد دانه نیز با افزایش در میزان آبیاری از ۸۹۰ کیلوگرم در هکتار برای تیمار شاهد به ۲۵۴۰ کیلوگرم در هکتار برای تیمار آبیاری مطلوب افزایش یافت. نامبردگان اظهار داشتند که الگوی رشد گیاه کاملینا نشان می‌دهد که ۲۳۰ میلی‌متر آب برای رشد گیاه موردنیاز است، اما برای حداکثر عملکرد به ۴۳۰ میلی‌متر آب نیاز است. دوبره و جرکن<sup>۴</sup> (۲۰۱۱) در یک آزمایش دیگر گزارش کردند عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن کاملینا تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری قرار گرفت، به‌طوری‌که با افزایش میزان آب آبیاری صفات موردبررسی به‌شدت بهبود یافت. نامبردگان همچنین اظهار داشتند که در شرایط محدودیت رطوبت ترکیباتی همچون اولئیک، لینولئیک و اسید لینولنیک کاهش یافت. احمدیان کوشک‌غازی و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی دریافتند که بیشترین و کمترین عملکرد دانه کاملینا بر اساس کارایی مصرف آب در تاریخ کاشت ۳۰ بهمن و ۲۰ اسفند به ترتیب به میزان ۰/۴۵ و ۰/۲۵ کیلوگرم در مترمکعب مشاهده شد. بدون شک تولید غذای کافی و مطلوب از اهداف توسعه ملی و امنیت غذایی هر کشور محسوب می‌شود. این امر مگر با اتخاذ تدابیر مناسبی همچون افزایش تولید در واحد سطح و استفاده از ارقام جدید و متناسب با شرایط موجود صورت نخواهد گرفت. از آنجایی‌که یکی از محدودیت‌های اصلی کشور ایران در تولید محصولات کشاورزی مختلف به‌ویژه گیاهان روغنی، کمبود منابع آبی است و از طرفی اهمیت خودکفایی در تولید روغن خوراکی نیز بر کسی پوشیده نیست، بنابراین این تحقیق باهدف بررسی کشت گیاه کاملینا به‌عنوان یک منبع جدید و قابل‌اطمینان در تولید روغن در شرایط آبیاری تکمیلی و همچنین مطالعه بهره‌وری آب این گیاه در شرایط آب و هوایی کرمانشاه انجام شد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی (با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا) در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی این منطقه جزء اقلیم سرد و نیمه‌خشک قرار دارد. منطقه موردنظر دارای متوسط بارندگی سالیانه ۴۴۴/۷ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد و حداکثر و حداقل درجه حرارت مطلق سالیانه به ترتیب ۴۴/۱ و ۲۷- درجه سانتی‌گراد است. قبل از اجرای آزمایش از خاک مزرعه نمونه‌برداری شد و به‌منظور تجزیه فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه آب‌و‌خاک ارسال گردید و در جدول (۱) ارائه شده است. آمار و اطلاعات هواشناسی به‌کاررفته در این طرح از ایستگاه هواشناسی کرمانشاه (واقع در فرودگاه شهید اشرفی اصفهانی) اخذ گردید و در جدول (۲) ارائه شده است.

<sup>۱</sup> McVay & Lamb

<sup>۲</sup> Putnam et al

<sup>۳</sup> Pavlista et al

<sup>۴</sup> Dobre & Jurcoane

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

اسیدیته	فسفر (ppm)	پتاسیم (ppm)	نیترات (ppm)	آهک (ppm)	ماده آلی (درصد)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت خاک (سانتی متر)	عمق خاک
۷/۳	۱۱	۴۷۰	۱۹/۹	۲۹/۵	۱/۱	۱/۰۸	۱۵/۴	۵۹/۴	۲۵/۲	لومی سیلتی	۰-۳۰

جدول ۲. میانگین شاخص های هواشناسی در طی دوره رشد گیاه کاملینا

ماه	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
جمع بارش (میلی متر)	۵۲/۵	۱۱۱/۹	۱۹/۴	۳۹/۲	۱۴۶/۳	۹۱/۷	۴۰	۰/۰۱
میانگین دما (سانتی گراد)	۱۰/۱	۵/۹	۴/۴	۳/۷	۹/۷	۱۱/۲	۱۷/۷	۲۵/۳
میانگین تبخیر (میلی متر)	۲/۱	۰	۰	۰	۰	۲/۱	۶	۱۱/۶

آزمایش به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل تاریخ کاشت (اوایل، اواسط و اواخر آبان ماه) که به عنوان عامل اصلی و مقادیر کاربرد کود نیتروژن (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) که به عنوان عامل فرعی بودند. منبع تأمین نیتروژن کود اوره ۴۶ درصد بود. مصرف کود در سه مرحله (بعد از مرحله روزت، انتهای مرحله طویل شدن ساقه ها و ابتدای مرحله پر شدن دانه ها) به صورت سرک و دست پاش انجام پذیرفت. از بذر رقم سهیل استفاده شد که از شرکت دانش بنیان بیستون شفا تهیه گردید. هر کرت فرعی شامل ۱۰ ردیف کاشت به فاصله ۲۵ سانتی متر و به طول ۵ متر بود. جهت جلوگیری از آتشویی نیتروژن فاصله بین کرت های فرعی ۱/۵ متر و فاصله بین کرت های اصلی نیز ۲ متر در نظر گرفته شد. مقدار بذر استفاده شده ۲۰ کیلوگرم در هکتار و کاشت آن نیز به صورت دستی صورت پذیرفت. تراکم مطلوب مزرعه ۳۰۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. جهت آماده سازی زمین از شخم توسط گاواهن و بعد از آن انجام دیسک زنی جهت خرد شدن کلوخه ها استفاده گردید. وجین علف های هرز مزرعه با دست صورت گرفت و در طول فصل رشد نیز از هیچ گونه آفت کش و علف کشی استفاده نشد.

مقدار بارش های صورت گرفته در تاریخ کاشت اوایل، اواسط و انتهای آبان ماه به ترتیب حدود ۴۹۷، ۴۴۸ و ۴۴۵ میلی متر بود. بعد از پایان یافتن بارندگی های مؤثر در اردیبهشت ماه مزرعه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک گیاه آبیاری شد و در جدول (۳) زمان و مقدار آب مصرفی در مزرعه کاملینا ارائه شده است. به منظور انجام آبیاری از سیستم تحت فشار از نوع بارانی استفاده گردید و میزان آب مصرفی با استفاده از روش حجمی به دست آمد. به این منظور ظرفی با حجم مشخص به آب پاش متصل گردید و بر مبنای زمان لازم برای پر شدن ظرف میزان حجم آب مصرفی تعیین شد. برای افزایش دقت در هر بار آبیاری این فرآیند سه بار در مکان های مختلف مزرعه تکرار شد و سپس از اطلاعات میانگین گرفته شد (خورسند و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول ۳. زمان و مقدار آب مصرفی در مزرعه کاملینا

تاریخ	آبیاری (مترمکعب)
۹۹/۲/۱۶	۳۶/۵
۹۹/۲/۲۳	۷۷/۸
۹۹/۲/۳۰	۵۶/۰
۹۹/۳/۶	۲۴/۵
جمع	۱۹۴/۸

برداشت در هر تاریخ کاشت با توجه به زمان رسیدگی گیاه (قهوه ای یا تیره شدن ۹۰ درصد غلافها) صورت گرفت. بدین منظور از هر کرت پس از حذف اثرات حاشیه ای مساحتی به اندازه ۲ مترمربع (به صورت کف بر) برداشت گردید و سپس عملکرد دانه اندازه گیری شد. برای

اندازه‌گیری درصد روغن و پروتئین دانه‌ها نیز به ترتیب از دستگاه سوکسله (سوکسله، ۱۸۷۹) و روش کج‌دال (کج‌دال؛ ۱۸۸۳) استفاده شد. کارایی مصرف آب در حالت‌های مورد بررسی نیز از رابطه زیر محاسبه شد (رایت؛ ۱۹۹۵):

$$(1) \quad \text{عملکرد (دانه، روغن و پروتئین)} = \frac{\text{کارایی مصرف آب}}{\text{میزان تبخیر و تعرق}}$$

در این رابطه عملکرد و میزان تبخیر و تعرق به ترتیب برحسب کیلوگرم در هکتار و میلی‌متر می‌باشند. به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌های مستخرج از آزمایش از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ استفاده شد. داده‌ها به‌وسیله آنالیز واریانس (ANOVA) تحلیل و میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد از نظر آماری مقایسه شدند.

## نتایج و بحث

### کارایی مصرف آب دانه

نتایج نشان داد که اثر تاریخ کاشت و برهمکنش تاریخ کاشت و کود مصرفی بر کارایی مصرف آب دانه معنی‌دار نبود، درحالی‌که مصرف کود اثر معنی‌داری از خود برجای گذاشت. نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. بیشترین کارایی مصرف آب دانه به مقدار ۰/۹۶ کیلوگرم بر میلی‌متر مربوط به تیمار ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و کمترین آن به مقدار ۰/۵۴ کیلوگرم بر میلی‌متر مربوط به تیمار شاهد بود. نتایج در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج نشان داد ارتباط کارایی مصرف آب دانه نسبت به تاریخ کاشت معنی‌دار نبود، اما نسبت به کود مصرفی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت خطی، درجه دوم و درجه سوم (در سطح پنج درصد) معنی‌دار بود که در جدول (۶) ارائه گردیده است. از آنجایی‌که عملکرد دانه و کارایی مصرف آب با یکدیگر رابطه مستقیم دارند، بنابراین به نظر می‌رسد افزایش عملکرد دانه موجب افزایش در کارایی مصرف آب خواهد شد، مشروط بر اینکه میزان آب تبخیر و تعرق یافته نوسان زیادی نداشته باشد. اما چنانچه افزایش در عملکرد دانه فراتر از محدوده‌های افزایشی در مصرف آب باشد، رابطه بین کارایی مصرف آب و عملکرد دانه دستخوش تغییرات شده و حتی ممکن است معکوس نیز شود. همچنین با افزایش میزان نیتروژن عملکرد وزن خشک کل گیاه نیز افزایش می‌یابد که در مقادیر بالای کاربرد کود نیتروژن میزان جذب نیتروژن در بخش‌های رویشی گیاه افزایش می‌یابد که این موضوع ممکن است باعث کاهش عملکرد دانه شود. دانشمند و همکاران (۱۳۸۵) بیان کردند که کاربرد کود نیتروژن اثر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب دانه دارد و در صورتی‌که میزان نیتروژن مصرفی باعث افزایش تعرق بیشتر گیاه نشود این دو با یکدیگر هم‌افزایی خواهند داشت.

جدول ۴. تجزیه واریانس کارایی مصرف آب گیاه کاملینا

منابع تغییر	درجه آزادی	کارایی مصرف آب دانه	کارایی مصرف آب روغن	کارایی مصرف آب پروتئین دانه	کارایی مصرف آب پروتئین کل
تکرار	۲	۰/۰۳۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۳۴ <sup>ns</sup>
تاریخ کاشت	۲	۰/۱۰۶ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۸*	۰/۰۱ <sup>ns</sup>	۰/۴۵۳ <sup>***</sup>
تکرار × تاریخ کاشت	۴	۰/۰۴ <sup>**</sup>	۰/۰۱۳ <sup>**</sup>	۰/۰۲۹*	۰/۰۴۷۴*
نیتروژن	۳	۰/۲۸*	۰/۰۰۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۳۸ <sup>**</sup>	۰/۱۸۷ <sup>***</sup>
نیتروژن × تاریخ کاشت	۶	۰/۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۲ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۶ <sup>ns</sup>	۰/۰۳۲ <sup>ns</sup>
خطا	۱۸	۰/۰۵۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۱۷
ضریب تغییرات (درصد)	۳۰	۳۷	۳۱	۳۵	

ns، \*، \*\* و \*\*\* به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و یک‌هزارم درصد

<sup>1</sup> Soxhlet

<sup>2</sup> Kjeldahl

<sup>3</sup> Wright

### کارایی مصرف آب روغن دانه

اثر تاریخ کاشت بر کارایی مصرف آب روغن دانه معنی دار بود، اما اثر مصرف کود و همچنین برهمکنش آن‌ها معنی دار نشد. نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. بیشترین کارایی مصرف آب روغن دانه به مقدار ۰/۱۴ کیلوگرم بر میلی‌متر مربوط به تیمار تاریخ کاشت اول و کمترین آن به مقدار ۰/۰۹ کیلوگرم بر میلی‌متر متعلق به تیمار تاریخ کشت سوم بود که در جدول (۵) نشان داده شده است. کارایی مصرف آب روغن دانه همچنین دارای روند خطی نسبت به تاریخ کاشت بود، اما نسبت به کود هیچ‌گونه پاسخی در سطوح مختلف نشان نداد. جدول (۶) بیانگر این موضوع است.

### کارایی مصرف آب پروتئین دانه

نتایج نشان داد که اثر تاریخ کاشت و برهمکنش تاریخ کاشت و کود نیتروژن بر کارایی مصرف آب پروتئین دانه معنی دار نبود، ولی کاربرد کود نیتروژن اثر معنی داری بر این صفت داشت. نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. مطابق جدول (۵) بیشترین کارایی مصرف آب پروتئین دانه به مقدار ۰/۲۳ کیلوگرم بر میلی‌متر متعلق به تیمار مصرف ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و کمترین آن به مقدار ۰/۰۹۵ کیلوگرم بر میلی‌متر مربوط به تیمار عدم مصرف کود بود. با توجه به جدول (۶) کارایی مصرف آب پروتئین دانه نسبت به تاریخ کاشت هیچ‌گونه پاسخ معنی داری نداشت، اما نسبت به کاربرد کود نیتروژن در تیمارهای ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، روند خطی و درجه سوم معنی داری از خود نشان داد.

جدول ۵. اثر تاریخ کاشت و کاربرد کود نیتروژن بر ویژگی‌های مورد بررسی کاملینا

تیمار	کارایی مصرف آب دانه (کیلوگرم بر میلی‌متر)	کارایی مصرف آب روغن (کیلوگرم بر میلی‌متر)	کارایی مصرف آب پروتئین (کیلوگرم بر میلی‌متر)	کل (کیلوگرم بر میلی‌متر)
اول	۰/۸۷ <sup>a</sup>	۰/۱۴ <sup>a</sup>	۰/۱۶ <sup>a</sup>	۰/۴۶ <sup>a</sup>
دوم	۰/۸۲ <sup>a</sup>	۰/۱۱ <sup>a</sup>	۰/۲ <sup>a</sup>	۰/۵ <sup>a</sup>
سوم	۰/۶۹ <sup>a</sup>	۰/۰۹۷ <sup>a</sup>	۰/۱۵ <sup>a</sup>	۰/۱۵ <sup>b</sup>
شاهد	۰/۵۴ <sup>b</sup>	۰/۱۱ <sup>a</sup>	۰/۰۹۵ <sup>b</sup>	۰/۱۹ <sup>c</sup>
۱۰۰	۰/۹۶ <sup>a</sup>	۰/۱۵ <sup>a</sup>	۰/۲۲ <sup>a</sup>	۰/۴۲ <sup>ab</sup>
۲۰۰	۰/۸۱ <sup>a</sup>	۰/۱۱ <sup>a</sup>	۰/۱۴ <sup>ab</sup>	۰/۳۴ <sup>b</sup>
۳۰۰	۰/۸۶ <sup>a</sup>	۰/۱۱ <sup>a</sup>	۰/۲۳ <sup>a</sup>	۰/۵۳ <sup>a</sup>

در هر ستون میانگین‌های که دارای حرف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد دارای اختلاف معنی دار نمی‌باشند.

### کارایی مصرف آب پروتئین کل

طبق جدول (۴) اثر تاریخ کاشت و مصرف کود بر کارایی مصرف آب پروتئین کل معنی داری بود، ولی بر همکنش آن‌ها اثر معنی داری بر آن نداشت. مطابق جدول (۵) بیشترین کارایی مصرف آب پروتئین کل به مقدار ۰/۵ کیلوگرم بر میلی‌متر در تیمار تاریخ کاشت دوم و کمترین آن به مقدار ۰/۱۵ کیلوگرم بر میلی‌متر در تیمار تاریخ کشت سوم مشاهده شد. همچنین بیشترین کارایی مصرف آب پروتئین کل به مقدار ۰/۵۳ کیلوگرم بر میلی‌متر مربوط به ۳۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن و کمترین میزان آن نیز به مقدار ۰/۱۹ کیلوگرم بر میلی‌متر در تیمار عدم مصرف کود بود. علاوه بر این کارایی مصرف آب پروتئین کل نسبت به تاریخ کاشت دارای روند خطی (تاریخ کاشت دوم) و درجه دوم (تاریخ کاشت سوم) معنی دار و نسبت به مصرف کود نیتروژن نیز دارای روند خطی (مصرف ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و درجه سوم (مصرف ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) معنی داری بود. برونسون و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که مصرف کود نیتروژن علی‌رغم کاهش درصد و عملکرد روغن دانه باعث افزایش کارایی مصرف آب شد. نامبردگان همچنین اظهار داشتند که افزایش میزان آب آبیاری باعث افزایش صفات مذکور شده و می‌توان ارتباط نزدیکی بین میزان آب مصرفی و کود نیتروژن مشاهده کرد، اما این اثرات بر صفات مختلف گیاه متفاوت است. شرایط محیطی و میزان تقسیم ترکیبات فتوسنتزی بین بخش‌های مختلف گیاه نیز می‌تواند اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های گیاهی داشته باشد، به نحوی که با افزایش میزان نیتروژن تعداد دانه در غلاف افزایش می‌یابد اما درصد روغن کاهش و عملکرد

<sup>1</sup> Bronson

کل روغن افزایش می‌یابد، این در حالی است که مقدار پروتئین نیز افزایش می‌یابد. با این وجود اگر مقدار آب آبیاری افزایش یابد و در زمان مناسب در اختیار گیاه قرار گیرد، عملکرد روغن از پروتئین پیشی خواهد گرفت و می‌تواند به این دلیل باشد که بین میزان آبیاری و کود نیتروژن رابطه تنگاتنگی وجود دارد که باعث تناقض در نتایج می‌شود. نیوپن و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) عنوان کردند که با افزایش میزان آب آبیاری میزان پروتئین کل کاهش یافت، اما مقدار پروتئین دانه دچار تغییر نشد. همچنین آن‌ها بیان کردند که میزان سطوح آبیاری باید به نحوی باشد که توانایی ایجاد تغییر را داشته باشد و در سطوح پایین آبیاری معمولاً تغییر چندانی در صفات ایجاد نمی‌گردد، همچنین با افزایش تأخیر در کاشت و برخورد مراحل انتهایی رشد با دماهای بالا نیز میزان پروتئین دانه افزایش پیدا می‌کند، به علاوه میزان پروتئین به شدت تحت تأثیر میزان آبیاری و کود قرار می‌گیرد.

جدول ۶. مقایسات متعامد ویژگی‌های مورد بررسی گیاه کاملینا

تفکیک SS	کارایی مصرف آب دانه (کیلوگرم بر میلی‌متر)	کارایی مصرف آب روغن دانه (کیلوگرم بر میلی‌متر)	کارایی مصرف آب پروتئین دانه (کیلوگرم بر میلی‌متر)	کارایی مصرف آب پروتئین کل (کیلوگرم بر میلی‌متر)
خطی	۰/۲۰ <sup>ns</sup>	۰/۱۰۶*	۰/۰۰۶ <sup>ns</sup>	۰/۵۷***
درجه دو	۰/۰۱۲ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۲ <sup>ns</sup>	۰/۳۲***
خطی	۰/۳۰*	۰/۰۰۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۴۶*	۰/۳۹***
درجه دو	۰/۲۹*	۰/۰۰۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۱۶ <sup>ns</sup>
درجه سه	۰/۲۵*	۰/۰۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۶۴**	۰/۱۵۹**

ns، \*، \*\*، \*\*\* به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و یک هزارم درصد

## بحث

این مطالعه با هدف بررسی کشت گیاه کاملینا به عنوان یک منبع جدید و قابل اطمینان در تولید روغن در شرایط آبیاری تکمیلی و همچنین مطالعه بهره‌وری آب این گیاه در شرایط اقلیمی شهرستان کرمانشاه انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. فاکتور اصلی تاریخ کاشت (اوایل آبان، اواسط آبان و اواخر آبان ماه) و فاکتور فرعی کود نیتروژن (۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ کیلوگرم کود در هکتار) بود.

## نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه اثر تاریخ کاشت بر ویژگی‌های مرتبط با بهره‌وری آب محصول کاملینا معنی‌دار نبود، اما این ویژگی‌ها در تاریخ کاشت اول بالاتر از سایر تاریخ‌های کاشت بود. در بین تیمارهای کاربرد کود اوره بیشترین کارایی مصرف آب دانه و روغن دانه در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم کود در هکتار و بیشترین کارایی مصرف آب پروتئین دانه و پروتئین کل در تیمار ۳۰۰ کیلوگرم کود در هکتار مشاهده شد. به‌طور کلی از نتایج این بررسی می‌توان نتیجه گرفت که کشت کاملینا در تاریخ کاشت مناسب علاوه بر استفاده بهتر از بارندگی‌های مؤثر، از برخورد مراحل انتهایی رشد گیاه با دماهای بالا جلوگیری می‌کند. همچنین مصرف ۱۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به دلیل بهره‌وری بالاتر از آب در کنار فواید جلوگیری از خطرات زیست‌محیطی با توجه به بهبود اکثر صفات مورد بررسی توصیه می‌گردد.

## منابع

- حسینی فرد، مرجان سادات، و قربانی جاوید، مجید. (۱۳۹۹). معرفی دانه روغنی و دارویی کاملینا. علمی تخصصی جوانه، ۱۶(۲)، ۴۵-۴۲. [https://journal.ut.ac.ir/article\\_78525\\_3a1fe5da9b38742c1498842fa022dd07.pdf](https://journal.ut.ac.ir/article_78525_3a1fe5da9b38742c1498842fa022dd07.pdf)
- خورد، افشین، بزانه، محمد، بشارت، سینا، و زینال زاده، کامران. (۱۳۹۷). برآورد بیلان حجمی آب و الگوی رطوبتی آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در محیط متخلخل. علوم آب و خاک، ۲۲(۴)، ۳۱۶-۳۰۱. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3293-fa.html>
- دانشمند، علیرضا، شیرانی راد، امیرحسین، نورمحمدی، قربان، زارعی، قاسم، و دانشیان، جهانفر. (۱۳۸۵). اثر تنش آبی و مقادیر مختلف کود نیتروژن بر عملکرد دانه، عملکرد، جذب نیتروژن و کارایی مصرف آب و نیتروژن در دو رقم کلزا. مجله علوم زراعی ایران، ۸(۴)، ۳۴۲-۳۲۳. <https://sid.ir/paper/57093/fa>

<sup>1</sup> Neupane et al

- صمدی، مهتاب. (۱۳۹۲). اهمیت و اصلاح کاملینا. خبرنامه داخلی شرکت توسعه کشت دانه های روغنی، ۲۸، ۸-۹.  
<http://www.ordc.ir/Page/bulletin/?page=4>
- قمرنیا، هوشنگ، کهریزی، دانیال، و رستمی احمدوندی، حسین. (۱۳۹۸). کاملینا: گیاهی کم توقع و سازگار. انتشارات دانشگاه رازی.  
[https://press.razi.ac.ir/book\\_416.html](https://press.razi.ac.ir/book_416.html)

## References

- Bronson, K. F., Hunsaker, D. J., & Thorp, K. R. (2019). Nitrogen fertilizer and irrigation effects on seed yield and oil in camelina. *Agronomy Journal*, 111(4), 1712-1719. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0644>
- Daneshmand, A. R., Shiranirad, A. H., Nourmohammadi, Gh., Zareei, Gh., & Daneshian, J. (2007). Effect of water stress and different levels of Nitrogen fertilizer on seed yield and its components, nitrogen uptake and water use and nitrogen utility efficiency in two rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 8(4), 323-342. <https://sid.ir/paper/57093/en> [in Persian]
- Dobre, P., & Jurcoane, Ş. (2011). Camelina crop-opportunities for a sustainable agriculture. *Scientific Papers-Series A, Agronomy*, 54, 420-424. [https://www.researchgate.net/publication/283604208\\_Camelina\\_cropopportunities\\_for\\_a\\_sustainable\\_agriculture](https://www.researchgate.net/publication/283604208_Camelina_cropopportunities_for_a_sustainable_agriculture)
- Esmail, M., Kooshkghazi, A., Madandoust, M., Mohajeri, F., Kahrizi, D., & Student, Ph. (2021). Study of different dates of planting camelina (*camelina sativa* (L.) crantz). *International Journal of Modern Agriculture*, 10(1), 361-365. [https://www.researchgate.net/publication/349663649\\_STUDY\\_OF\\_DIFFERENT\\_DATES\\_OF\\_PLANTING\\_CAMELINA\\_CAMELINA\\_SATIVA\\_L\\_CRANTZ](https://www.researchgate.net/publication/349663649_STUDY_OF_DIFFERENT_DATES_OF_PLANTING_CAMELINA_CAMELINA_SATIVA_L_CRANTZ)
- Ghamarnia, H., Kahrizi, D., & Rostami Ahmadvandi, H. (2018). Camelina: an unexpected and adaptable plant. Razi University Press. [https://press.razi.ac.ir/book\\_416.html](https://press.razi.ac.ir/book_416.html) [in Persian]
- Hosseini Fard, M. S., & Ghorbani Javid, M. (2020). Introduction of Camelina oil and medicinal seed. *Javane*, 16(2), 42-45. [https://journal.ut.ac.ir/article\\_78525\\_3a1fe5da9b38742c1498842fa022dd07.pdf](https://journal.ut.ac.ir/article_78525_3a1fe5da9b38742c1498842fa022dd07.pdf) [in Persian]
- Khorsand, A., Bazaneh, M., Besharat, S., & Zeynalzadeh, K. (2019). Estimation of Water Mass Balance and Soil Wetting Pattern for Subsurface Drip Irrigation in the Porous Media. *Journal of Water and Soil Science*, 22(4), 301-316. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3293-fa.html> [in Persian]
- Kjeldahl, J. (1883). A new method for the estimation of nitrogen in organic compounds. *Fresenius' Zeitschrift für Analytische Chemie*, 22(1), 366-382. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01338151>
- McVay, K. A., & Lamb, P. F. (2008). Camelina production in Montana. Montana State University, Bozeman. <https://agresearch.montana.edu/carc/Articles/mt200701AG%20Camelina%20Production%20in%20MT.pdf>
- Neupane, D., Solomon, J. K., Mclennon, E., Davison, J., & Lawry, T. (2020). Camelina production parameters response to different irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*, 148, 112286. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112286>
- Pavlista, A. D., Hergert, G. W., Margheim, J. M., & Isbell, T. A. (2016). Growth of spring camelina (*Camelina sativa*) under deficit irrigation in Western Nebraska. *Industrial Crops and Products*, 83, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.017>
- Putnam, D. H., Budin, J. T., Field, L. A., & Breene, W. M. (1993). Camelina: a promising low-input oilseed. *New crops*, 314, 322. <https://eurekamag.com/research/002/315/002315484.php>
- Samadi, M. (2012). Importance and correction of Camelina. *Internal Newsletter of Oilseed Research & Development Company*, 28, 8-9. <http://www.ordc.ir/Page/bulletin/?page=4> [in Persian]
- Soxhlet, F. V. (1879). Die gewichtsanalytische bestimmung des milchfettes. *Dingler's Polytechnisches Journal*, 232, 461-465. <https://scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=364919>
- Wright, P. R., Morgan, J. M., Jessop, R. S., & Cass, A. (1995). Comparative adaptation of canola (*Brassica napus*) and Indian mustard (*B. juncea*) to soil water deficits: yield and yield components. *Field Crops Research*, 42(1), 1-13. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(95\)00013-G](https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)00013-G)





## Pressure management of the water distribution network of Javanroud city by determining the optimal location and setting of pressure relief valves

Iman Rostami<sup>1</sup> , Elham Darvishi<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail : [I.rostami@stu.razi.ac.ir](mailto:I.rostami@stu.razi.ac.ir)

<sup>2</sup> Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water and Science Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: [e.darvishi@razi.ac.ir](mailto:e.darvishi@razi.ac.ir)

---

### ABSTRACT

---

#### Introduction

Leakage is caused by high pressure Existence in water distribution networks. Pressure management has been introduced as an effective solution to reduce leakage. Various methods have been introduced by researchers to apply pressure management in water distribution networks. Among these methods, the use of regulating pressure reducing valves (PRV) has been used more. In this research, for the water distribution network of Javanroud city, the optimal position and settings of pressure reducing valves have been determined using the Harmony search algorithm. In this case, optimization of network reliability was used as the objective function and hydraulic analysis of the network will be based on pressure.

#### Materials and Methods

In this research, network analysis has been performed by Pressure Dependent Analysis (PDA), which provides more realistic results than the Demand Dependent Analysis (DDA). Different relationships for flow and pressure have been defined by researchers. According to Chang et al. 2019, The Wagner et al. 1998 relationship has more favorable results than other relationships. In this dissertation, Wagner et al 1998 equation is used as the relationship between flow and pressure. The Epanet program is used to simulate the distribution network, the MATLAB program is used for coding and optimization Algorithm, the Epanet program is used to design the network, and the ArcGIS is used to calculate the flow rate of each node. Many optimization methods have been used to solve the problems of water distribution networks, among which the Harmony Search method has provided good results. Optimization of distribution networks to maximize reliability and minimize design and operation costs, which is done as a single and multiple objectives according to the conditions and limitations. Since the purpose of this study is to increase network reliability, various decision variables have been used in the studied scenarios, which are the number of pressure reducing valves, position and settings of pressure reducing valves and the diameter of network pipes. The various target functions also include network, pipe and junction reliability.

#### Results

Among the one-objective scenarios, the highest Pressure (junction) reliability is 0.6524 and the highest network reliability is 0.5974. Among the two-objective scenarios, the reliability increases if the objective functions are Pressure (junction) and velocity (pipe) reliability and the decision variable is only reduced pressure valves position and setting. If the diameter of the pipe and the reduced pressure valves are variable, both indices increase, but this increase is less than the previous scenario.

#### Conclusion

Pressure management and reduction of high pressures are necessary to reduce leakage and extend the life of water distribution network equipment. There is a need for a benchmark and indicator to compare the distribution network pressure management. Investigation of the presented indicators shows that the reliability index is a suitable criterion for evaluating pressure management. In this research, using optimization methods, pressure reducing valves and changing the diameter of the pipe, the possibility of increasing the reliability of Javanroud water distribution network was investigated. In this study, using single-objective and two-objective optimization algorithms, the position and settings of pressure relief valves were determined for this network. In the single-objective Harmony Search algorithm, network reliability was considered, and in the two-objective algorithm, pressure and velocity reliability were considered as the objective functions. The results showed that the single-objective algorithm has

---

---

increased the reliability of the network by 17% and the two-objective algorithm by 14% compared to the current situation. Examining the changes of network reliability in 24 hours of the day shows that the network reliability values obtained from the two-objective algorithm had very little fluctuations compared to the single-objective algorithm. In other words, the reliability of the network has been almost constant throughout the day.

**Keywords:** network reliability, Pressure Dependent Analysis, Harmony Search algorithm, multi-objective optimization

**Article Type:** Research Article

**Article history:** **Received:** 16 January 2023 **Revised:** 19 March 2023 **Accepted:** 09 April 2023 **ePublished:** 27 June 2023

---

**Cite this article:** Rostami, I., & Darvishi, E. (2023). Pressure management of the water distribution network of Javanroud city by determining the optimal location and setting of pressure relief valves, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(1), 9-24. DOI: 10.22126/ATWE.2023.8822.1037

**Publisher:** Razi University

© The Author(s).





## مدیریت فشار شبکه توزیع آب شهر جوانرود با تعیین محل بهینه و تنظیمات شیرهای فشارشکن

ایمان رستمی<sup>۱</sup>، الهام درویشی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [I.rostami@stu.razi.ac.ir](mailto:I.rostami@stu.razi.ac.ir)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [e.darvishi@razi.ac.ir](mailto:e.darvishi@razi.ac.ir)

### چکیده

وجود فشار بالا در شبکه‌های توزیع آب موجب نشت، هدر رفت آب و متعاقباً افزایش هزینه‌های بهره‌برداری خواهد شد. امروزه شیرهای فشارشکن به‌منظور ایجاد فشار مناسب در شبکه به کار می‌روند. شبکه توزیع آب شهر جوانرود به دلیل اختلاف ارتفاع زیاد در برخی نقاط دارای فشار بالا است. در این مطالعه با تعریف چهار سناریو و استفاده از الگوریتم جستجوی هماهنگ تک هدفه و دو هدفه موقعیت و تنظیمات شیرهای فشارشکن برای این شبکه تعیین شد. در الگوریتم تک هدفه جستجوی هماهنگ قابلیت اطمینان ترکیبی و در الگوریتم دو هدفه قابلیت اطمینان فشاری و سرعتی به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که الگوریتم تک هدفه ۱۷ درصد و الگوریتم دو هدفه ۱۴ درصد نسبت به وضعیت موجود قابلیت اطمینان شبکه افزایش داشته است. بررسی تغییرات قابلیت اطمینان ترکیبی در ۲۴ ساعت شبانه‌روز نشان می‌دهد که مقادیر قابلیت اطمینان ترکیبی حاصل از الگوریتم دو هدفه نوسانات بسیار کمی نسبت به الگوریتم تک هدفه داشته است. به عبارتی در طول شبانه‌روز قابلیت اطمینان شبکه تقریباً ثابت بوده است. همچنین در نظر گرفتن محل و تنظیمات شیرهای فشارشکن به‌عنوان متغیر تصمیم نتایج بهتری نسبت به تغییر قطر لوله ارائه می‌دهد که دلیل آن را می‌توان در اختلاف ارتفاع زیاد شبکه دانست.

**واژه‌های کلیدی:** قابلیت اطمینان، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، الگوریتم جستجوی هماهنگ، بهینه‌سازی چند هدفه

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۶ دی ۱۴۰۱ اصلاح: ۲۸ اسفند ۱۴۰۱ پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۱۳ خرداد ۱۴۰۲

**استناد:** رستمی، ایمان، و درویشی، الهام. (۱۴۰۲). مدیریت فشار شبکه توزیع آب شهر جوانرود با تعیین محل بهینه و تنظیمات شیرهای فشارشکن، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۳(۱)، ۹-۲۴، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.8822.1037



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

به‌مرور زمان تمام سیستم‌های توزیع در سطح جهان پیر شده و روبه‌زوال می‌روند، درحالی‌که تقاضاها رو به افزایش است. همین مسئله باعث شده است که تلفات آب در سیستم‌های توزیع در بسیاری از شهرها به سطح نگران‌کننده‌ای رسیده باشد (هو، ۲۰۰۱). میزان نشت در شبکه‌های توزیع، تابعی از فشار وارد شده توسط پمپ‌ها و اختلاف ارتفاع شبکه است. رابطه بین میزان نشت و فشار شبکه با آزمایش‌ها ثابت شده است. از همین رو مدیریت فشار شبکه توزیع روش خوبی برای کاهش نشت است (فارلی و ترو، ۲۰۰۳). مدیریت فشار به روش‌های مختلفی از جمله زون‌بندی شبکه توزیع آب (نادرخانی و همکاران، ۲۰۱۹) تغییرات سطح آب مخزن (نظیف و همکاران، ۲۰۱۰، گوپتا و همکاران، ۲۰۱۷)، پمپ‌های دور متغیر (پیچ و همکاران، ۲۰۱۷) و شیرهای فشارشکن (دای و لی، ۲۰۱۶، دای، ۲۰۲۱) انجام می‌شود.

گوپتا و کلات<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) با تعیین تعداد شیرآلات، محل قرارگیری و تنظیم بهینه آن‌ها به‌وسیله الگوریتم ژنتیک چند هدفه، نشت شمال غربی شبکه شهر ناگبور هند را ۲۰/۶۴ درصد کاهش داده‌اند. همچنین در مقایسه با مطالعات قبلی تعداد کمتری از شیرهای فشارشکن مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات مشابهی توسط محققین دیگر انجام شده است نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تعیین بهینه محل قرارگیری و تنظیم شیر فشارشکن موجب کاهش نشت در شبکه توزیع آب شده است (نیکولینی و همکاران، ۲۰۱۱، نیکولینی و زواتو، ۲۰۰۹). در برخی تحقیقات هدف کمینه کردن فشار بوده و مقادیر کمتر از ۳۰ متر در هر گره از شبکه توزیع قابل قبول نبوده است. این تابع هدف منطقی نیست زیرا به‌طور مثال تفاوت ۲۹ متر و ۳۰ متر در شبکه توزیع اندک است. در حالی در این روش که فشار ۳۰ متر مجاز و ۲۹ متر مجاز نیست. بنابراین لازم است تابع هدف محدوده‌های فشار را در نظر بگیرد (آراجو و همکاران، ۲۰۰۶، پائولا و همکاران، ۲۰۱۷). دینی و تابش<sup>۳</sup> (۲۰۱۸) شاخص‌های قابلیت اطمینان فشاری، سرعتی، کیفی و ترکیبی را بر اساس محدوده‌های مختلف پیشنهاد دادند. در این مطالعه شاخص قابلیت اطمینان فشاری و سرعتی به‌عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

شبکه مورد مطالعه در این پژوهش، شبکه توزیع آب شهرستان جوانرود است. در این شهر اختلاف ارتفاع زیاد وجود دارد که موجب وجود مناطق با فشار بالا شده است. در این پژوهش با هدف افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب، موقعیت و تنظیمات شیرهای فشارشکن بهینه شده است. تحلیل هیدرولیکی شبکه به‌صورت مبتنی بر فشار انجام شده است. به عبارتی دبی تأمین شده در گره‌ها تابعی از فشار در گره خواهد بود.

## روش پژوهش

### روش تحلیل شبکه

تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب به دو روش انجام می‌شود. روش تحلیل مبتنی بر تقاضا<sup>۴</sup> (DDA) رابطه بین تقاضای واقعی آب و فشار گره‌ای را نادیده می‌گیرد. مدل‌های مبتنی بر تقاضا معمولاً با این فرضیه که تقاضای آب در گره‌ها تأمین خواهد شد تجزیه و تحلیل را انجام می‌دهند. در این روش بدون در نظر گرفتن فشار در گره، دبی برداشتی از گره را برابر نیاز آن گره در نظر می‌گیرد. این روش در شرایط عادی دارای اعتبار است، اما اعتبار آن در شرایطی مانند ترکیدن لوله، قطع پمپاژ و کمبود آب و فشار کم شبکه توزیع کاهش می‌یابد. به همین دلیل استفاده از DDA برای شبیه‌سازی شبکه‌های تحت تأثیر کمبود فشار با شرایط واقعی تفاوت زیادی دارد (لیو و همکاران، ۲۰۱۱).

1 WHO

2 Farley & Trow

3 Naderkhani et al

4 Nazif et al

5 Gupta et al

6 Page et al

7 Dai & Li

8 Gupta & Kulat

9 Nicolini et al

10 Nicolini & Zovatto

11 Araujo et al

12 Paola et al

13 Dini & Tabesh

14 Demand Dependent Analysis

15 Liu et al

روش دوم تحلیل مبتنی بر فشار (PDA) صریحاً رابطه بین فشار و تأمین تقاضا را در برمی‌گیرد. در این روش هنگامی که فشار گره به سطح خاصی کاهش یابد که تحت عنوان فشار مطلوب شناخته شود، تقاضای گره فقط می‌تواند تا حدی تأمین شود. زمانی که فشار گره به حداقل فشار شبکه برسد تأمین تقاضای گره ناچیز و یا صفر خواهد شد (لیو و همکاران، ۲۰۱۱).

لیسرا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) برای مقایسه رویکردهای مختلف سه شبکه با اندازه‌های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که روش تقاضامحور DDA الزاماً منجر به برآورد بیش از حد حجم آب مورد نیاز گره می‌شود. زیرا فرض می‌کند که تقاضای آب همیشه برآورد می‌شود. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که روش فشارمحور PDA امکان محاسبه شاخص قابلیت اطمینان واقع‌بینانه‌تری نسبت به روش تقاضامحور DDA را دارد.

روابط مختلفی برای توصیف رابطه دبی و فشار توسط محققین ارائه شده است. چنگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۹) روابط مختلف دبی و فشار را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که رابطه ارائه شده توسط واگنر و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۸۸) مطابقت بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد. معادله ارائه شده توسط واگنر و همکاران (۱۹۸۸) مطابق رابطه (۱) است.

$$q^{avl} = \begin{cases} 0 & P^{avl} < P^{\min} \\ q^{req} \times \left( \frac{P^{avl} - P^{\min}}{P^{req} - P^{\min}} \right)^n & P^{\min} \leq P^{avl} \leq P^{req} \\ q^{req} & P^{avl} > P^{req} \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه  $q^{avl}$  و  $q^{req}$  به ترتیب دبی مورد نیاز و دبی موجود در گره و  $P^{avl}$ ،  $P^{req}$  و  $P^{\min}$  به ترتیب فشار مورد نیاز، فشار موجود و فشار حداقل گره می‌باشند. بر اساس این رابطه چنانچه فشار بیش از فشار مورد نیاز گره باشد، دبی برداشتی از گره برابر دبی مورد تقاضا خواهد بود. در صورتی که در شبکه‌های با فشار بالا افزایش فشار موجب افزایش مصرف آب خواهد شد. دینی و اسدی در سال ۲۰۲۰ برای مدیریت فشار شبکه از روش PDA استفاده کردند. در این پژوهش دبی تقاضا گره‌ها ثابت و تنها دبی نشت تابعی از فشار در نظر گرفتند. قبل از سال ۲۰۲۰ در برنامه Epanet تنها امکان تحلیل هیدرولیکی به روش مبتنی بر تقاضا وجود داشت. اما در سال ۲۰۲۰ امکان تحلیل به روش مبتنی بر فشار نیز به این برنامه اضافه شد. این رابطه همان رابطه ارائه شده توسط واگنر و همکاران (۱۹۸۸) است.

### شاخص‌های قابلیت اطمینان

دینی و تابش (۲۰۱۸) شاخص قابلیت اطمینان فشاری را به این صورت تعریف کردند که تا فشار ۱۰ متر، قابلیت اطمینان گره صفر است. برای فشار ۱۰ تا ۲۶ متر قابلیت اطمینان از صفر تا قابل قبول (۰/۵) رو به افزایش است، از فشار ۲۶ تا ۲۸/۵ قابلیت اطمینان از قابل قبول تا خوب (۰/۵ تا ۰/۷۵) و از ۲۸/۵ تا ۳۱ قابلیت اطمینان گره از قابل قبول تا مطلوب (۰/۷۵ تا ۱) است.

برای فشارهای بیشتر از ۳۱ متر حوادث و شکستگی لوله و شیرآلات و همچنین نشت آب در شبکه افزایش می‌یابد به همین دلیل قابلیت اطمینان کاهش پیدا می‌کند. از همین رو قابلیت اطمینان شبکه برای فشار ۳۱ تا ۴۰/۵ از مطلوب تا خوب (۱ تا ۰/۷۵)، برای فشار ۴۰/۵ تا ۵۰ خوب تا قابل قبول (۰/۷۵ تا ۰/۵)، برای فشار ۵۰ تا ۶۰ از قابل قبول تا غیر قابل قبول (۰/۵ تا ۰/۲۵) رو به کاهش و برای فشار بالای ۶۰ متر قابلیت اطمینان شبکه غیر قابل قبول است، و به صورت تابع (۲) محاسبه می‌شود.

$$NPRI(j, t) = \begin{cases} 0 & P < 10m \\ \frac{P-10}{32} & 10m < P < 26m \\ \frac{P-26}{10} + 0.5 & 26m < P < 31m \\ 1 & P = 31m \\ \frac{-(P-31)}{38} + 1 & 31m < P < 50m \\ \frac{-(P-50)}{40} + 0.5 & 50m < P < 60m \\ 0.25 & 60m < P \end{cases} \quad (2)$$

<sup>16</sup> Pressure Dependent Analysis

<sup>2</sup> Liserra et al

<sup>3</sup> Chang et al

<sup>4</sup> Wagner et al

که در این رابطه  $NPRI(j,t)$  شاخص قابلیت اطمینان فشار گره زام در گام زمانی  $t$  و  $P$  فشار در گره زام در گام زمان  $t$  است. به عبارتی برای هر گره در هر گام زمان قابلیت اطمینان فشاری محاسبه می‌شود. شاخص قابلیت اطمینان فشاری کل شبکه به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$NPRI(t) = \frac{\sum_{j=1}^{NN} q_{j,t}^{req} \times NPRI(j,t)}{\sum_{j=1}^{NN} q_{j,t}^{req}} \quad (3)$$

در این رابطه  $NPRI(t)$  شاخص قابلیت اطمینان فشاری کل شبکه در زمان  $t$ ،  $NN$  تعداد گره‌های شبکه و  $q_{j,t}^{req}$  تقاضای مورد نیاز گره زام در زمان  $t$  است. در هر گام زمانی یک شاخص فشاری برای شبکه محاسبه خواهد شد. چنانچه دبی مورد نیاز گره برابر صفر باشد، حتی در صورت کم بودن فشار گره روی شاخص کل تأثیرگذار نخواهد بود. شاخص قابلیت اطمینان فشاری برای کل شبکه در شبانه‌روز از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$NPRI = \frac{\sum_{t=1}^{24} NPRI(t)}{24} \quad (4)$$

بیشترین سرعت مجاز در شبکه‌های توزیع آب طبق نشریه‌ی شماره ۳-۱۱۷ برابر است با ۲ متر بر ثانیه که این مقدار برای شرایط جریان آتش‌نشانی تا ۲/۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد و کمترین سرعت جریان جهت جلوگیری از رسوب‌گذاری ۰/۳ متر بر ثانیه پیشنهاد شده است. دینی و تابش (۲۰۱۸) شاخص قابلیت اطمینان سرعتی را به صورت زیر معرفی کردند.

$$PVRI(j,t) = \begin{cases} 0 & V < 0 \text{ m/s} \\ \frac{5V}{3} & 0 \text{ m/s} < V < 0.3 \text{ m/s} \\ \frac{V-0.3}{2} + 0.5 & 0.3 \text{ m/s} < V < 0.8 \text{ m/s} \\ \frac{5(V-0.8)}{4} + 0.75 & 0.8 \text{ m/s} < V < 1 \text{ m/s} \\ 1 & V = 1 \text{ m/s} \\ \frac{-5(V-1)}{4} + 1 & 1 \text{ m/s} < V < 1.2 \text{ m/s} \\ \frac{-5(V-1.2)}{16} + 0.75 & 1.2 \text{ m/s} < V < 2 \text{ m/s} \\ \frac{-(V-2)}{2} + 0.5 & 2 \text{ m/s} < V < 2.5 \text{ m/s} \\ 0.25 & 2.5 \text{ m/s} < V \end{cases} \quad (5)$$

که در این رابطه  $PVRI(j,t)$  شاخص قابلیت اطمینان سرعت لوله زام در زمان  $t$  و  $V$  سرعت جریان لوله زام در زمان  $t$  است. شاخص قابلیت اطمینان سرعتی برای کل شبکه در زمان  $t$  به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$PVRI(t) = \frac{\sum_{j=1}^{NP} |Q_{j,t}| \times PVRI(j,t)}{\sum_{j=1}^{NP} |Q_{j,t}|} \quad (6)$$

$PVRI(t)$  شاخص قابلیت اطمینان سرعتی برای کل شبکه در زمان  $t$  و  $Q_{j,t}$  دبی جریان در لوله زام و زمان  $t$  است. به عبارتی در هر گام زمانی برای کل شبکه یک شاخص قابلیت اطمینان محاسبه خواهد شد. شاخص قابلیت اطمینان سرعتی برای کل شبکه در شبانه‌روز از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$PVRI = \frac{\sum_{t=1}^{24} PVRI(t)}{24} \quad (7)$$

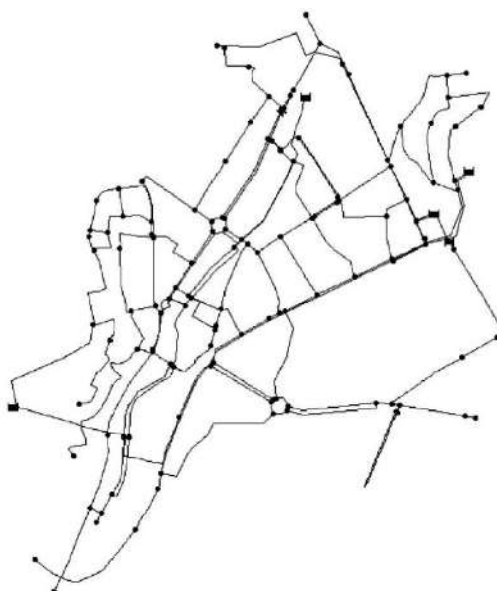
دینی و تابش (۲۰۱۸) شاخص قابلیت اطمینان کیفی شبکه را نیز معرفی کردند. از آنجایی که در این پژوهش هدف مدیریت فشار شبکه توزیع است این شاخص بررسی نخواهد شد. برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه از ترکیب شاخص‌های اطمینان فشاری و سرعتی استفاده شده است. از میانگین هندسی دو شاخص مذکور به عنوان شاخص قابلیت اطمینان تلفیقی شبکه استفاده می‌شود:

$$NRI = \sqrt{NPRI \times PVRI} \quad (۸)$$

بر اساس این رابطه چنانچه مقدار یکی از شاخص‌ها برابر صفر باشد، شاخص ترکیبی صفر خواهد بود. در این پژوهش شاخص‌های قابلیت اطمینان ارائه شده توسط دینی و تابش (۲۰۱۸) به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است.

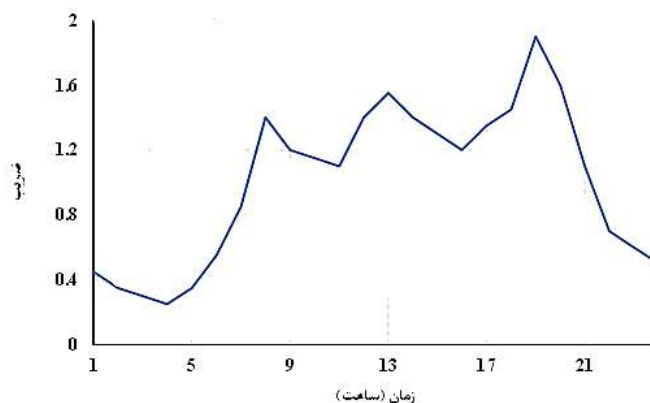
### شبکه جوانرود

شهرستان جوانرود از شهرستان‌های استان کرمانشاه در غرب کشور است. این شهرستان از جنوب شرق با روانسر، از شمال با پاوه، از غرب با کشور عراق و از جنوب غرب با سرپل ذهاب همسایه است. بر اساس سرشماری نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵ جمعیت این شهرستان ۷۵۱۶۹ نفر برآورد شده و همچنین بر اساس نشریه شماره ۱۱۷ سرانه مصرف برای هر نفر ۱۷۵ لیتر در شبانه‌روز به دست آمده است. این شهرستان در درون یک دره با توپوگرافی نامناسبی است. در اکثر نقاط شبکه توزیع دارای فشار اضافی است. جانمایی اجزای این شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. جانمایی شبکه توزیع آب جوانرود

ضریب الگوی مصرف در شبانه‌روز متغیر بوده و برای شهرستان جوانرود بر اساس نشریه شماره ۱۱۷ به صورت شکل (۲) است. در این شبکه کمترین ضریب مصرف ۰/۳ در ساعت ۴ و بیشترین ضریب برابر ۱/۹ در ساعت ۱۹ است. با توجه به هد مخازن بیشترین فشارها در ساعت ۴ و کمترین فشارها در ساعت ۱۹ است.



شکل ۲. تغییرات ضریب الگوی مصرف شبکه جوانرود

### الگوریتم جستجوی هماهنگ

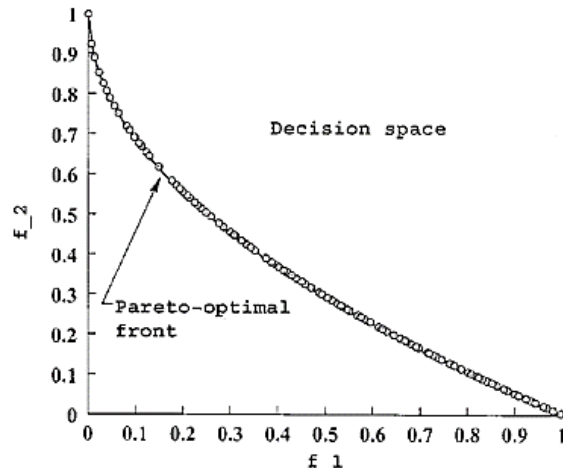
در حل مسائل شبکه‌های توزیع آب الگوریتم‌هایی مانند جستجوی ذرات PSO، جامعه مورچگان ACO و ... بسیار به کاررفته است. از میان این روش‌ها روش جستجوی هماهنگ نتایج بسیار خوبی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب نشان داده است. به همین دلیل این روش در بهینه‌سازی موقعیت و تنظیمات فشارشکن‌ها استفاده می‌شود.

الگوریتم جستجوی هماهنگ که اولین بار توسط گییم و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) معرفی شد، الهام گرفته از موسیقی است. تاکنون کاربرد زیادی در علوم مختلفی مانند بهینه‌سازی شبکه توزیع آب، تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام<sup>۲</sup>، بهینه‌سازی ساختاری و غیره داشته است (گییم و همکاران، ۲۰۰۲، لی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵، کاراهان و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳). برخی از این تحقیقات نشان داده‌اند که الگوریتم جستجوی هماهنگ در زمان کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند.

مراحل این الگوریتم به قرار زیر است:

۱. تعریف مقادیر پارامترهای الگوریتم و مسئله
۲. ایجاد حافظه هارمونی
۳. تولید هارمونی جدید از حافظه هارمونی
۴. به‌روزرسانی حافظه هارمونی
۵. بررسی معیار توقف

با توجه به توابع هدف، الگوریتم جستجوی هماهنگ تک هدفه و چند هدفه در این پژوهش به کاررفته است. در بهینه‌سازی تک هدفه انتخاب بهترین جواب راحت است اما در بهینه‌سازی چند هدفه اهداف بر یکدیگر اولویت ندارند و انتخاب جواب بهینه مشکل است. به همین منظور در تحقیقات پیش رو از مجموعه جواب‌های پرتو<sup>۵</sup> استفاده شده است. مجموعه پرتو عبارت است از جواب‌هایی که همگی نسبت به یکدیگر تسلط ندارند. در این مجموعه با حرکت از نقطه‌ای به نقطه دیگر مقدار مشخصی از یک هدف برای دستیابی به مقداری سود در هدف دیگر کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳. جبهه پارتو در مسئله با دو تابع هدف (دب و همکاران، ۲۰۰۲)

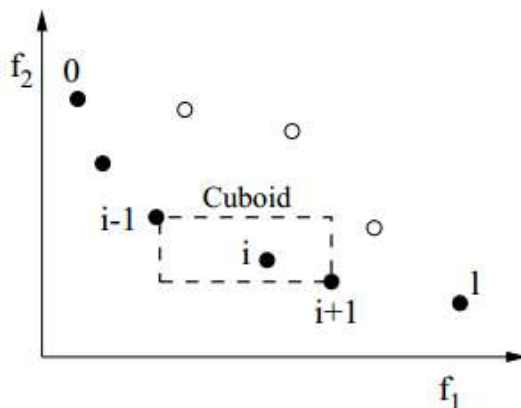
گام بعدی پس از مشخص کردن مجموعه جواب‌های پرتو حذف جواب‌های اضافی است. از آنجا که بدیهی است این جواب‌های اضافی با تعدادی از جواب‌های موجود در حافظه الگوریتم در یک مجموعه پرتو باشند برای حفظ یکنواختی و تنوع جواب‌ها، از روش فاصله ازدحامی (شکل ۴) برای حذف موارد اضافی استفاده شده است. فاصله ازدحامی هر جواب در مجموعه پرتو از رابطه (۹) به دست آمده می‌آید (دب و همکاران، ۲۰۰۲):

1 Harmony Search  
 2 Geem et al  
 3 Muskingum  
 4 Lee et al  
 5 Karahan et al  
 6 Pareto  
 7 Deb et al



$$d_j^i = \left| \frac{f_j^{i+1} - f_j^{i-1}}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} \right| \quad (9)$$

در این رابطه  $d_j^i$  فاصله ازدحامی جواب  $i$  ام در مجموعه پرتو  $z$  ام می‌باشد.  $f_j^{i+1}$  و  $f_j^{i-1}$  به ترتیب مقادیر تابع هدف در نقاط بعد و قبل از  $i$  می‌باشند.  $f_j^{\max}$  و  $f_j^{\min}$  حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف در مجموعه پرتو  $z$  ام می‌باشند.



شکل ۴. محاسبه فاصله ازدحامی (دب و همکاران، ۲۰۰۲)

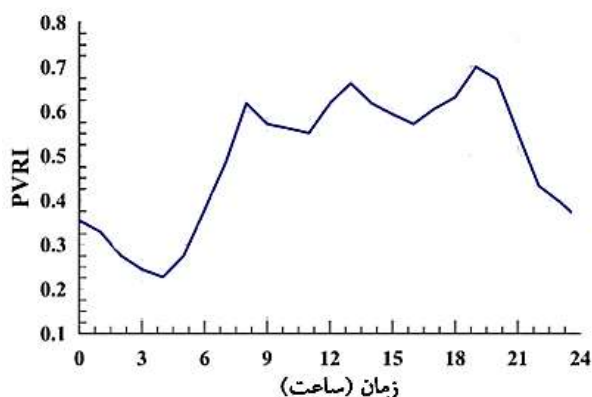
### سناریوها

به منظور مدیریت فشار شبکه توزیع آب شهر جوانرود سناریوهای مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سناریو اول محل و تنظیمات شیرهای فشار شکن متغیر تصمیم و قابلیت اطمینان ترکیبی تابع هدف خواهد بود. در سناریو دوم قطر لوله‌ها و محل و تنظیمات شیرهای فشار شکن به عنوان متغیر تصمیم و قابلیت ترکیبی تابع هدف خواهد بود. در این سناریو بررسی خواهد شد که آیا طراح قادر به طراحی شبکه با قابلیت اطمینان بالاتر بوده است یا خیر. در سناریو سوم محل و تنظیمات شیرهای فشار شکن متغیر تصمیم و قابلیت اطمینان فشاری و سرعتی دو تابع هدف هستند. در سناریو چهارم مشابه سناریو سوم است با این تفاوت که قطر لوله‌ها نیز متغیر تصمیم خواهد بود.

### یافته‌ها

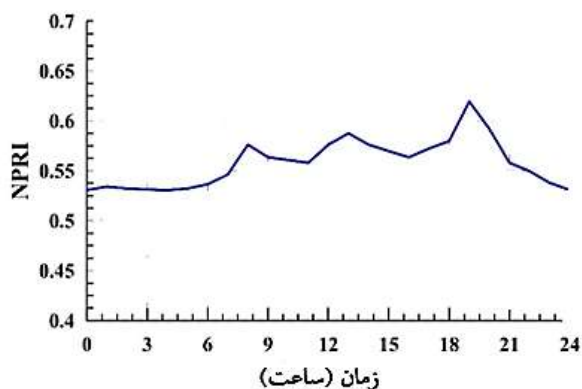
#### وضعیت موجود شبکه جوانرود

شکل ۵ شکل تغییرات قابلیت اطمینان سرعتی وضعیت موجود شبکه جوانرود را نسبت به زمان نشان می‌دهد. حداقل قابلیت اطمینان حدود ۰/۲۲ در ساعت ۴، حداکثر حدود ۰/۷ در ساعت ۱۹ و میانگین آن در ۲۴ ساعت شبانه‌روز برابر ۰/۴۷۲۳ است. از آنجایی که در ساعات با مصرف کم قابلیت اطمینان سرعتی پایین است، بنابراین در این شبکه تعدادی لوله وجود دارد که سرعت جریان در آن‌ها پایین است.



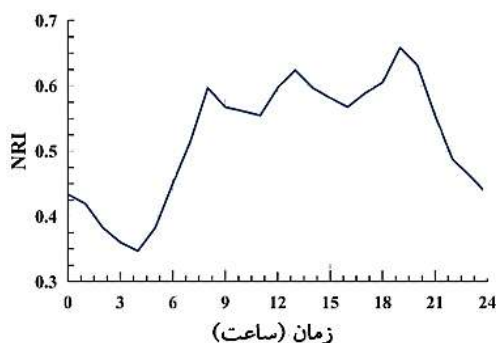
شکل ۵. قابلیت اطمینان سرعتی وضعیت موجود شبکه جوانرود

تغییرات قابلیت اطمینان فشاری وضعیت موجود شبکه در شبانه‌روز در شکل ۶ آمده است. در شبکه جوانرود حداقل شاخص قابلیت اطمینان فشاری ۰/۵۳ در ساعت ۴، حداکثر ۰/۶۲ در ساعت ۱۹ و میانگین آن ۰/۵۵۳۸ است.



شکل ۶. قابلیت اطمینان فشاری وضعیت موجود شبکه جانرود

در شکل ۷ قابلیت اطمینان ترکیبی در مدت ۲۴ ساعت شبانه‌روز ترسیم شده است. حداقل قابلیت اطمینان ترکیبی شبکه حدود ۰/۳۴ در ساعت ۴، حداکثر ۰/۶۵ در ساعت ۱۹ و میانگین قابلیت اطمینان برابر با ۰/۵۱۱۴ است. همان‌طور که قبلاً گفته شد در ساعت ۴ لوله‌ها با سرعت پایین و فشار بالا در گره‌ها وجود دارد که موجب کاهش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. بنابراین افزایش قابلیت اطمینان شبکه نیازمند تمهیداتی است که موجب افزایش سرعت در لوله و کاهش فشار گره‌ها شود.



شکل ۷. قابلیت اطمینان ترکیبی وضعیت موجود شبکه جانرود

### سناریو اول

در این سناریو متغیرهای تصمیم موقعیت، تنظیمات، زمان شروع و مدت‌زمان تأثیر شیرهای فشارشکن تنظیمی و تابع هدف شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تعداد شیرهای فشارشکن شاخص‌های قابلیت اطمینان ترکیبی شبکه افزایش می‌یابد. قابلیت اطمینان با یک شیر فشارشکن برابر با ۰/۵۶۱۳، با دو شیر فشارشکن تنظیمی برابر با ۰/۵۸۵۱ و قابلیت اطمینان با سه شیر فشارشکن تنظیمی با افزایش ۱۷ درصدی برابر با ۰/۵۹۷۴ است. نتایج این سناریو در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای دو و سه شیر فشارشکن محل نصب شیر فشارشکن یکسان اما دارای تنظیمات متفاوت هستند. لوله‌های ۵۶ و ۴۵ در حالت دو و سه شیر فشارشکن تکرار شده‌اند.

جدول ۱. نتایج سناریو اول

مدت‌زمان (ساعت)	زمان شروع	تنظیم شیر فشارشکن (متر آب)	شماره لوله	تابع هدف	تعداد شیر فشارشکن
۴	۲۰	۳۸	۱۰۳	۰/۵۶۱	۱
۱۱ و ۴	۱۳ و ۱۹	۵۰ و ۳	۴۵ و ۵۶	۰/۵۸۵۱	۲
۸ و ۱۴	۱۶ و ۷	۶ و ۲۷	۴۵ و ۵۶	۰/۵۸۵۱	۲
۴ و ۲، ۲	۹ و ۲۲، ۲۲	۳۰ و ۴۹، ۳۵	۴۵ و ۵۶، ۱۰۴	۰/۵۹۷۴	۳
۹ و ۸، ۱۷	۳ و ۱۶، ۶	۳۱ و ۴۷، ۲۸	۴۵ و ۵۶، ۱۰۴	۰/۵۹۷۴	۳

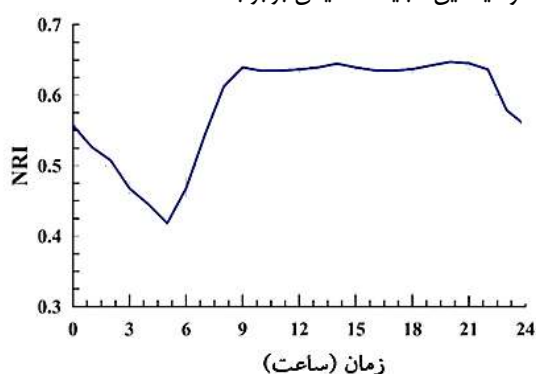
## سناریو دوم

متغیرهای تصمیم در سناریو دوم موقعیت، تنظیمات، زمان شروع، مدت زمان شیر فشارشکن، قطر لوله‌ها و تابع هدف قابلیت اطمینان ترکیبی است. به عبارتی این سناریو به دنبال بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه با تغییر قطر و استفاده از شیرهای فشارشکن به صورت هم‌زمان است. قابلیت اطمینان ترکیبی با یک شیر فشارشکن  $0/5613$ ، با دو شیر فشارشکن  $0/5815$  و با سه شیر فشارشکن  $0/5812$  به دست آمده است. در حالت دو و سه شیر فشارشکن تقریباً  $13/7$  درصد افزایش قابلیت اطمینان ترکیبی داشته است.

جدول ۲. نتایج سناریو دوم

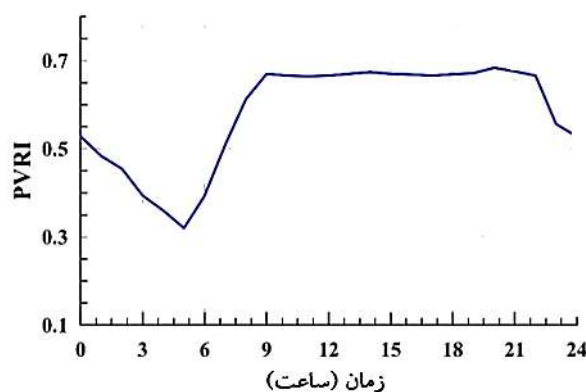
مدت زمان (ساعت)	زمان شروع	تنظیم شیر فشارشکن (متر آب)	شماره لوله	تابع هدف	تعداد شیر فشارشکن
۳	۲۱	۲۱	۵۱	$0/5613$	۱
۱۱ و ۹	۳ و ۱۳	۱۶ و ۳۹	۱۰۸ و ۹۸	$0/5815$	۲
۱۴ و ۲، ۴	۷ و ۲۲، ۱۴	۳ و ۳۵، ۲۲	۱۵۹ و ۵۰، ۱۴۸	$0/5812$	۳

شکل (۸) تغییرات قابلیت اطمینان ترکیبی در مدت ۲۴ ساعت شبانه‌روز در حالت دو شیر فشارشکن ترسیم شده است. حداقل قابلیت اطمینان ترکیبی شبکه  $0/4183$ ، حداکثر  $0/6471$  و میانگین قابلیت اطمینان برابر با  $0/5815$  است.



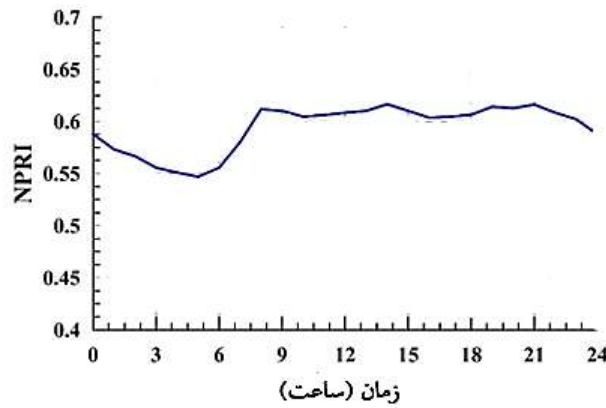
شکل ۸. قابلیت اطمینان ترکیبی سناریو دوم

شکل (۹) تغییرات قابلیت اطمینان سرعتی سناریو دوم را نسبت به زمان نشان می‌دهد. حداقل قابلیت اطمینان حدود  $0/32$ ، حداکثر  $0/6835$  و میانگین آن در ۲۴ ساعت شبانه‌روز برابر  $0/5807$  است که این مقدار نسبت به میانگین قابلیت اطمینان سرعتی موجود شبکه ۲۳ درصد افزایش یافته است.



شکل ۹. قابلیت اطمینان سرعتی سناریو دوم

تغییرات قابلیت اطمینان فشاری شبکه در شبانه‌روز در شکل (۱۰) آمده است. در این سناریو حداقل شاخص قابلیت اطمینان فشاری  $0/5469$ ، حداکثر  $0/6165$  و میانگین آن  $0/5939$  است که به نسبت وضعیت اولیه شبکه ۷ درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۰. قابلیت اطمینان فشاری سناریو دوم

### سناریو سوم

در این سناریو تابع هدف اول قابلیت اطمینان فشاری، تابع هدف دوم قابلیت اطمینان سرعتی و متغیرهای تصمیم موقعیت و تنظیمات شیرهای فشارشکن تنظیمی است. با توجه به نتایج شبکه با دو شیر فشارشکن به قابلیت اطمینان فشاری ۰/۵۹۱۹ و قابلیت اطمینان سرعتی ۰/۵۷۸۳ و با سه شیر فشارشکن به قابلیت اطمینان فشاری ۰/۵۹۱۸ و قابلیت اطمینان سرعتی ۰/۵۷۳۲ خواهد رسید. در تمام حالات قابلیت اطمینان فشاری و سرعتی نسبت به وضعیت موجود افزایش یافته است. این افزایش در حالت دو شیر فشارشکن بیش از حالت سه شیر فشارشکن است. در حالت دو شیر فشارشکن قابلیت اطمینان فشاری حدود ۷ درصد و قابلیت اطمینان سرعتی حدود ۲۲ درصد نسبت به وضعیت موجود افزایش داشته است. در این سناریو قابلیت اطمینان ترکیبی ۰/۵۸۵۰ خواهد بود که حدود ۱۴ درصد بهبود پیدا کرده است.

جدول ۳. نتایج سناریو سوم

شماره لوله	زمان شروع	تنظیم شیر فشارشکن (متر آب)	مدت زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان سرعتی	قابلیت اطمینان فشاری	تعداد شیر فشارشکن
۷	۱۱	۷	۳	۰/۵۵۰۱	۰/۵۷۲۷	۱
۱۴۷	۶	۳۸	۱۰	۰/۵۳۴۷	۰/۵۸۰۳	۱
۱۱۶ و ۱۷۳	۱ و ۱۱	۴۰ و ۹	۱ و ۲	۰/۵۷۸۳	۰/۵۹۱۹	۲
۴۵ و ۵۶	۱۶ و ۱۶	۳۱ و ۱۳	۸ و ۸	۰/۵۴۲۲	۰/۵۹۳۳	۲
۶۵ و ۲۷، ۱۰۷	۱۰ و ۲۱، ۷	۶ و ۳۴، ۲	۲ و ۳، ۱۱	۰/۵۷۳۲	۰/۵۹۱۸	۳
۳۰ و ۲۳، ۱۶۱	۵ و ۱، ۴	۵ و ۳۸، ۴۶	۱۱ و ۱۱، ۱۸	۰/۵۲۰۴	۰/۵۹۲۷	۳

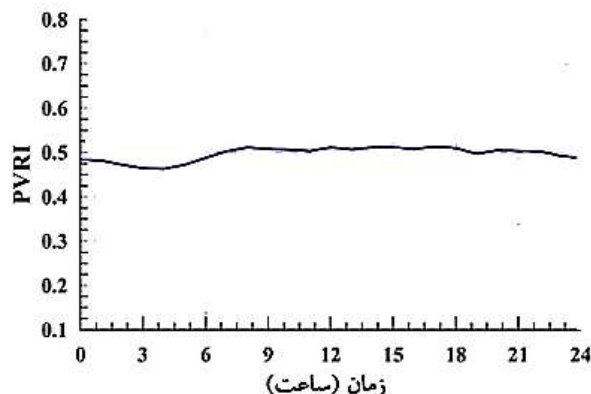
### سناریو چهارم

در این سناریو توابع هدف قابلیت اطمینان‌های فشاری و سرعتی، و متغیرهای تصمیم شیرهای فشارشکن تنظیمی و قطر لوله‌ها است. جبهه پرتو برای یک، دو و سه شیر فشارشکن در جدول ۴ ارائه شده است. با افزایش تعداد شیرهای فشارشکن وضعیت نتایج بهبود یافته است. بهترین نتیجه در این سناریو با سه شیر فشارشکن قابلیت اطمینان فشاری با ۵ درصد افزایش ۰/۵۸۰۲ و قابلیت اطمینان سرعتی با ۱۸ درصد افزایش ۰/۵۶۰۹ به دست آمده است. در این سناریو قابلیت اطمینان ترکیبی برابر ۰/۵۷۰۴ است.

جدول ۴. نتایج سناریو چهارم

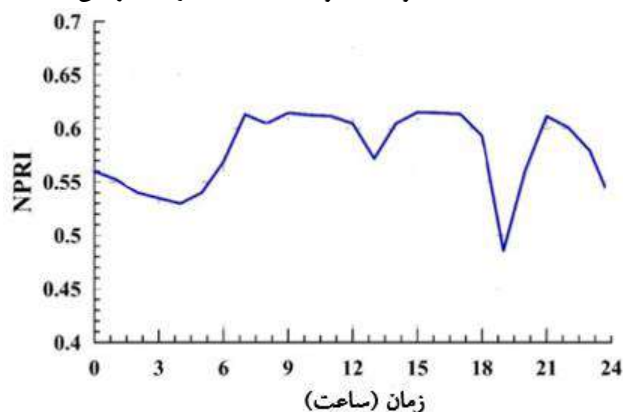
شماره لوله	زمان شروع	تنظیم شیر فشارشکن (متر آب)	مدت زمان (ساعت)	قابلیت اطمینان سرعتی	قابلیت اطمینان فشاری	تعداد شیر فشارشکن
۱۴۶	۲۰	۳۷	۴	۰/۵۲۳۲	۰/۵۷۸۰	۱
۵۰ و ۴۶	۳ و ۸	۲۴ و ۱۷	۲ و ۱۱	۰/۵۵۰۶	۰/۵۷۴۳	۲
۱۴۷ و ۸۰	۱۶ و ۸	۲۷ و ۳۱	۸ و ۶	۰/۵۵۰۶	۰/۵۷۲۹	۲
۸۵ و ۱۳۳	۱۰ و ۸	۵۰ و ۱۴	۱۰ و ۶	۰/۴۹۶۲	۰/۵۷۸۷	۲
۱۱ و ۵۱، ۱۰۰	۱ و ۱۲، ۱	۱۰ و ۱۷، ۲۶	۶ و ۱۲، ۹	۰/۵۶۰۹	۰/۵۸۰۲	۳
۶۰ و ۱۴۷، ۹۷	۸ و ۱۶، ۲۱	۲ و ۲۹، ۳۱	۳ و ۸، ۳	۰/۵۶۲۶	۰/۵۷۴۵	۳
۱۳۳ و ۱۶۶، ۵۱	۳ و ۱۶، ۱۷	۱۳ و ۴۰، ۲	۱۷ و ۸، ۳	۰/۵۵۳۴	۰/۵۷۲۲	۳

شکل (۱۱) تغییرات قابلیت اطمینان سرعتی یکی از نتایج سناریو چهارم را نسبت به زمان نشان می‌دهد (سومین نتیجه با دو شیر فشار شکن). حداقل قابلیت اطمینان سرعتی ۰/۴۶۲۹، حداکثر ۰/۵۱۲۴ و میانگین آن در ۲۴ ساعت شبانه‌روز برابر ۰/۴۹۶۲ است که این مقدار نسبت به وضعیت موجود شبکه ۵ درصد افزایش یافته است.



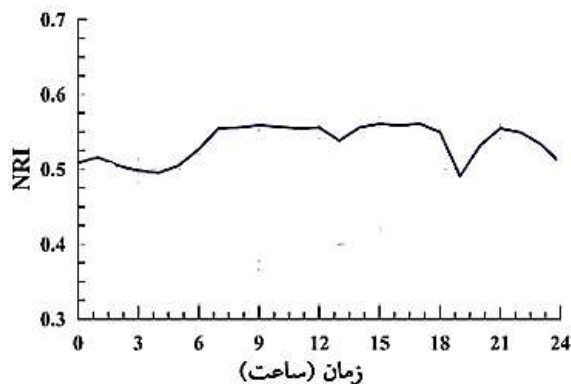
شکل ۱۱. قابلیت اطمینان سرعتی برای سناریو چهارم

تغییرات قابلیت اطمینان فشاری سناریو ۵ در شبانه‌روز در شکل (۱۲) آمده است. در این سناریو حداقل شاخص قابلیت اطمینان فشاری ۰/۴۸۵۶، حداکثر ۰/۶۱۵۱ و میانگین آن ۰/۵۷۸۷ است که به نسبت وضعیت اولیه شبکه ۴/۵ درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۲. قابلیت اطمینان فشاری برای سناریو چهارم

شکل (۱۳) قابلیت اطمینان ترکیبی سناریو چهارم را در مدت ۲۴ ساعت شبانه‌روز نشان می‌دهد. حداقل قابلیت اطمینان ترکیبی شبکه ۰/۴۹۰۹، حداکثر ۰/۵۶۰۶ و میانگین قابلیت اطمینان برابر با ۰/۵۳۵۳ است که نسبت به وضعیت موجود شبکه ۴/۵ درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۳. قابلیت اطمینان ترکیبی برای سناریو چهارم

#### بحث

وجود فشار بالا در شبکه‌های توزیع آب موجب نشت، هدر رفت آب و متعاقباً افزایش هزینه‌های بهره‌برداری خواهد شد. شبکه توزیع آب شهر جوانرود به دلیل اختلاف ارتفاع زیاد در برخی نقاط دارای فشار بالا است. در این پژوهش به منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه

توزیع آب جانرود چهار سناریو با الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه و دو هدفه تعریف و نتایج آن‌ها ارائه شد. نتیجه تمام سناریوها افزایش مقدار قابلیت اطمینان ترکیبی نسبت به وضعیت موجود را نشان داده است.

### نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج الگوریتم تک هدفه و دو هدفه نشان می‌دهد که الگوریتم تک هدفه قابلیت اطمینان ترکیبی بزرگ‌تری نسبت به الگوریتم دو هدفه ارائه می‌دهد (مقایسه سناریو اول و سوم و مقایسه سناریو دوم و چهارم). اما اختلاف بین حداقل و حداکثر قابلیت اطمینان ترکیبی حاصل از الگوریتم تک هدفه بیشتر از نتایج الگوریتم دو هدفه است. به عبارتی مقادیر قابلیت اطمینان حاصل از الگوریتم دو هدفه در طول شبانه‌روز تغییر زیادی ندارد. در نتایج الگوریتم تک هدفه قابلیت اطمینان سرعتی در برخی ساعات شبانه‌روز مقادیر پایینی را دارد. در صورتی که قطر لوله جز متغیرهای تصمیم باشد یا خیر، قابلیت اطمینان تغییر زیادی ندارد. دلیل آن اختلاف ارتفاع زیاد در شبکه توزیع آب جانرود است که در نقاط با فشار بالا نیاز به شیر فشارشکن خواهد بود و افت در لوله‌ها قادر به کاهش قابل توجه این اختلاف فشار نیست. راه‌حل دیگری که پیشنهاد می‌شود زون‌بندی شبکه بر اساس اختلاف ارتفاع است که در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است. بر اساس قابلیت اطمینان سرعتی معرفی شده توسط دینی و تابش (۲۰۱۸) لازم است که سرعت جریان در لوله‌ها در تمام ساعات شبانه‌روز حدود یک متر بر ثانیه باشد. در صورتی که مطابق نشریه ۳-۱۱۷ چنانچه تنها در یک ساعت از شبانه‌روز سرعت به بیش از ۰/۷ متر بر ثانیه برسد، امکان رسوب در لوله وجود ندارد.

## تقدیر و تشکر

لازم است نویسندگان مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان کرمانشاه برای حمایت مادی و معنوی از این مقاله تشکر و قدردانی کنند.

## منابع

دینی، مهدی، و تابش، مسعود. (۱۳۹۷). ارائه شاخص قابلیت اطمینان جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب. مجله آب و فاضلاب. ۲۹(۳)، ۱-۱۶. <https://doi.org/10.22093/wwj.2017.51035.2154>

نادرخانی، علی محمد، جزءقاسمی، علیرضا، و حسینخانی، علی. (۱۳۹۸). بررسی اثرات زون بندی و مدیریت فشار شبکه در شبکه توزیع آب (مطالعه موردی شهر قیدار). دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدر رفت و بازیافت، تهران. <https://civilica.com/doc/990471>

## References

- Chang, D., Lee, H., Yoo, D., & Kim, J. (2019). Quantification of the head-outflow relationship for pressure-driven analysis in water distribution networks. *KSCE J. Civ. Eng*, 23, 3353–3363. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1883-3>
- Dai, P.D. (2021). Optimal Pressure Management in Water Distribution Systems Using an Accurate Pressure Reducing Valve Model Based Complementarity Constraints. *Water*, 13, 825. <https://doi.org/10.3390/w13060825>
- Dai, P.D., & Li, P. (2016). Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Systems Based on an Extended Model for Pressure Reducing Valves. *Water Resour Manage*, 30(3), 1239–1254. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1223-z>
- Dini, M. & Tabesh, M. (2018). A new reliability index for evaluating the performance of water distribution network. *Journal of Water and Wastewater*, 29(3), 1-16. <https://dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.51035.2154> [In Persian]
- Dini, M., & Asadi, A. (2020). Optimal operational scheduling of available partially closed valves for pressure management in water distribution networks. *Water Resources Management*, 34, 2571-2583. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-020-02579-4>
- Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*. IWA Publishing, London. 296 pp. <https://www.iwapublishing.com/books/9781900222112/losses-water-distribution-networks>
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *SIMULATION*, 76(2), 60-68. <http://dx.doi.org/10.1177/003754970107600201>
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2002). Harmony Search Optimization: Application to Pipe Network Design. *International Journal of Modelling and Simulation*, 22(2), 125-133. <https://doi.org/10.1080/02286203.2002.11442233>
- Gupta, A. D., & Kulat, K. (2018). Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure management techniques. Case study: Nagpur, India. *Water Supply*, 18(6), 2015-2027. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2018.023>
- Gupta, A. D., Bokde, N., Marathe, D., & Kulat, K. (2017). Optimization techniques for leakage management in urban water distribution networks. *Water Supply*, 17(6), 1638-1652. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2017.064>
- Karahan, H., Gurarslan, G., & Geem, Z. W. (2013). Parameter estimation of the nonlinear Muskingum flood-routing model using a hybrid harmony search algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(3), 352–360. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000608](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000608)

- Lee, K. S., Geem, Z. W., Lee, S. H., & Bae, K. W. (2005). The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization. *Engineering Optimization*, 37(7), 663-684. <https://doi.org/10.1080/03052150500211895>
- Liserra, T., Maglionico, M., Ciriello, V., & Di Federico, V. (2014). Evaluation of Reliability Indicators for WDNs with Demand-Driven and Pressure-Driven Models. *Water Resources Management*, 28(5), 1201-1217. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0522-5>
- Liu, J., Yu, G., & Savic, D. (2011). Deficient-Network Simulation Considering Pressure-Dependent Demand. *ICPTT 2011*, 886-900. [http://dx.doi.org/10.1061/41202\(423\)94](http://dx.doi.org/10.1061/41202(423)94)
- Naderkhani, A. M., Jozeghasemi, A. R. & Hossienkhani, A. (2019). Investigation the effects of zoning and network pressure management in water distribution network (Case study: Ghidar city). *Proc. 2019, 2ed Nat. Conf. on Water Consumption Management Loss Reduction & Reuse, Tehran* <https://civilica.com/doc/990471> [In Persian]
- Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M., & Moridi, A. (2010). Pressure management model for urban water distribution networks. *Water Resour Manage*, (24), 437-458. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-009-9454-x>
- Nicolini, M., & Zovatto, L. (2009). Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(3), 178-187. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2009\)135:3\(178\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:3(178))
- Nicolini, M., Giacomello, C., & Deb, K. (2011). Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 134-142. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000087](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000087)
- Page, P. R., Abu-Mahfouz, A. M., & Mothetha, M. L. (2017). Pressure Management of Water Distribution Systems via the Remote Real-Time Control of Variable Speed Pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(8), 04017045. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000807](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000807)
- Paola, F. D., Giugni, M., & Portolano, D. (2017). Pressure Management through Optimal Location and Setting of Valves in Water Distribution Networks Using a Music-Inspired Approach. *Water Resources Management*, 31, 1517-1533. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1592-y>
- Shirzad, A., & Tabesh, M. (2016). New indices for reliability assessment of water distribution networks. *Journal of Water Supply*, 65(5), 384-395. <http://dx.doi.org/10.2166/aqua.2016.091>
- Wagner, J. M., Shamir, U., & Marks, D. H. (1988). Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:3\(276\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(276))
- WHO. (2001). World Health Organisation. Leakage management and control - a best practice manual. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/66893>





## Prediction of climatic factors and water productivity of grain corn field (*Zea mays L.*) in the conditions of climate change

Parisa Karami<sup>1</sup> , Farzad Mondani<sup>2</sup> , Rozhin Ghobadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student of Agroecology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: [parisa.karamiii97@gmail.com](mailto:parisa.karamiii97@gmail.com)

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associated Professor, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: [f.mondani@razi.ac.ir](mailto:f.mondani@razi.ac.ir)

<sup>3</sup> Ph. D. Graduated of Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: [rozhin.ghobadi@gmail.com](mailto:rozhin.ghobadi@gmail.com)

### ABSTRACT

#### Introduction

The increase of greenhouse gases in the last few decades has upset the climate balance of the planet, which is called the phenomenon of climate change. According to the latest report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, the main cause of global warming and climate change since the middle of the 20th century has been the increase in greenhouse gases (especially carbon dioxide, methane and nitrogen oxide) due to human activities. Although farmers are not able to control the climatic conditions, but management and changes in factors such as irrigation, soil, crop varieties, activities and technologies used in the cultivation of crops can reduce the harmful effects of climate change. It has a significant role on the growth, production and water efficiency of agricultural products. Therefore, according to the significant area under cultivation of corn in Kermanshah province, this study aims to predict some of the most important factors affecting growth and production in the conditions of climate change, as well as simulating the effects of climate change on water productivity and finally presenting adaptation strategy to the changes made in corn water productivity under the climatic conditions of Kermanshah region were carried out.

#### Material and Methods

The present study was conducted to simulate the effects of climate change on maize growth, production and water productivity at the experimental field of Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran, during 2017-2018. The evaluated factors included daily solar radiation, daily minimum temperature, daily maximum temperature, amount of water consumption and evapotranspiration during the corn growth period. The CERES-Maize model was used in order to simulate the evaluated characteristics of corn. The daily meteorological information required to create the weather file of Kermanshah city for the base period (1980-2010) was obtained from the American National Aeronautics and Space Administration. Meteorological information for the near future (2020-2050) and long-term (2050-2080) periods for RCP8.5 and RCP4.5 climate change scenarios were also obtained from MarkSim site.

#### Results and discussion

The results of prediction of general circulation models showed that according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the total radiation for maize growth period from 3418 MJ/m<sup>2</sup> under baseline conditions, will reach to 3983 and 3984 MJ/m<sup>2</sup> for the near future period and 4006 and 4023 MJ/m<sup>2</sup> for far future period, respectively. Under basal condition, the average temperature for maize growth period was 22°C which based on RCP4.5 and RCP8.5 scenarios it will increase 2.3% and 4.3% in the near future, and 8.5% and 17.2% in the far future, respectively. The amount of water consumed, water use efficiency and evapotranspiration in the near future climate change in the scenario RCP4.5 varied as 9.1, -5.4 and 7.7 -0.18 % and in the RCP8.5 scenario varied as, 9.2, -11.6 and 6.7% compared to baseline conditions, respectively. These values for the RCP4.5 scenario in the far future climate change condition were 9.7, -23.7 and 6.9% and for the RCP8.5 scenario were 10.1, -50.7 and 5.7%, respectively. Regarding to the effect of sowing date, in both near and far future climate changes and under both scenarios, by sowing the studied cultivars at late dates (May 15 and May 25) compared to the early dates (April 15 and April 25) and common date (May 4), the water use efficiency was improved. Among the studied cultivars, Simon cultivar had the highest water use efficiency.

#### Conclusions

In general, according to our results, sowing of Simon cultivar in May 25 which had the highest water use efficiency in both future climate periods and both scenarios, it can suggest as a suitable strategy to reduce the negative effects of climate change on maize production in Kermanshah region.

**Keywords:** Daily solar radiation, temperature, adaptation strategy, water use efficiency

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 25 December 2022 Revised: 11 April 2023 Accepted: 13 May 2023 ePublished: 27 June 2023

**Cite this article:** Karami, P., Mondani, F., & Ghobadi, R. (2023). Prediction of climatic factors and water productivity of grain corn field (*Zea mays L.*) in the conditions of climate change. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(1), 25-41. DOI: <https://doi.org/10.22126/atwe.2023.8850.1039>





## پیش‌بینی فاکتورهای اقلیمی و بهره‌وری آب مزرعه ذرت دانه‌ای (*Zea mays L.*) در شرایط تغییر اقلیم

پریسا کرمی<sup>۱</sup>، فرزاد مندنی<sup>۲</sup>، روزین قبادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [parisa.karamiii97@gmail.com](mailto:parisa.karamiii97@gmail.com)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار اکولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [f.mondani@razi.ac.ir](mailto:f.mondani@razi.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [rozhin.ghobadi@gmail.com](mailto:rozhin.ghobadi@gmail.com)

### چکیده

این تحقیق برای شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر فاکتورهای محیطی تأثیرگذار بر رشد، تولید و بهره‌وری آب گیاه ذرت در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه طی سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ اجرا شد. فاکتورهای مورد ارزیابی شامل تشعشع روزانه خورشید، درجه حرارت حداقل روزانه، درجه حرارت حداکثر روزانه، میزان آب مصرفی و تبخیر و تعرق طی دوره رشد ذرت بود. به‌منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های مورد ارزیابی ذرت از مدل CERES-Maize استفاده شد. اطلاعات هواشناسی موردنیاز برای ساخت فایل هواشناسی شهرستان کرمانشاه برای دوره مینا (۲۰۱۰-۱۹۸۰) از سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا اخذ شد. اطلاعات هواشناسی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۰) و دور (۲۰۸۰-۲۰۵۰) نیز برای سناریوهای تغییر اقلیم RCP4.5 و RCP8.5 از سایت مارکسیم به دست آمد. نتایج پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی نشان داد که مجموع تشعشع روزانه خورشید طی دوره رشد ذرت از ۳۴۱۸ مگاژول بر مترمربع در شرایط مینا، طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به ۳۹۸۳ و ۳۹۸۴ مگاژول بر مترمربع برای دوره آینده نزدیک و به ۴۰۰۶ و ۴۰۲۳ مگاژول بر مترمربع برای دوره آینده دور رسید. در شرایط مینا میانگین دمای طول دوره رشد ذرت ۲۲ درجه سانتی‌گراد بود که بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب، ۲/۳ و ۴/۳ درصد در دوره آینده نزدیک و ۸/۵ و ۱۷/۲ درصد در دوره آینده دور افزایش یافت. میزان آب مصرفی، کارایی مصرف آب و تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تغییر اقلیم آینده نزدیک در سناریوی RCP4.5 نسبت به شرایط مینا به ترتیب، ۹/۱، -۵/۴ و ۷/۷ درصد و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب، ۹/۲، -۱۱/۶ و ۶/۷ درصد تغییر کرد. این مقادیر در شرایط تغییر اقلیم آینده دور برای سناریوی RCP4.5 به ترتیب، ۹/۷، -۲۳/۷ و ۶/۹ درصد و برای سناریوی RCP8.5 به ترتیب، ۱۰/۱، -۵۰/۷ و ۵/۷ درصد بودند. در رابطه با اثر تاریخ کاشت، در دوره‌های اقلیمی آینده و طبق سناریوها، کاشت ذرت در تاریخ‌های دیر هنگام (۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) در مقایسه با تاریخ‌های زودهنگام (۲۶ فروردین و ۵ اردیبهشت) و رایج (۱۵ اردیبهشت) منجر به بهبود کارایی مصرف آب شد. در بین ارقام موردبررسی نیز رقم Simon بیشترین کارایی مصرف آب را داشت. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده کاشت رقم Simon در تاریخ ۴ خرداد می‌تواند به‌عنوان راهکاری برای مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم بر بهبود بهره‌وری آب پیشنهاد گردد.

**واژه‌های کلیدی:** تشعشع روزانه خورشید، درجه حرارت، راهکارهای سازگاری، کارایی مصرف آب

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۴ دی ۱۴۰۱ اصلاح: ۲۲ فروردین ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۱۳ خرداد ۱۴۰۲

**استناد:** کرمی، پ، مندنی، ف، و قبادی، ر. (۱۴۰۲). پیش‌بینی فاکتورهای اقلیمی و بهره‌وری آب مزرعه ذرت دانه‌ای (*Zea mays L.*) در شرایط تغییر اقلیم. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۳(۱)، ۴۱-۲۵. شناسه دیجیتال: <https://doi.org/10.22126/atwe.2023.8850.1039>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه‌ی اخیر باعث برهم خوردن تعادل اقلیمی کره زمین شده که به آن پدیده تغییر اقلیم گفته می‌شود. طبق آخرین گزارش هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (۲۰۱۳)، عامل اصلی گرمایش جهانی و تغییر اقلیم از اواسط قرن بیستم به بعد افزایش گازهای گلخانه‌ای (به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، متان و اکسید نیتروژن) در اثر فعالیت‌های انسان بوده است. در طی سال‌های گذشته موضوع تغییر اقلیم در بسیاری از مطالعات علمی مطرح شده است، به‌طوری‌که نوسان‌ها و تغییرات اقلیمی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین چالش‌های محیطی هستند که در شروع قرن ۲۱ میلادی موردتوجه قرار گرفته‌اند (هولم<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۹). بنا بر گزارش هیئت بین دولتی تغییر اقلیم روند گرم شدن کره زمین به‌سرعت در حال افزایش است و انتظار می‌رود که با صرف‌نظر از اثری که گازهای گلخانه‌ای بر اقلیم جهانی دارند، دمای کره زمین تا سال ۲۰۳۰ نسبت به اواخر قرن بیستم تقریباً یک درجه سانتی‌گراد در مقیاس جهانی گرم شود (هولم و همکاران، ۱۹۹۹). چنانچه غلظت گازهای گلخانه‌ای اتمسفر با سرعت فعلی افزایش یابد پیش‌بینی اغلب مدل‌های اقلیمی موجود حاکی از آن است که میانگین دمای جهان در سال ۲۱۰۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ میلادی حداقل دو درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و باوجود اینکه دامنه عدم قطعیت پیش‌بینی دما برای سال ۲۱۰۰ بین ۱ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد است ولی باید توجه داشت که حتی یک درجه افزایش در طی ده سال گذشته نیز اثرات قابل‌توجهی را در پی داشته است (ساندرز<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹).

امروزه در شرایطی که رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی، تقاضا برای غذا را افزایش داده است (اوزکان<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۲)، تغییر اقلیم به‌طور مستقیم می‌تواند بر امنیت غذایی در نقاط مختلف جهان تأثیرگذار باشد، زیرا فرآیندهای تغییر اقلیم که شامل افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری، دما و متغیر بودن بارش است به‌طور مستقیم محصولات کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (موریسون<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). کشاورزی به دلیل ارتباط بسیار نزدیک با شرایط آب و هوایی نسبت به تغییر اقلیم بسیار آسیب‌پذیر است و تغییر اقلیم می‌تواند از دامنه بهینه در رابطه با دمای موردنیاز برای رشد و میزان آب موردنیاز، تولیدات گیاهی را دستخوش تغییر کند (رانوزی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۲).

اگرچه کشاورزان قادر نیستند شرایط اقلیمی را کنترل کنند، ولی مدیریت و تغییر در فاکتورهایی چون آبیاری، خاک، رقم محصول، فعالیت‌ها و تکنولوژی‌های مورداستفاده در کشت محصولات زراعی می‌تواند در کاهش اثرات مضر تغییر اقلیم بر رشد، تولید و بهره‌وری آب محصولات کشاورزی نقش بسزایی داشته باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۹۲). تخفیف و سازگاری<sup>۶</sup> دو روش شناخته‌شده برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم است (ازکان و آکائوز<sup>۷</sup>، ۲۰۰۲). منظور از سازگاری استراتژی‌های است که رشد و نمو گیاه طوری تنظیم شود که کمتر در معرض تغییرات اقلیمی به وقوع پیوسته قرار بگیرد (روزنویگ و توبیلو<sup>۸</sup>، ۲۰۰۷). راهکارهای سازگاری بسته به سیستم کشاورزی منطقه و سناریوهای تغییر اقلیمی متفاوت است. از جمله این استراتژی‌ها می‌توان به تغییر تاریخ کاشت، تراکم کاشت (ترنکا<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۴)، استفاده از ارقام مقاوم به شرایط گرم‌تر، تغییر در تناوب کاشت و مدیریت آبیاری اشاره کرد (اسمیت و اسکینر<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۲؛ توبیلو<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۲).

با توجه به اهمیت تولید ذرت، تغییرات اقلیمی می‌تواند اثرات منفی خود را در زمینه کاهش عملکرد در منطقه موردبررسی و در سطح کشور نشان دهد. بنابراین برای مقابله با کاهش عملکرد حاصل از تغییرات اقلیمی آینده اصلاح و تغییر مدیریت زراعی در قالب راهکارهای سازگاری ضروری است. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی می‌توان از طریق گزینه‌های مانند تنظیم تاریخ کاشت، تغییر الگوی کشت، کشت ارقام مقاوم‌به‌گرما و ترویج گیاهان زراعی جدید (گیاهان فراموش‌شده و کمتر استفاده‌شده) اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی را کاهش داد (تینگم و ریوینگتون<sup>۱۲</sup>، ۲۰۰۹). استفاده از تغییر در تاریخ کاشت به‌عنوان راهکار سازگاری برای فرار از تنش

<sup>1</sup> Hulme

<sup>2</sup> Saunders

<sup>3</sup> Ozkan

<sup>4</sup> Morison

<sup>5</sup> Ranuzzi

<sup>6</sup> Mitigation

<sup>7</sup> Adaptation

<sup>8</sup> Ozkan and Akcaoz

<sup>9</sup> Rosenzweig and Tubiello

<sup>10</sup> Trnka

<sup>11</sup> Smit and Skinner

<sup>12</sup> Tubiello

<sup>13</sup> Tingem and Rivington

گرما در شرایط تغییر اقلیم می تواند برای محصول ذرت در نظر گرفته شود (لیو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). رحیمی مقدم و همکاران (۲۰۱۸) نیز دریافتند راهکارهای سازگاری برای ارقام ذرت در جنوب ایران در شرایط تغییر اقلیم شامل ارقام مختلف و مدیریت تاریخ کاشت بود. بنابراین با توجه به سطح زیر کشت قابل توجه ذرت در استان کرمانشاه این مطالعه باهدف پیش بینی برخی از مهم ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر رشد و تولید در شرایط تغییر اقلیم و همچنین شبیه سازی اثرات تغییر اقلیم بر بهره وری آب و در نهایت ارائه راهکارهای سازگاری به تغییرات ایجاد شده در بهره وری آب ذرت تحت شرایط اقلیمی منطقه کرمانشاه انجام شد.

## مواد و روش ها

### شبیه سازی اثرات تغییر اقلیم

به منظور شبیه سازی ویژگی های مورد ارزیابی گیاه ذرت و مقایسه مقادیر شبیه سازی شده با مقادیر واقعی، مدل CERES-Maize از بسته نرم افزاری DSSAT v4.6 استفاده شد (هوگنboom<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). برای شبیه سازی توسط مدل CERES-Maize ابتدا لازم است که داده های مورد نیاز در قالب فایل های خاصی سازمان دهی و به عنوان ورودی ها به مدل معرفی شوند. اطلاعات مدیریت زراعی توسط زیر مدل XBUILD به مدل ارائه می شود. اطلاعات هواشناسی توسط زیر مدل WeatherMan برای مدل تعریف شدند. برای ساخت فایل خاکشناسی از زیر مدل SBUILD استفاده شد. ضرایب ژنتیکی رقم مورد نظر در فایل ارقام گیاهی وارد گردید. فایل های  $A^3$  و  $T^3$  نیز بر اساس داده های مشاهده شده یا اندازه گیری شده در آزمایش مزرعه ای آماده شدند. در این مطالعه برای ساخت فایل ارقام گیاهی از نتایج آزمایشی که توسط مندنی (۱۳۹۶) به منظور برآورد ضرایب ژنتیکی ارقام متداول ذرت دانه ای در استان کرمانشاه برای مدل CERES-Maize اجرا شده بود، استفاده شد. پس از انجام فرایند واسنجی، تعیین اعتبار مدل CERES-Maize توسط اطلاعات مستخرج از آزمایش مزرعه ای که در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه (عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۹ متر از سطح دریا) به صورت کرت های یک بار خرد شده بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ اجرا شده بود صورت گرفت (مندنی و همکاران، ۱۴۰۰). در تحقیق مذکور فاکتور اصلی سه سطح آبیاری شامل بیش آبیاری (تأمین ۱۳۰ درصد نیاز آبی، IR130%)، آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، IR100%) و کم آبیاری (تأمین ۷۰ درصد نیاز آبی، IR70%) و فاکتور فرعی سه رقم ذرت (SC704, Simon, BC678) بود. در پایان پس از کسب اطمینان از تطابق قابل قبول بین مقادیر شبیه سازی شده با مقادیر واقعی به دست آمده از آزمایش های مزرعه ای، از مدل اعتبارسنجی شده برای بررسی اثر تغییرات اقلیم آینده بر رشد، تولید و بهره وری آب ذرت دانه ای استفاده شد.

### جمع آوری داده های اقلیمی

اطلاعات روزانه هواشناسی مورد نیاز برای ساخت فایل هواشناسی (بیشترین و کمترین درجه حرارت، مقدار بارش و تشعشع روزانه) شهرستان کرمانشاه برای دوره مینا (۲۰۱۰-۱۹۸۰) از سازمان ملی هواوردی و فضای آمریکا<sup>۵</sup> (AgMERRA) اخذ شد. اطلاعات هواشناسی دوره های آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و دور (۲۰۵۰-۲۰۸۰) نیز در سه تکرار برای سناریوهای تغییر اقلیمی مدنظر (RCP8.5 و RCP4.5) از سایت مارکسیم<sup>۶</sup> به دست آمده آمد. بر این اساس برای هر یک از دوره های اقلیمی مدنظر ۹۰ سال داده هواشناسی از سایت مذکور استخراج گردید و به عنوان ورودی مدل در فایل هواشناسی قرار داده شد تا نوسانات احتمالی در داده های هواشناسی به حداقل ممکن کاهش یابد. غلظت دی اکسید کربن برای شرایط مینا ۳۸۰ پی پی ام بود که طبق سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای آینده نزدیک به ترتیب، ۴۷۰ و ۵۳۰ پی پی ام و برای آینده دور به ترتیب، ۵۶۰ و ۷۷۰ پی پی ام در نظر گرفته شد<sup>۷</sup> لازم به ذکر است که غلظت های نام برده میانگینی از غلظت های سالیانه هر یک از دوره های تغییر اقلیم نزدیک و دور در نظر گرفته شد.

<sup>1</sup> Liu

<sup>2</sup> Hoogenboom

<sup>3</sup> Harvest data

<sup>4</sup> Time-series data

<sup>5</sup> National Aeronautics and Space Administration (NASA)

<sup>6</sup> <https://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/agmerra>

<sup>7</sup> <http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM>

<sup>8</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Representative\\_Concentration\\_Pathway](https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathway)

## راهکارهای سازگاری به شرایط تغییر اقلیم

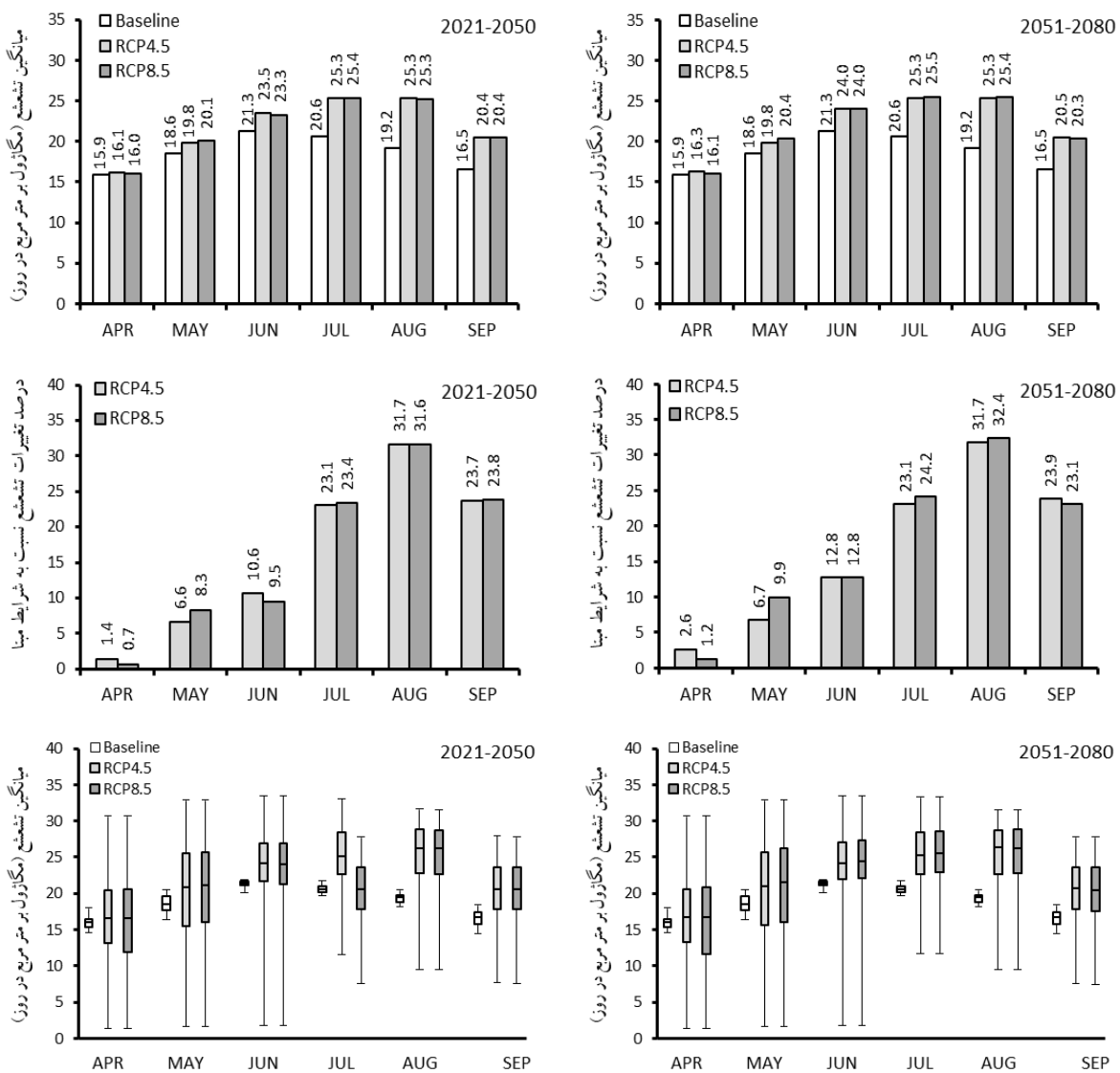
به‌منظور امکان تعدیل اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید ذرت در منطقه هدف، تغییر تاریخ کاشت و رقم و همچنین میزان آب آبیاری به‌عنوان راهکارهای سازگاری در نظر گرفته شدند. تاریخ رایج برای کاشت ذرت در منطقه کرمانشاه ۱۵ اردیبهشت است. از آنجایی که حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به گرما، مرحله گلدهی آن است و افزایش دما طول این دوره را کاهش می‌دهد، بنابراین هر نوع تغییر در تاریخ برخورد این مرحله با دماهای بالا می‌تواند به‌شدت در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید گیاه مؤثر باشد (خابا و همکاران، ۲۰۰۱). در این مطالعه برای ارائه راهکارهای سازگاری ذرت به شرایط اقلیمی آینده، تاریخ کاشت‌های ۵ اردیبهشت و ۲۶ فروردین به‌عنوان کشت زودهنگام، ۱۵ اردیبهشت به‌عنوان کشت به‌هنگام و ۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد به‌عنوان کشت دیرهنگام و ارقام ذرت BC678، Simon، SC704 در نظر گرفته شدند. با توجه به شرایط در نظر گرفته‌شده به‌عنوان راهکارهای سازگاری، برای هر یک از دوره‌های اقلیمی نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و دور (۲۰۸۰-۲۰۵۰) مدل CERES-Maize ۱۳۵۰ مرتبه (۵ تاریخ کاشت × ۳ رقم × ۹۰ ورودی هواشناسی) اجرا گردید و سپس میانگین خروجی‌های مدل برای شرایط نام‌برده به‌عنوان اطلاعات مورد ارزیابی برای هر یک از دوره‌های اقلیمی استخراج گردید. در پایان پس از استخراج اطلاعات مدنظر برای هر یک از دوره‌های اقلیمی، از طریق مقایسه این اطلاعات با خروجی مدل برای دوره مینا (۱۹۸۰-۲۰۱۰)، بهترین راهکار سازگاری برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر بهبود بهره‌وری آب در منطقه کرمانشاه معرفی گردید.

## نتایج و بحث

### تشعشع خورشید

تغییرات تشعشع روزانه خورشید در فاصله سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰ (شرایط مینا) طی دوره رشد ذرت در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. میانگین ماهانه تشعشع در شرایط مینا طی ماه‌های فروردین و اردیبهشت به ترتیب حدود ۱۵/۹ و ۱۸/۶ مگاژول بر مترمربع در روز بود که در شرایط تغییر اقلیم در فاصله سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ (آینده نزدیک) طبق سناریوی RCP4.5، به ترتیب با ۱/۴ و ۶/۶ درصد افزایش به حدود ۱۶/۱ و ۱۹/۸ مگاژول بر مترمربع در روز خواهد رسید. همچنین نتایج نشان داد در صورت رخ دادن سناریوی RCP4.5 در دوره آینده نزدیک، میانگین تشعشع در ماه‌های خرداد و تیر نسبت به شرایط مینا به ترتیب ۱۰/۶ و ۲۳/۱ درصد و در ماه‌های مرداد و شهریور به ترتیب ۳۱/۷ و ۲۳/۷ درصد افزایش خواهد یافت. در شرایط سناریوی RCP8.5 نیز میانگین تشعشع روزانه خورشید در طول دوره رشد ذرت نسبت به شرایط مینا افزایش نشان داد، به‌طوری‌که در ماه‌های فروردین و اردیبهشت به ترتیب با ۰/۷ و ۸/۳ درصد افزایش از ۱۵/۹ و ۱۸/۶ در شرایط مینا به ۱۶ و ۲۰/۱ مگاژول بر مترمربع در روز خواهد رسید. همچنین میزان تشعشع خورشید طی ماه‌های خرداد و تیر نسبت به شرایط مینا به ترتیب در حدود ۲ و ۴/۸ مگاژول بر مترمربع در روز بیشتر بود، درحالی‌که این افزایش در ماه‌های مرداد و شهریور به ترتیب حدود ۲۵/۳ و ۲۰/۴ مگاژول بر مترمربع پیش‌بینی شد که در شکل (۱) ارائه شده است.

<sup>1</sup> Khabba



شکل ۱. میانگین ماهانه (ردیف اول)، درصد تغییرات نسبت به دوره مبنا (ردیف دوم) و نمودار جعبه‌ای (ردیف سوم) تشعشع خورشید

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، نتایج این بررسی همچنین نشان داد که بر اساس پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، میزان تشعشع روزانه خورشیدی طول دوره رشد ذرت در فاصله سال‌های ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ (آینده دور) نسبت به شرایط مبنا (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) افزایش نشان داد. در سناریوی RCP4.5، بیشترین میانگین تشعشع روزانه خورشید در ماه‌های تیر و مرداد به میزان ۲۵/۳ مگاژول بر مترمربع در روز و کمترین آن در فروردین به میزان ۱۶/۳ مگاژول بر مترمربع در روز رخ داد. طبق سناریوی RCP8.5 حداکثر میزان افزایش میانگین تشعشع روزانه خورشید برابر با ۲۵/۵ و ۲۵/۴ مگاژول بر مترمربع در روز به ترتیب در ماه‌های تیر و مرداد (به ترتیب حدود ۲۴/۲ و ۳۲/۴ درصد افزایش) مشاهده شد و کمترین آن نیز به میزان ۱۶/۱ مگاژول بر مترمربع در روز برای فروردین‌ماه به دست آمد. به‌طورکلی نتایج پیش‌بینی‌ها نشان داد که در هر دو سناریوی تغییر اقلیم آینده، کمترین و بیشترین درصد تغییرات در میزان تشعشع روزانه خورشید برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ نسبت به شرایط مبنا به ترتیب در ماه‌های فروردین و مرداد رخ خواهد داد. پیش‌بینی‌های مدل‌های گردش عمومی همچنین نشان داد که میزان تشعشع خورشید در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط مبنا در طول دوره رشد ذرت افزایش خواهد یافت، به‌گونه‌ای که میزان تشعشع کل دوره رشد ذرت از ۳۴۱۷/۸ مگاژول بر مترمربع برای شرایط سال‌های مبنا به حدود ۳۹۸۳/۴ و ۳۹۸۴/۱۵ مگاژول بر مترمربع در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای شرایط تغییر اقلیم سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. تشعشع کل دوره رشد ذرت برای شرایط تغییر اقلیم سال‌های ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ نسبت به شرایط مبنا به ترتیب برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 حدود ۴۰۶/۰۵ و ۴۰۲۳/۳ مگاژول بر مترمربع پیش‌بینی شد. رحیمی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۷) نیز افزایش میزان تشعشع تجمعی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۴۰-۲۰۷۰) در طول دوره رشد ذرت در استان

کرمانشاه را گزارش کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد میزان تشعشع تجمعی از ۱۷۱۹ مگاژول بر مترمربع در شرایط مبنا به ترتیب به ۱۷۵۷ و ۱۸۰۱ مگاژول بر مترمربع برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 خواهد رسید. باین‌حال در مطالعه سریواستوا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در کشور غنا میزان تشعشع تجمعی در طول دوره رشد ذرت طبق سناریوی RCP8.5، در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۸۰ به ترتیب ۲ و ۱۴/۴ درصد نسبت به شرایط مبنا کمتر بود. طبق پژوهش آموزو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) در غرب آفریقا میزان تشعشع تجمعی در سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۳-۰/۶ و ۰/۴-۰/۵ درصد نسبت به شرایط پایه کاهش نشان داد. بر اساس مطالعه دیاس<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) میانگین تشعشع روزانه در کشور سریلانکا از ۱۴/۹ مگاژول بر مترمربع در روز در شرایط فعلی برای سال‌های ۲۰۴۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۶۰ طبق سناریوی RCP8.5 به ترتیب به حدود ۱۸، ۱۹/۴ و ۱۸/۷ مگاژول در مترمربع در روز خواهد رسید.

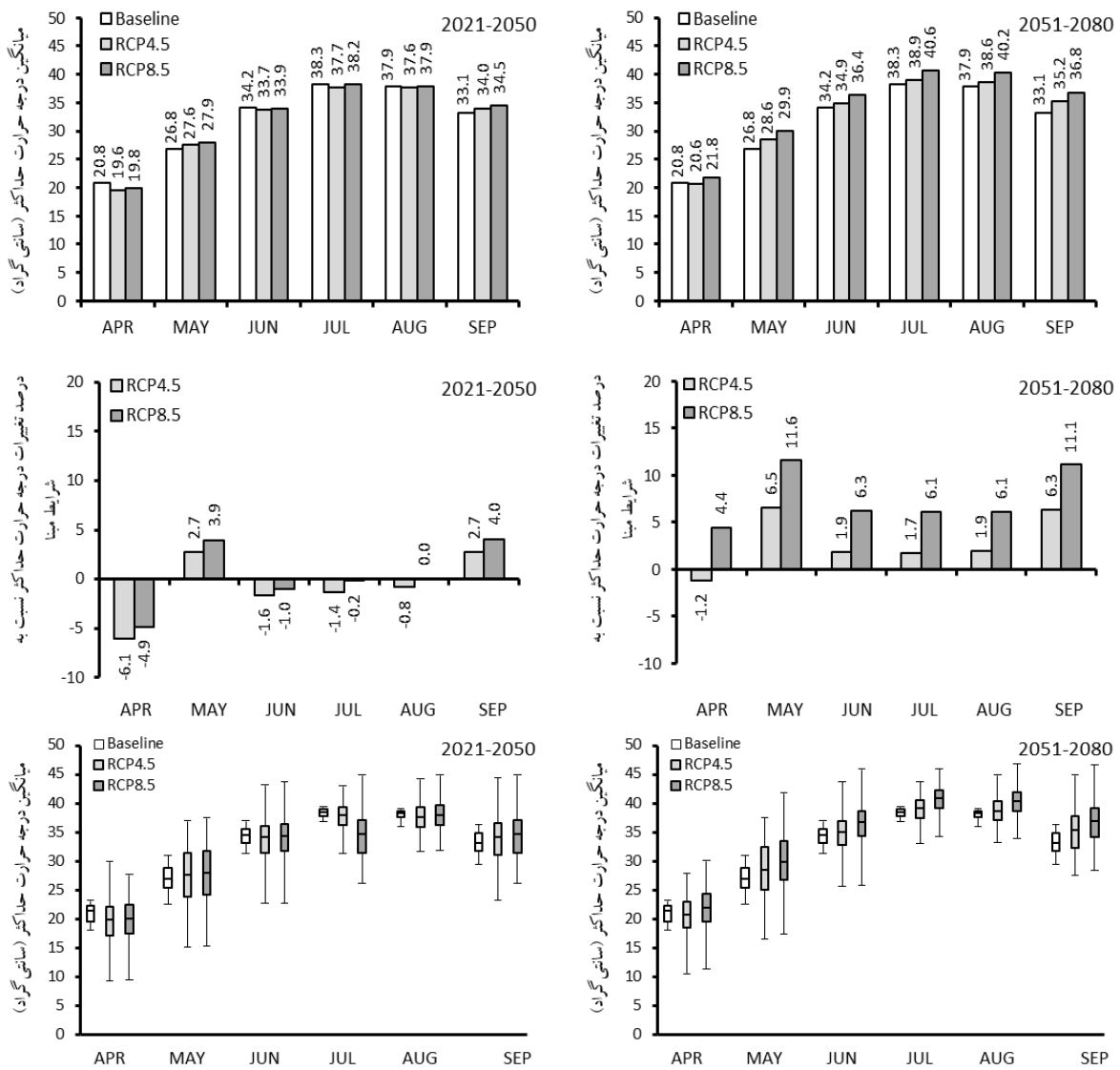
### درجه حرارت

بر اساس پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی، میانگین دمای روزانه طول دوره رشد ذرت در فاصله سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ (آینده نزدیک) و ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ (آینده دور) در مقایسه با شرایط مبنا (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) به‌جز در ماه فروردین و سناریوی RCP4.5 افزایش خواهد یافت که در اشکال (۲) و (۳) ارائه شده است.

<sup>1</sup> Srivastava

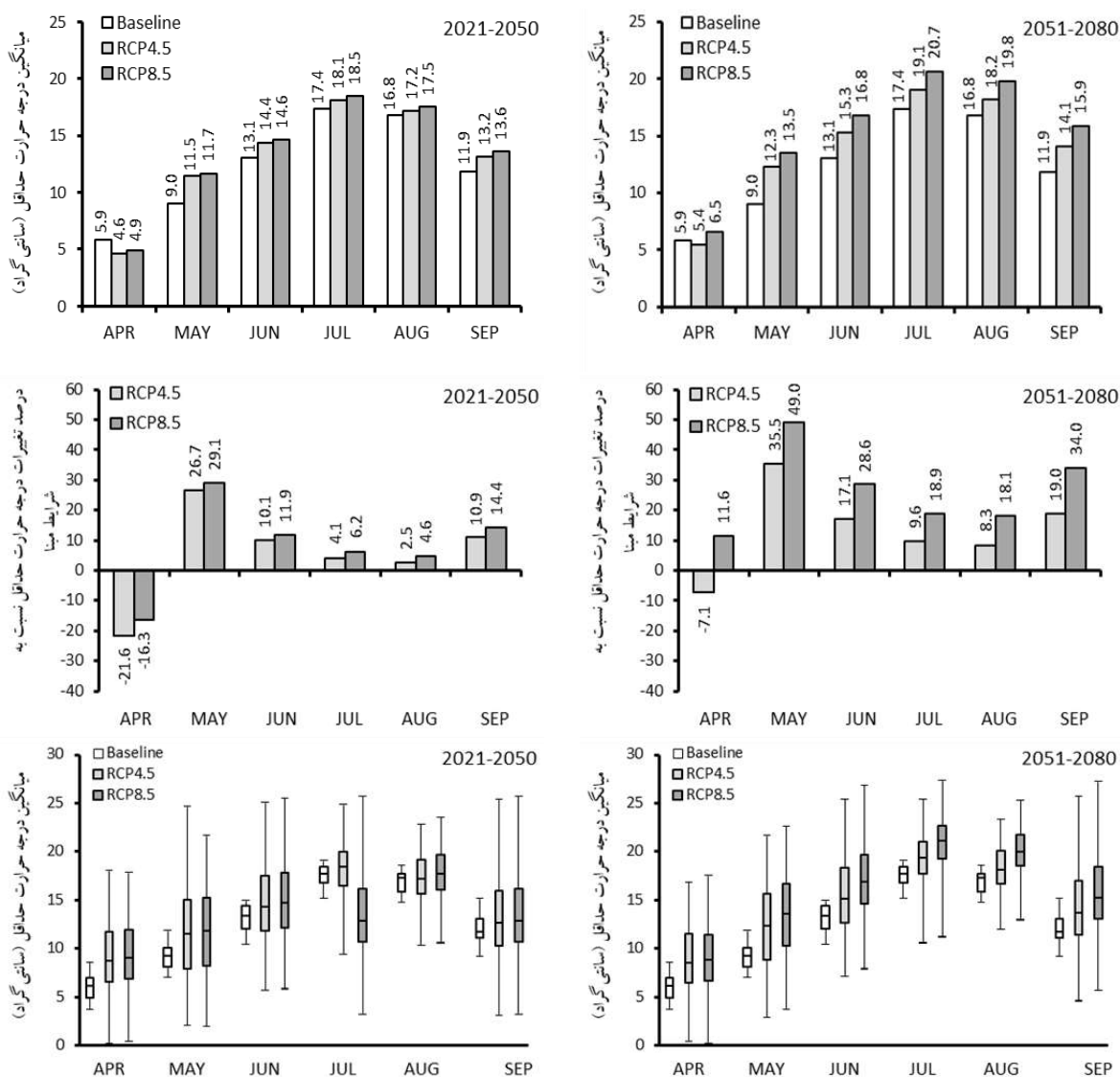
<sup>2</sup> Amouzou

<sup>3</sup> Dias



شکل ۲. میانگین ماهانه (ردیف اول)، درصد تغییرات نسبت به دوره مبنا (ردیف دوم) و نمودار جعبه‌ای (ردیف سوم) درجه حرارت حداکثر





شکل ۳. میانگین ماهانه (ردیف اول)، درصد تغییرات نسبت به دوره مبنا (ردیف دوم) و نمودار جعبه‌ای (ردیف سوم) درجه حرارت حداقل

در شرایط مبنا میانگین دمای طول دوره رشد ذرت ۲۲ درجه سانتی‌گراد بود که بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب با حدود ۲/۳ و ۴/۳ درصد افزایش به ۲۲/۴۲ و ۲۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد برای شرایط تغییر اقلیم سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ خواهد رسید. همانطور که در اشکال (۳) و (۴) مشاهده می‌شود، میانگین دمای روزانه دوره رشد ذرت در شرایط تغییر اقلیم سال‌های ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ به ترتیب برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 با حدود ۸/۵ و ۱۷/۲ درصد افزایش، ۲۳/۴۳ و ۲۴/۹۱ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شد. همان‌گونه که نتایج این بررسی نشان داد در طول دوره رشد ذرت درجه حرارت حداقل در مقایسه با درجه حرارت حداکثر، بیشتر تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم قرار گرفت. توضیحات فوق در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده‌اند. در دوره آینده نزدیک میزان تغییرات درجه حرارت حداقل برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در مقایسه با شرایط مبنا به ترتیب حدود ۵/۵ و ۸/۳ درصد بود، درحالی‌که این تغییرات برای درجه حرارت حداکثر به ترتیب حدود ۰/۸- و ۰/۳ درصد پیش‌بینی شد. در دوره آینده دور نیز میزان تغییرات درجه حرارت حداقل برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در مقایسه با شرایط مبنا به ترتیب حدود ۱۳/۷ و ۲۶/۷ درصد بود، درحالی‌که این تغییرات برای درجه حرارت حداکثر به ترتیب حدود ۲/۸ و ۷/۶ درصد پیش‌بینی شد. رحیمی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۷) گزارش کردند که میانگین حداقل و حداکثر دمای طول دوره رشد ذرت در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۴۰-۲۰۷۰) در استان کرمانشاه افزایش یافت، به طوری‌که دمای حداقل و حداکثر در سناریوی RCP4.5 به ترتیب ۲۵ و ۷ درصد و در سناریوی RCP8.5، ۵۷ و ۱۵ درصد نسبت به شرایط مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۰) افزایش

نشان داد. بونویچای<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸) نیز دریافته اند که حداقل و حداکثر دمای طول دوره رشد برنج در تایلد برای سناریوی RCP4.5 و آینده نزدیک (۲۰۴۵-۲۰۶۹) به ترتیب ۱/۳ و ۱/۱ درجه سانتی گراد و برای سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۱/۹ و ۱/۶ درجه سانتی گراد نسبت به دوره مینا (۱۹۸۰-۲۰۰۴) افزایش یافت. نتایج سریواسوتا و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد حداقل و حداکثر دمای طول دوره رشد ذرت در کشور غنا برای دوره تغییر اقلیم سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۸۰ طبق سناریو RCP4.5 به ترتیب، ۶/۵ و ۵/۳ و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب، ۱۰/۶ و ۹/۲ درجه سانتی گراد نسبت به دوره مینا (۱۹۷۱-۲۰۰۰) افزایش می یابد. افزایش حداقل و حداکثر دما در سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 توسط جهان بخش اصل و همکاران (۱۳۹۵) و کرمی و همکاران (۱۳۹۷) نیز گزارش شده است.

### میزان آب مصرفی

نتایج شبیه سازی های مدل CERES-Maize در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقدار آب مورد نیاز ذرت در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط مینا افزایش خواهد یافت. در شرایط مینا (۱۹۸۱-۲۰۱۰) میزان آب مصرفی برای ارقام مورد بررسی حدود ۵۶۰ میلی متر بود.

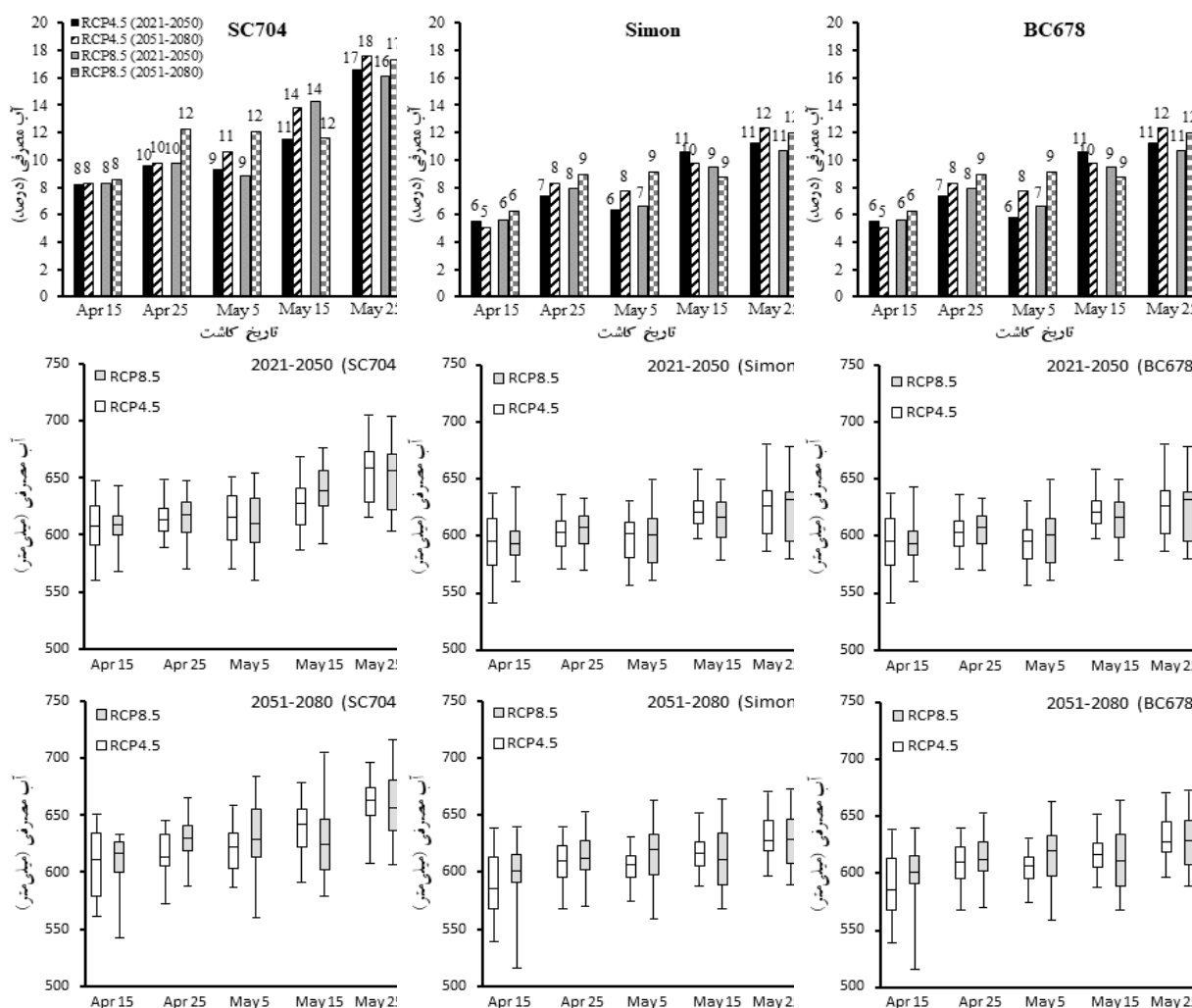
جدول ۱. طول دوره نمو فنولوژیک، تولید، مقادیر آب و تبخیر و تعرق ارقام ذرت برای دوره مینا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) در تاریخ کاشت مرسوم (۱۵ اردیبهشت)

BC678	Simon	SC704	
۵۶۱	۵۶۱	۵۶۰	آب مصرفی (میلی متر)
۱/۴۵	۱/۸۳	۱/۷۶	کارایی مصرف آب (گرم بر میلی متر)
۱۶۰	۱۶۰	۱۵۸	تبخیر (میلی متر)
۴۵۹	۴۵۹	۴۶۹	تعرق (میلی متر)
۶۱۹	۶۱۹	۶۲۷	تبخیر و تعرق (میلی متر)

نیاز آبی ارقام مذکور در شرایط تغییر اقلیم دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، طبق سناریوی RCP4.5 به ترتیب با ۹/۳۳، ۶/۳۸ و ۵/۸۱ درصد افزایش به ۶۱۲، ۵۹۷ و ۵۹۴ میلی متر و طبق سناریوی RCP8.5 به ترتیب با ۸/۸۸، ۶/۶۷ و ۶/۶۷ درصد افزایش به ۶۱۰، ۵۹۸ و ۵۹۸ میلی متر تغییر خواهد کرد که در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین در دوره تغییر اقلیم نزدیک با تغییر تاریخ کاشت میزان آب مصرفی ذرت نیز تغییر نشان داد، به طوری که در هر دو سناریو کمترین مقدار آب مصرفی برای ارقام Simon، SC704 و BC678 در زودترین تاریخ کاشت (۲۶ فروردین) به دست آمد (به ترتیب ۶۰۶، ۵۹۲ و ۵۹۲ میلی متر در سناریوی RCP4.5 و ۶۰۶، ۵۹۳ و ۵۹۳ میلی متر در سناریوی RCP8.5). بیشترین مقدار آب مصرفی برای ارقام مذکور در دیرترین تاریخ کاشت (۴ خرداد) شبیه سازی شد (به ترتیب ۶۲۴، ۶۲۴ و ۶۲۴ میلی متر در سناریوی RCP4.5 و ۶۵۰، ۶۲۱ و ۶۲۱ میلی متر در سناریوی RCP8.5).

نتایج پیش بینی ها نشان داد که نیاز آبی ذرت در دوره تغییر اقلیم دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) نسبت به شرایط مینا در مقایسه با دوره تغییر اقلیم نزدیک بیشتر تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. در دوره تغییر اقلیم دور میزان آب مصرفی ارقام Simon، SC704 و BC678 نسبت به شرایط مینا در سناریوی RCP4.5 به ترتیب ۱۰/۵۳، ۷/۶۶ و ۷/۶۶ درصد و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۱۲، ۹ و ۹ درصد افزایش یافت. مشابه با دوره آینده نزدیک، در دوره آینده دور نیز کمترین و بیشترین نیاز آبی ارقام ذرت به ترتیب با کاشت در تاریخ های ۲۶ فروردین و ۴ خرداد به دست خواهد آمد. در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بیشترین میزان آب مصرفی در رقم SC704 و دیرترین تاریخ کاشت (۴ خرداد) به ترتیب به میزان ۶۵۸ و ۶۵۷ میلی متر پیش بینی شد. این مقادیر در شکل (۴) نشان داده شده است. به طور کلی نتایج شبیه سازی نشان داد میزان آب مصرفی هر سه رقم، در همه تاریخ های کاشت نسبت به شرایط مینا در طول دوره رشد ذرت افزایش می یابد.

<sup>1</sup> Boonwichai



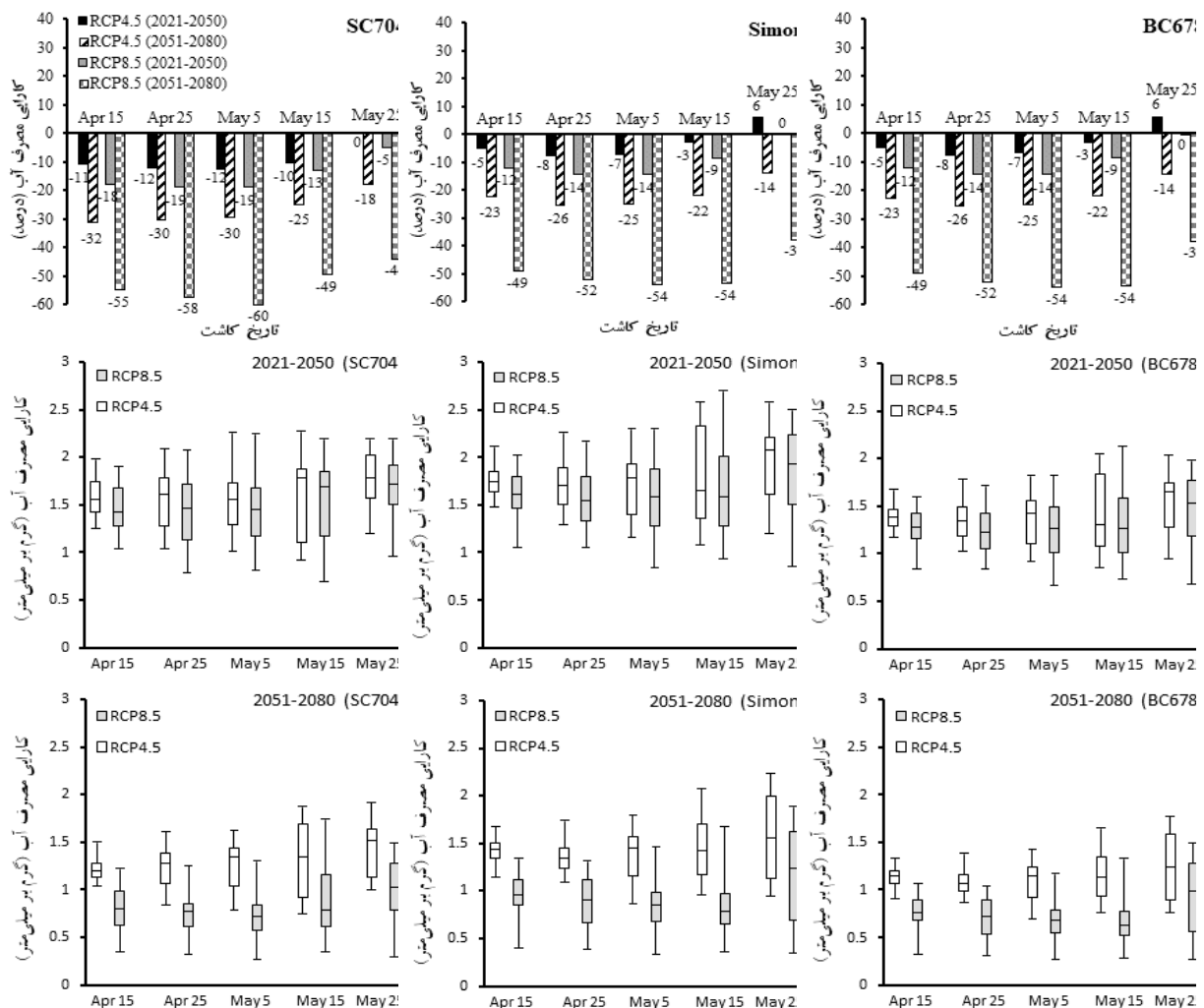
شکل ۴. درصد تغییرات آب مصرفی برای دوره‌های آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) (ردیف اول). نمودار جعبه‌ای آب مصرفی (ردیف دوم و سوم) - خط افقی وسط هر جعبه میانه (چارک دوم)، مستطیل‌های پایین و بالا به ترتیب چارک‌های اول و سوم، خطوط افقی پایین و بالا در خارج هر جعبه به ترتیب حداقل و حداکثر داده‌ها را نشان می‌دهند.

نتایج همچنین نشان داد که در هر دو سناریو و هر دو دوره اقلیم، تأخیر در کاشت میزان آب مصرفی ذرت را افزایش و تسریع در کاشت میزان آب مصرفی را کاهش خواهد داد. به طوری که بیشترین میزان آب مصرفی در هر دو سناریو در تاریخ کاشت ۴ خرداد و کمترین میزان آب مصرفی در ۲۶ فروردین شبیه‌سازی شد. به عبارت دیگر کشت زودتر ذرت میزان آب مصرفی این گیاه را کاهش می‌دهد و تأخیر در کاشت میزان آب مصرفی را افزایش می‌دهد. نیاز آبی ارقام Simon و BC678 در هر دو سناریو و تمام تاریخ‌های کاشت یکسان و کمتر از رقم SC704 بود. با توجه به گزارش پنجم (۲۰۱۴، IPCC) مطابق با پیش‌بینی‌ها میزان دما و دی‌اکسید کربن اتمسفر افزایش می‌یابد که نتیجه این افزایش تغییر در الگوی بارندگی و نیاز آبی محصولات است و تشدید تغییرات آب و هوایی به احتمال زیاد بر اقتصاد، محیط‌زیست و بخش‌های اجتماعی تأثیر می‌گذارد. ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند نیاز آبی ذرت در دوره آینده (۲۰۸۰-۲۱۰۰) در کشور چین طبق سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به شرایط پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۶) به ترتیب ۹/۲۲ و ۲۴/۹۰ درصد افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند نیاز آبی برنج در سال (۲۰۸۰-۲۱۰۰) در کشور چین طبق سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نسبت به شرایط پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۶) به ترتیب ۶/۱۲ و ۱۲۶/۳۴ درصد افزایش می‌یابد.

<sup>1</sup> Zhang

## کارایی مصرف آب

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، کارایی مصرف آب برای ارقام SC704، Simon و BC678 در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ (شرایط مبنا) به ترتیب ۱/۷۶، ۱/۸۳ و ۱/۴۵ گرم بر میلی‌متر بود. با توجه به شکل ۵ در شرایط تغییر اقلیم دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) کارایی مصرف آب در سناریوی RCP4.5 به ترتیب با ۱۲/۴۰، ۷/۲۸ و ۶/۸۱ درصد کاهش نسبت به شرایط مبنا به ۱/۷۰ و ۱/۳۵ گرم بر میلی‌متر خواهد رسید. در سناریوی RCP8.5 میزان کارایی مصرف آب این ارقام به ترتیب ۱/۴۳، ۱/۵۷ و ۱/۲۴ گرم بر میلی‌متر شبیه‌سازی شد که به ترتیب ۱۸/۶۴، ۱۴/۲۵ و ۱۴/۲۹ درصد نسبت به شرایط مبنا کاهش یافت. در هر دو سناریو بیشترین کارایی مصرف آب برای ارقام موردبررسی در دیرترین تاریخ کاشت (۴ خرداد) و کمترین آن در تاریخ کاشت دوم (۵ اردیبهشت) به دست آمد. همچنین در هر دو سناریو بیشترین میزان کارایی مصرف آب در رقم Simon در تاریخ کاشت ۴ خرداد و کمترین آن در رقم BC678 در تاریخ کاشت ۵ اردیبهشت پیش‌بینی شد.



شکل ۵. درصد تغییرات کارایی مصرف آب برای دوره‌های آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره مبنا (۱۹۸۱-۲۰۱۰) (ردیف اول). نمودار جعبه‌ای کارایی مصرف آب (ردیف دوم و سوم) - خط افقی وسط هر جعبه میانه (چارک دوم)، مستطیل‌های پایین و بالا به ترتیب چارک‌های اول و سوم، خطوط افقی پایین و بالا در خارج هر جعبه به ترتیب حداقل و حداکثر داده‌ها را نشان می‌دهند.

در دوره تغییر اقلیم آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) نیز کارایی مصرف آب ذرت نسبت به شرایط مبنا کاهش یافت. اما این کاهش شدیدتر از دوره تغییر اقلیم آینده نزدیک پیش‌بینی شد. علاوه بر این، با توجه به شکل ۵ میزان کاهش این صفت در شرایط سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریو RCP4.5 بود، به طوری که کارایی مصرف آب ارقام SC704، Simon و BC678 نسبت به شرایط مبنا در سناریوی RCP4.5 به ترتیب ۲۹/۵۸، ۲۵/۱۰ و ۲۵ درصد و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۵۹/۷۴، ۵۴ و ۵۳/۹۷ درصد کاهش نشان داد. مشابه با دوره آینده

نزدیک، در دوره آینده دور نیز بیشترین کارایی مصرف آب ارقام ذرت در هر دو سناریو در رقم Simon با دیرترین تاریخ کاشت (۴ خرداد) شبیه‌سازی شد و کمترین آن در رقم BC678 در تاریخ‌های کاشت ۵ اردیبهشت دست خواهد آمد. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی نشان داد میزان کارایی مصرف آب ارقام ذرت در تاریخ‌های کاشت موردبررسی در دوره‌های تغییر اقلیم نسبت به شرایط منا کاهش می‌یابد. در هر دو سناریو و هر دو دوره، تأخیر در کاشت میزان کارایی مصرف آب ذرت را افزایش و کاشت زودهنگام میزان این صفت را کاهش خواهد داد، به‌طوری‌که بیشترین میزان کارایی مصرف آب در هر دو سناریو در تاریخ کاشت ۴ خرداد و کمترین آن در تاریخ ۵ اردیبهشت شبیه‌سازی شد. به‌عبارت‌دیگر کشت زودتر ذرت میزان کارایی مصرف آب این گیاه را کاهش می‌دهد و تأخیر در کاشت میزان کارایی مصرف آب را افزایش می‌دهد. بیشترین و کمترین کارایی مصرف آب به ترتیب در ارقام Simon و BC678 در تاریخ‌های کاشت ۴ خرداد و ۵ اردیبهشت مشاهده شد. در تحقیقات دیگر مشخص شد که بالا رفتن غلظت دی‌اکسید کربن ممکن است کارایی مصرف آب محصولات زراعی را بهبود ببخشد (لاکی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

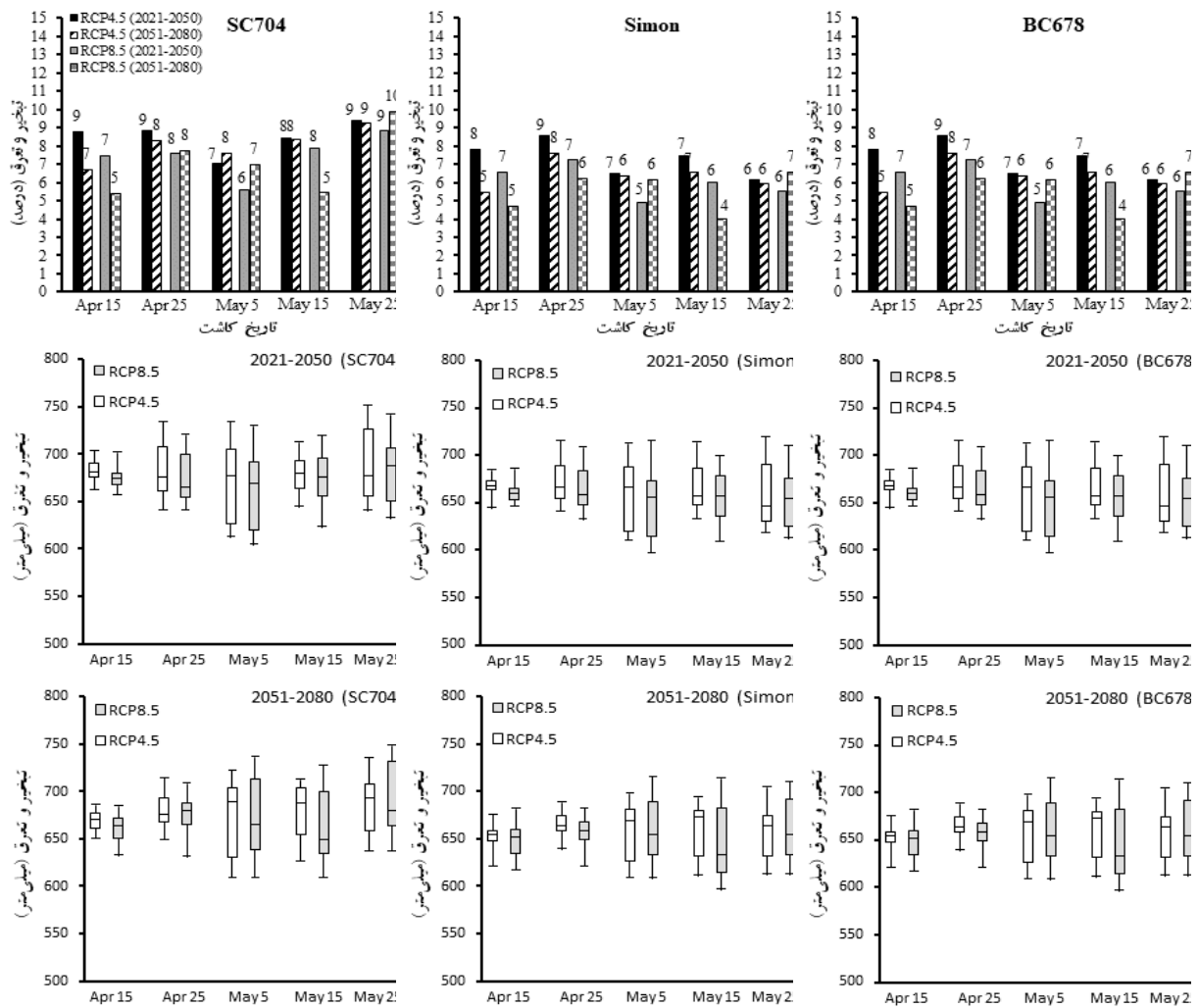
### تبخیر و تعرق

همانطور که در جدول (۱) مشاهده شد، مقدار تبخیر و تعرق در شرایط منا برای ارقام SC704، Simon و BC678 به ترتیب حدود ۶۲۷، ۶۱۹ و ۶۱۹ میلی‌متر بود، که در شرایط تغییر اقلیم دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) طبق سناریوی RCP4.5، به ترتیب با ۷، ۶/۵۲ و ۶/۵۲ درصد افزایش به ۶۷۱، ۶۵۹ و ۶۵۹ میلی‌متر خواهد رسید. همچنین نتایج نشان داد در صورت وقوع سناریوی RCP8.5 تبخیر و تعرق نسبت به شرایط منا به ترتیب با ۵/۵۷، ۴/۹۳ و ۴/۹۳ درصد افزایش به ۶۶۲، ۶۴۹ و ۶۴۹ میلی‌متر خواهد رسید. میزان تبخیر و تعرق ارقام Simon و BC678 در هر دو سناریو باهم برابر و کمتر از رقم SC704 بود و در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج این بررسی همچنین نشان داد که در فاصله سال‌های ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ (دوره آینده دور) برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، میزان تبخیر و تعرق در طول دوره رشد ذرت نسبت به شرایط منا (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) افزایش نشان داد و در شکل ۶(ب) ارائه شده است. در سناریوی RCP4.5 مقدار تبخیر و تعرق ارقام SC704، Simon و BC678 با ۷/۵۶، ۶/۳۱ و ۶/۳۱ درصد افزایش نسبت به شرایط منا به ۶۷۵، ۶۵۸ و ۶۵۸ میلی‌متر و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب با ۶/۹۷، ۶/۱۱ و ۶/۱۱ درصد افزایش به ۶۶۴، ۶۵۱ و ۶۵۱ میلی‌متر رسید. مشابه دوره آینده نزدیک میزان تبخیر و تعرق ارقام Simon و BC678 در هر دو سناریو باهم برابر و کمتر از رقم SC704 بود. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی نشان داد میزان تبخیر و تعرق هر سه رقم، در همه تاریخ‌های کاشت و هر دو سناریو نسبت به شرایط منا در طول دوره رشد ذرت افزایش می‌یابد. در هر دو سناریو و هر دو دوره تغییر اقلیم، تأخیر در کاشت مقدار تبخیر از سطح خاک را کاهش و مقدار تعرق گیاه را افزایش داد. مطالعات نشان داده است که در صورت دسترسی بهینه به آب با افزایش دما تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد (لانگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). اسلاما<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند میزان تبخیر و تعرق در شرایط تغییر اقلیم آینده ۹ تا ۲۹ درصد کاهش می‌یابد که کاهش آن به دلیل کاهش طول دوره رشد ذرت بود.

<sup>1</sup> Leakey

<sup>2</sup> Long

<sup>3</sup> Islama



شکل ۶. درصد تغییرات تبخیر و تعرق برای دوره‌های آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۱) (ردیف اول). نمودار جعبه‌ای تبخیر و تعرق (ردیف دوم و سوم) - خط افقی وسط هر جعبه میانه (چارک دوم)، مستطیل‌های پایین و بالا به ترتیب چارک‌های اول و سوم، خطوط افقی پایین و بالا در خارج هر جعبه به ترتیب حداقل و حداکثر داده‌ها را نشان می‌دهند.

### بحث

در این پژوهش شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر فاکتورهای محیطی تأثیرگذار بر رشد، تولید و بهره‌وری آب گیاه ذرت در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه طی سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ اجرا شد. فاکتورهای مورد ارزیابی شامل تشعشع روزانه خورشید، درجه حرارت حداقل روزانه، درجه حرارت حداکثر روزانه، میزان آب مصرفی و تبخیر و تعرق طی دوره رشد ذرت بود. به‌منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های مورد ارزیابی ذرت از مدل CERES-Maize استفاده شد. اطلاعات روزانه هواشناسی مورد نیاز برای ساخت فایل هواشناسی شهرستان کرمانشاه برای دوره مبنا (۲۰۱۰-۱۹۸۰) از سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا اخذ شد. اطلاعات هواشناسی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۵۰) و دور (۲۰۵۰-۲۰۸۰) نیز برای سناریوهای تغییر اقلیم RCP4.5 و RCP8.5 از سایت مارکسیم به دست آمد.

### نتیجه‌گیری

نتایج پیش‌بینی‌های مدل‌های گردش عمومی نشان داد که میزان روزانه تشعشع خورشید در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به شرایط مبنا در طول دوره رشد ذرت افزایش خواهد یافت، به‌گونه‌ای که میزان تشعشع کل دوره رشد ذرت از ۳۴۱۸ مگاژول بر مترمربع در شرایط

مینا، طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به ۳۹۸۳ و ۳۹۸۴ مگاژول بر مترمربع در دوره آینده نزدیک و به ۴۰۰۶ و ۴۰۲۳ مگاژول بر مترمربع در دوره آینده دور خواهد رسید. میانگین دمای طول دوره رشد ذرت در شرایط مینا ۲۲ درجه سانتی‌گراد بود که بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب با حدود ۲/۳ و ۴/۳ درصد افزایش به ۲۲/۴۲ و ۲۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد در دوره آینده نزدیک خواهد رسید. میانگین دمای روزانه دوره رشد ذرت در شرایط تغییر اقلیم در دوره آینده دور برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 با حدود ۸/۵ و ۱۷/۲ درصد افزایش، ۲۳/۴۳ و ۲۴/۹۱ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شد. در شرایط مینا صفات آب مصرفی، کارایی مصرف آب و تبخیر و تعرق ارقام ذرت به‌طور میانگین به ترتیب ۵۶۰/۷ میلی‌متر، ۱/۶۸ گرم بر میلی‌متر و ۶۲۱/۷ میلی‌متر بود. صرف‌نظر از تاریخ کاشت و رقم در شرایط تغییر اقلیم آینده نزدیک در سناریوی RCP4.5، صفات مذکور نسبت به شرایط مینا به ترتیب، ۹/۱، ۵/۴- و ۷/۷ درصد و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب، ۹/۲، ۱۱/۶- و ۶/۷ درصد تغییر کرد. این مقادیر در شرایط تغییر اقلیم آینده دور برای سناریوی RCP4.5 به ترتیب، ۹/۷، ۲۳/۷- و ۶/۹ درصد و برای سناریوی RCP8.5 به ترتیب، ۱۰/۱، ۵۰/۷- و ۵/۷ درصد بودند. بنابراین کاهش کارایی مصرف آب در دوره تغییر اقلیم آینده دور شدیدتر از دوره آینده نزدیک و در سناریوی RCP8.5 شدیدتر از سناریوی RCP4.5 بود. مصرف آب و تبخیر و تعرق در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط مینا بیشتر بود. در رابطه با اثر تاریخ کاشت، در هر دو دوره اقلیمی آینده و طبق هر دو سناریو با کاشت ارقام موردبررسی در تاریخ‌های دیر هنگام (۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) در مقایسه با تاریخ‌های زود هنگام (۲۶ فروردین و ۵ اردیبهشت) و رایج (۱۵ اردیبهشت) کارایی مصرف آب بیشتر بود. در بین ارقام موردبررسی نیز رقم Simon بیشترین کارایی مصرف آب را داشت. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در صورت وقوع هر یک از سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های آینده نزدیک و دور کاشت رقم Simon در تاریخ‌های دیر هنگام (۲۵ اردیبهشت و ۴ خرداد) که بیشترین عملکرد دانه را با بالاترین کارایی مصرف آب تولید خواهد کرد به‌عنوان راهکار مدیریتی مناسب برای مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم آینده بر تولید ذرت دانه‌ای پیشنهاد می‌گردد.

## منابع

- جهانبخش اصل، سعید، خورشید دوست، علی محمد، عالی‌نژاد، محمدحسین، و پوراصغر، فرناز. (۱۳۹۵). تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی (مطالعه موردی: حوضه‌ی شهر چای ارومیه). نشریه هیدروژئومورفولوژی، ۲(۷)، ۱۰۷-۱۲۲. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1395.3.7.6.2>
- رحیمی‌مقدم، سکینه، عینی نرگسه، حامد، دیهیم فرد، رضا، و حقیقت، مسعود. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه ذرت (*Zea mays* L.) در استان کرمانشاه با استفاده از یک مدل فرآیندگرا. مجله علوم زراعی ایران، ۲۰(۴)، ۳۱۵-۳۲۸. <https://sid.ir/paper/375658/fa>
- کریمی، فریبا، خالدی، شهریار، شکیب، علیرضا، براتی، غلامرضا، و باباییان، ایمان. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم در استان فارس. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷(۴۷)، ۹۳-۷۷. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2938-fa.html>
- مرادی، روح‌اله، کوچکی، علیرضا، و نصیری محلاتی، مهدی. (۱۳۹۲). تأثیر تغییر اقلیم بر تولید ذرت و ارزیابی تغییر تاریخ کاشت به‌عنوان راهکار سازگاری در شرایط آب و هوایی مشهد، دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۲۳(۴)، ۱۱۱-۱۳۰. [https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article\\_786\\_f0811ad6bcc19f78b259bf30a3431687.pdf](https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article_786_f0811ad6bcc19f78b259bf30a3431687.pdf)
- مندنی، فرزاد. (۱۳۹۶). شبیه‌سازی اثر کود نیتروژن بر تولید ذرت (*Zea mays*) توسط مدل CERES-Maize تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه. مجله آب و خاک، ۳۱، ۱۶۷۸-۱۶۶۵. <https://10.22067/jsw.v31i6.61895>
- مندنی، فرزاد، کریمی، پریرسا، و قبادی، روژین. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی تأثیر رژیم‌های رطوبتی بر رشد و عملکرد ذرت (*Zea mays*) در منطقه کرمانشاه توسط مدل CERES-Maize. تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک، ۳(۱)، ۵۶-۳۹. <https://10.22034/csrr.2021.280069.1091>

## References

- Amouzou, K. A. Lamers, J. P., Naab, J. B. Borgemeister, C., Vlek, P., & Land Becker, M. (2019). Climate change impact on water-and nitrogen-use efficiencies and yields of maize and sorghum in the northern Benin dry savanna, West Africa. *Field Crops Research*, 235, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.021>

- Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M. S., Weesakul, S., & Datta, A. (2018). Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *Journal of cleaner production*, 198, 1157-1164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.146>
- Dias, M. P. N. M., Navaratne, C. M., Weerasinghe, K. D. N., & Hettiarachchi, R. H. A. N. (2016). Application of DSSAT crop simulation model to identify the changes of rice growth and yield in Nilwala river basin for mid-centuries under changing climatic conditions. *Procedia food science*, 6, 159-163. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.039>
- Hoogenboom, G. Jones, J.W. Wilkens, P.W. Porter, C.H. Boote, K.J. Hunt, L.A. Singh, U., Lizaso, J.L. White, J.W. Uryasev, O. Ogoshi, R. Koo, J. Shelia, V. & Tsuji, G.Y. (2015). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 ([www.DSSAT.net](http://www.DSSAT.net)). DSSAT Foundation, Prosser, Washington. <https://www.scienceopen.com/document?vid=e47eace4-48b7-424f-ae93-fb7727d30e24>
- Huang, Y., Yu, Y., Zhang, W., Sun, W., Liu, S., Jiang, J., Wu, J., Yu, W., & Yang, Z. (2009). Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agri. Forest. Meteorol*, 149, 106-129. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.07.013>
- Hulme, M., Barrow, E. M., Arnell, N. W., Harisson, P. A., Jones, T. C., & Dowing, T. E. (1999). Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. *Nature*, 397, 688-691. <https://doi.org/10.1038/17789>
- Leakey, A. D. B. (2009). Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276, 2333-2343. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1517>
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Nösberger, J. & Ort, D. R. (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science*, 312, 1918-1921. [https:// DOI: 10.1126/science.1114722](https://doi.org/10.1126/science.1114722)
- Islama, A., Ahuja, R. L., Garciab, L. A., Ma, L., Saseendran, A. S., & Trout, T. J. (2012). Modeling the impacts of climate change on irrigated maize production in the Central Great Plains. *Agricultural Water Management*, 110, 9-108. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.004>
- Jahanbakhsh Asl, S., Khorshiddoust, A. M., Alinejad, M. H., & Pourasghr, F. (2016). Impact of climate change on precipitation and temperature by taking the uncertainty of models and climate scenarios (Case Study: Shahrchay Basin in Urmia). *Hydrogeomorphology*, 3(7), 107-122. <https://dord.net/dor/20.1001.1.23833254.1395.3.7.6.2> [In Persian]
- Karami, F., Khaledi, Sh., Shakiba, A. R. Barati, Gh., & Babaeian, I. (2017). Simulation yield of maize based on scenarios of climate change in Fars province. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 17(47), 77-93. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2938-fa.html> [In Persian]
- Khabba, S., Ledent, J. F., & Lahrouni, A. (2001). Maize ear temperature. *European Journal of Agronomy*, 14, 197-208. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00095-2)
- Liu, Z., Hubbard, K. G., Lin, X., & Yang, X. (2013). Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global change biology*, 19(11), 3481-3492. <https://doi.org/10.1111/gcb.12324>
- Mondani, F. (2018). Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (*Zea mays*) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition. *Water and Soil*, 31(6), 1665-1678. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i6.61895>
- Mondani, F., Karami, P., & Ghobadi, R. (2021). Simulation of moisture regimes effect on maize (*Zea mays*) growth and yield in Kermanshah region by CERES-Maize model. *Crop Science Research in Arid Regions*, 3(1), 39-56. <https://doi.org/10.22034/csrar.2021.280069.1091>
- Moradi, R., Koocheki, A. L., & Nassiri Mahallati, M. (2014). Effect of Climate Change on Maize Production and Shifting of Planting Date as Adaptation Strategy in Mashhad. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(4), 111-130. [https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article\\_786\\_f0811ad6bcc19f78b259bf30a3431687.pdf](https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article_786_f0811ad6bcc19f78b259bf30a3431687.pdf) [In Persian]



- Morison, J. I. L., & Morecroft, M. D. (2006). *Plant Growth and Climate Change*. Blackwell Publisher, Oxford, England. <https://doi.org/10.1002/9780470988695>
- Ozkan, B., & Akcaoz, H. (2002). Impacts of climate factors on yields for selected crops in southern Turkey. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 7, 367-380. <https://doi.org/10.1023/A:1024792318063>
- Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R., (2018). Adaptation strategies to lessen negative impact of climate change on grain maize under hot climatic conditions: A model-based assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.032> [In Persian]
- Rahimi-Moghaddam, S., Eyni Nargeseh, H., Deihimfard, R., & Haghghat, M. (2019). Simulating climate change effect on maize (*Zea mays* L.) grain yield in Kermanshah province using a process-based simulation model. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 20(4), 315-328. <https://sid.ir/paper/375658/fa>
- Ranuzzi, A., & Srivastava, R. (2012). Impact of Climate Change on Agriculture and Food Security. ICRIER Policy Series, no. 16. [https://www.icrier.org/pdf/Policy\\_Series\\_No\\_16.pdf](https://www.icrier.org/pdf/Policy_Series_No_16.pdf)
- Rosenzweig, C., & Tubiello, F. N. (2007). Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 855-873. <https://DOI: 10.1007/s11027-007-9103-8>
- Saunders, M. A. (1999). Earth's future climate. *Philos. The Royal Society*, 357, 3459- 3480. [https://www.tropicalstormrisk.com/docs/Saunders\\_1999paper.pdf](https://www.tropicalstormrisk.com/docs/Saunders_1999paper.pdf)
- Srivastava, A. K., Mboh, C. M., Zhao, G., Gaiser, T., & Ewert, F. (2018). Climate change impact under alternate realizations of climate scenarios on maize yield and biomass in Ghana. *Agricultural systems*, 159, 157-174. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.011>
- Smit, B., & Skinner, M. W. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 7, 85-114. <https://doi.org/10.1023/A:1015862228270>
- Tingem, M., & Rivington, M. (2009). Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14, 153-168. <https://doi.org/10.1007/s11027-008-9156-3>
- Trnka, M., Dubrovsky, M., & Ekzalud, Z. (2004). Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. *Climatic Change*, 64, 227-255. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024675.39030.96>
- Tubiello, F. N., Jagtap, S., Rosenzweig, C., Goldberg, R., & Jones, J. W. (2002). Effects of climate change on US crop production from the National Assessment. Simulation results using two different GCM scenarios. Part I: Wheat, Potato, Corn, and Citrus. *Climate research*, 20, 259-270. <https://doi.org/10.3354/cr020259>
- Zhang, Y., Wang, Y., & Niu, H. (2019). Effects of temperature, precipitation and carbon dioxide concentrations on the requirements for crop irrigation water in China under future climate scenarios. *Science of The Total Environment*, 656, 373-387. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.362>



## Numerical investigation of the effect of geometric and hydrodynamic parameters of waves on the performance of rectangular floating pontoon breakwater structure

Mehdi Azami<sup>1</sup> , Morteza Bakhtiari<sup>2✉</sup> , Hossein Bahrami<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> M.Sc. Graduated of Coastal engineering of ports and marine structures, Department of Marine structure, Khorramshahr university of marine science technology, Khorramshahr, Iran. E-mail: mehdi\_azami69@yahoo.com

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associate Professor, Department of Marine structure, Khorramshahr university of marine science technology, Khorramshahr, Iran. E-mail: bakhtiari@kmsu.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Marine structure, Khorramshahr university of marine science technology, Khorramshahr, Iran. E-mail: hossein\_bahrami1979@yahoo.com

### ABSTRACT

#### Introduction

Considering that pontoon breakwaters are among the most common floating breakwaters, which have many advantages over other types of fixed breakwaters, these types of breakwaters are used in many recreational ports today. These breakwaters consist of a number of separate pontoons connected to each other, which are usually made of reinforced concrete. The structural design of breakwater parts is done in such a way that its assembly is easy and cheap. The parts of this breakwater can be separated and transported more easily than other breakwaters. Pontoon breakwaters have advantages over other floating breakwaters. A review of past research shows that regarding different types of breakwater structures, various studies have been carried out in both numerical and laboratory (field) studies departments inside and outside the country, and most of the researches have been conducted after investigating the effect of parameters has been effective on the design of this breakwater, while in the present research, a sample of the designed breakwater has been exposed to waves and the effect of these waves on the various displacements of the structure has been investigated.

#### Methods and materials

In this research, ANSYS AQWA software was used and the analyzes were performed in the form of hydrostatic analysis and time history analysis by applying the 20-year average wave conditions of the region and time history analysis under the conditions of regional limit waves. AQWA software was developed around 1984 by WS Atkins to analyze and evaluate offshore and offshore structures. This software has the ability to create a mesh automatically, and you can also draw the geometry of the structure in CAD software such as CATIA and Solidworks and then import it into this software. Of course, this software has been purchased by ANSYS since 2008 and now it can be used under one of ANSYS software modules. AQWA deals with the hydrodynamic simulation of marine engineering problems such as oil platforms, marine structures, wave motion, etc. and includes two modules, Hydrodynamic Diffraction and Hydrodynamic Time Response.

#### Results

The results of this research show that the highest amount of displacement occurred in the Heave movement (wave period of 6 seconds) and the lowest amount of displacement occurred in the Surge movement (wave period of 2 seconds). Also, the results show that the amount of rotation around the Z and Y axes against The rotation around the X axis is very small, even the maximum values of the rotation around the Y and Z axes are lower than the minimum rotation around the X axis with a value of 6.7504e-05 (°/m) which occurs in a period of 2 seconds

**Keywords:** Floating Breakwater, Geometric Parameters, Wave Hydrodynamic, ANSYS AQWA, Heave

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 19 March 2023 Revised: 01 June 2023 Accepted: 13 June 2023 ePublished: 27 June 2023

**Cite this article:** Azami, M., Bakhtiari, M., & Bahrami, Hossein. (2023). Numerical investigation of the effect of geometric and hydrodynamic parameters of waves on the performance of rectangular floating pontoon breakwater structure, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(1), 42-60. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9049.1049

**Publisher:** Razi University

© The Author(s).





## بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرودینامیک امواج بر عملکرد سازه موج شکن شناور پانتونی مستطیلی

مهدی اعظمی<sup>۱</sup>، مرتضی بختیاری<sup>۲</sup>، حسین بهرامی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سواحل بنادر و سازه‌های دریایی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: mehdi\_azami69@yahoo.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: bakhtiari@kmsu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: hossein\_bahrami1979@yahoo.com

### چکیده

یکی از سازه‌های بسیار مهم در حوزه مهندسی سواحل، موج شکن‌ها می‌باشند که به منظور و اهداف مختلفی ساخته می‌شوند. موج شکن‌های پانتونی از جمله متداول‌ترین موج شکن‌های شناور بوده که نسبت به سایر انواع موج شکن‌های ثابت دارای مزایای فراوانی از جمله اقتصادی بودن و همچنین کارایی بالا می‌باشند. در تحقیق حاضر به مطالعه عملکرد موج شکن پانتونی با مقطع مستطیلی تحت شرایط امواج دریای خزر با دوره بازگشت ۲۰ ساله پرداخته شده است. به منظور انجام تحقیق حاضر از نرم افزار ANSYS AQWA با مقیاس مدل‌های آزمایشگاهی ۱:۵۰ برای مدل سازی استفاده شده است. پس از اجرای مدل‌ها بر اساس سناریوهای مختلف تحلیل‌ها، به صورت هیدرواستاتیک و تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال شرایط موج متوسط منطقه و تحلیل تاریخچه زمانی تحت شرایط امواج حدى منطقه انجام گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد در شرایط تحلیل هیدرواستاتیک بیشترین میزان جابجایی را در حرکت Heave (بالا و پایین رفتن شناور)، و کمترین میزان جابجایی را در حرکت Surge (چپ و راست رفتن شناور) که بسیار ناچیز است، رخ داده است. جابجایی در حرکت Heave تحت پیوند موج ۶ ثانیه دارای بیشترین مقدار (۱/۶۱ متر) و در پیوند ۲ ثانیه دارای کمترین مقدار است همچنین در همین شرایط تحلیل میزان دوران حول محورهای Z و Y در برابر دوران حول محور X بسیار کمتر بوده و مقادیر بیشینه دوران حول محورهای Y و Z از مینیمم دوران حول محور X با مقدار  $6.7e-05$  ( $^{\circ}/m$ ) که در پیوند ۲ ثانیه اتفاق می‌افتد، کمتر است.

**واژه های کلیدی:** موج شکن شناور، پارامترهای هندسی، هیدرودینامیک امواج، نرم افزار آنسیس، بالا و پایین رفتن شناور

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۸ اسفند ۱۴۰۱ اصلاح: ۱۱ خرداد ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۳ خرداد ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۳ خرداد ۱۴۰۲

**استناد:** اعظمی، مهدی،، بختیاری، مرتضی،، و بهرامی، حسین. (۱۴۰۲). بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرودینامیک امواج بر

عملکرد سازه موج شکن شناور پانتونی مستطیلی، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، (۱)۳، ۴۲-۶۰، شناسه دیجیتال:

10.22126/ATWE.2023.9049.1049



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

موج‌شکن‌های شناور پانتونی یکی از معمول‌ترین نوع موج‌شکن‌های شناور است. امروزه در بسیاری از بندرهای تفریحی از این نوع موج‌شکن‌ها استفاده می‌شود. این موج‌شکن‌ها شامل تعدادی پانتون مجزای متصل شده به یکدیگر هستند که معمولاً از بتن مسلح ساخته شده‌اند. طراحی سازه‌های قطعات موج‌شکن به گونه‌ای انجام می‌شود که مونتاژ آن آسان و ارزان قیمت باشد. قطعات این موج‌شکن راحت‌تر از موج‌شکن‌های دیگر از یکدیگر جدا شده و حمل می‌گردد. موج‌شکن‌های پانتونی دارای مزایایی نسبت به سایر موج‌شکن‌های شناور هستند، از جمله آن که انتقال این شناورها آسان است. موج‌شکن‌های پانتونی از تعدادی المان‌های شناور مجزا که به هم متصل شده‌اند ساخته شده است. چنانچه نیاز باشد می‌توان با جدا کردن المان‌ها از هم، آن‌ها را به مکانی که مورد نیاز است، منتقل نمود و حتی می‌توان با اتصال المان‌های دیگر، ترکیب بندی جدیدی را به وجود آورد. موج‌شکن‌های پانتونی سازه‌های نسبتاً ایمنی هستند که در صورت آسیب دیدگی یک یا چند پانتون محدود در اثر سوراخ شدن و نفوذ آب به درون آن‌ها، پانتون‌های مجاور شناوری کافی را برای کل سازه تأمین خواهند کرد. این شناورها دارای طول عمر مفید ۱۰۰ سال می‌باشند و حتی بعد از ۳۰ تا ۵۰ سال می‌توانند برای ساخت شناورهای دیگر در ساحل یا فراساحل به کار روند، بنابراین یکی از دلایل اصلی استفاده از این سازه‌ها می‌تواند طول عمر مفید زیاد آن‌ها باشد. سازه‌های پانتونی سطح مرطوب وسیع و مرکز جرم کوتاهی دارند. معمولاً بسیار پایدار هستند و برای آب‌های کم عمق و عمیق کاربرد دارند. با توجه به مطالب بیان شده و نظر به اهمیت بهره‌برداری از سواحل، تحقیقات در خصوص جنبه‌های مختلف مهندسی سواحل به خصوص سازه‌های ساحلی موضوع تحقیق محققین مختلف بوده است. در خصوص انواع مختلف سازه موج‌شکن، از گذشته تاکنون تحقیقات مختلفی در دو بخش مطالعات عددی و آزمایشگاهی (میدانی) در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در این بخش به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود تا در نهایت لزوم انجام تحقیق حاضر در مقایسه با تحقیقات گذشته تبیین گردد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۴).

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بررسی‌های به عمل آمده بر روی هندسه مقطع نشان می‌دهد، موج‌شکن‌های با مقطع مستطیلی عملکرد بهتری نسبت به سایر انواع مقاطع دایره‌ای، مثلثی در کاهش ارتفاع امواج و ضریب آبگذری دارند همچنین استفاده از موج‌شکن مستطیلی با نصب تیغه اضافی (بیرون زدگی صفحه پایینی) عملکرد بهتری نسبت به مقاطع ساده دارند (ساتکو<sup>۱</sup> و هایدن<sup>۲</sup> ۱۹۷۴، کاتاندوس و همکاران<sup>۳</sup> ۲۰۰۹). در خصوص سیستم مهاربندی موج‌شکن‌های شناور بررسی‌ها نشان می‌دهد چینه‌ها و مهارها و همچنین نوع سیستم مهاربندی تأثیر بسیار زیادی در پایداری سازه و عملکرد سازه داشته است (یاماموتو و همکاران<sup>۴</sup> ۱۹۸۰، مارتینلی<sup>۵</sup> و همکاران ۲۰۰۸، اوزرن<sup>۶</sup> ۲۰۰۹). خلیلی و شفیع‌فر (۱۳۸۹)، در پژوهشی به بهینه‌سازی هندسه موج‌شکن شناور پانتونی برای افزایش راندمان آن پرداختند.

در مطالعه عددی انجام شده، ابتدا به بررسی میزان راندمان موج‌شکن شناور پانتونی با شکل مکعب مستطیل پرداخته و حساسیت راندمان موج‌شکن به مقادیر مختلف عمق آب‌خور، عرض موج‌شکن و مهاربندی در برابر امواج نامنظم دریا با مشخصات مختلف ارتفاع، پریود و زاویه موج برخوردی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد موج‌شکن شناور پانتونی از نرم‌افزار Moses استفاده گردیده است. پس از انجام مطالعات بر عملکرد موج‌شکن شناور پانتونی، به بررسی بهینه‌سازی هندسه موج‌شکن شناور پانتونی برای افزایش راندمان پرداخته شده است. هدف از بهینه‌سازی انجام شده، کمینه کردن میزان عبور موج از موج‌شکن (افزایش راندمان موج‌شکن) است. روش بهینه‌سازی بکار رفته در این تحقیق الگوریتم ژنتیک است.

<sup>1</sup> Sutko

<sup>2</sup> Haden

<sup>3</sup> Koutandos et al

<sup>4</sup> Yamamoto

<sup>5</sup> Martinelli et al

<sup>6</sup> Ozeren

حجتی و همکاران ۲۰۱۹، در تحقیقی به مطالعه عملکرد موجشکن‌های جفت و مستغرق شناور با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات صاف پرداختند. در این تحقیق عملکرد سازه در برابر امواج سینوسی شکل با دوره تناوب کمتر از ۳ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد حضور موجشکن‌های شناور در مجاورت موجشکن‌های مغروق کمک زیادی به پایداری فشار و کاهش نوسانات می‌نماید. همچنین نتایج نشان می‌دهد جابجایی Heave عملکرد بهتری نسبت به حرکت دورانی Sway (چپ و راست رفتن شناور) دارد. وو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) طرح جدیدی از یک موجشکن با سطح آزاد را به منظور استهلاک امواج مورد بررسی قرار دادند. این سازه از دو بخش ثابت با مقطع مستطیلی و یک بخش اضافی نفوذپذیر (مشبک) مستطیلی شکل تشکیل شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد با لحاظ نمودن بخش نفوذپذیر (مشبک) کارایی سازه به نحوه قابل توجهی افزایش می‌یابد. گائو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۲)، در یک تحقیق به مطالعه تحلیلی مدل موجشکن مشبک با استفاده از تئوری امواج خطی پرداختند. ایشان با استفاده از معادله مرتبه دوم گرین یک معادله با شیب ملایم برای مطالعه امواج مورب برخوردی به سازه مشبک استفاده نمودند. نتایج حاصل از تحقیق مطابقت بسیار خوب نتایج مدل تحلیلی با تحقیقات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل شده شامل انعکاس و استهلاک امواج و در نتیجه کاهش نیروی وارده بر سازه بوده است که در حالت طرح جدید موجشکن مستغرق مشبک کارایی مناسبی داشته است. بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد عمده تحقیقات صورت گرفته در قالب تحقیقات آزمایشگاهی بوده و بیشتر در حد شناخت پدیده‌ها بوده است و در نتیجه با لحاظ نمودن این محدودیت نتایج کاربردی استخراج نشده است. بر این اساس و باهدف رفع نواقص تحقیقاتی گذشته اقدام به مطالعه عددی عملکرد سازه موجشکن شناور با در نظر گرفتن نسبت مقیاسی مناسب از یک طرح واقعی موجشکن و همچنین لحاظ نمودن داده‌های ۲۰ ساله امواج دریای خزر در شرایط مدل‌سازی شده است.

مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد در خصوص انواع مختلف سازه موجشکن، از گذشته تاکنون مطالعات مختلفی در دو بخش مطالعات عددی و آزمایشگاهی (میدانی) در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که عمده تحقیقات انجام شده به دنبال بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر بر طراحی این موجشکن بوده است در حالیکه در تحقیق حاضر نمونه‌ای از موجشکن طراحی شده در معرض امواج قرار گرفته است و تأثیر این امواج بر روی جابجایی‌های مختلف سازه مورد بررسی قرار گرفته است.

### روش پژوهش

همان‌گونه که بیان گردید هدف از تحقیق حاضر بررسی عملکرد سازه موجشکن شناور با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA است. به منظور مدل‌سازی‌ها از داده‌های امواج با دوره بازگشت ۲۰ ساله استفاده شده است. لذا در این بخش تحقیق ابتدا به معرفی منطقه مورد نظر و داده‌های مورد استفاده و سپس به معرفی نرم‌افزار یاد شده پرداخته شده است.

### تئوری حاکم بر تحقیق

به منظور استخراج روابط حاکم بر تحقیق حاضر هیدرودینامیک موجشکن‌های شناور در قالب شرایط مرزی مربوطه بیان می‌گردد.

شرایط مرزی مربوط به موجشکن‌های شناور

- شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد:

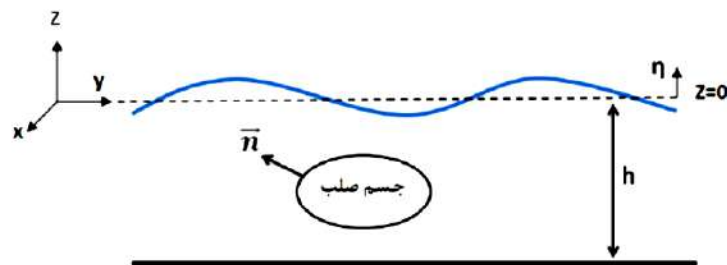
<sup>1</sup> Wu et al

<sup>2</sup> Guo et al

در شکل (۱) پارامترهای شرایط مرزی نشان داده شده است. فشار در سطح آزاد آب ( $\eta=Z$ ) برابر با فشار اتمسفر است. از آنجاکه امواج با تیزی نسبی کوچک در نظر گرفته می شوند، معادله برنولی برای یک جریان غیر چرخشی غیر استاتیکی به صورت زیر درمی آید:

(۱)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0 \rightarrow Z = \eta$$



شکل ۱. تعریف پارامترهای شرایط مرزی تئوری تفرق-انتشار

- شرط مرزی سینماتیکی سطح آزاد:

سرعت قائم ذره آب در سطح آزاد سیال برابر با سرعت قائم خود سیال است. این توضیح منجر به معادله زیر می گردد:

(۲)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \rightarrow z=0$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \rightarrow z=0$$

- شرط مرزی بستر دریا:

بر اساس این شرط مبادله انرژی قائم در بستر دریا غیرممکن فرض می گردد؛ بنابراین با فرض افقی بودن بستر دریا، سرعت قائم ذرات آب در بستر دریا صفر در نظر گرفته می شود.

(۳)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \rightarrow z=-h$$

در شرایط آب عمیق، امواج آب عمیق از اصطکاک بستر تأثیر نمی پذیرند و معادله به صورت زیر بسط می یابد:

(۴)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad \text{for } z=-h$$

• شرط مرزی سینماتیکی روی سطح جسم شناور:

سرعت یک ذره آب در یک نقطه در سطح جسم معادل با سرعت نقطه‌ای خود این جسم است.

(۵)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{v} \cdot \vec{n}$$

که در این رابطه  $\vec{V}$  سرعت یک نقطه از بدنه و  $\vec{n}$  بردار نرمال بدنه است که جهت مثبت آن به سمت سیال است. این شرط به دلیل حصول اطمینان از عدم نشت در بدنه لحاظ می‌گردد.

• شرط تابش:

حرکت جسم و پتانسیل‌های تفرق باید شرط تابش را تأمین کنند. شرط تابش بیان می‌دارد هنگامی که فاصله از جسم نوسان کننده افزایش می‌یابد، مقدار پتانسیل به سمت صفر میل می‌کند:

(۶)

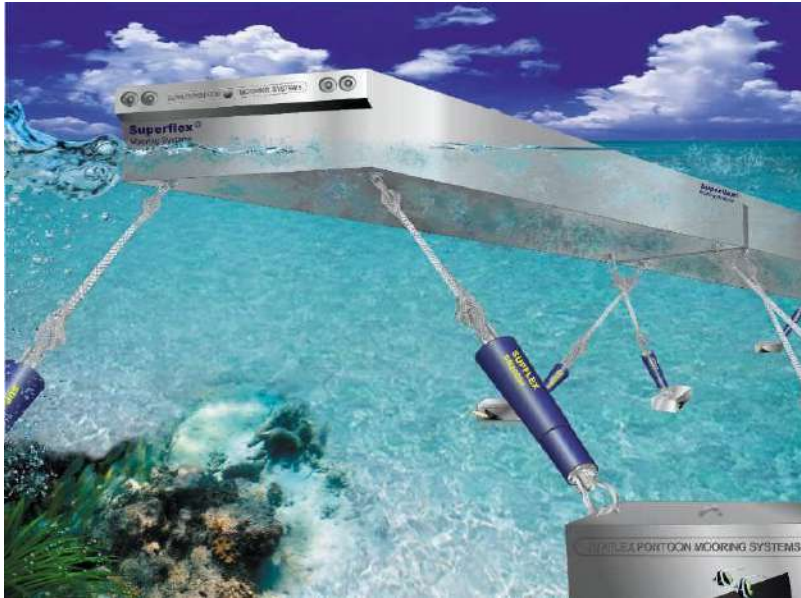
$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left( \frac{\partial}{\partial R} \pm i\lambda \right) \phi_{r+d} = 0$$

#### اطلاعات و داده‌های مورد استفاده

مجموعه اطلاعات و داده‌های مورد استفاده برای انجام پژوهش که مربوط به هندسه و مشخصات سازه‌ای موجشکن شناور و اطلاعات مربوط به محل انجام شبیه‌سازی هیدرودینامیکی است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

#### اطلاعات مربوط به سازه موجشکن شناور

در شکل (۲) تصویر شماتیک از یک نمونه موجشکن پانتونی و در شکل (۳) مشخصات هندسی سازه موجشکن مورد مطالعه ارائه شده است. در طرح‌های مورد مطالعه بعد سوم مطابق نمونه آزمایشگاهی برابر ۸۵ سانتیمتر انتخاب شده است همچنین در شبیه‌سازی آن‌ها، آب‌خور نمونه‌ها ثابت و برابر هشت سانتیمتر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است مقیاس مدل‌های آزمایشگاهی ۱:۵۰ است.



شکل ۲. طرح شماتیک موج شکن پانتونی شناور

1	شماره مدل
	هندسه مدل
$\rho=500 \text{ Kg/m}^3$	مشخصات مدل

شکل ۳. مشخصات هندسی سازه موج شکن شناور با مقیاس ۱:۵۰ (ابعاد به متر)

### داده‌ها و اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه

برای انجام پژوهش با بهره‌گیری از اطلاعات موج دریای خزر اقدام به مدل‌سازی شرایط هیدرودینامیکی در نرم‌افزار شده است. موقعیت مکانی محل قرارگیری سازه موج شکن در طول جغرافیایی ۴۹.۴۵۶۸ و عرض ۳۷.۴۹۸۷۶ است. عمق آب نیز ۱۰ متر است. مشخصات موج منطقه که با استفاده از توزیع گامبل محاسبه شده است، در جدول (۱) ارائه شده است.



جدول ۱. مشخصات موج منطقه مورد مطالعه

	$H_s$	$T_p$	Dir
حالت حدی	۳/۶	۸/۵۶	۴۶
امواج ۲۰ ساله	۰/۴۸۳۴۳۱	۴/۵	۱۰۱/۳

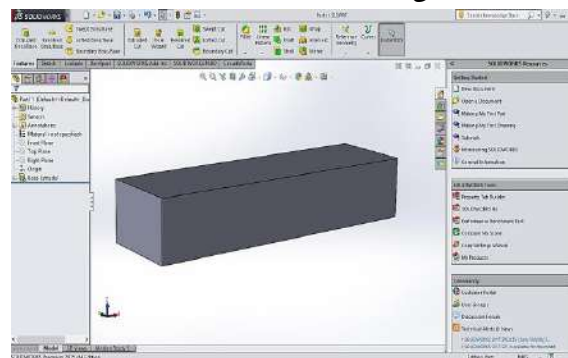
در جدول فوق پارامتر  $H_s$  ارتفاع موج شاخص،  $T_p$  دوره تناوب موج و Dir زاویه موج می‌باشد.

### نرم‌افزار ANSYS AQWA

نرم‌افزار AQWA در حدود سال ۱۹۸۴ برای تحلیل و ارزیابی سازه‌های دریایی و دور از ساحل توسط WS Atkins گسترش یافت. این نرم‌افزار قابلیت ایجاد مش به صورت خودکار را دارد و همچنین می‌توان هندسه سازه را در نرم‌افزارهای CAD نظیر CATIA و Solidworks رسم کرد و سپس وارد این نرم‌افزار نمود. البته این نرم‌افزار از سال ۲۰۰۸ توسط شرکت ANSYS خریداری شده و اکنون تحت یکی از ماژول‌های نرم‌افزار ANSYS قابل کاربرد است. AQWA به شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مسائل مهندسی دریایی از قبیل سکوه‌های نفتی، سازه‌های دریایی، حرکت امواج و... می‌پردازد و شامل دو ماژول Hydrodynamic Diffraction و Hydrodynamic Time Response است.

### مدل‌سازی هندسه موج‌شکن در Solidworks

با توجه به اطلاعات ارائه‌شده مربوط به مدل آزمایشگاهی سازه موج‌شکن اقدام به مدل‌سازی هندسی با توجه به مقیاس ۱:۵۰ گردید. در شکل ۴ هندسه مقطع ترسیم‌شده در نرم‌افزار Solidworks نشان داده شده است.



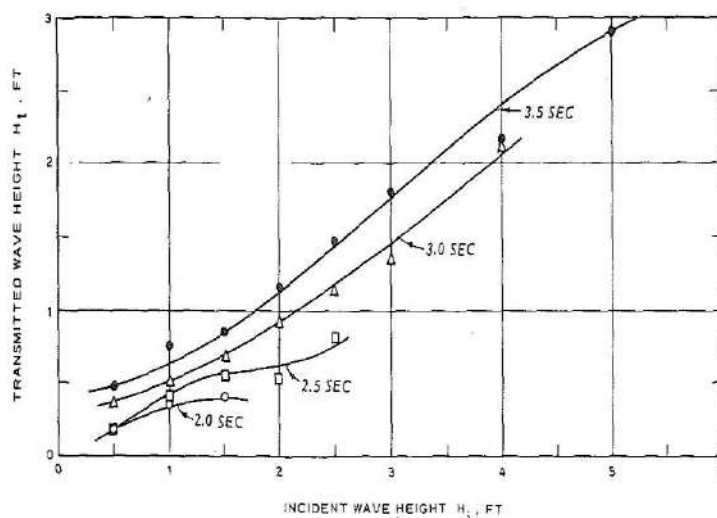
شکل ۴. هندسه مدل

### شبیه‌سازی هیدرودینامیکی در نرم‌افزار ANSYS AQWA

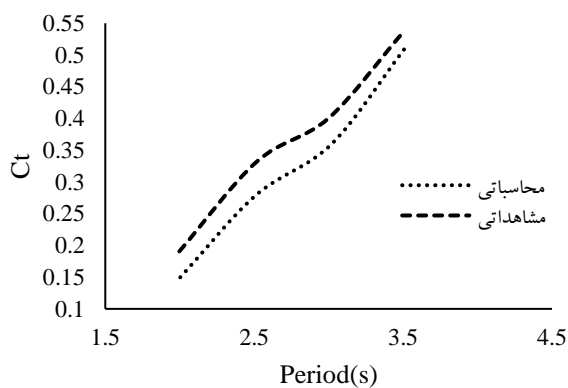
در نرم‌افزار ANSYS برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مسائل مهندسی دریایی از ماژول AQWA که شامل دو بخش Hydrodynamic Diffraction و Hydrodynamic Time Response است، استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرودینامیکی برای موج‌شکن شناور ابتدا شرایط کلی مدسازی را تحت ماژول Hydrodynamic Diffraction برای سازه تبیین کرده و پس از تحلیل موج‌شکن در این ماژول و گرفتن خروجی‌های مختلف، عملکرد سازه را در حالت کلی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. در ماژول Hydrodynamic Time Response عملکرد سازه در بازه زمانی معرفی شده و تحت شرایط بارگذاری موج قرار می‌گیرد. در این ماژول سازه در دو حالت مورد بارگذاری تحت شرایط منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در حالت اول با اعمال میانگین امواج ۲۰ ساله‌ی منطقه مورد مطالعه، سازه تحت این شرایط مورد بارگذاری موج و در حالت دوم سازه تحت شرایط بارگذاری حدی قرار داده شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل عددی تهیه‌شده در نرم‌افزار، از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی مک کارتنی<sup>۱</sup> ۱۹۸۵ استفاده گردید. در شکل (۵) نتایج حاصل‌شده از آزمایش‌های انجام‌شده مک کارتنی ۱۹۸۵ بر روی موج‌شکن پانتونی نشان داده شده است. با استفاده از نمودار ارائه شده ضریب انتقال ( $C_t$ ) مدل آزمایشگاهی را در یک ارتفاع موج ثابت برای پریودهای ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ محاسبه شده است. سپس شرایط موج را بر موج‌شکن مدل‌سازی شده در نرم‌افزار انسیس اعمال کرده و ضریب انتقال را برای آن نیز به‌دست آورده است. نتایج حاصل از صحت‌سنجی در شکل (۶) ارائه شده است. متوسط اختلاف نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ۱۲/۵٪ است.



شکل ۵. نتایج آزمایشگاهی ارتفاع موج تابیده‌شده به موج عبوری (McCartney (1985)



شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی

<sup>1</sup> McCartney

## یافته‌ها

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده حاصل از تحقیق که شامل سه حالت تحلیل هیدرواستاتیکی، تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال شرایط موج میانگین ۲۰ ساله‌ی منطقه و تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال شرایط موج حدی منطقه مورد مطالعه بوده و بحث در خصوص این نتایج ارائه می‌گردد.

### نتایج به‌دست آمده در ماژول Hydrodynamic Diffraction

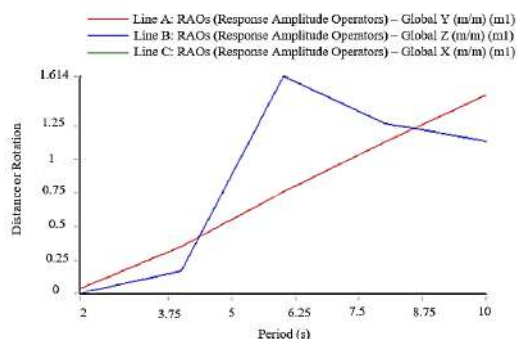
به‌منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرودینامیکی برای موجشکن شناور ابتدا شرایط کلی مدسازی را تحت ماژول Hydrodynamic Diffraction برای سازه تبیین گردید.

### تحلیل هیدرواستاتیکی

در تحلیل هیدرواستاتیکی سازه موجشکن از لحاظ پایداری در برابر بارهای ثقلی و شناوری تحلیل می‌شود. از جمله خروجی‌های مهم در این قسمت می‌توان به‌سختی هیدرواستاتیکی، پارامترهای جابجایی هیدرواستاتیکی، خصوصیات پهنه‌ی آبی و پارامترهای پایداری اشاره نمود.

### میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس پریود

شکل (۷)، میزان جابجایی سازه برحسب پریود موج را در راستای سه محور  $X$  و  $Y$  و  $Z$  تحت موج تابیده‌شده با زاویه  $90^\circ$  درجه، نشان می‌دهد.

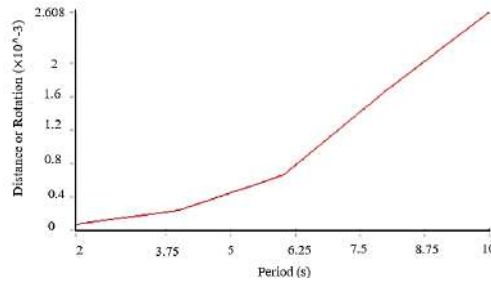


شکل ۷. میزان جابجایی در امتداد  $X$  و  $Y$  و  $Z$  بر اساس پریود

بیشترین میزان جابجایی را در حرکت Heave و کمترین میزان جابجایی را در حرکت Surge که بسیار ناچیز است رخ داده است. جابجایی در حرکت Heave تحت پریود موج ۶ ثانیه دارای بیشترین مقدار (۱/۶۱۴۲ متر) و در پریود ۲ ثانیه دارای کمترین مقدار است. میزان جابجایی در حرکت Sway نیز همواره با افزایش پریود به‌صورت خطی افزایش می‌یابد لذا در پریود ۱۰ ثانیه شاهد بیشترین میزان جابجایی در این حرکت به مقدار ۱/۴۷۶۴ متر هستیم. دلیل ناچیز بودن جابجایی در راستای  $X$ ، جهت موج برخوردی است که عمود بر محور طولی موجشکن است.

میزان دوران در حرکت Roll (چپ شدن شناور) و Pitch (اوج گرفتن شناور) و Yaw (پیچیدن شناور) بر اساس پریود

در شکل (۸)، میزان دوران سازه پریود موج برخوردی را حول محورهای  $X$ ،  $Y$ ،  $Z$  نشان داده شده است.

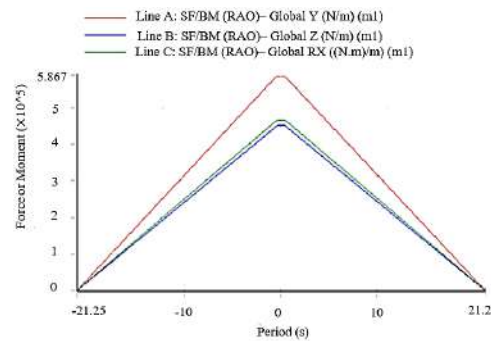


شکل ۸. میزان دوران حول X و Y و Z بر اساس پریود

دوران حول محورهای مربوطه حاصل از موجی است که با زاویه‌ی ۹۰ درجه به سازه برخورد کرده است به همین دلیل میزان دوران حول محورهای Z و Y در برابر دوران حول محور X بسیار ناچیز است حتی مقادیر بیشینه دوران حول محورهای Y و Z از مینیمم دوران حول محور X با مقدار  $6.7504e-05$  ( $^{\circ}/m$ ) که در پریود ۲ ثانیه اتفاق می‌افتد نیز کمتر است. میزان دوران حول محور X با افزایش پریود زیاد شده و در پریود ۱۰ ثانیه بیشترین میزان دوران به مقدار  $2.6082e-03$  ( $^{\circ}/m$ ) رخ داده است.

#### تغییرات نیروی برشی و گشتاور خمشی در طول سازه

شکل (۹)، تغییرات نیروی برشی در امتداد Y و Z و گشتاور خمشی حول X را در امتداد طولی سازه نشان می‌دهد.

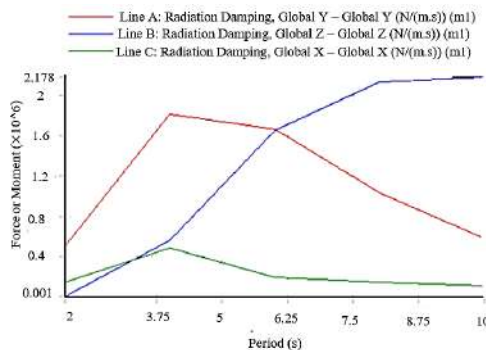


شکل ۹. تغییرات نیروی برشی و گشتاور خمشی در طول سازه

همان‌گونه که از نمودار مشخص است که بیشینه مقادیر فوق در مرکز موج‌شکن رخ خواهد داد و در گوشه‌های انتهایی سازه این مقادیر صفر خواهند شد. بیشترین مقدار نیروی برشی در امتداد محور Y اتفاق می‌افتد که مقدار آن  $5/867 \times 105$  نیوتن بر متر است. بیشینه مقدار نیروی برشی در راستای Z نیز  $4/5 \times 105$  است. بیشینه مقدار گشتاور خمشی حول X نیز  $4/64 \times 105$  است.

#### میزان میرایی موج تابشی در امتداد X و Y و Z بر اساس پریود

شکل (۱۰) میزان میرایی موج تابشی در راستای محور X، Y، Z را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. میزان میرایی موج تابشی در امتداد X و Y و Z بر اساس پریود

نمودار فوق میزان میرایی موج تابشی در راستای محور X، Y، Z را نشان می‌دهد. نمودارهای فوق در پریود ۹ ثانیه تا ۴ ثانیه یک روند افزایشی در میزان میرایی را ارائه می‌دهند. با افزایش پریود موج میزان میرایی در راستای Z همواره صعودی و رو به افزایش است ولی از مقادیر میرایی در راستای محورهای Y و X کاسته می‌شود. بیشترین مقدار میرایی مربوط به راستای Z به میزان  $2.178 \times 10^6$  در پریود ۱۰ ثانیه رخ می‌دهد و کمترین میزان میرایی نیز مربوط به راستای Z به میزان ۵۰۷.۹۴ است. در راستای Y نیز بیشترین مقدار در پریود ۴ ثانیه به میزان  $1.808 \times 10^6$  و کمترین آن در پریود ۲ ثانیه و مقدار  $0.495 \times 10^6$  است. همچنین در راستای X بیشترین مقدار در پریود ۴ ثانیه،  $0.476 \times 10^6$  و کمترین آن در پریود ۱۰ ثانیه به میزان  $0.105 \times 10^6$  است.

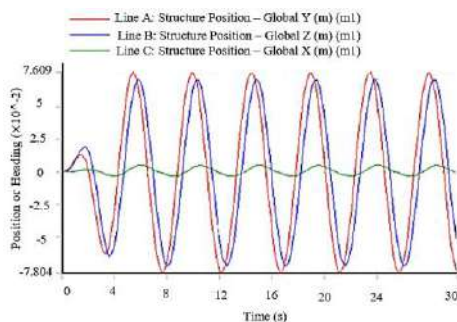
نتایج به‌دست‌آمده از ماژول Hydrodynamic Time Response

در ماژول Hydrodynamic Time Response عملکرد سازه در بازه زمانی معرفی و تحت شرایط بارگذاری موج قرار می‌گیرد. در این ماژول سازه در دو حالت مورد بارگذاری تحت شرایط منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت اول با اعمال میانگین امواج ۲۰ ساله‌ی منطقه مورد مطالعه و در حالت دوم سازه تحت شرایط بارگذاری حدى قرار گرفته و عملکرد آن را مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج به‌دست‌آمده تحت بارگذاری میانگین امواج ۲۰ ساله

میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس (RAO) بر حسب زمان

شکل (۱۱)، میزان جابه‌جایی سازه را بر اساس عملکرد پاسخ دامنه در راستای سه محور X، Y، Z بر حسب زمان نشان می‌دهد.

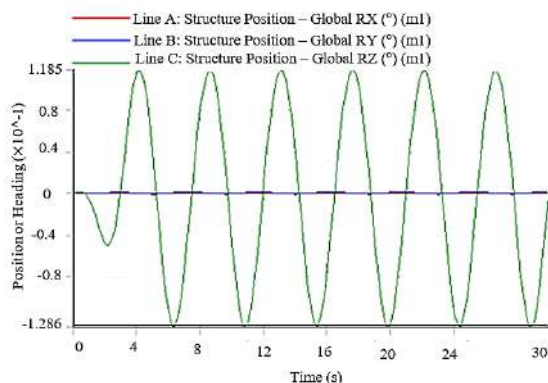


شکل ۱۱. میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس (RAO) بر حسب زمان

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین جابه‌جایی به ترتیب مربوط به حرکت Sway سپس حرکت Heave است. حرکت Surge نیز دارای کمترین میزان جابه‌جایی است. دلیل این اختلاف میزان جابه‌جایی‌ها مربوط به جهت موج برخوردی به سازه است که با زاویه  $101/3$  درجه به آن برخورد می‌کند. بنابراین باید انتظار یک همچنین واکنشی را از سازه داشت.

### میزان دوران Roll و Pitch و Yaw بر اساس (RAO) برحسب زمان

شکل (۱۲)، بیانگر میزان دوران حول محورهای X، Y، Z برحسب زمان است.

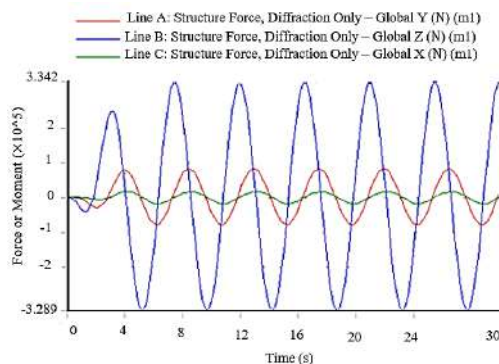


### شکل ۱۲. میزان دوران در حرکت Roll و Pitch و Yaw بر اساس (ROA) برحسب زمان

با توجه به زاویه موج برخوردی (۱/۳ درجه) میزان دوران حول محور Z دارای بیشترین مقدار است و دوران در حول محور X، Y خیلی ناچیز است. بازه دورانی سازه حول محور Z در یک حرکت سیکلیک از 0.118 درجه تا -0.128 درجه است.

### میزان نیروی تفرق در امتداد X، Y، Z برحسب زمان

شکل (۱۳) بیانگر میزان نیروی تفرق ایجاد شده در امتداد محورهای X، Y، Z برحسب زمان است.

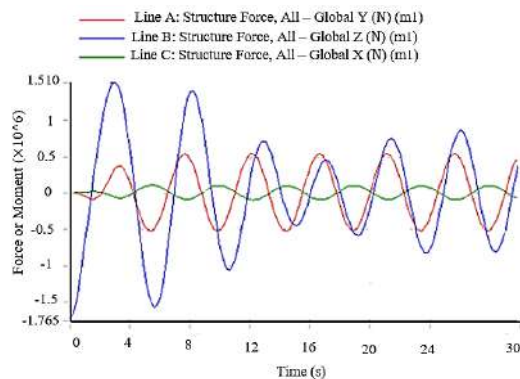


### شکل ۱۳. میزان نیروی تفرق در امتداد X، Y، Z برحسب زمان

بیشترین نیروی تفرق مربوط به نیروی ایجاد شده در امتداد محور Z است که دامنه تغییرات آن از  $3.289 \times 10^5$  تا  $3.342 \times 10^5$  است. در راستای Y دامنه تغییرات این نیرو بین  $0.82 \times 10^5$  تا  $-0.79 \times 10^5$  است. در راستای X نیز کمترین میزان این نیرو به وجود می‌آید که این مقادیر بین  $-0.18 \times 10^5$  و  $0.16 \times 10^5$  است.

### میزان نیروی کل در جهت X، Y، Z برحسب زمان

شکل (۱۴)، بیانگر نیروی کل به وجود آمده در راستای محورهای X، Y، Z برحسب زمان است.



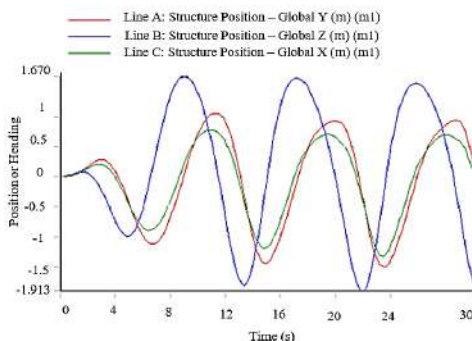
شکل ۱۴. میزان نیروی کل در جهت X, Y, Z برحسب زمان

مهم‌ترین این نیروها شامل نیروی تفرق، نیروی به‌دست‌آمده توسط سیستم مورینگ و نیروی فرود کریلف می‌باشد. در راستای محور Z نیروی کل به وجود آمده بین مقادیر  $1.51 \times 10^6$  و  $-1.76 \times 10^6$  متغیر است. در راستای محور Y نیز این مقادیر بین  $0.537 \times 10^6$  و  $-0.527 \times 10^6$  متغیر است. همچنین در راستای محور X که شاهد کمترین میزان نیرو در این راستا هستیم این مقادیر بین  $0.103 \times 10^6$  و  $-0.101 \times 10^6$  متغیر است.

#### نتایج به‌دست‌آمده تحت بارگذاری موج حدی

#### میزان جابجایی در امتداد X, Y, Z بر اساس (RAO) برحسب زمان

شکل (۱۵)، میزان جابجایی سازه را برحسب زمان بر اساس عملکرد پاسخ دامنه ارائه می‌کند.

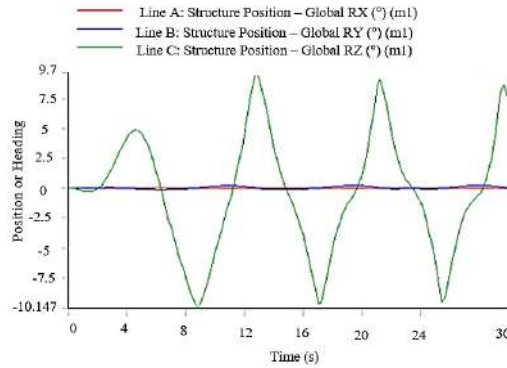


شکل ۱۵. میزان جابجایی Surge و Sway و Heave بر اساس (RAO) برحسب زمان

در امتداد محور Z شاهد بیشترین میزان جابه‌جایی سازه هستیم که بین مقادیر ۱.۶۷ متر و  $-1.913$  متغیر است. در راستای محور X و Z شاهد تقریباً جابه‌جایی‌های یکسانی در زمان‌های مختلف هستیم که به علت جهت موج تابشی است.

#### میزان دوران حول X و Y و Z بر اساس (RAO) برحسب زمان

شکل (۱۶)، میزان دوران حول محورهای X, Y, Z را بر اساس عملکرد پاسخ دامنه برحسب زمان نشان می‌دهد.

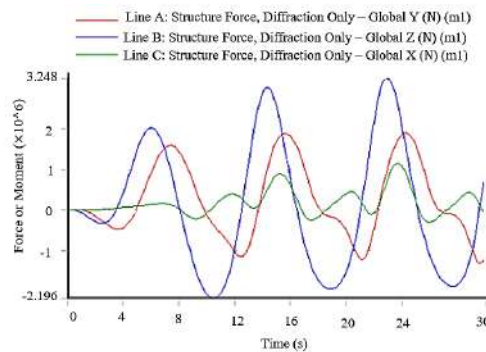


شکل ۱۶. میزان دوران در حرکت Roll و Pitch و Yaw بر اساس (RAO) برحسب زمان

با توجه به نمودار بیشترین میزان دوران حول محور Z رخ می‌دهد که بین 9.7 درجه و -10.14 درجه تغییر می‌کند. میزان دوران حول محورهای Y, X هم بسیار ناچیز است.

#### میزان نیروی تفرق در امتداد Y, Z, X برحسب زمان

شکل (۱۷)، میزان نیروی تفرق را در امتداد محورهای X, Y, Z برحسب زمان نشان می‌دهد.



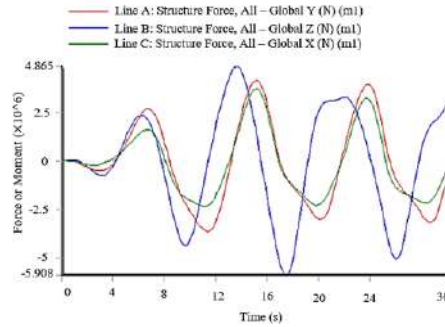
شکل ۱۷. میزان نیروی تفرق در امتداد Y, Z, X برحسب زمان

در حالت فوق بیشترین نیرو در امتداد محور Z روی می‌دهد که مقدار آن بین  $3.247 \times 10^6$  و  $-2.196 \times 10^6$  نیوتن متغیر است. همچنین نیروی تفرق در راستای Y بین  $1.89 \times 10^6$  و  $-1.33 \times 10^6$  در حال تغییر است. در راستای X نیز نیروی تفرق بین  $1.14 \times 10^6$  و  $-0.322 \times 10^6$  متغیر است.

#### میزان نیروی کل در امتداد Y, Z, X برحسب زمان

شکل (۱۸)، بیانگر نیروی کل به وجود آمده در راستای محورهای X, Y, Z برحسب زمان است.



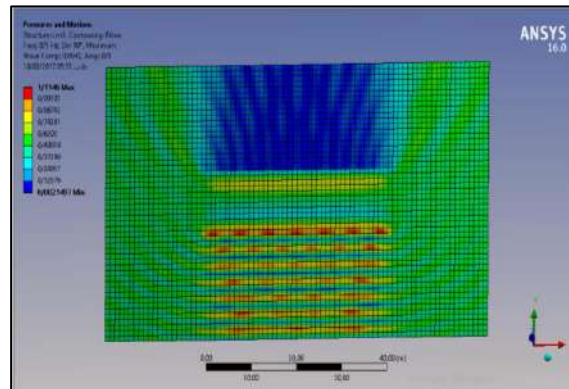


شکل ۱۸. میزان نیروی کل در امتداد X, Z, Y برحسب زمان

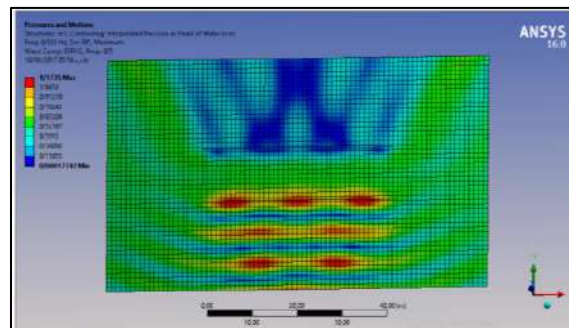
مهم‌ترین این نیروها شامل نیروی تفرق، نیروی به‌وجودآمده توسط سیستم مورینگ و نیروی فرود کریلف می‌باشد. در راستای محور Z نیروی کل به وجود آمده بین مقادیر  $4/865 \times 10^6$  و  $-5/908 \times 10^6$  متغیر است. در راستای محور Y نیز این مقادیر بین  $4/147 \times 10^6$  و  $-3/66 \times 10^6$  متغیر است. همچنین در راستای محور X که شاهد کمترین میزان نیرو در این راستا هستیم این مقادیر بین  $3/733 \times 10^6$  و  $-2/379 \times 10^6$  متغیر است.

### بررسی راندمان موج‌شکن‌های شناور در پریودهای مختلف

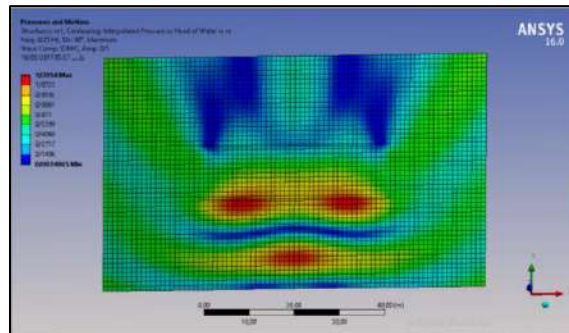
راندمان موج‌شکن شناور را با ضریبی به نام ضریب انتقال می‌سنجند. ضریب انتقال، نسبت ارتفاع موج عبوری از موج‌شکن به موج تابشی است. به‌منظور بررسی راندمان سازه، موج‌شکن تحت تابش پریودهای مختلف با ارتفاع موج ثابت قرار گرفته است.



شکل ۱۹. ارتفاع موج عبوری از موج‌شکن تحت پریود ۲ ثانیه



شکل ۲۰. ارتفاع موج عبوری از موج شکن تحت پریود ۳ ثانیه



شکل ۲۱. ارتفاع موج عبوری از موج شکن تحت پریود ۴ ثانیه

بر اساس نتایج به دست آمده در شکل های ۱۹ تا ۲۱ در صورتی که ارتفاع موج عبوری از موج شکن به ترتیب حدود ۰/۱۲ متر، ۰/۲۸ متر و ۰/۵ متر بوده است، ضریب انتقال در این حالات به ترتیب برابر ۰/۱۲، ۰/۲۸، و ۰/۵ بوده است. با توجه به کانتورهای ارتفاع موج عبوری همواره ضریب انتقال با افزایش پریود افزایش میابد به نحوی که از پریود ۴ ثانیه به بعد کارایی موج شکن به شدت کاهش یافته و ضریب انتقال به ۱ نزدیک می شود.

## بحث

در این بخش بر اساس تئوری حاکم بر تحقیق و همچنین بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفته اقدام به تحلیل و بحث در خصوص نتایج به دست آمده می گردد. به صورت کلی شاخص های مختلفی توسط محققین به عنوان پارامترهای هدف در تحلیل رفتار و عملکرد یک موج شکن شناور مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این پارامترها می توان به ضریب عبور موج از موج شکن (نسبت ارتفاع موج عبور کرده به موج نزدیک شونده)، ضریب بازتاب موج از موج شکن، حرکات شش گانه این جسم شناور و عملکرد سیستم مهاربندی آن اشاره نمود. در خصوص نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر در خصوص پارامترهای جابجایی، دوران نیروی برشی، گشتاور خمشی، نیروی تفرق و نیروی کل و همچنین میزان میرایی موج تابشی بر اساس تحقیقات گذشته (حجتی و همکاران ۲۰۱۹)، مشخص گردیده که دوره تناوب بیشترین تأثیر را بر روی آن ها داشته که در تحقیق حاضر نیز این موضوع به دست آمده است. نظر به اینکه در سناریوهای تحقیق حاضر نسبت  $\frac{D}{L} = 0.67 > 0.2$  لذا بر اساس تئوری تفرق - انتشار باید اقدام به محاسبه نیروی وارد بر سازه موج شکن شناور گردد. از آنجاکه سیال غیرقابل تراکم و جریان سیال غیر چرخشی فرض می شود، میدان سیال را می توان با تابع پتانسیل تعریف نمود و این تابع پتانسیل باید در معادله لاپلاس صدق کند. به منظور حل معادله لاپلاس با در نظر گرفتن شرط مرزی دینامیکی سطح آزاد معادله نهایی به شکل زیر در می آید.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0 \rightarrow Z = \eta$$

(۷)

با در نظر گرفتن حل معادله لاپلاس بر اساس شرایط مرزی دینامیکی سطح آزاد، تغییرات سطح آب تابعی از مقادیر  $Z$  است که با نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر که نشان می دهد بیشترین میزان نیروی وارده بر سازه موج شکن شناور در راستای محور  $Z$  بوده است مطابقت دارد همچنین این موضوع با نتیجه حاصل شده برای جابجایی حداکثر که بر اساس تئوری تفرق - انتشار در حرکت  $Heave$  رخ داده مطابقت دارد و این موضوع در تحقیق حجتی و همکاران ۲۰۱۹ نیز اثبات شده است

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- بیشترین میزان جابجایی را در حرکت Heave (پریود موج ۶ ثانیه) و کمترین میزان جابجایی را در حرکت Surge (پریود موج ۲ ثانیه) رخ داده است.
- میزان دوران حول محورهای Z و Y در برابر دوران حول محور X بسیار ناچیز بوده حتی مقادیر بیشینه دوران حول محورهای Y و Z از مینیمم دوران حول محور X با مقدار  $6.7504e-0^5$  ( $^{\circ}/m$ ) که در پریود ۲ ثانیه اتفاق می افتد نیز کمتر است.
- با افزایش پریود موج میزان میرایی در راستای Z همواره صعودی و رو به افزایش بوده ولی از مقادیر میرایی در راستای محورهای Y و X کاسته می شود.
- بیشترین مقدار نیروی برشی در امتداد محور Y اتفاق می افتد که مقدار آن  $5/867 \times 10^5$  نیوتن بر متر است. بیشینه مقدار نیروی برشی در راستای Z نیز  $4/5 \times 10^5$  است. بیشینه مقدار گشتاور خمشی حول X نیز  $4/64 \times 10^5$  است.
- با توجه به زاویه موج برخوردی ( $10.1/3$  درجه) میزان دوران حول محور Z دارای بیشترین مقدار است و دوران در حول محور X، Y خیلی ناچیز است.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر به جهت ایجاد شرایط لازم جهت انجام تحقیق، سپاسگزاری نمایند.

### منابع

حجتی، امیرحسین، امانی فرد، نیما، لشته نشایی، میراحمد، و دولتی، سامرا. (۱۳۹۸). بررسی عددی اثر موج شکن شناور در میرایی امواج ساحلی با روش هیدرودینامیک ذرات هموار. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۱(۲)، ۴۳۶-۴۲۷. <https://doi.org/10.22060/mej.2016.789>

خلیلی، هادی. (۱۳۸۹). بهینه سازی هندسه موج شکن شناور برای افزایش راندمان. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.

### References

- Guo, Y.C., Mohapatra, S.C., & Guedes Soares, C. (2022). Submerged breakwater of a flexible porous membrane with a vertical flexible porous wall over variable bottom topography. *Journal of Ocean Engineering*, 243, 109989. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109989>
- Hojjati, A.H., Amanifard, N., Neshaei, M.A.L., & Dolati, S. (2019). Numerical Investigation of Floating Breakwater Effect on Coastal Waves Attenuation by Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(2), 125-127. <https://doi.org/10.22060/mej.2016.789> [In Persian]
- Khalili, H. (1389). Optimization of floating breakwater geometry to increase efficiency. Master's thesis. Tarbiat Modares University. [In Persian]
- Koutandos, E., Prinos, P., & Gironella, X. (2005). Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 43(2), 174-188. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2005.9641234>

- Martinelli, L., Ruol, P., & Zanuttigh, B. (2008). Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts. *Applied Ocean Research*, 30(3), 199-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2008.09.002>
- McCartney, B.L. (1985). Floating Breakwater Design. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111(2), 304-318. [https://www.researchgate.net/profile/K-G-Vijay/post/Floating\\_breakwater\\_design/attachment/5cb18a183843b01b9b99adc2/AS%3A747121674297344%401555139096640/download/1985+Floating+Breakwater+Design+-+McCartney.pdf](https://www.researchgate.net/profile/K-G-Vijay/post/Floating_breakwater_design/attachment/5cb18a183843b01b9b99adc2/AS%3A747121674297344%401555139096640/download/1985+Floating+Breakwater+Design+-+McCartney.pdf)
- Ozeren, Y., & Wren, D.G., (2009). Technical Note: Predicting Wind-Driven Waves in Small Reservoirs. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*, 52(4), 1213. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.27793>
- Sutko, A.A., & Haden, E.L. (1974). The effect of surge, heave and pitch on the performance of a floating breakwater. *Proceedings of Floating Breakwater Conference, Rhode Island*, 41-53. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/COM741163703.xhtml>
- Wu, J., Me, T., & Zou, Z. (2022). Experimental study on wave attenuation performance of a new type of free surface breakwater. *Journal of Ocean Engineering*, 244, 110447. <https://doi.org/10.3390/en14248316>
- Yamamoto, T., Yoshida, A., & Ijima, T. (1980). Dynamics of elastically moored floating objects. *Applied Ocean Research*, 2(2), 85-92. [https://doi.org/10.1016/0141-1187\(80\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0141-1187(80)90034-6)



## Modeling of seepage in rockfill dams using a physical model

Mahnaz Eskandari<sup>1</sup> , Javad Zahiri<sup>2</sup> , Amir Naserin<sup>3</sup> , Ali Roshanfekr<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> M.Sc. Graduated of Water structures, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: mahnazeskandari484@gmail.com

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associate Professor of Water Engineering Department, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant Professor of Water Engineering Department, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: amir8480@gmail.com

<sup>4</sup> Ph. D Graduated of Civil Engineering, Studies expert of Cascade Civil Services LLC, Texas, America. Email: Ali.roshanfekr@gmail.com

---

### ABSTRACT

---

#### Introduction

The measurement of the permeable water pressure, the flow rate of leakage and drainage from the beginning of the construction of the rockfill dam are the most important characteristics needed in analysis these dams.

Failure to control the above parameters can cause the waste of water stored in the reservoir, threaten the safety of the dam, and also reduce the stability of the dam through piping or liquefaction. Rockfill dams are used to prevent seepage, store water, control floods and delay floods.

The problem of leakage should be controlled and limited in such a way as to prevent the creation of adverse effects such as: loss of water stored behind the earthen structure, creation of pore pressure in the porous medium, reduction of the effective stress between soil particles and, as a result, reduction prevent its shear resistance.

In many cases, rockfill dam meets the needs of the project, because gravel is far more stable than soil and its ability to be washed is less. The slopes of the gravel dam body are steeper than many other soils, which saves money.

#### Methodology

This research was conducted in the hydraulic laboratory of the Faculty of Agricultural Engineering and Rural Civil Engineering, in Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. In this research, a physical model was used to model seepage from gravel dams.

On this basis, a flume with dimensions of 7.5 meters in length, 60 cm in depth and 50 cm in width and a pump with a maximum flow rate of 42 liters per second were used. In the present research, gravel materials were first prepared from the river mines of Khuzestan province to conduct experiments. These materials were used in three sizes with an average diameter of 10, 20 and 30 mm respectively to make the model.

In this research, it was tried to study the leakage parameters in the gravel dam by building a physical model. A physical model of a gravel dam was built in a laboratory flume with three gravel samples and three slopes with the aim of investigating and determining the amount of leakage from the dam body. Pore pressure was measured with piezometers installed in the flume body.

The outlet flow depth can be used as the starting point of the seepage level in the downstream direction and the phreatic level in the upstream direction. Also, no deviation occurs above this depth. Below this depth, the settlement surface forms the downstream boundary conditions that are considered in the field of pore pressure modeling. The outlet flow depth in gravel dams can be determined using the concept of the unsteady flow field angle, which is in agreement with a one-dimensional non-Darcy flow equation.

#### Results and discussion

Comparing the effect of gravel with different diameters on the angle of the unsteady flow field shows that the dimensions of the gravels did not have a noticeable effect on the angle of the unsteady flow field. However, for a constant flow rate, with increasing particle diameter, the downstream outlet depth decreases, which is consistent with the results of Ansari et al. (2015).

Investigating the effect of different downstream slopes on the outlet depth shows that at a constant flow rate, with the decrease of the slope of the downstream wall, the angle of the unstable flow field and the depth of the outlet flow have decreased. Based on the investigations, it can be concluded that decreasing the slope along with the increase in the diameter of the gravels causes the depth of the outlet flow and the angle of the field to decrease compared to the previous slope.

In the ratio of  $Bc/H = 2$ , with the increase of particle diameter for a fixed flow rate, the depth of the outlet flow decreases, and with the increase of the flow rate, the effect of particle size has increased to some extent, which is in agreement with the results of Chabakpour et al. (2015). In the ratio of  $Bc/H=2$ , with the increase of the width of the model, the depth of the outflow has decreased compared to  $Bc/H=1$ .

The results of the research showed that in a constant slope, the flow-field angle increases as the flow depth increases. Also, with the increase of the flow rate and the increase of the diameter of the particles, the depth of the outlet flow is reduced and these changes are not clear at low flow rates, but are clearly visible at high flow rates.

In constant diameter and flow rate, with the increase of the slope of the model, the depth of the outlet flow decreases, and in the constant flow rate, with the increase of the ratio ( $Bc/H$ ), the value of the outlet height of the flow decreases.

#### Conclusions

Based on the experiments, the following results are presented. In the ratio of  $Bc/H = 1$ , with the increase of upstream depth, the depth of outflow has increased.

---

---

Considering that the depth of the outlet flow downstream can be determined using the concept of the flow-field angle, it can be said that the depth of the outlet flow increases with the increase of the flow-field angle. In the ratio  $B_c/H=2$ , with the increase in the width of the model, the depth of the outlet flow has decreased compared to  $B_c/H=1$ . In addition, it can be concluded that in a constant slope, with the increase in flow depth, flow-field angle increases. Also, with the increase in the diameter of the particles, the depth of the outflow decreases. These changes are not clear at low flow rates but are clearly visible at high flow rates.

**Keywords:** Rockfill dam, piping, pore water pressure, leakage flow rate, piezometer

**Article Type:** Research Article

**Article history:** **Received:** 16 March 2023 **Revised:** 26 May 2023 **Accepted:** 14 June 2023 **ePublished:** 27 June 2023

---

**Cite this article:** Eskandari, M., Zahiri, J., Naserin, A., & Roshanfekar, A. (2023). Modeling of seepage in rockfill dams using a physical model, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(1), 61-78. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9135.1053

**Publisher:** Razi University

© The Author(s).





## بررسی نشت در سدهای سنگریزه‌ای با استفاده از مدل فیزیکی

مهناز اسکندری<sup>۱</sup>، جواد ظهیری<sup>۲</sup>، امیر ناصرین<sup>۳</sup>، علی روشنفکر<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: mahnazeskandari484@gmail.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: amir8480@gmail.com

<sup>۴</sup> دانش‌آموخته دکتری مهندسی عمران، کارشناس مطالعات Cascade Civil Servises LLC، تگزاس، آمریکا. رایانامه: Ali.roshanfekr@gmail.com

### چکیده

از مهم‌ترین ویژگی‌های موردنیاز در بررسی و تحلیل سدهای سنگریزه‌ای، اندازه‌گیری فشار آب منفذی، میزان نشت و زهاب خروجی از بدنه و پی آن است که اندازه‌گیری این کمیت‌ها از همان شروع ساخت سد آغاز می‌گردد. عدم کنترل پارامترهای فوق می‌تواند سبب هدر رفت آب ذخیره‌شده در مخزن، تهدید ایمنی سد و همچنین از طریق پاپینگ یا روانگرایی سبب کاهش پایداری سد شوند. در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش‌ها ابتدا مصالح سنگریزه از معادن رودخانه‌ای استان خوزستان تهیه شد. در این تحقیق سعی شد تا با ساخت مدل فیزیکی پارامترهای نشت در سد سنگریزه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد. مدل فیزیکی سد سنگریزه‌ای در فلوم آزمایشگاهی با سه نمونه سنگریزه و سه شیب با هدف بررسی و تعیین میزان نشت از بدنه سد ساخته شد. مصالح مورد استفاده در سه اندازه قطر متوسط ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر جهت ساخت مدل استفاده شدند. میزان فشار منفذی با پیژومترهای نصب‌شده در بدنه‌ی فلوم اندازه‌گیری گردید. در این تحقیق جهت بررسی نشت از مفهوم زاویه‌ی میدان جریان ناپایدار نیز استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که در شیب ثابت، با افزایش عمق جریان، زاویه میدان افزایش می‌یابد. مقایسه تأثیر سنگریزه‌های با قطرهای مختلف بر زاویه میدان جریان ناپایدار نشان می‌دهد که ابعاد سنگریزه‌ها، تأثیر محسوسی بر زاویه میدان جریان ناپایدار نداشته است. باین‌حال برای یک دبی ثابت با افزایش قطر ذرات، عمق خروجی در پایین‌دست کاهش می‌یابد که این تغییرات در دبی‌های کم مشخص نیست اما در دبی‌های بالا به‌وضوح قابل مشاهده است. در قطر و دبی ثابت با افزایش شیب مدل، عمق جریان خروجی کاهش یافته و در دبی ثابت با افزایش نسبت (Bc/H)، مقدار ارتفاع خروجی جریان کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** سد سنگریزه‌ای، پاپینگ، فشار آب منفذی، دبی نشت، پیژومتر

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۶ اسفند ۱۴۰۱ اصلاح: ۰۵ خرداد ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۴ خرداد ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ خرداد ۱۴۰۲

**استناد:** اسکندری، م، ظهیری، ج، ناصرین، ا، و روشنفکر، ع. (۱۴۰۲). بررسی نشت در سدهای سنگریزه‌ای با استفاده از مدل فیزیکی، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۱)، ۶۱-۷۸. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9135.1053



## مقدمه

از آنجاکه تأمین آب همواره نیاز اساسی بشر برای استفاده در بخش‌های گوناگون از جمله کشاورزی، صنعتی و آب شرب است، مهار آب‌های سطحی، جاری و سیلاب از طریق سد، از پروژه‌های اساسی و زیر بنایی یک کشور محسوب می‌شود (چهرآزاد، ۱۳۹۳). در مرحله مطالعات پروژه‌های احداث سد بر مسیر رودخانه، تعیین موقعیت مناسب ساختگاه سد و انتخاب گزینه مناسب برای نوع سد، از نظر فنی و اقتصادی دارای اهمیت ویژه‌ای است. قبل از آن که یک سد ساخته شود باید بررسی‌های جامعی صورت گیرد. این بررسی‌ها در انتخاب نوع سد، محل سد و اهداف پروژه می‌تواند تأثیر بسیار زیادی داشته باشد. نوع سد در یک محل، بستگی به عواملی مثل توپوگرافی، ژئوتکنیک، هیدرولوژی، مصالح موجود، لرزه‌خیزی، عمق آبرفت، وضعیت پی و ... دارد که باید همگی آن‌ها مدنظر قرارگیرد (صادق‌پور و همکاران، ۱۳۸۷). سد سنگریزه‌ای سدی است که مقطع آن دارای یک المان مجزای ناتراوایی شناخته‌شده از خاکریز متراکم یا غشایی با ضخامت کم از آسفالت است که بیش از ۵۰٪ از مصالح به‌کاررفته در آن سنگریزه هستند (سرور، ۱۳۹۵). از سدهای سنگریزه‌ای به‌منظور کاهش تراوش، ذخیره آب، کنترل سیلاب و تأخیر در سیل استفاده می‌شود (قادری، ۱۳۸۴). نشت به معنای تراویدن، تراوش، ترشح، چکه و درز کردن است. به‌عبارت‌دیگر نشت، نفوذ آب و حرکت آرام آن در خاک است. مسئله نشت باید به‌گونه‌ای کنترل و محدود شود تا از ایجاد اثرات نامطلوب حاصل از آن مانند: تلف شدن آب ذخیره‌شده در پشت سازه‌ی خاکی، ایجاد فشار منفذی در محیط متخلخل، کاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آن، اعمال فشار بالا بر سازه‌های غیرقابل نفوذ (مانند سازه‌های بتنی، فولادی و...) در محیط، آب‌شستگی، کاهش ایمنی، بروز فشارهای حفره‌ای، کاهش مقاومت برشی، بالا رفتن نیروی تراوشی و امکان فرسایش ذرات ریزدانه هسته، جلوگیری شود (چهرآزاد، ۱۳۹۳). سد سنگریزه‌ای در بسیاری از موارد پاسخگوی نیازهای طرح است. چراکه سنگریزه، به‌مراتب از خاک پایدارتر و قابلیت شسته شدن آن کمتر است. شیب‌های بدنه سد سنگریزه‌ای از بسیاری خاک‌های دیگر تندتر بوده که باعث صرفه‌جویی در هزینه می‌شود (ولی‌پور گودرزی، ۱۳۷۳). دارسی (۱۸۵۶)، اولین کسی بود که حرکت آب در منافذ خاک را بررسی کرد و با انجام آزمایش‌هایی که در لایه‌ای از شن انجام داد، به این نتیجه رسید که دبی نشت یافته از درون شن و ماسه به ارتفاع آب و ضخامت لایه‌های شن و ماسه وابسته است که نتیجه تحقیقات وی منجر به ارائه رابطه  $i = \left(\frac{1}{K}\right) V$  شد. این رابطه زمانی درست خواهد بود که عدد رینولدز بزرگ‌تر از یک نشود. بنابراین برای محیط‌های متخلخل درشت‌دانه مثل خاک‌ریزها و سدهای سنگریزه‌ای بایستی از روابط غیر دارسی جهت بررسی شرایط جریان استفاده کرد (بایوردی، ۱۳۷۲). هانسن و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۵)، اظهار داشتند که در محیط‌های متخلخل که از ذرات درشت‌دانه مثل شن و قلوه‌سنگ استفاده شده است، چون سرعت جریان افزایش می‌یابد و جریان آرام نیست نمی‌توان از روابط دارسی استفاده کرد. آن‌ها برای تحلیل جریان در این‌گونه محیط‌ها با حل معادله‌ی دیفرانسیلی، که از ترکیب روابط غیرخطی و معادله‌ی پیوستگی بود استفاده کردند. استیفنسون<sup>۲</sup> (۱۹۷۹)، با استفاده از انتگرال‌گیری تحلیلی از معادله دیفرانسیل معمولی مربوط به جریان متغیر تدریجی ماندگار در کانال‌های مستطیلی، به یک جواب از معادله رسید و با مقایسه نتایج آن با مشاهدات مربوط به فلوم آزمایشگاهی، همبستگی خوبی را گزارش کرد. معادله تحلیلی وی فقط برای حالتی که جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته باشد قابل کاربرد است. وی فرض کرد که در محل عمق بحرانی سطح نشت ظاهر می‌شود. نتایج تحقیق نشان داد که شیب اصطکاکی در مباحث هیدرولیک کانال‌های باز معمولاً از روابط شزی یا مانینگ به دست می‌آید، درحالی‌که در محیط‌های متخلخل برای ارزیابی شیب اصطکاکی از یک معادله توانی سرعت-گرادیان استفاده می‌شود، که این رابطه را به‌صورت  $S_f = i = a V_V^N$  بیان کرد که در آن  $V_V$  سرعت منفذی یا سرعت نشت،  $i$  گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد)،  $a$  ضریبی است که به روش تجربی تعیین می‌شود و  $N$  توانی است که به‌صورت تجربی تعیین می‌شود و معمولاً مقدار آن تا ۲ برای جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته تغییر می‌کند. درحالی‌که ویلکینس (۱۹۵۶)، در به‌کارگیری تئوری جریان متغیر تدریجی ماندگار در سدهای سنگ‌ریز از معادله توانی  $i = a V_V^N$  به‌جای رابطه مانینگ برای محاسبه شیب اصطکاکی استفاده کرد. وی معتقد بود اگرچه محاسبات مربوط به

<sup>1</sup> Darcy

<sup>2</sup> Hansen et al

<sup>3</sup> Stephenson



جریان‌های متغیر تدریجی عمدتاً به مسائل کانال‌های روباز منتهی می‌شود، اما اولین مطالعه جدی و مستند خود را در مورد کاربرد این گونه جریان‌ها به‌عنوان یک ابزار مدل‌سازی پروفیل خط نشت در سدهای سنگریزه‌ای، انجام داد. از این روش برای تعیین موقعیت خط نشت در سدهای سنگ‌ریز در سال ۱۹۶۳ توسط پارکین مورد استفاده قرار گرفت. پارکین تئوری جریان متغیر تدریجی را در سدهای سنگ‌ریز به کاربرد و همبستگی خوبی را بین پروفیل خط نشت محاسباتی و اندازه‌گیری شده مشاهده کرد (هانسن، ۲۰۰۵). هدف از اجرای تحقیق حاضر، ساخت مدل فیزیکی با مدل‌سازی پارامترهای نشت در سد سنگریزه‌ای و بررسی تأثیر ابعاد سنگریزه‌ها و شیب و طول سازه سر بر سایر پارامترهای نشت است.

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

روشفکر و همکاران (۱۳۸۹)، روابطی برای محاسبه ضرایب غیر داری در محیط‌های سنگریزه‌ای ارائه کردند. معادلات جریان غیر داری به دو صورت  $i = rV + sV^2$  و  $i = \alpha V^N$  نشان داده می‌شوند. آن‌ها با به کار بردن بعضی روابط غیر داری از جمله معادله آرگون و استفاده از تحلیل‌های ریاضی معادلاتی را برای محاسبه مقدار  $N, \alpha$  ارائه کردند. آن‌ها برای ضرایب هدایت هیدرولیکی در محیط متخلخل هم روابطی را ارائه کردند. مقدار  $N$  را با استفاده از رگرسیون غیرخطی محاسبه کردند و با  $N$  محاسباتی مقایسه کردند. نتیجه به‌دست‌آمده نشان داد که در مجاورت مرزها مقدار  $N$  محاسبه‌شده، از دقت بالایی برخوردار بوده است و بافاصله گرفتن از مرزها از دقت نتایج کاسته می‌شد. گردنوشهری و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از تئوری باکینگهام و تحلیل رگرسیون، رابطه‌ای برای نیمرخ طولی سطح آب در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای ارائه نموده و همچنین با استفاده از معادله اولر و با در نظر گرفتن اثرات شیب زیاد و انحنای عمودی خطوط جریان، رابطه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای را ارائه نمودند. نتایج آزمایشگاهی نیمرخ طولی سطح آب و نیمرخ طولی فشار وارد بر کف در محیط متخلخل سنگریزه‌ای با قطر متوسط ذرات  $1/68$  سانتی‌متر و دو طول  $0/5$  و  $1$  متری تطابق خوبی با روابط ارائه‌شده نشان می‌دهند، به طوری که متوسط قدر مطلق خطای نسبی مقادیر محاسباتی این دو نیمرخ به ترتیب برابر با  $1/31$  و  $1/71$  درصد است. بازرگان و شعاعی (۱۳۸۹)، با انجام آزمایش‌های گسترده بر روی انواع مختلف مصالح سنگریزه‌ای، به بررسی درستی فرضیه‌های مورد استفاده در تئوری جریان‌های متغیر تدریجی پرداختند و تأثیر خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل مثل دانه‌بندی، تخلخل، ضریب یکنواختی و خاصیت گرانروی سیال، که روی ویژگی‌های مختلف جریان مانند سرعت و گرادیان هیدرولیکی اثر می‌گذارند را مورد بررسی قرار دادند. این محققین طی این آزمایش‌ها روابط جدیدی برای گرادیان هیدرولیکی پیشنهاد نمودند. صالحی و همکاران (۱۳۹۵)، تأثیر زاویه و ابعاد زهکش پنجه‌ای بر خط نشت آزاد آب در بدنه سدهای خاکی همگن با استفاده از مدل آزمایشگاهی ارائه نمودند. آزمایش‌ها با ارتفاع‌های مختلف آب در پشت دیواره سد خاکی همگن انجام شد و با استفاده از داده‌های پیژومتریک، وضعیت خط نشت آزاد آب در حالت‌های مختلف زهکش پنجه‌ای مقایسه شد. در پنجه سد سه نوع زهکش با زاویه‌های  $45$ ،  $60$  و  $90$  درجه در ارتفاعات مختلف ساخته شدند و روند خط نشت در بدنه سد خاکی در حالت‌های مختلف آزمایش و در حداکثر ارتفاع آب سد خاکی با استفاده از هفت چاهک مشاهداتی در بدنه سد و  $30$  پیژومتر در دیواره فلوم برداشت شد. منحنی‌های برداشت‌شده در نقاط انتهایی خط نشت از روند خطی تبعیت می‌کردند که این امر موجب شد معادلات ریاضی خط نشت در انتهای بدنه سد و ابتدای ورود به زهکش ترسیم گردد. محل برخورد خط با بدنه زهکش از حل عددی معادلات ریاضی خط نشت و خط ریاضی در یک دستگاه حل معادلات برداشت شد. با مقایسه این افت‌ها بهترین زهکش که زهکش  $45$  درجه است، معرفی شد.

### روش پژوهش

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شد. در این پژوهش، جهت مدل‌سازی تراوش از سدهای سنگریزه‌ای، از مدل فیزیکی استفاده شده است. بر همین اساس از فلومی با

ابعادی به طول ۷/۵ متر، عمق ۶۰ و عرض ۵۰ سانتی‌متر و پمپی با دبی حداکثر ۴۲ لیتر بر ثانیه استفاده شد. شکل (۱) نمایی از فلوم مورد استفاده در تحقیق و نحوه قرارگیری پیزومترها را نشان می‌دهد.



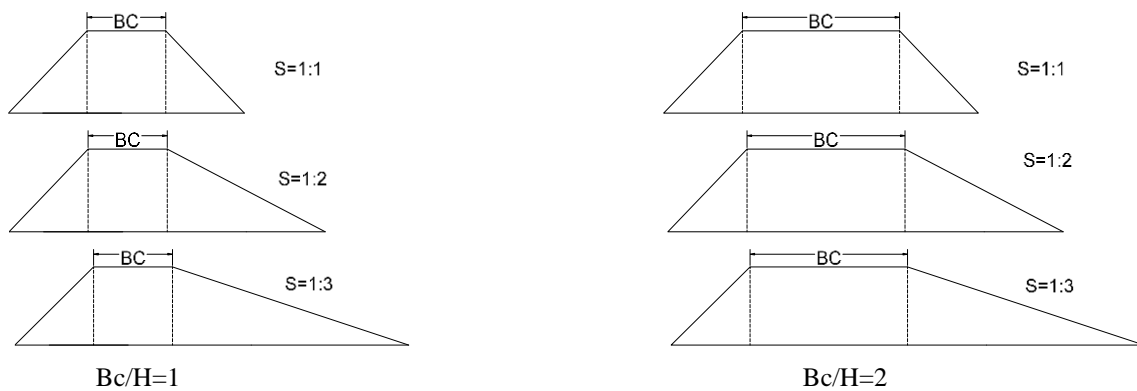
(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) نمایی از فلوم مورد استفاده در تحقیق حاضر و ب) نحوه قرارگیری پیزومترها بر روی بدنه فلوم

برای ساخت مدل سد، از مصالح سنگریزه‌ای استفاده شده است. این مصالح در سه قطر متوسط ۱۰ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر انتخاب شدند. در این پژوهش ۱۸ سد شامل ۶ سد، با دو نسبت  $Bc/H = 1$  و  $Bc/H = 2$  و با سه شیب ۱:۱، ۲:۱ و ۳:۱ ساخته شد. برای اندازه‌گیری فشار منفذی در داخل بدنه سد از ۹۶ پیزومتر به صورت شبکه‌بندی شده در فواصل منظم روی دیواره پلکسی گلاس فلوم در وسط فلوم تعبیه و آب‌بندی شده بود، استفاده شد. در ابتدا مدل‌های فیزیکی جهت مشاهده شرایط مرزی و ارزیابی هیدرولیک مربوط به ناحیه‌ی پایین‌دست ایجاد شدند و در درون فلوم شیشه‌ای قرار گرفتند. مواد دانه‌ای استفاده‌شده در خاک‌ریزهای مدل، به منظور جلوگیری از هرگونه حرکتی در باکس‌های سیمی، محدود شدند. این باکس‌ها دارای مش ۰/۵ سانتی‌متر بوده و با سنگریزه‌های الک شده پر شدند. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر به صورت شماتیک در شکل (۲) ارائه شده است.

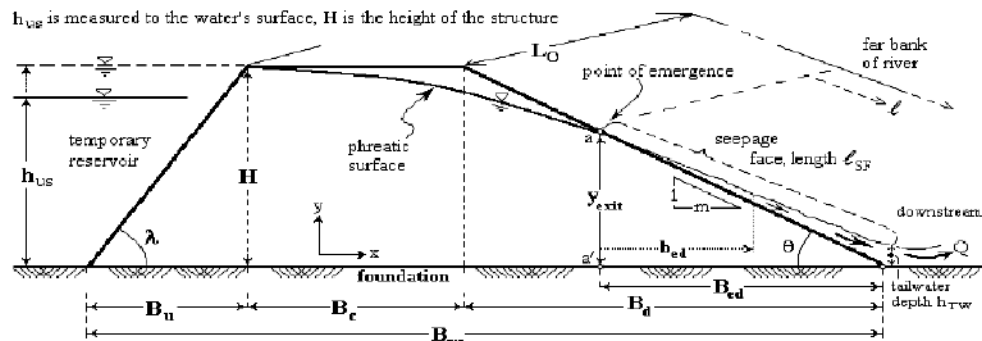


شکل ۲. شماتیک سدهای سنگریزه‌ای مورد استفاده در تحقیق

بعد از ساخت و آماده سازی مدل سدهای سنگریزه‌ای، جریان آب برای سه عمق ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر تنظیم گردید. بعد از تثبیت جریان آب در فلوم، دبی از روی دستگاه دبی‌سنج خوانده و با توجه به اینکه کانال مستطیلی است میزان سرعت جریان ورودی از طریق رابطه پیوستگی به دست آمد:

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

در معادله بالا  $V$  سرعت جریان و  $Q$  دبی خروجی از سد سنگریزه‌ای است. پارامترهای مختلف سطح نشت در سدهای سنگریزه‌ای در شکل (۳) نشان داده شده است. ارتفاع نقطه‌ی اولین ناپایداری جریان بر روی کناره‌ی پایین دست ( $y_{exit}$ ) یک کمیت پایه‌ای مهم به حساب می‌آید.



شکل ۳. پارامترهای نشت از سدهای سنگریزه‌ای (روشنفکر، ۲۰۱۳)

عمق جریان خروجی می‌تواند به عنوان نقطه‌ی شروع سطح نشت در جهت پایین دست و برای محاسبه سطح فریاتیکی در جهت بالادست، استفاده شود. علاوه بر این، هیچ انحرافی در بالای این عمق اتفاق نمی‌افتد. در زیر این ارتفاع، سطح نشست شرایط حدی پایین دست را تشکیل می‌دهد که در زمینه مدل سازی فشار منفذ مورد توجه قرار می‌گیرد (هانسن و روشنفکر، ۲۰۱۲).  $y_{exit}$  در سدهای سنگریزه‌ای می‌تواند با استفاده از مفهوم زاویه‌ی میدان جریان ناپایدار ( $\theta$ ) تعیین شود (هانسن و همکاران، ۲۰۰۵)، که در هماهنگی با یک معادله جریان غیر داری تک بعدی است (هانسن و همکاران، ۱۹۹۵).

$$V = n \sqrt{\frac{gd}{K_s}} \times i \quad (2)$$

$$K_s = \frac{800}{Re} + K_{ang} \quad (3)$$

$$i = \frac{K_s}{gdn^2} \times V^2 \quad (4)$$

$$y_{exit} = \frac{q}{V} \quad (5)$$

در معادلات بالا  $n$  تخلخل ماتریکس سنگفرش،  $g$  شتاب گرانشی،  $d$  قطر ذره نماینده،  $i$  شیب هیدرولیکی،  $K_{ang}$  ضریب زاویه‌ای که مقدار آن برای کره‌های صاف ۱ و برای سنگ‌های زاویه‌ای ۴ است.  $q$  دبی در واحد عرض،  $K_s$  ضریب استفسون،  $Re$  عدد رینولدز جریان و  $y_{exit}$  عمق جریان خروجی است. در گزارش لپس (۱۹۷۳)، در رابطه با روش‌های مختلف طراحی ژئوهیدرولیک برای این رده از سازه‌ها، یک تقریب تخصصی از شیب هیدرولیکی در پنجه به سادگی برابر  $i_{exit} = \tan \theta$  در نظر گرفته شده است. با این حال انتظار می‌رود که زاویه واقعی که نشانگر میدان نشست ناپایدار است کمتر از  $\theta$  باشد. زاویه‌ی میدان جریان مؤثر ( $\theta_{ff}$ ) با عمق نسبی خروجی تغییر می‌کند به این صورت که با افزایش عمق نسبی خروجی، این زاویه به  $\theta$  نزدیک می‌شود. هانسن و همکاران (۲۰۰۵) رابطه زیر را جهت محاسبه زاویه میدان جریان ناپایدار ارائه نمودند:

$$\frac{\theta_{ff}}{\theta} = 1/41 \frac{y_{exit}}{H} + 0/17 \quad (۶)$$

که در آن  $\theta_{ff}$  زاویه میدان جریان ناپایدار،  $\theta$  زاویه پنجه پایین دست،  $H$  ارتفاع خاکریز است.

## یافته‌ها

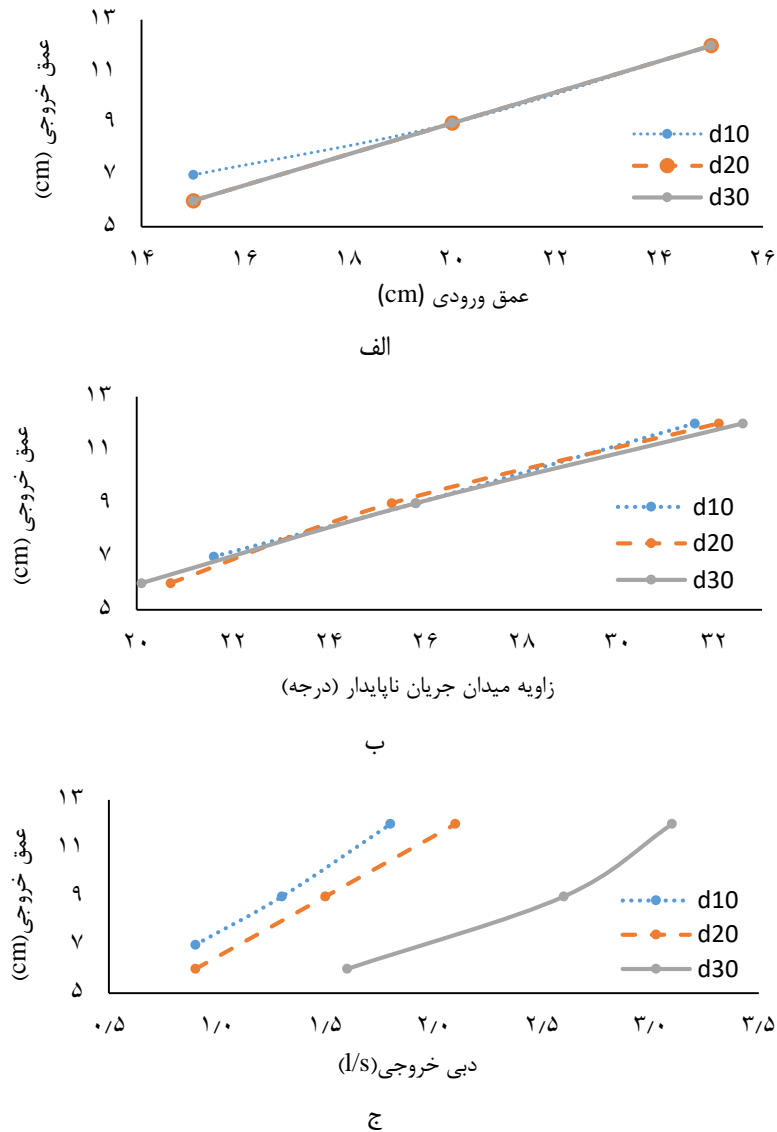
### مرحله اول آزمایش‌ها

در این مرحله برای انجام آزمایش، بعد از برقراری جریان در کانال، دبی متغیر برای هر عمق (۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر)، به کار گرفته شد و فشار داخل لوله‌های پیژومتری قرائت شد و با کمک معادلات موجود پارامترهای موردنظر برای هر سه قطر سنگریزه محاسبه شد. مدل اول با عرض و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و با شیب پایین دست ثابت، ساخته شد و برای انجام هر آزمایش، در هر عمق با سه قطر سنگریزه پر شد. بعد از برقراری و تثبیت جریان در کانال، پارامترهای مرتبط با جریان اندازه‌گیری شدند. این پارامترها شامل: دبی، عمق جریان بالادست و فشار لوله پیژومتری بودند. این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای ارائه بهتر نتایج، آزمایش‌ها کدگذاری شدند. برای این منظور S به‌عنوان نماد شیب پنجه، L طول سازه سد و D اندازه میانگین قطر ذرات مورد استفاده در سد، انتخاب شدند. برای درک بهتر نام‌گذاری مدل‌ها، جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های فیزیکی مورد استفاده

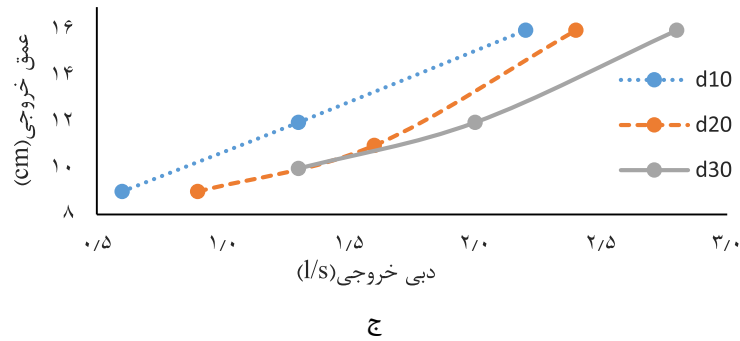
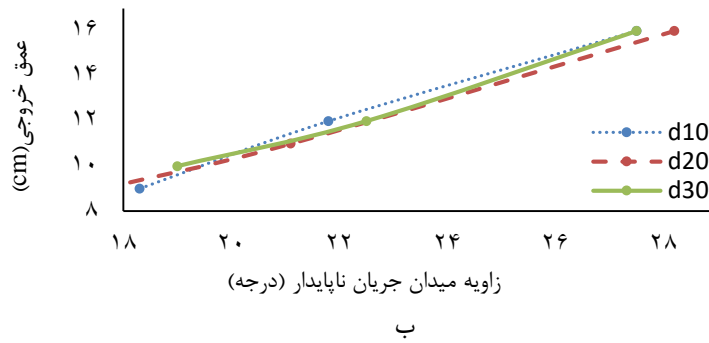
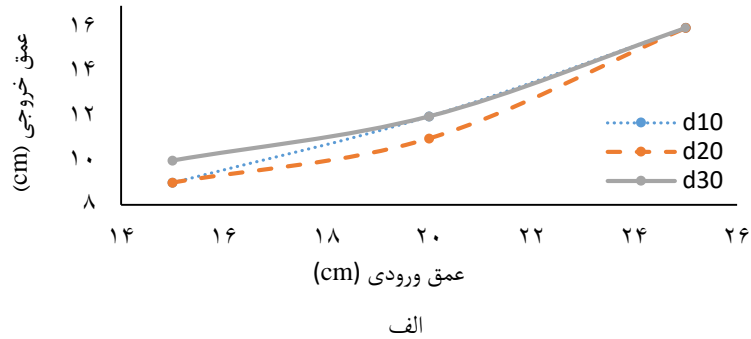
مدل	اندازه قطر ذرات (mm)	طول نمونه (cm)	شیب پنجه
S1L1	۳۰، ۲۰، ۱۰	۳۰	۱:۱
S2L1	۳۰، ۲۰، ۱۰	۳۰	۲:۱
S3L1	۳۰، ۲۰، ۱۰	۳۰	۳:۱
S1L2	۳۰، ۲۰، ۱۰	۶۰	۱:۱
S2L2	۳۰، ۲۰، ۱۰	۶۰	۲:۱
S3L2	۳۰، ۲۰، ۱۰	۶۰	۳:۱

در حالت  $Bc/H=1$ ، طبق شکل (۴) الف، با افزایش عمق ورودی در بالادست، عمق جریان خروجی در پایین دست، افزایش می‌یابد به طوری که اندازه قطر ذرات، تأثیر به خصوصی بر روی عمق خروجی نداشته است. شکل (۴) ب، نشان می‌دهد که با افزایش عمق جریان خروجی، زاویه میدان جریان ناپایدار روند افزایشی داشته که اندازه قطر ذرات تأثیری بر زاویه میدان نداشته است. در شکل (۴) ج، برای یک دبی ثابت با افزایش قطر ذرات، عمق خروجی در پایین دست کاهش می‌یابد که با نتایج انصاری و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. در مرحله بعد (مدل S2L1)، شیب مدل کاهش یافته و از هر سه اندازه سنگریزه جهت پر کردن مدل استفاده شد. بعد از ساخت مدل و پر شدن با اندازه سنگریزه‌های مختلف، پارامترهای موردنظر اندازه‌گیری شدند.



شکل ۴. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل SIL1

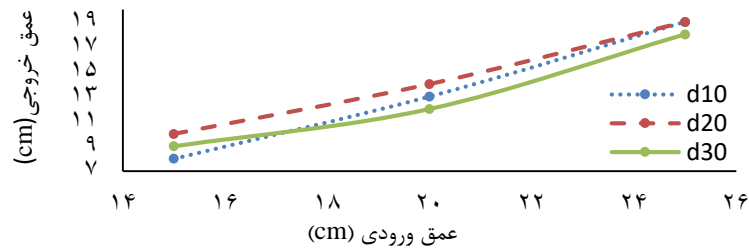
طبق نتایج ارائه شده در شکل (۵) الف مشاهده می شود که برای یک عمق ثابت در بالادست، اندازه ذره تأثیر زیادی بر عمق جریان خروجی ندارد اما می توان گفت کاهش شیب به ۲:۱ سبب کاهش عمق جریان خروجی در پایین دست شده است. در شکل (۵) ب، با افزایش قطر ذرات، زاویه میدان جریان ناپایدار افزایش یافته ولی با کاهش شیب، زاویه میدان روند کاهشی داشته است. در شکل (۵) ج، مشاهده می شود که با افزایش قطر ذرات به ازای دبی جریان ثابت، عمق جریان خروجی کاهش می یابد. می توان نتیجه گرفت کاهش شیب به همراه افزایش قطر سنگریزه ها سبب کاهش هر چه بیشتر عمق جریان خروجی و زاویه میدان نسبت به شیب قبلی می شود که نتایج به دست آمده با نتایج صدقی اصل (۱۳۸۹) همخوانی دارد. در مرحله بعد با همان عرض ۳۰ سانتی متر، شیب پایین دست سه برابر کاهش یافته و با هر سه قطر سنگریزه ها، آزمایش ها در همان شرایط آزمایش های قبلی انجام شد.



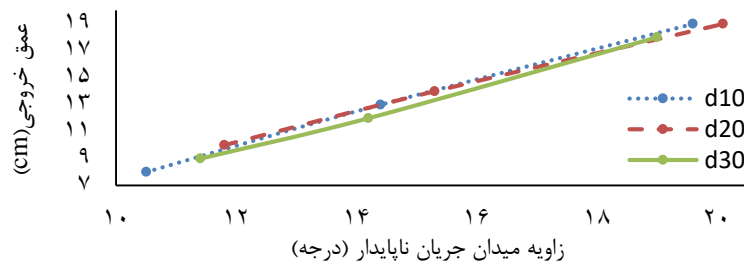
شکل ۵. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S2L1

در شکل (۶) الف مشاهده می‌شود که در تمامی سنگریزه‌های استفاده‌شده، با افزایش عمق جریان ورودی، عمق جریان خروجی افزایش می‌یابد که در این میان اندازه ذرات بر روی این تغییرات تأثیر چندانی نداشته است. نتایج شکل (۶) ب، نشان می‌دهد با افزایش زاویه میدان جریان، عمق خروجی روند افزایشی داشته ولی اندازه ذرات تأثیری بر این روند نداشته است. در شکل (۶) ج، در یک دبی خروجی ثابت، افزایش قطر ذرات باعث کاهش عمق جریان خروجی شده است که با کاهش شیب، میزان عمق خروجی جریان و زاویه میدان کاهش بسیاری داشته است. در مجموع در نسبت  $Bc/H=1$ ، در یک شیب ثابت، با افزایش عمق و دبی جریان، زاویه میدان جریان و عمق جریان خروجی افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش قطر ذرات، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد. این تغییرات در دبی‌های اندک قابل ملاحظه نیست اما در دبی‌های بالا به‌وضوح قابل مشاهده

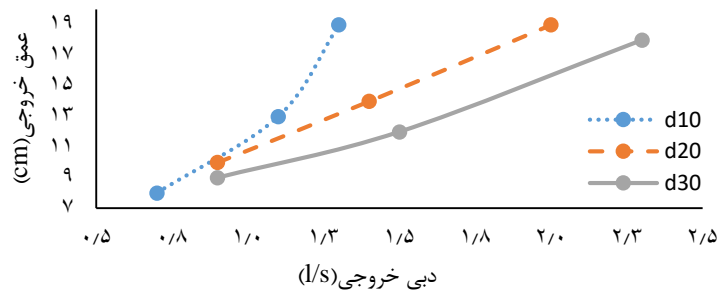
است. با کاهش شیب مدل، عمق جریان خروجی و زاویه میدان روند کاهشی داشته است، زیرا جریان طول مسیر بیشتری را طی می کند که از لحاظ ضریب امنیت قابل قبول تر و امن تر است و با نتایج هانسن (۱۹۹۲)، مطابقت دارد.



الف



ب



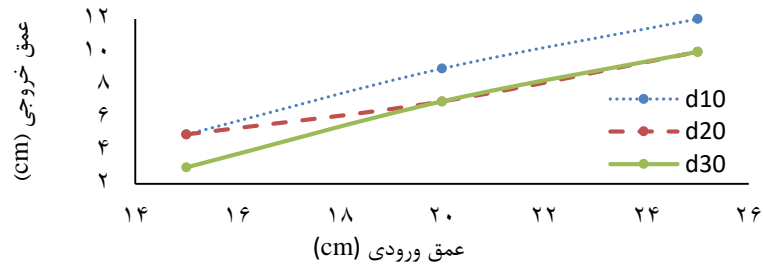
ج

شکل ۶. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S3L1

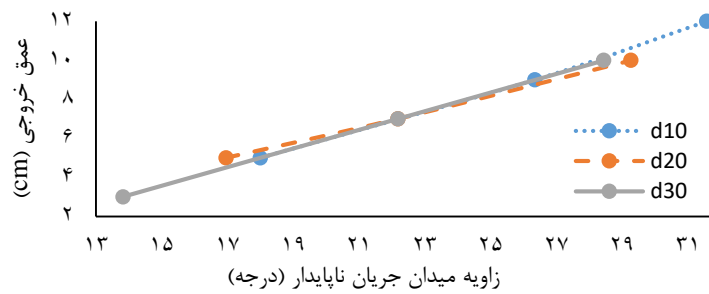
### مرحله دوم آزمایش ها

در مرحله دوم از آزمایش ها، عرض تاج دو برابر شد و از عرض ۳۰ سانتی متر به عرض ۶۰ سانتی متر رسید. ارتفاع مدل ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. در قسمت اول از آزمایش، شیب پایین دست ۱:۱ در نظر گرفته شده است. در نسبت  $Bc/H=2$ ، با افزایش عرض سد، اختلاف عمق بالادست و پایین دست بسیار زیاد گردید. شکل (۷) الف، نشان می دهد که با افزایش قطر ذرات، عمق جریان خروجی در حال کاهش است. در شکل (۷) ب، با افزایش عمق خروجی زاویه میدان جریان افزایش یافته است ولی اندازه ذرات تأثیر به خصوصی بر این روند نداشته است. بر اساس

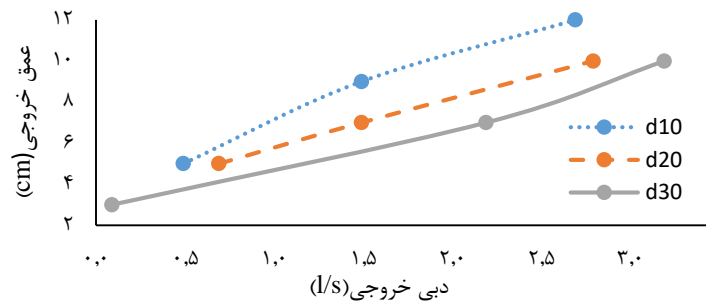
شکل (۷) ج، با افزایش قطر ذرات به ازای یک دبی ثابت، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد که با افزایش دبی جریان، تأثیر اندازه ذرات تا حدودی بیشتر شده است که این نتیجه با نتایج چاپک‌پور و همکاران (۱۳۹۵)، مطابقت دارد. در مرحله بعد با توجه به ثابت بودن شرایط آزمایش، فقط شیب پایین‌دست به ۲:۱ کاهش داده شد و پس از اندازه‌گیری پارامترها، نتایج بررسی شدند.



الف



ب

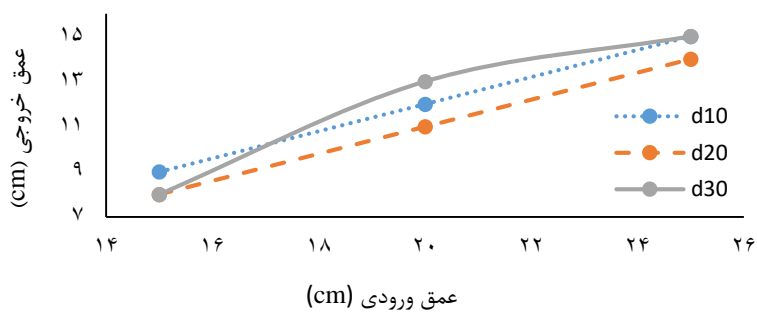


ج

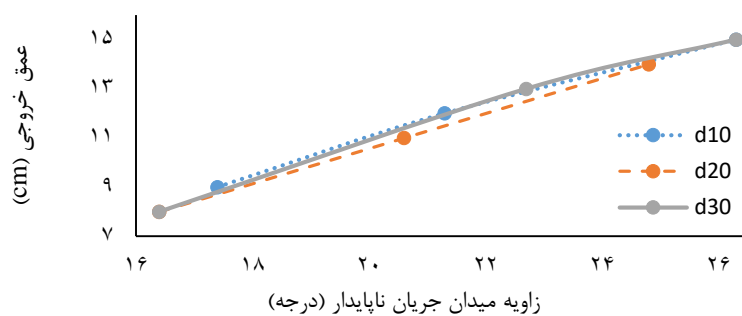
شکل ۷. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S1L2

در شکل (۸) الف، به ازای تمامی قطر سنگریزه‌ها، با افزایش عمق جریان ورودی عمق خروجی هم افزایش یافته است. در شکل ۸ ب، با افزایش زاویه میدان جریان، عمق خروجی افزایش یافته است ولی اندازه ذرات تأثیری بر این روند نداشته است. در شکل (۸) ج، با افزایش دبی، عمق جریان خروجی افزایش یافته است ولی افزایش قطر ذرات تأثیر واضحی بر عمق جریان خروجی نداشته است. در مرحله آخر در نسبت  $B/C/H = 2$ ، از شیب ۳:۱ جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

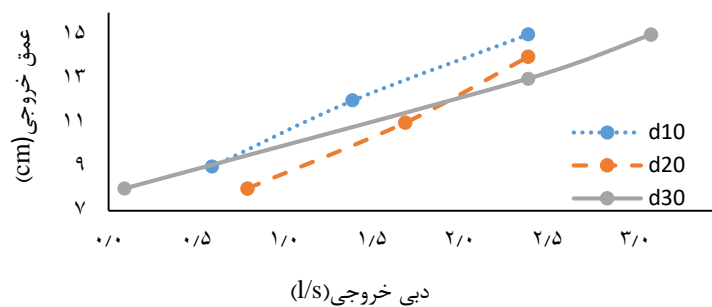




الف



ب

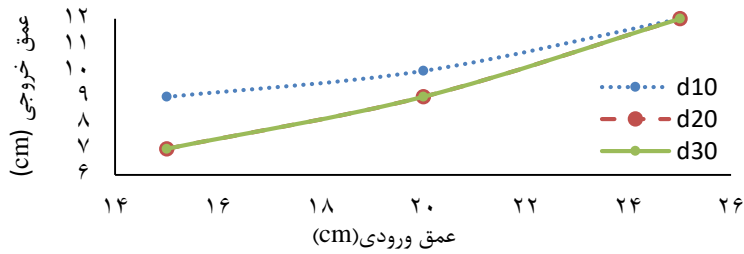


ج

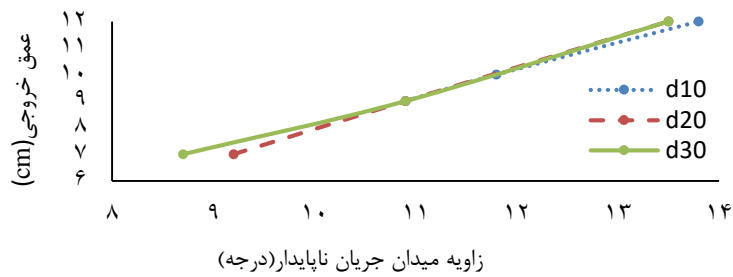
شکل ۸. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S2L2

شکل (۹) الف نشان می‌دهد در اعماق ورودی پایین، ذره با قطر ۱۰ میلی‌متر نسبت به دیگر ذرات تأثیر بیشتری بر عمق جریان خروجی داشته ولی با افزایش عمق ورودی تأثیر اندازه ذرات بر میزان عمق خروجی کاهش یافته است. در شکل (۹) ب، به ازای مقادیر مختلف زاویه جریان، اندازه ذرات تأثیر چندانی بر عمق خروجی نداشته ولی با افزایش زاویه میدان جریان میزان عمق خروجی هم افزایش یافته است. در شکل (۹) ج،

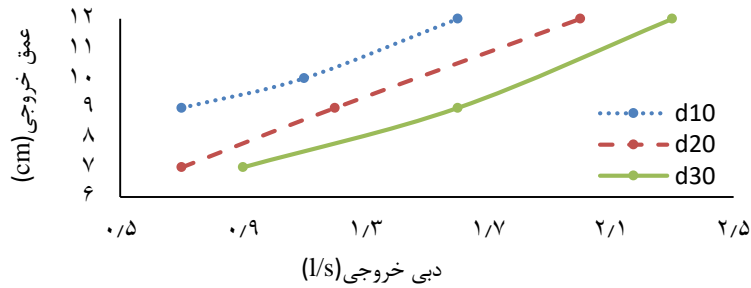
به ازای یک دبی جریان ثابت، با افزایش قطر ذرات عمق جریان خروجی روند کاهشی داشته است که با نتایج هانسن روشنفکر (۲۰۱۲)، مطابقت دارد.



الف



ب



ج

شکل ۹. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S3L2

### بحث

در این تحقیق سعی شد تا با ساخت مدل فیزیکی پارامترهای نشت در سد سنگریزه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد. در این پژوهش ۱۸ سد به ارتفاع ۳۰ سانتی متر ساخته شد. شیب بالادست ثابت اما قطر ذرات، عمق سطح آب بالادست، دبی و شیب پایین دست متغیر در نظر گرفته شده است.

این مدل‌ها با دو نسبت  $Bc/H=1$  و  $Bc/H=2$  ساخته شدند. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که با افزایش طول سازه، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد که این میزان کاهش عمق جریان خروجی به ازای مقادیر عمق جریان ورودی کمتر، محسوس‌تر بوده و با افزایش عمق جریان ورودی، تأثیر طول سازه بر عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد. همین مسئله در مورد زاویه میدان جریان نیز مشاهده می‌شود. بدین ترتیب که با افزایش طول سازه به ازای یک شیب ثابت، زاویه میدان جریان کاهش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که در نسبت  $Bc/H=1$ ، با افزایش عمق بالادست، عمق جریان خروجی افزایش یافته است. با توجه به اینکه عمق جریان خروجی در پایین‌دست می‌تواند با استفاده از مفهوم زاویه میدان جریان ناپایدار تعیین شود، می‌توان گفت با افزایش زاویه میدان جریان ناپایدار عمق جریان خروجی هم افزایش می‌یابد. مقایسه تأثیر سنگریزه‌های با قطرهای مختلف بر زاویه میدان جریان ناپایدار نشان می‌دهد که ابعاد سنگریزه‌ها، تأثیر محسوسی بر زاویه میدان جریان ناپایدار نداشته است. باین‌حال برای یک دبی ثابت با افزایش قطر ذرات، عمق خروجی در پایین‌دست کاهش می‌یابد که با نتایج انصاری و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. بررسی تأثیر شیب‌های مختلف پایین‌دست بر شرایط جریان خروجی از سد نشان می‌دهد که در یک دبی ثابت، با کاهش شیب دیواره پایین‌دست، زاویه میدان جریان ناپایدار و عمق خروجی جریان کاهش بسیاری داشته است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت کاهش شیب به همراه افزایش قطر سنگریزه‌ها سبب کاهش هر چه بیشتر عمق جریان خروجی و زاویه میدان نسبت به شیب قبلی می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده با نتایج صدقی اصل (۱۳۸۹) همخوانی دارد. در نسبت  $Bc/H=2$ ، با افزایش قطر ذرات به ازای یک دبی ثابت، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد که با افزایش دبی جریان، تأثیر اندازه ذرات تا حدودی بیشتر شده است که این نتیجه با نتایج چابک‌پور و همکاران (۱۳۹۵)، مطابقت دارد. در نسبت  $Bc/H=2$ ، با افزایش عرض مدل عمق جریان خروجی نسبت به  $Bc/H=1$  کاهش یافته است. علاوه بر این بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان به این نتیجه رسید که در یک شیب ثابت، با افزایش عمق جریان، زاویه میدان افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر ذرات، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد. این تغییرات در دبی‌های کم مشخص نیست اما در دبی‌های بالا به‌وضوح قابل مشاهده است.

### منابع

- انصاری، اسحاق، صدقی اصل، محمد. و پرویزی، منصور. (۱۳۹۵). ارزیابی دقت کد کامپیوتری SEEP/W در برآورد دبی و نیمرخ سطح آب جریان درون محیط‌های متخلخل درشت دانه طویل. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷(۲)، ۳۶۲-۳۵۵.  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58340>
- بازرگان، جلال، و شعاعی، سید محمد. (۱۳۸۹). تحلیل جریان‌های غیرداری در مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، ۴۴(۲)، ۱۳۹-۱۳۱.  
[https://journals.ut.ac.ir/article\\_20773.html](https://journals.ut.ac.ir/article_20773.html)
- بای‌پوردی، محمد. (۱۳۷۲). فیزیک خاک. چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران. <https://www.gisoom.com/book/1645119/>
- چابک‌پور، جعفر، امیری تکدانی، ابراهیم، و صدقی اصل، محمد. (۱۳۹۵). برآورد ضرایب انتشار طولی رسوبات معلق درون محیط‌های متخلخل درشت دانه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک - دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۲۳(۶)، ۳۳۲-۳۱۷.  
<https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.9347.2337>
- چهرآزاد، محمد رضا. (۱۳۹۳). راهکارهای کاهش میزان نشت در سدهای خاکی و تأثیر آن بر افزایش ایمنی سد سیرجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه زابل، ایران.
- روشنفکر، علی، ظهیری، جواد، و کاشفی‌پور، سید محمود. (۱۳۸۹). ارائه روابطی جهت محاسبه‌ی ضرایب جریان غیرداری در محیط‌های سنگریزه‌ای. نشریه آب و خاک، ۲(۵)، ۸۶۳-۸۵۵.  
<https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5277>

- سرور، سالار. (۱۳۹۵). مدل سازی عددی نشت از زیر سد بتنی با استفاده از روش المان محدود. پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی غیاث‌الدین جمشید کاشانی، قزوین، ایران.
- صادق‌پور، امیرحسین، معجزی، محسن، و فدایی، میثم. (۱۳۸۷). بررسی و مقایسه گزینه‌های سدسنگریزه‌ای با هسته رسی و رویه بتنی (مطالعه موردی سد بازفت). دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی. دانشگاه کاشان، ایران. <https://civilica.com/doc/39112>
- صالحی، سعید، شایان نژاد، محمد، اخروی، سید سعید، و نجف‌پور، نوید. (۱۳۹۵). تعیین ابعاد بهینه زهکش پنجه ای بر اساس بهترین خط نشت در سدهای خاکی همگن با استفاده از مدل آزمایشگاهی. مجله پژوهش آب ایران ۱۰(۱)، ۱۰-۱.
- [https://iwrj.sku.ac.ir/article\\_10452.html](https://iwrj.sku.ac.ir/article_10452.html)
- صدقی اصل، محمد، رحیمی، حسن، فرهودی، جواد، و محمدولی سامانی، جمال محمد. (۱۳۸۹). تجزیه و تحلیل پروفیل‌های جریان درون محیط‌های متخلخل درشت دانه. مجله پژوهش آب ایران، ۴(۲)، ۸۸-۸۱. [https://iwrj.sku.ac.ir/article\\_11127.html](https://iwrj.sku.ac.ir/article_11127.html)
- قادری، کوروش، سامانی، جمال محمدولی، و عمادی، علیرضا. (۱۳۸۴). بررسی روابط مختلف تراوش غیر داری و مدل ریاضی محاسبه جریان در محیط‌های متخلخل مستغرق. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران. <https://civilica.com/doc/3614/>
- گرد نوشهری، امیر، امیری تکلدانی، ابراهیم، و صدقی اصل، محمد. (۱۳۹۶). مطالعه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک جریان با سطح آزاد در یک محیط متخلخل سنگریزه‌ای. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۴)، ۹۲۸-۹۱۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.222788.667593>
- ولی‌پور گودرزی، فرزاد. (۱۳۷۳). کاربرد سنگریز در سازه‌های هیدرولیکی. چاپ اول، انتشارات امیرکبیر. <https://www.gisoom.com/book/172627>

## References

- Ansari, E., Sedghi Asl, M., & Parvizi, M. (2016). Accuracy of SEEP/W model in predicting seepage line and flow rate through lengthy coarse porous medium. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(2), 355-362. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58340>
- Baybordi, M. (1372). *Soil physics*. Fifth edition, Tehran University Press. <https://www.gisoom.com/book/1645119> [In Persian]
- Bazargan, J., & Shoaie, S.M. (2010). Analysis of Non-Darcy Flow in Rock Fill Materials Using Gradually Varied Flow Method. *Journal of Civil Engineering and Mapping*, 44(2), 131-139. [https://journals.ut.ac.ir/article\\_20773.html](https://journals.ut.ac.ir/article_20773.html) [In Persian]
- Chabokpour, J., Amiri Tokaldany, E., & Sedghi Asl, M. (2017). Estimation of longitudinal dispersion coefficient of suspended sediments through the large porous Medias. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 317-332. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.9347.2337>[In Persian]
- Cheharazad, M.R. (2013). Solutions to reduce the amount of leakage in earthen dams and its effect on increasing the safety of Sirjan Dam. Master's thesis. University of Zabol, Iran. [In Persian]
- Gord-Noshahri, A., Amiri Tokaldany, E., & Sedghi-Asl, M. (2017). Study of non-hydrostatic pressure distribution of free surface flow in a rockfill porous media. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(4), 917-928. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.222788.667593> [In Persian]
- Hansen, D. (1992). *The behaviour of flow through rockfill dams*, University of Ottawa (Canada). <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-15444>
- Hansen, D., & Roshanfekr, A. (2012). Assessment of potential for seepage-induced unraveling failure of flow-through rockfill dams. *ASCE International Journal of Geomechanics*, 12(5), 573-560. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000145](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000145)

- Hansen, D., Garga, V. K., & Townsend, D. R. (1995). Selection and application for a 1-dimensional non-Darcy flow equation for 2-dimensional flow through rockfill embankments. *Geotech. J*, 32, 223–232. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t95-025>
- Hansen, D., Zhong, W. Z., & Yoon Han, S.Y. (2005). Hydraulic performance and stability of coarse rockfill deposits. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-water Management*, 158, 163–175. <http://dx.doi.org/10.1680/wama.2005.158.4.163>
- Qaderi, K., Samani, J. M. A., & Emadi, A. (1384). Investigating different relations of non-Darcy seepage and mathematical model for calculation of flow in submerged porous media. The fifth hydraulic conference of Iran. Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. <https://civilica.com/doc/3614/> [In Persian]
- Roshanfekar, A. (2013). Contributions to the hydraulics of flow-through rockfill structures. Ph.D. thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. [https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-NSHD-37567&op=pdf&app=Library&oclc\\_number=1032915066](https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-NSHD-37567&op=pdf&app=Library&oclc_number=1032915066)
- Roshanfekar, A., Zahiri, J., & Kashefipoor, M. (2010). Presenting Some Equations for Calculating the Non-Darcy Flow Coefficients in Rockfills. *Water and Soil*, 24(5), 855-863. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5277> [In Persian]
- Sadeghpour, A., Mojezi, M., & Fadaei, M. (2008). Investigating and comparing gravel dam options with clay core and concrete top (case study of Bazfat Dam). The second national conference on dams and electric power plants. Kashan University, Iran. <https://civilica.com/doc/39112> [In Persian]
- Salehi, S., Shayannejad, M., Okhravi, S. S., & Najafpour, N. (2016). Determination of the optimum size of a toe drain based on the best phreatic line in homogeneous earth dams by using vitro model. *Iranian Water Researches Journal*, 10(1), 1-10. [https://iwrij.sku.ac.ir/article\\_10452.html](https://iwrij.sku.ac.ir/article_10452.html) [In Persian]
- Sarvar, S. (2015). Numerical modeling of leakage from under concrete dam using finite element method. Master's thesis, Ghiyasuddin Jamshid Kashani Institute of Higher Education, Qazvin, Iran. [In Persian]
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Farhoudi, J., & samani, J. M. V. (2010). Analysis of the Water Surface Profiles through Coarse Porous Medium. *Iranian Water Researches Journal*, 4(2), 81-88. [https://iwrij.sku.ac.ir/article\\_11127.html](https://iwrij.sku.ac.ir/article_11127.html) [In Persian]
- Stephenson, D. (1979). *Rockfill in Hydraulic Engineering*. Elsevier Scientific, Amsterdam. <https://shop.elsevier.com/books/rockfill-in-hydraulic-engineering/stephenson/978-0-444-41828-9>
- Valipour Guderzi, F. (1994). Application of gravel in hydraulic devices. First edition, Amir Kabir Publications. <https://www.gisoom.com/book/172627> [In Persian]



## Investigation of long-term irrigation with Kermanshah municipal treated wastewater on some of chemical properties of soil layers

Milad Farmanifard<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Corresponding Author, Ph. D graduated of Irrigation and Drainage, Expert of Kermanshah Regional Water Company, Office of Basic Studies of Water Resources, Kermanshah, Iran. E-mail: milad.farmanifard@gmail.com

### ABSTRACT

#### Introduction

In countries in the arid and semi-arid regions of the world, one of the most important problems in the agricultural sector as the main consumer of water resources is finding alternative and reliable water sources for irrigation. Reuse water is thought to be the only source of water that is increasing despite decreasing the volume of other sources. In recent years, one of the most suitable options for saving water resources is the recycling of urban and industrial wastewater for irrigation which is common practice in different parts of the world, but if the use of wastewater Sewage can not be managed properly for irrigation, which may cause environmental problems.

#### Material and methods

In this context, it is essential to have sufficient and localized information and continuous monitoring of affected water and soil resources. Therefore, the purpose of this study was to investigate the effects of long-term irrigation with municipal treated wastewater (TWW) compared to well water (WEW) as a control treatment on soil chemical in three layer with three replications in a two-year split plot trial design was performed. In three It has been repeated.

#### Results and discussion

The results of the study on the use of TWW in the studied areas showed that due to the availability of this source and the possibility of leaching, the risk of salinification of this land has been somewhat overcome. However, in some areas, due to the increase of sodium, the risk of sodiumization of this land has led to the fact that, due to the high clay content of this land, its future consequences include traps and reduced permeability. Irrigation with TWW resulted in a significant increase of 0.3 units of pH in irrigated soils with wastewater compared to WEW. The TN content varied between %11.30 and %25, which indicates the variable percentages of this parameter at the region of the study area. Also, the results of soil organic carbon (OC) changes as a result of irrigation with TWW showed that this irrigation effect was significant and increased by 55% for irrigation compared to treatments irrigation with WEW due to Organic contents in the wastewater. This, in addition to the advantages of soil fertility, can stabilize and stop the movement of heavy metals by making organic bonds with heavy metals.

#### Conclusions

The result showed that due to sufficient access to this source and the possibility of washing, the risk of salinization of these lands has been eliminated. However, in some areas, the increase of sodium ions and lower amounts of calcium and magnesium ions have resulted in the risk of sodicization of these lands, which due to the high percentage of clay in these lands, the future consequences of which include sele and reduced permeability are quite evident. Also, the changes of the SAR parameter between the two irrigation treatments with effluent and well water were not significant, which was similar to the parameters affecting SAR. On the other hand; Due to the low salinity of the incoming wastewater and the high volume of water used for irrigation and the lack of salinity of the soils in the region, the use of wastewater does not lead to a significant increase in the salinity of the lands in the region compared to the lands irrigated with well water. The results of this research in examining the amount of change in soil organic carbon (OC) as a result of irrigation with urban sewage showed that this effect is significant and increased by 55% for irrigation with sewage compared to irrigation with well water affected by existing organic matter. It is in the sewage. This issue, along with the advantage of soil fertility, can stabilize and stop the mobility of heavy metals by creating organic bonds with heavy metals. According to the results of this study, irrigation with municipal wastewater leads to a significant increase in pH of 0.3 units in soils irrigated with wastewater compared to soils irrigated with well water, which can be caused by high leaching of basic cations. And basically, high inputs of nitrate and sulfate or oxidation of organic materials followed by the production of organic acids. According to the available water sources in the region, including underground water sources and wastewater in the region, as well as the chemical analysis of the well water and the physical and chemical characteristics of the drinking lands, it can be seen that while this water source is limited, its water quality causes soil conditions to deteriorate. In terms of salinity and in the future, it has the possibility of crossing the border of sodium. Therefore, it is not possible to rely on this water source and since there is no more suitable water source for replacement, it is necessary to carry out long-term planning with additional measures to improve the quality of the effluent. gave The lack of water and the low quality of the underground water resources in the region dictates the optimal management of incoming wastewater.

**Keywords:** Water resources crisis, Municipal treated wastewater, Chemical properties, Soil layers, OC, EC

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 29 January 2023 Revised: 30 April 2023 Accepted: 26 May 2023 ePublished: 27 May 2023

**Cite this article:** Farmanifard, M. (2023). Investigation of long-term irrigation with Kermanshah municipal treated wastewater on some of chemical properties of soil layers, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 79-102. DOI: 10.22126/ATWE.2023.8751.1033





## بررسی تأثیر آبیاری بلندمدت با فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه بر برخی خصوصیات شیمیایی لایه های خاک

میلاد فرمانی فرد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، کارشناس شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه، دفتر مطالعات پایه منابع آب، کرمانشاه، ایران. رایانامه: milad.farmanifard@gmail.com

### چکیده

در کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا، یکی از مهم‌ترین مشکلات در بخش کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده اصلی منابع آب، یافتن منابع آب جایگزین و قابل‌اتکا برای آبیاری است. به نظر می‌رسد که پساب تنها منبع آبی است که علیرغم کاهش حجم منابع دیگر، در حال افزایش است. در سال‌های اخیر یکی از گزینه‌های مناسب جهت صرفه‌جویی در مصرف منابع آب، بازیافت پساب فاضلاب شهری و صنعتی برای آبیاری است که به‌عنوان یک عمل مشترک در مناطق مختلف دنیا رواج دارد اما در صورتی که استفاده از پساب فاضلاب برای آبیاری به‌درستی مدیریت نشود ممکن است باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی شود. در این شرایط، در اختیار داشتن اطلاعات کافی و محلی و پایش مداوم منابع آب‌و خاک تحت تأثیر، امری ضروری است. از این‌رو؛ هدف این تحقیق بررسی اثرات آبیاری بلندمدت با پساب تصفیه شده شهری (پساب) در مقایسه با آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد، بر خصوصیات شیمیایی خاک در قالب طرح تجزیه مرکب دوساله و آزمایش کرت‌های خرد شده در سه تکرار بوده است. نتیجه بررسی استفاده از پساب شهری در اراضی مورد بررسی، نشان داد که به علت دسترسی کافی به این منبع و امکان انجام آبیاری، خطر شور شدن این اراضی تا حدودی مرتفع گردیده است. ولیکن در برخی مناطق، در پی افزایش سدیم، خطر سدیمی شدن این اراضی را در پی داشته است که با توجه به درصد بالای رس این اراضی، پیامدهای آتی آن شامل سله و کاهش نفوذپذیری مشهود است. نتایج نشان داد که آبیاری با پساب شهری به‌طور متوسط منجر به افزایش معنی‌دار  $0/3$  واحدی pH در خاک‌های تحت آبیاری با پساب نسبت به اراضی مشروب از آب چاه شد. همچنین، نتایج بررسی میزان تغییر کربن آلی خاک (OC) در نتیجه آبیاری با پساب شهری نشان داد که این اثر آبیاری با پساب معنی‌دار و به میزان ۵۵ درصد افزایش برای حالت آبیاری با پساب در مقایسه با آبیاری با آب چاه متأثر از مواد آلی موجود در پساب است. این موضوع ضمن مزیت حاصلخیز کنندگی خاک، می‌تواند موجب تثبیت و متوقف نمودن حرکت‌پذیری فلزات سنگین با ایجاد پیوندهای آلی با فلزات سنگین گردد.

**واژه‌های کلیدی:** بحران منابع آب، پساب تصفیه شده شهری، خصوصیات شیمیایی، لایه‌های خاک، کربن آلی، شوری

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۹ بهمن ۱۴۰۱ اصلاح: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۵ خرداد ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۶ تیر ۱۴۰۲

**استناد:** فرمانی فرد، م. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر آبیاری بلندمدت با فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه بر برخی خصوصیات شیمیایی لایه‌های خاک، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۱۰۲-۷۹، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.8751.1033



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

جمعیت انسان به طور پیوسته در حال افزایش است و پیش بینی می شود از ۷٫۶ میلیارد نفر در سال ۲۰۱۷ در سال ۲۰۵۰ به ۹٫۸ میلیارد نفر برسد (ایالات متحده، ۲۰۱۷) که این افزایش سریع جمعیت انسانی در چند دهه اخیر شهرنشینی را به سرعت افزایش داده است (مریم و بوبو کگونگور، ۲۰۱۹) که منتج به افزایش قابل توجه تولید فاضلاب شهری شده است (رومانو و همکاران، ۲۰۱۹). این در حالی است که جهان روز به روز با تشدید بحران آب مواجه است و به تبع آن، استفاده مجدد از پساب فاضلابها به عنوان گزینه ای برای افزایش منابع آب قابل دسترس مورد توجه است (بیچای<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲) و در شرایط فعلی، یکی از راه های مقابله با شرایط اقلیمی خشک در ایران نیز استفاده بهینه از منابع آب موجود و همچنین استفاده از آب های نامتعارف است.

بخش کشاورزی عمده ترین بخش مصرف کننده آب شیرین بشمار می رود که معمولاً بیش از ۷۰ درصد از برداشت منابع آب را به خود اختصاص داده است (فانو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۶). از طرفی افزایش تقاضا در بخش مصرف خانگی و شرب، منجر به بالا رفتن حجم پساب در این بخش شده و می تواند یک گزینه مناسب برای تأمین دائمی حجم بالای آب برای آبیاری بوده و به کاهش محدودیت منابع آب در دسترس کمک کند (گونستون<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸). استفاده از پساب تصفیه شده برای آبیاری محصولات، مقادیر مختلفی از عناصر دیگر مانند سدیم، کلسیم، منیزیم و غیره را به خاک اضافه می کند. بنابراین، پساب تصفیه شده به اندازه کافی می تواند منبع قابل اعتمادی برای تولید محصولات کشاورزی، به ویژه در مناطق خشک کم آب باشد (انگلاکیس و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۳، فرهادخانی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۰ و جونگ و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۲۰). در این ارتباط باید توجه داشت که؛ مواد مغذی موجود در فاضلاب بیشتر از آب شیرین است، از این رو از یک سو می تواند به عنوان یک منبع پایدار برای مواد مغذی در کشاورزی و در جهت کمک به کاهش مصرف کودهای شیمیایی بکار گرفته شده و از طرفی نیز از تخلیه فاضلاب به آب های سطحی و آلودگی محیط زیست جلوگیری می کند (سازمان حفاظت محیط زیست<sup>۷</sup>، ۲۰۱۶). در سوی مقابل استفاده از این پساب با دغدغه های چون: شوری و سدیمی شدن خاکها و تجمع فلزات سنگین همراه است (ژو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). البته محققین، افزایش مواد آلی خاک و برخی ریزمغذی ها را نیز به عنوان آثار مثبت استفاده از پسابها عنوان نمودند. همچنین، سدیمی شدن و به تبع آن تخریب ساختمان خاک، سلبستن سطح خاک و کاهش نفوذپذیری و در نتیجه کاهش محصول می تواند از اثرات استفاده از پساب های شهری بر کشاورزی باشد (موین و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۱ و سینگ و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۲). چنانچه غلظت برخی عناصر موجود در پساب از میزان استاندارد بیشتر باشد، غلظت این عناصر در خاک نیز به تدریج افزایش یافته و از آستانه تحمل گیاه فراتر خواهد رفت (امین<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). در عین حال ممکن است موجب آلودگی آب های زیرزمینی و بروز مشکلات زیست محیطی شوند.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

برخی از محققین با مطالعه مزایای استفاده مجدد از پساب در بخش کشاورزی گزارش نمودند به دلیل اینکه فاضلاب تصفیه شده به طور کلی دارای غلظت بالایی از مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر می باشد، استفاده از آن می تواند کاربرد از کود را کاهش داده و موجب بهبود راندمان تولید

<sup>1</sup> United Nations

<sup>2</sup> Maryam & Buyukgungor

<sup>3</sup> Romano et al

<sup>4</sup> Bichai et al

<sup>5</sup> FAO

<sup>6</sup> Gunston

<sup>7</sup> Angelakis et al

<sup>8</sup> Farhadkhani et al

<sup>9</sup> Jeong et al

<sup>10</sup> EPA

<sup>11</sup> Xu

<sup>12</sup> Muyen et al

<sup>13</sup> Singh et al

<sup>14</sup> Amin



گرد (بلوم و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲ و نوگویرا و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۳). همچنین، مطالعات متعددی مبنی بر تغییرات در برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک به دلیل استفاده از فاضلاب تصفیه شده مانند افزایش شوری خاک، هدایت الکتریکی (EC)، سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم قابل تبادل، فسفر قابل دسترس گیاه و عناصر کم مصرف (النقشندی و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۹۷، کیزیلوغللو و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸، تارچونا و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰، گونزی و مونوندو<sup>۶</sup>، ۲۰۰۸ و بام و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۴)، افزایش محتوای ماده آلی (روشن و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۰۷ و ژو و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۰) و افزایش pH خاک (رادینگوانا و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۰ و حسین و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۹) و بهبود ساختار و خاکدانه سازی ذرات خاک گزارش شده است. از طرفی نیز باید گزارش شده که آبیاری با فاضلاب باعث افزایش سدیم خاک می‌شود که موجب تخریب ساختار خاک شده و بر تخلخل خاک و تنوع زیستی میکروبی خاک تأثیر منفی می‌گذارد (بلاید و همکاران<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۳ و حسین و همکاران<sup>۱۳</sup>، ۲۰۱۹) که افزایش محتوای سدیم خاک همچنین ممکن است به دلیل ممانعت از رشد عمومی در مراحل مختلف رشد و عدم تعادل تغذیه‌ای، تخریب کلی خاک و محدود شدن تولید محصول را تشدید کند (هانجرا و همکاران<sup>۱۴</sup>، ۲۰۱۳ و پنا و همکاران<sup>۱۵</sup>، ۲۰۲۰).

شایان جزی و همکاران (۱۳۸۹)، پس از بررسی تأثیر آبیاری با پساب شهری به مدت ۱۵ سال در منطقه شمال اصفهان گزارش کردند که استفاده از پساب برای آبیاری، باعث افزایش اسیدیته خاک (pH)، کاهش EC، کاهش درصد سدیم تبدلی (ESP) و کاهش SAR گردیده است. همچنین آبیاری با پساب شهری تأثیری بر میزان مواد آلی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) نداشته است. بنابراین استفاده از پساب تأثیر مطلوبی بر خاک در مقایسه با استفاده از آب چاه داشته است.

سلگی و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیقی با هدف بررسی تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه نشده شهری بر تجمع فلزات سنگین در خاک سطحی و زیرسطحی اراضی کشاورزی جنوب شهر بروجرد، ۱۳ مزرعه آبیاری شده با فاضلاب تصفیه نشده شهری و ۷ مزرعه آبیاری شده با آب چاه که بافت خاک مشابهی داشتند را آزمایش و مقادیر سرب، کادمیوم، مس، روی، pH، EC و مواد آلی خاک را اندازه‌گیری نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که میانگین غلظت همه فلزات سنگین در خاک سطحی (بجز مس) و زیرسطحی آبیاری شده با فاضلاب تصفیه نشده شهری در مقایسه با خاک آبیاری شده با آب چاه بیشتر بود. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که کاربرد فاضلاب pH خاک را تا حدوری در مقایسه با خاک‌های آبیاری شده با آب چاه کاهش داده است و مقادیر EC هم به دلیل کاربرد فاضلاب افزایش یافته است.

فراه‌دخانی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر فاضلاب تصفیه شده بر ویژگی‌های خاک و کیفیت محصولات مختلف را در مقایسه با آبیاری آب شیرین در منطقه تحت تنش آب خاور میانه ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد آبیاری با فاضلاب تصفیه شده تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های خاک تحت آبیاری در کرت‌های شاهد وجود ندارد. با این حال، مطالعه مقادیر SAR و EC کمی بالاتر در مناطق تحت آبیاری فاضلاب گزارش کرد. این مطالعه به این نتیجه رسید که آبیاری با پساب تصفیه شده می‌تواند با رعایت ملاحظات لازم به عنوان یک منبع آبیاری اختیاری برای محصولات برگی و ریشه‌ای در مناطق کم آب در نظر گرفته شود.

پینتو و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۰) سطوح بالای EC و pH را با آب با کیفیت حاشیه‌ای در مقایسه با تصفیه‌های فاضلاب شیرین و رقیق گزارش کردند.

<sup>1</sup> Blum et al

<sup>2</sup> Nogueira et al

<sup>3</sup> Al-Nakshabandi et al

<sup>4</sup> Kiziloglu et al

<sup>5</sup> Tarchouna et al

<sup>6</sup> Gwenzi & Munondo

<sup>7</sup> Bame et al

<sup>8</sup> Rusan et al

<sup>9</sup> Radingoana et al

<sup>10</sup> Hussain et al

<sup>11</sup> Belaid et al

<sup>12</sup> Hanjra et al

<sup>13</sup> Pena et al

<sup>14</sup> Pinto et al

لادو و بن‌هور<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) و مورگان-کورونادو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۱)، گزارش داده‌اند که شوری و سدیم خاک‌هایی که تحت آبیاری بلندمدت با پساب تصفیه شده شهری قرار دارند، افزایش می‌یابد. طبری و صالحی<sup>۳</sup> (۲۰۰۹)، در مطالعه‌ای که اثرات آبیاری با فاضلاب شهری بر روی خاک را بررسی کردند، که افزایش در pH، EC و کربن آلی خاک در تیمار پساب مشاهده گردید. رانا و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۰)، اثرات بلندمدت آبیاری با پساب شهری را بر روی خصوصیات خاک در هایانای هند مورد بررسی قرار دادند. پایش پساب ورودی نشان داد که کل نمک و محتوای فلزات سنگین در مقایسه با آب چاه بالاتر، ولیکن در محدوده مورد قبول قرار دارد. همچنین، محتوای کربن آلی، فسفر، کلسیم و منیزیم در خاک‌های تحت آبیاری با پساب بالاتر و pH کمتر از خاک‌های تحت آبیاری با آب چاه می‌باشد. کاربرد مستمر پساب طی ۳۵ سال، منجر به تجمع معنی‌دار فلزات سنگین و مواد مغذی در خاک شده است. نتایج تحقیقات ال‌فا-هنتاتی و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۳)، در منطقه الحجاب تانزانیا حاکی از افزایش pH بود که آنرا به افزایش نمک‌های مختلف محلول در پساب شهری نسبت دادند. افزایش SAR خاک را نیز متأثر از EC بالای پساب و مقادیر بالای  $Ca^{2+}$  و  $Na^{+}$  دانستند. همچنین دریافتند که میزان نمک خاک متأثر از میزان دوره آبیاری با پساب بوده و با طولانی شدن این دوره افزایش یافته است. همچنین با افزایش عمق، خاک شورتر شده است. یشای و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۴)، نتیجه گرفتند که در خاک‌های رسی تحت آبیاری نسبتاً سنگین با پساب تصفیه شده شهری، خطرات سدیم بیشتر از کلر و یا شوری مستقیم برای گیاه و خاک است. بانو و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ای پیرامون تأثیر بلندمدت آبیاری با پساب (۲۰، ۳۰ و ۴۰ سال) در اراضی شهر بیجینگ چین به این نتیجه رسیدند که آبیاری بلندمدت با پساب باعث افزایش محتوای کربن آلی خاک گردیده و مقدار کربن آلی تأثیر معنی‌داری بر روی تجمع عناصر حاصلخیز داشته است. الغبار و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۴) و الغبار و سورشا<sup>۹</sup> (۲۰۱۵)، با تحقیق روی خاک‌های تحت آبیاری بلند مدت با پساب شهری در منطقه کارناتاکای هند، افزایش EC، نیتروژن، فسفر و پتاسیم و همچنین کاهش pH خاک را گزارش نمودند در حالیکه Cl دارای تغییر معنی‌داری نشان نداد. فرمانی‌فرد و همکاران<sup>۱۰</sup> (۱۳۹۵)، در تحقیقات خود دریافتند که استفاده از پساب تصفیه شده شهر کرمانشاه باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک گردید، اما با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات شیمیایی و فلزات سنگین آب و خاک، استفاده از فاضلاب تصفیه نشده و پساب برای آبیاری محصولات خوراکی توصیه نمی‌شود. اخیراً عامری و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۳)، تأثیرات کوتاه، میان مدت و بلندمدت پساب تصفیه شده به عنوان یک روش آبیاری بر خواص فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک (تحت تیمارهای مختلف آبیاری به مدت ۱، ۷ و ۱۵ سال در مقایسه با خاک کشت دیم) در منطقه‌ای با اقلیم خشک واقع در جنوب شرقی تونس را مطالعه نمودند. ارزیابی فیزیکی و شیمیایی بدست آمده از این تحقیق ثابت کرد که آبیاری با پساب تصفیه شده حاصلخیزی خاک را بهبود بخشیده است و زیست توده میکروبی C و N با افزایش زمان آبیاری افزایش یافته است. همچنین این مطالعه نشان داد که آبیاری طولانی مدت با پساب تصفیه شده باعث افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و در نتیجه حاصلخیزی خاک شده است. در نقطه مقابل، پاتوژن‌ها و باکتری‌ها می‌توانند تهدیدی جدی برای کیفیت بهداشتی خاک و یک عامل محدود کننده برای استفاده از پساب تصفیه شده در مناطق کشاورزی بدون تصفیه سوم باشند.

استفاده از فاضلاب‌های شهری و صنعتی در آبیاری اراضی مناطق حومه شهری در بسیاری از نقاط جهان به امری معمول و متعارف تبدیل شده است (سینگ و آگراول<sup>۱۲</sup>، ۲۰۰۸). از طرف دیگر، فاضلاب‌ها اغلب دارای مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین و سمی می‌باشند (تبری و همکاران<sup>۱۳</sup>، ۲۰۰۸) که نوع و مقدار آنها از مکانی به مکان دیگر و حتی در یک مکان خاص، در طول زمان متفاوت است. بنابراین در صورت استفاده از

<sup>1</sup> Lado & Ben-Hur

<sup>2</sup> Morugán-Coronado et al

<sup>3</sup> Tabari & Salehi

<sup>4</sup> Rana et al

<sup>5</sup> Olfa Hentati et al

<sup>6</sup> Yishai et al

<sup>7</sup> Bao et al

<sup>8</sup> Alghobar et al

<sup>9</sup> Alghobar & Suresha

<sup>10</sup> Ammeri et al

<sup>11</sup> Singh and Agrawal

<sup>12</sup> Tabari et al

فاضلاب باید مسائل مرتبط با کاربرد آن نیز شناسایی، بررسی و مدیریت شود (امونگور و رامولمانا؛ ۲۰۰۴). در حال حاضر در بسیاری از شهرهای ایران، فاضلاب‌های شهری و رواناب‌های سطحی که از شهرها خارج می‌شوند، در زمین‌های کشاورزی پایین دست استفاده می‌گردد. در این ارتباط، ضرورت دارد در مورد اثرات آبیاری با پساب تأثیرپذیری خاک از ابعاد مختلف فیزیکی و شیمیایی در قیاس با شرایط آبیاری با آب با کیفیت مناسب مطالعه و ارزیابی شده و نتایج حاصله از آزمایشات با استانداردهای موجود و دست‌آوردهای تحقیقات پیشین مقایسه گردد. لذا، هدف از این تحقیق بررسی اثرات آبیاری بلند مدت با پساب شهری بر روی خصوصیات شیمیایی لایه‌های خاک شامل: نسبت جذب سدیم خاک (SAR)، کل جامدات محلول، هدایت الکتریکی و اسیدیته (pH) و مقایسه آن با آب چاه به عنوان شاهد می‌باشد.

## روش پژوهش

موقعیت منطقه مورد مطالعه

تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کرمانشاه با مساحتی در حدود ۷۸ هکتار، در جنوب غربی شهر و به مختصاتی به طول جغرافیایی “۲۷° ۱۸’ ۳۴” و عرض “۱۸° ۰۸’ ۴۷” واقع شده است. این تصفیه‌خانه برای جمعیتی برابر ۴۰۰ هزار نفر طراحی و از اواسط پائیز ۱۳۸۴ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. فرآیند تصفیه در این تصفیه‌خانه به روش لجن فعال از نوع متعارف می‌باشد که شامل مراحل تصفیه‌های مقدماتی، اولیه و ثانویه و نهایتاً گندزدایی پساب است. مقدار پساب خروجی معادل ۷۰۰ لیتر در ثانیه و ۶۰۰۰۰ مترمکعب در شبانه روز است.

این تحقیق در شرایط واقعی انجام شده و سعی گردید که تمام شرایط مزرعه بر آزمایشات حاکم باشد. اراضی منتخب در پایین دست تصفیه‌خانه واقع گردیده‌اند که به روش سطحی و سنتی قریب ۱۰ سال با پساب خروجی تصفیه‌خانه آبیاری شده‌اند. همچنین نمونه‌های شاهد (که از سال‌های دور با آب چاه آبیاری شده و می‌شوند) نیز دقیقاً در اراضی روبروی این منطقه واقع شده‌اند که هر یک مساحتی قریب ۵ هکتار را شامل می‌گردند. دور آبیاری در فصل بهار ۹ روزه و در تابستان ۷ روزه بود. کشت غالب در کل منطقه مورد مطالعه و اراضی اطراف آن گندم، جو و ذرت است که جهت شباهت حداکثری و عدم ایجاد اختلاف در نتایج، نمونه‌برداری از خاک به نحوی صورت پذیرفت که هر دو نمونه خاک تحت تیمارهای مختلف از اراضی تحت کشت یک محصول یکسان جمع‌آوری گردد. همچنین، به دلیل امکان تأثیر گیاه و سیستم ریشه، نمونه‌برداری از سه لایه خاک ۳۰ سانتی‌متری از قسمت‌های مختلف مزرعه در سه تکرار انجام شد.

مشخصات و آنالیز نمونه‌های آب

در این مطالعه از دو تیمار آب، یکی پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب و دیگری چاه به عنوان شاهد استفاده شد. برای آزمایشات آب، قبل از شروع آبیاری یعنی اوائل اردیبهشت و در پایان برداشت محصول و قبل از بارندگی سال زراعی بعد، یعنی اوائل شهریور اقدام به نمونه‌برداری از پساب خروجی از تصفیه‌خانه و آب چاه در همان محل جهت انجام آزمایشات شیمیایی گردید و این کار به مدت دو سال تکرار شد و پارامترهای کیفی نمونه‌های برداشت شده با استانداردهای معتبر مقایسه شد (فائو، ۱۹۸۵ و سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۰۳). مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۱)، غلظت برخی از پارامترها در نمونه‌های پساب تصفیه‌خانه بیشتر از حدود مجاز بدست آمده است. غلظت منیزیم، آهن، منگنز، و غلظت کلسیم و نیترات و فسفات و مقدار هدایت الکتریکی اکثر نمونه‌های پساب و حتی در برخی موارد معدود آب چاه، بیشتر از حدود پیشنهادی و مجاز جهت آبیاری است که باید مورد توجه و بررسی بیشتر قرار گیرد و می‌تواند در خاک جذب شده و در طول رشد گیاه از طریق ریشه وارد شده و در اندام‌های مختلف تجمع یابد.

به طور معمول، اگر غلظت سدیم در آب آبیاری بالا باشد، جایگزین کلسیم و منیزیم قابل تعویض شده که این پدیده می‌تواند باعث تضعیف هوادهی خاک به دلیل کاهش نفوذپذیری شود (استیونس و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۳. حسن‌لی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸ و موین و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۱). همچنین، لی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۹) پراکندگی خاک رس در خاک آبیاری شده با پساب که حاوی سدیم با غلظت بیش از ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر بود را مشاهده

<sup>1</sup> Emongor and Ramolemana

<sup>2</sup> WHO

<sup>3</sup> Stevens et al

<sup>4</sup> Hassanli et al

<sup>5</sup> Li et al

نمودند. از آنجا که غلظت سدیم در پساب مورد استفاده در پژوهش حاضر، به طور متوسط، در حدود ۵۰ میلی گرم در لیتر می باشد، پایش و همچنین اصلاح خاک پس از آبیاری با این پساب، از اهمیت زیادی برای حفظ سلامت و پتانسیل خاک برای استفاده کشاورزی آبی منطقه برخوردار است. مقدار pH پساب ورودی به منطقه نیز قلیائیت این آب را نشان می دهد. ولیکن شوری آن پایین بوده و SAR آن نیز کمتر از نصف آب چاه می باشد. مقادیر pH هر دو منبع آبی در دامنه قلیائیت قرار دارد. این موضوع موجب قلیایی شدن خاک تحت آبیاری گردیده، مگر آنکه برخی واکنش های شیمیایی و فعل و انفعالات صورت گرفته در خاک موجب تغییر این روند گردد.

جدول ۱. نتایج آزمایشات شیمیایی و فلزات سنگین آب و مقایسه با استانداردها جهت استفاده در آبیاری

متغیر	واحد	پساب	آب چاه	FAO <sup>۱</sup>	آب	سازمان حفاظت محیط زیست
مس (Cu)	mg/l	۰/۱۱	۰/۰	۰/۲	آب	۰/۲
آهن (Fe)	mg/l	۳۶/۲	۱/۰۶	۵	سازمان حفاظت محیط زیست	۳
روی (Zn)	mg/l	۰/۱۱	۰/۰۷	۱	سازمان حفاظت محیط زیست	۲
منگنز (Mn)	mg/l	۱۱/۱	۰/۰۲	۰/۲	سازمان حفاظت محیط زیست	۱
کادمیوم (Cd)	mg/l	۰/۳۵	۰/۰۶	-	سازمان حفاظت محیط زیست	۰/۰۵
سدیم (Na)	mg/l	۲۶/۲	۳۲/۶	۶۹	سازمان حفاظت محیط زیست	-
کلسیم (Ca)	mg/l	۳۱۸/۵	۱۰۸/۲	۲۰۰	سازمان حفاظت محیط زیست	-
منیزیم (Mg)	mg/l	۱۶۸/۳	۵۴/۱	۲۵	سازمان حفاظت محیط زیست	۱۰۰
نیترات (NO <sub>3</sub> )	mg/l	۶۰/۷	۲۸/۴	۵۰	سازمان حفاظت محیط زیست	۳۰
فسفات (PO <sub>4</sub> )	mg/l	۶/۲۵	۴۳/۳	۶	سازمان حفاظت محیط زیست	۱۰
پتاسیم (K)	mg/l	۱۹/۸	۸/۵	-	سازمان حفاظت محیط زیست	-
کلرو (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	۵۸/۳	۲۱/۵	۱۰۰	سازمان حفاظت محیط زیست	۶۰۰
نسبت جذب سدیم (SAR)	-	۱۷/۰	۳/۶۱	۳	سازمان حفاظت محیط زیست	-
کل ذرات محلول (TDS)	mg/l	۱۱۸۶	۳۶۸	۱۰۰۰-۲۰۰۰	سازمان حفاظت محیط زیست	۷۰۰
هدایت الکتریکی (EC)	dS/m	۰/۹۶	۱/۴۱	۰/۷	سازمان حفاظت محیط زیست	-
اسیدیته (pH)	-	۷/۶۸	۷/۰	۶/۵-۸/۴	سازمان حفاظت محیط زیست	۶-۸/۵

بر اساس نمودار ویلکوکس (پیشنهادی برای مصارف کشاورزی) و با توجه به میزان EC اندازه گیری شده (بین ۸۲۰ تا ۱۴۱۰ میکروزیمنس بر سانتی متر)، هر دو منبع آب در کلاس C3 با شاخص شوری زیاد قرار می گیرند اما با توجه تغییرات زیاد مقدار SAR (۳/۰۴ تا ۱۷)، شاخص خطر سدیمی کم تا زیاد طبقه بندی می شوند. بطور دقیق تر، پساب مورد استفاده در کلاس C<sub>3</sub>S<sub>2</sub> با شوری زیاد و نسبت جذب سدیمی متوسط و نمونه های آب چاه مورد آزمایش در کلاس C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> با شوری زیاد و نسبت جذب سدیمی کم قرار می گیرند. در مجموع با توجه به بالا بودن شوری نسبی منابع آب مورد استفاده (پساب و آب چاه)، ادامه آبیاری با این منابع می تواند منجر به شور شدن خاک در لایه های مختلف گردد. از طرفی نیز؛ قرار گرفتن پساب در کلاس سدیمی بالاتر از متوسط و حتی زیاد (S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub>) در برخی نمونه های اندازه گیری، خطر سدیمی شدن خاک های تخت آبیاری بلند مدت با پساب را گوشزد می کند. لذا این نتایج، نشان می دهند که این آب ها (خصوصاً پساب مورد استفاده) برای آبیاری مناسب نمی باشند.

### مشخصات و آنالیز نمونه های خاک

در مورد خاک، در پایان هر فصل زراعی و به مدت دو سال (۹۲ و ۹۳) نمونه های خاک تحت تیمار پساب و آب چاه و در سه تکرار از سه لایه عمق های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی متری برداشت شد. در مجموع ۳۶ نمونه خاک مورد آزمایشات فیزیکی و شیمیایی قرار گرفت. بطوریکه؛ پس از خشک شدن نمونه ها را خرد کرده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. ویژگی های فیزیکی خاک، شامل جرم مخصوص حقیقی به روش

آزمایشگاهی با استفاده از پیکنومتر (کلوت و دیرکون<sup>۱</sup>؛ ۱۹۸۶)، جرم مخصوص ظاهری به روش نمونه‌برداری دست نخورده (کلوت و دیرکون، ۱۹۸۶)، رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و رطوبت در نقطه پژمردگی دائم به روش مزرعه‌ای و میزان آب قابل دسترس از تفاضل مقادیر FC و PWP (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۲)، اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از روش بار افتان استفاده شد (کلوت و دیرکون، ۱۹۸۶). بافت خاک با استفاده از هیدرومتر تعیین و بر اساس طبقه‌بندی USDA در هر سه لایه، بافت خاک لوم ماسه‌ای به دست آمد. خلاصه نتایج خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک در لایه‌های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و بافت خاک در لایه‌های عمقی مختلف

تیمار آبیاری	لایه خاک (سانتی‌متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر بر ساعت)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تخلخل (%)	درصد ماسه	درصد سیلت	درصد رس	کلاس بافت خاک
پساب تصفیه شده	۰ - ۳۰	۳۸/۰۲	۱/۶۴	۳۵/۸۳	۶۱/۶	۲۲/۰	۱۶/۴	Sandy Loam
	۳۰ - ۶۰	۳۴/۱۸	۱/۵۸	۲۷/۱۱	۵۹/۶	۲۲/۳	۱۸/۱	Sandy Clay Loam
آب چاه	۶۰ - ۹۰	۳۶/۰۶	۱/۷۲	۳۳/۱۹	۶۳/۶	۱۴/۰	۲۲/۴	Sandy Loam
	۰ - ۳۰	۱۸/۱۹	۱/۷۰	۳۷/۰۰	۷۲/۱	۱۵/۴	۱۲/۴	Sandy Loam
	۳۰ - ۶۰	۲۷/۱۶	۱/۸۰	۲۹/۹۰	۷۵/۲	۱۳/۴	۱۱/۴	Sandy Loam
	۶۰ - ۹۰	۲۰/۶۰	۱/۶۹	۲۵/۷۳	۶۸/۲	۱۵/۴	۱۶/۴	Sandy Loam

جهت آنالیز شیمیایی نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد تا کاملاً خشک گردد. در مرحله بعد آنها را الک و آسیاب کرده تا پودر کاملاً یکنواختی بدست آید. ۰/۵ گرم از نمونه فوق را با روش هضم کامل جهت تزریق به دستگاه آماده شد. برای اندازه‌گیری کلیه عناصر موجود در این تحقیق، از روش جذب اتمی با کوره گرافیکی استفاده شد. این پژوهش در قالب یک طرح تجزیه مرکب دو ساله با آزمایش کرت‌های خرد شده (برای دو تیمار آبیاری با پساب و آب چاه) و در سه تکرار، در مدت دو سال برای هر یک از پارامترهای شیمیایی خاک انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم افزارهای آماری SAS 9.1 و MSTATC تحلیل و ارزیابی شدند. آزمون نرمال بودن داده‌ها بر اساس روش کولموگوروف-اسمیرنوف صورت گرفت. آزمون مقایسه میانگین نیز در سطوح احتمالی ۱٪ و ۵٪ بر اساس روش دانکن انجام گردید.

## یافته‌ها

خلاصه نتایج جدول تجزیه واریانس خصوصیات شیمیایی لایه‌های خاک تحت تأثیر تیمارهای آبیاری با پساب و آب چاه در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳. خلاصه نتایج جدول تجزیه واریانس خصوصیات شیمیایی لایه‌های خاک تحت تأثیر تیمارهای آبیاری

pH	EC	OC	SAR	Df	Sources
----	----	----	-----	----	---------

<sup>1</sup> Klute & Dirksen

<sup>2</sup> Kolmogorov-Smirnov

**۸/۸۴۳	ns۰/۰۰۵۴	ns۰/۰۰۳	ns۰/۲۰۳	۱	Year
ns۰/۰۲۳	ns۰/۰۰۳۲	ns۰/۱۰۲	*۰/۷۷۸	۴	Rep(Year)
**۰/۸۱۳	**۰/۰۰۰۲	**۳/۰۳۹	ns۰/۰۹۰	۱	A
**۰/۱۴۸	ns۰/۰۳۵	ns۰/۰۷۷	ns۰/۲۱۱	۱	Year*A
ns۰/۰۲۱	ns۰/۰۰۳۵	ns۰/۱۱۷	ns۰/۳۰۸	۴	Rep*A(Year)
۰/۰۲۱	۰/۰۰۴۶	۰/۱۱۷	۰/۳۰۸	۱۶	Error A
**۰/۱۴۷	ns۰/۰۰۷۸	ns۰/۲۲۷	ns۰/۰۸۳	۲	B
ns۰/۰۰۸	ns۰/۰۰۴۸	ns۰/۰۵۸	ns۰/۰۷۴	۲	Year*B
ns۰/۰۰۲	ns۰/۰۰۰۳	ns۰/۲۵۵	ns۲/۲۲۴	۲	A*B
ns۰/۰۱۳	ns۰/۰۲۱	ns۰/۰۲۲	**۰/۰۳۵	۲	Year*A*B
۰/۱۴۷	۰/۰۰۹۲	۰/۲۲۷	۰/۰۸۳	۲	Error B
۱/۶۷	۷/۱۵	۱۶/۴۰	۸/۸۲		CV (%)

\*معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد، \*\*معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns عدم وجود تفاوت معنی دار.

Y: سال، R: تکرار، A: تیمار آب و B: لایه خاک

نتایج نشان داد که مقدار مواد آلی، کربن آلی و هدایت الکتریکی خاک تحت تأثیر تیمارها و عوامل مختلف از نظر آماری معنی دار نشده است. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان از معنی دار شدن اثر تیمار آبیاری بر تمامی پارامترهای مورد مطالعه به جز مواد آلی در سطح ۵٪ است. همچنین تأثیر تفاوت غلظت کل جامدات محلول و اسیدیته بین لایه‌های خاک معنی دار می‌باشد. از نکات قابل توجه، عدم مشاهده تفاوت آماری معنی دار در غلظت پارامترهای شیمیایی خاک در نتیجه اثر متقابل تیمارهای آبیاری در لایه‌های سه‌گانه خاک می‌باشد.

نتایج آزمون دانکن جهت مقایسه میانگین‌های غلظت پارامترهای شیمیایی در لایه‌های خاک تحت تاثیر تیمارهای آبیاری در جدول (۴) ارائه شده است. مطابق نتایج آماری بدست آمده، تأثیر تیمارهای آبیاری (A) بر نسبت جذب سدیم، مواد آلی، هدایت الکتریکی و اسیدیته، در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار نبود. همچنین، متوسط دو ساله تأثیر متقابل تیمارهای آبیاری در لایه‌های خاک نتایج نسبتاً متفاوتی داشته است. بطوریکه؛ برای هدایت الکتریکی اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نمی‌شود. در همه موارد اختلاف بین لایه‌های دوم و سوم (۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری) در نمونه‌های خاک‌های تحت هر دو تیمار آبیاری در سطح ۵ درصد معنی دار نشده است. همچنین، علیرغم وجود اختلاف مقداری غلظت پارامترهای شیمیایی مختلف در لایه‌های خاک در دو سال مختلف تکرار آزمایشات، می‌توان گفت؛ تفاوت معنی‌دار آماری (در سطح احتمال ۵٪) بین لایه‌های خاک تحت تیمارهای یکسان از این نظر مشاهده نمی‌شود. در واقع می‌توان چنین برداشت نمود که تأثیر کیفیت آب آبیاری در کوتاه مدت نمی‌تواند تغییر قابل توجهی در تغییر خاک ایجاد نماید (عدم مشاهده اختلاف آماری بین لایه‌های خاک تحت تیمارهای یکسان)، اما آبیاری بلند مدت باعث ایجاد تفاوت مقداری و آماری محسوس در تغییر غلظت پارامترهای شیمیایی خاک (وجود اختلاف آماری معنی‌دار در خاک‌های تحت تیمارهای آبیاری پساب و آب چاه) خواهد شد.

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های غلظت خصوصیات شیمیایی لایه‌های خاک تحت تاثیر تیمارهای آبیاری

pH	EC (dS/m)	OC (%)	SAR	عمق خاک (cm)	تیمار آب
a۷/۳۸	a۴/۱۲	a۲/۰۳	a۵/۱۹	۰ - ۹۰	پساب
a۷/۰۸	a۲/۹۳	b۱/۴۵	a۵/۲۹	۰ - ۹۰	آب چاه
abc۷/۲۷	a۴/۴۳	a۲/۱۲	a۵/۵۸	۰-۳۰	
ab۷/۳۸	a۴/۰۳	ab۱/۸۶	c۴/۹۲	۳۰-۶۰	پساب
a۷/۵۱	a۳/۹۱	a۲/۱۲	bc۵/۰۷	۶۰-۹۰	
c۷/۰۰	ab۳/۳۱	bc۱/۶۸	c۴/۷۱	۰-۳۰	
c۷/۰۶	b۲/۸۳	cd۱/۴۶	a۵/۷۰	۳۰-۶۰	آب چاه
bc۷/۱۹	b۲/۸۰	d۱/۲۱	ab۵/۴۷	۶۰-۹۰	
ab۷/۳۳	b۳/۸۵	ab۲/۰۱	a۵/۳۷	۰-۳۰	پساب
a۷/۰۵	b۳/۷۳	ab۱/۸۵	a۴/۶۹	۳۰-۶۰	(سال اول)
a۷/۵۸	b۳/۶۲	ab۱/۱۲	a۵/۰۶	۶۰-۹۰	
abc۷/۲۷	b۳/۰۸	ab۱/۶۸	a۴/۷۵	۰-۳۰	آب چاه
abc۷/۲۸	b۲/۹۲	ab۱/۶۳	a۵/۶۴	۳۰-۶۰	(سال اول)
ab۷/۳۷	b۳/۰۷	b۱/۲۰	a۵/۴۹	۶۰-۹۰	
abc۷/۲۰	a۵/۰۲	a۲/۲۳	a۵/۷۹	۰-۳۰	پساب
abc۷/۲۵	ab۴/۳۲	ab۱/۸۶	a۵/۱۶	۳۰-۶۰	(سال دوم)
ab۷/۴۳	ab۴/۲۰	ab۲/۱۲	a۵/۰۸	۶۰-۹۰	
d۶/۷۳	ab۳/۱۸	ab۱/۶۸	a۴/۶۸	۰-۳۰	آب چاه
cd۶/۸۵	b۲/۷۵	ab۱/۳۰	a۵/۷۶	۳۰-۶۰	(سال دوم)
bcd۷/۰۲	b۲/۵۶	b۱/۲۱	a۵/۴۴	۶۰-۹۰	

در هر ستون و برای هر گروه میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک باشند با همدیگر اختلاف معنی‌داری ندارند ( $P < 0/05$ )

این افزایش در SAR محلول خاک نشان می‌دهد تا زمانی که بارش باران کافی وجود دارد، تجمع نمک سدیم در خاک کمتر است. علاوه بر این، در آینده، افزایش SAR در لایه‌های پایین‌تر پروفیل خاک، بطور بالقوه می‌تواند منجر به کاهش نفوذ لایه‌های زیرین نسبت لایه‌های سطحی شود (آندروز و همکاران؛ ۲۰۱۶).

### بررسی و مقایسه پارامترهای شیمیایی خاک تحت تاثیر تیمارهای آبیاری

در استفاده از فاضلاب‌های شهری و پساب حاصل از تصفیه آن برای آبیاری محصولات کشاورزی و به دلیل وجود انواع یون‌های محلول در این قبیل آب‌ها، توجه به خصوصیات خاک، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از موارد مهم و اساسی به شمار می‌آید. در چنین شرایط اقلیمی که با دمای بالای هوا و رطوبت نسبی کم توأم است، تبخیر و تعرق گیاهی قابل ملاحظه بوده و در نتیجه، مقدار املاح باقیمانده در لایه سطحی نیمرخ خاک افزایش قابل توجهی می‌یابد.

### نسبت جذب سدیم خاک (SAR)

آبیاری سطح سدیم تبادلی در خاک را افزایش می‌دهد. به ویژه هنگامی که از پساب تصفیه شده برای آبیاری استفاده شود (سیلوا و همکاران؛ ۲۰۱۶). شور شدن خاک زمانی رخ می‌دهد که غلظت سدیم در سایت‌های تبادل مواد معدنی خاک رسی در مقایسه با غلظت کلسیم و منیزیم بیش از حد بالا باشد. این افزایش در غلظت نمک‌ها (به خصوص سدیم) و SAR در پساب به طور عمده به علت افزایش استفاده از نرم کننده‌های آب در جهت تلاش برای حفاظت از آب و تصفیه آن است. از آنجا که نمک‌ها با هر آبیاری به خاک اضافه می‌شوند، می‌توان انتظار داشت که آبیاری طولانی مدت با شوری و سدیم بالا، موجب تجمع املاح در خاک و افزایش SAR خاک گردد (آیرز و وسکات؛ ۱۹۸۵ و رحمان و همکاران؛ ۲۰۱۵). از آنجا که نسبت جذب سدیم متأثر از وجود و غلظت سه کاتیون  $Ca$ ،  $Na$  و  $Mg$  می‌باشد، روند و تغییرات آن در لایه‌های خاک متفاوت بدست آمده است که در شکل (۱) نشان داده شده است.

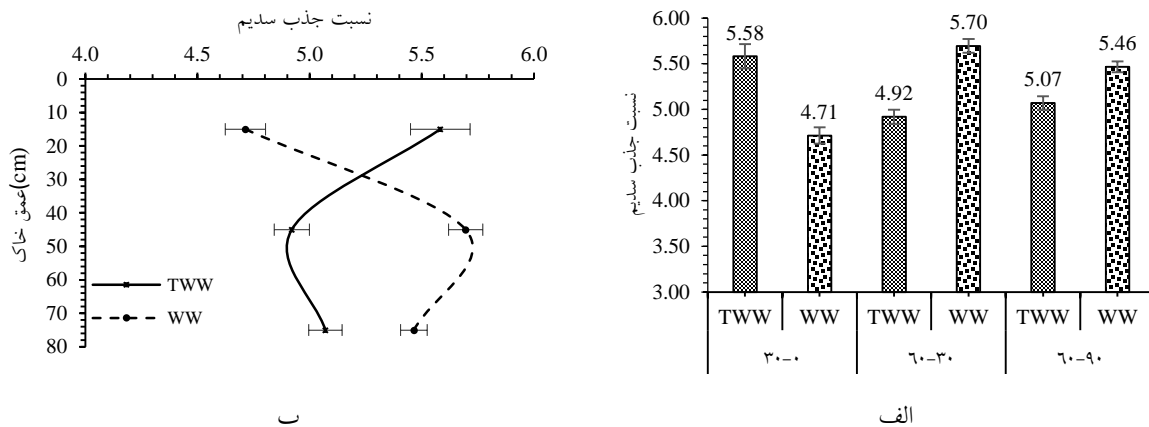
<sup>1</sup> Andrews et al

<sup>2</sup> Silva et al

<sup>3</sup> Ayers & Westcot

<sup>4</sup> Rahman





شکل ۱: متوسط مقدار نسبت جذب سدیم (SAR) در لایه‌های خاک تحت تیمارهای مختلف آبیاری

از نکات قابل توجه، تغییر روند مقدار SAR از لایه ۳۰ سانتی‌متری سطحی خاک به لایه‌های زیرین است. بطوریکه؛ مقدار SAR محاسبه شده در تیمارهای پساب لایه سطحی به مقدار قابل توجهی بیشتر از تیمار آب چاه بوده است اما در دو لایه زیرین، این روند عکس شده و مقدار SAR محاسبه برای تیمارهای آبیاری شده با آب چاه به مقدار محسوسی فزونی یافته است. این افزایش در زیر لایه‌های خاک موافق با یافته‌های مرتضی و همکاران (۲۰۱۵) است که اشاره نمودند مقدار SAR با افزایش عمق خاک کاهش یافته است. مقدار بالای SAR (بیشتر از ۱۳) نشان دهنده افزایش سدیمی شدن خاک که در نتیجه آبیاری با فاضلاب تصفیه شده می‌باشد (خاسخوسی و همکاران، ۲۰۱۵).

بیشترین و کمترین مقدار SAR نیز در لایه ۳۰-۶۰ سانتی‌متری و ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک تیمار شده با آب چاه به ترتیب برابر با ۵/۷۰ و ۴/۷۱ بدست آمده است. بطور معمول، مقدار SAR در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب از ۴/۵ تا ۷/۹ متغیر است (مومین و همکاران، ۲۰۱۱). مشابه با همین تحقیق اندروز و همکاران (۲۰۱۶)، بیان داشتند که آبیاری با فاضلاب دارای SAR بالا، می‌تواند منجر به افزایش معنی‌دار SAR محلول خاک گردد. در بسیاری از موارد، شوری خاک تحت آبیاری با پساب تصفیه شده به دلیل آبشستگی کم و بافت سنگین خاک رخ می‌دهد (کاندلا و همکاران، ۲۰۰۷ و چن و همکاران، ۲۰۱۳).

<sup>1</sup> Murtaza et al

<sup>2</sup> Khaskhoussy et al

<sup>3</sup> Candela et al

<sup>4</sup> Chen et al

همچنین از دید دیگر، مقدار SAR در تیمارهای آبیاری با پساب با افزایش عمق خاک (از لایه‌های سطحی به لایه‌های عمقی‌تر) بطور محسوسی کاهش یافته است در حالیکه برای تیمارهای آب چاه همین روند بطور محسوس‌تر اما افزایشی بوده است. در مطالعات مختلف اثرات متفاوتی از آبیاری با پساب بر روی میزان پارامتر SAR گزارش شده است. برخی محققین این اثر را افزایشی (الف-هنتاتی و همکاران، ۲۰۱۳، خاسخوسی و همکاران، ۲۰۱۵ و چن و همکاران، ۲۰۱۵) و در تحقیقات کمتری (شایان جزی و همکاران، ۱۳۸۹)، این اثر کاهش‌ی گزارش شده است که تا حد زیادی مرتبط با خصوصیات پساب آبیاری و نسبت پارامترهای حاکم بر معادله جذب سدیمی خاک می‌باشد. همچنین، مونزر و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۳)، دریافته‌اند که استفاده از پساب تصفیه شده موجب افزایش قابل توجه SAR لایه‌های بالایی خاک شده است در تحقیق حاضر، افزایش نسبی SAR خاک آبیاری شده با پساب تصفیه شده در توافق با مطالعات مختلف (لی و همکاران، ۲۰۰۹ و موین و همکاران، ۲۰۱۱) می‌باشد.

افزایش SAR خاک در نتیجه استفاده بلندمدت از پساب‌ها، می‌تواند باعث تخریب مسیرهای جریان آب در لایه‌های خاک شده و با کمبود موقت تهویه موردنیاز، به رشد محصول و عملکرد آسیب وارد نماید (لوی و همکاران، ۲۰۱۴). شرایط اولیه خاک و کیفیت آب آبیاری، در شرایط ثانویه پایداری خاک و خاکدانه‌ها و حجم منافذ قابل زهکشی بسیار مؤثر است (مامدو، ۲۰۱۴)، به گونه‌ای که، خطر تخریب خاکدانه‌ها و سدیمی شدن خاک در خاک‌هایی با درصد رس پایین کمتر می‌باشد، حتی اگر کیفیت پساب مورد استفاده پایین بوده و میزان سدیم آن بالا باشد (گارسیا-اورنس و همکاران، ۲۰۱۵،<sup>۵</sup> لوی و همکاران، ۲۰۰۳).

### کربن آلی خاک (OC)

بعد از pH، کربن آلی خاک (OC) مهم‌ترین شاخص کیفیت خاک و نقش اصلی را در سیکل غذایی گیاه بازی می‌کند (راتان و همکاران، ۲۰۰۵). چنین عملکردی از آبیاری با پساب به معنای حفظ پایداری کیفی خاک می‌باشد. در سال‌های اخیر، این نقش پساب‌ها در غنی‌سازی ماده آلی خاک در کنار سایر ریز مغذی‌ها، به یک شیوه به‌زرعی برای احیاء حاصلخیزی خاک و برگشت مواد آلی به خاک تبدیل شده است (سامیا و همکاران، ۲۰۱۳). بنا بر گزارش مالدونادو و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۰۸)، محتوای مواد آلی یک فاکتوری مهم و مؤثر بر حرکت‌پذیری فلزات در خاک‌های با رژیم طولانی مدت آبیاری با پساب می‌باشد.

سطوح بالای ماده آلی در خاک، نگهداشت فلزات سنگین توسط این متغیر را یادآوری می‌نماید. ر بین پارامترهای شیمیایی مورد بررسی در این تحقیق، محتوای کربن آلی خاک بیشترین تأثیرپذیری را نشان داده و آبیاری با پساب تأثیر بسزایی بر افزایش محتوای مواد آلی خاک داشته است. مطابق نتایج ارائه شده، درصد کربن آلی خاک در نتیجه آبیاری با پساب افزایش یافته است. اختلاف بین میزان کربن آلی اندازه‌گیری شده در لایه ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک دو تیمار آبیاری محسوس‌تر و بیشتر بوده است. همانطور که در شکل (۱، الف) نشان داده شده است، مقدار کربن آلی این لایه تحت آبیاری پساب از ۱/۲۱ به ۲/۱۲ درصد رسیده است که معادل افزایش ۷۶ درصدی است و با نتایج بلید و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۲)، مطابقت زیادی دارد که افزایش حدود ۱۰۰ درصدی را گزارش نمودند. همچنین، مقدار کربن آلی در خاک‌های آبیاری شده با آب چاه در لایه‌های سطحی بیشتر بوده است و با افزایش عمق خاک روند کاهش نشان می‌دهد. مقدار کربن آلی اندازه‌گیری شده در کلیه نمونه‌های خاک در تیمارهای آبیاری

<sup>1</sup> Olfa Hentati et al

<sup>2</sup> Mounzer

<sup>3</sup> Levy et al

<sup>4</sup> Mamedov

<sup>5</sup> García-Orenes et al

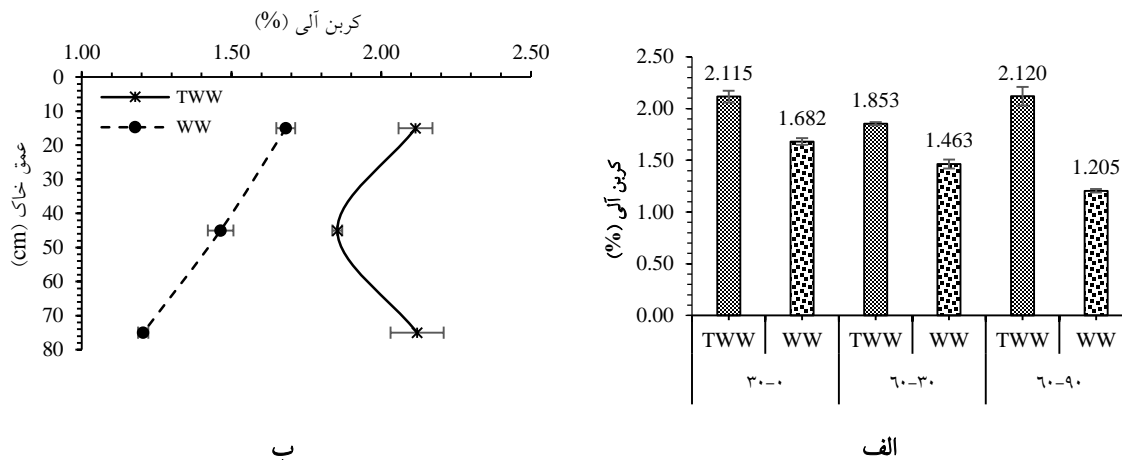
<sup>6</sup> Organic Carbon

<sup>7</sup> Samia et al

<sup>8</sup> Maldonado et al

<sup>9</sup> Belaid et al

شده با پساب از ۱/۵۷ تا ۲/۹۸ درصد و در تیمارهای آبیاری شده با آب چاه از ۱/۱۰ تا ۱/۹۸ درصد متغیر بود. نتایج آزمایشات بیگ‌هرچگانی و بنی‌طالبی (۱۳۹۲)، حاکی است که آبیاری با پساب کربن آلی خاک را افزایش داده است ( $p < 0/05$ ). زیرا پساب برخلاف آب چاه حاوی کربن آلی است که با BOD و COD نمایش داده می‌شود. پژوهشگران دیگر مانند دریچزل و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) نیز نتیجه مشابهی را گزارش کردند.



شکل ۲. متوسط مقدار کربن آلی (OC) در لایه‌های خاک تحت تیمارهای مختلف آبیاری

همچنین نتایج بدست آمده می‌تواند نشانگر تأثیر نسبتاً مشخص پساب بر خاک (تا عمق مورد بررسی) باشد. عبارتی پساب با دارا بودن مواد معدنی و آلی مختلف باعث تغییر نسبی محتوای کربن آلی خاک شده است. اگرچه با توجه به پایین بودن محتوای کربن آلی در لایه‌های زیرین خاک آبیاری شده با آب چاه، میزان افزایش آن در لایه‌های زیر سطحی محسوس‌تر و بیشتر از لایه سطحی بوده است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که مقدار کربن آلی در خاک‌های آبیاری شده با پساب فاضلاب کاهش یافته است و این کاهش در در ارتباط با افزایش فعالیت‌های میکروبی به دلیل بالا رفتن C و N در نتیجه تأثیر فاضلاب است (تارچونا و همکاران، ۲۰۱۰).

#### پارامترهای روتین شیمیایی خاک (pH, EC)

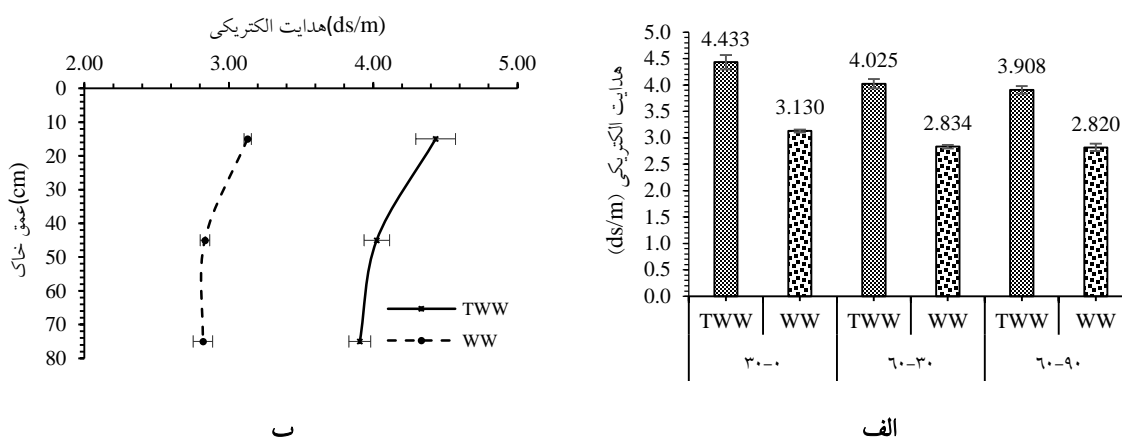
بالا بودن مقدار هدایت الکتریکی خاک حاکی از شور شدن خاک است که عوارض منفی مهمی بر فعالیت‌های کشاورزی پایدار دارد (کلی و همکاران، ۲۰۱۰). بر اساس نتایج بدست آمده از شکل (۳، الف و ب) تأثیر بلند مدت آبیاری با پساب بر تغییر و افزایش هدایت الکتریکی خاک مشخص و قابل توجه است. متوسط مقدار EC لایه‌های مختلف خاک تیمار شده با پساب ۴/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و در خاک‌های آبیاری شده با آب چاه ۲/۹۳ دسی‌زیمنس بر متر بدست آمده است. همچنین مقدار افزایش هدایت الکتریکی در لایه‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک آبیاری شده با پساب نسبت به آب چاه به ترتیب ۴۳، ۴۱ و ۳۹ درصد بوده است. این نتایج حاکی از تأثیر یکنواخت آبیاری با پساب بر عمق ۹۰ سانتی‌متری خاک است. در تأیید یافته‌های تحقیق حاضر، دیدگاه‌های مشابهی توسط بسیاری از محققان در مورد افزایش

<sup>1</sup> Drechsel et al

<sup>2</sup> Tarchouna et al

<sup>3</sup> Klay et al

شوری و سدیمی شدن خاک در لایه بالایی و سطحی خاک در نتیجه آبیاری با پساب تصفیه شده بیان شده است (حسنلی و همکاران، ۲۰۰۸، امیری و همکاران، ۲۰۰۸، و لاورنسن و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲).



شکل ۳. متوسط مقدار هدایت الکتریکی (EC) در لایه های خاک تحت تیمارهای مختلف آبیاری

میزان EC با مقادیر کمتر از ۴ دسی زیمنس بر متر بیانگر آن است که خاک منطقه غیرشور شده (قدیر و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰) و ریسک شور شدن اراضی منطقه مورد مطالعه را پایین برآورد می نماید. اما ادامه آبیاری طولانی مدت با پساب تصفیه شده، از علل شور شدن بیش از حد خاک است. علاوه بر این، اگر بارش منطقه کمتر از ۲۵۰ میلی متر باشد، خطر بالای شور شدن خاک نیز وجود دارد (ملگار و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۹). تحقیقات ساسانی (۱۳۹۴) که میزان EC در تیمار آبیاری با آب چاه در دامنه ۴/۱۵ تا ۶/۸ و در تیمار آبیاری با پساب در دامنه ۱/۱۶ تا ۱/۶۱ دسی زیمنس بر متر قرار دارد که حاکی از اثر معنی دار آبیاری با پساب در اراضی تحت آبیاری بر میزان EC بود. وجود نمک های محلول، سدیم، منیزیم و کلسیم موجود در فاضلاب می تواند هدایت الکتریکی خاک را افزایش می دهد (قنبری و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۷، محمد و مظهره<sup>۵</sup>، ۲۰۰۳، و مونهت و همکاران<sup>۶</sup>، ۱۹۹۶). لازم به ذکر است که به علت آشوبی، تجمع نمک در لایه های عمیق تر بیشتر از لایه های سطحی بود (ابو عواد<sup>۷</sup>، ۱۹۹۶). همچنین، نتایج یافته های خاسخوسی و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که هدایت الکتریکی تیمارهای خاک آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده به طور قابل توجهی در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافته است که این افزایش مربوط به اعماق ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی متر خاک بوده است. با این حال، آبیاری با آب شیرین به کاهش معنی دار EC منجر شده است. نتایج مشابهی در تأیید این موضوع گزارش شده است (راتان و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۰۵؛ روشن و همکاران، ۲۰۰۷). این افزایش متأثر از غلظت بالای کاتیون هایی مانند سدیم و پتاسیم در فاضلاب گزارش شده است (روشن و همکاران، ۲۰۰۷).

<sup>1</sup> Laurenson et al

<sup>2</sup> Qadir et al

<sup>3</sup> Melgar et al

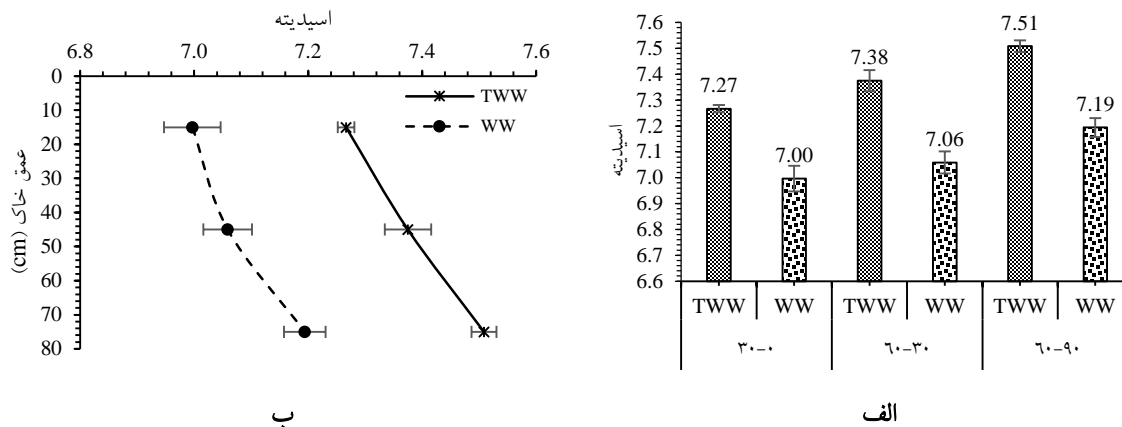
<sup>4</sup> Ghanbari et al

<sup>5</sup> Mohammad & Mazahreh

<sup>6</sup> Monnett et al

<sup>7</sup> Abu-Awwad

<sup>8</sup> Rattan et al



شکل ۴. متوسط مقدار اسیدیته (pH) در لایه‌های خاک تحت تیمارهای مختلف آبیاری

کرکهام (۲۰۰۶)، مهم‌ترین عامل در تحرک‌پذیری برخی فلزات تحرک‌پذیر (Zn) را pH عنوان نموده است. همچنین، حلالیت فلزات سنگین در pH های بالا رو به افزایش و در pH های پایین رو به کاهش است. در مطالعه حاضر، با محدوده pH بین ۷ تا ۷/۹۳، محدودیت تحرک پذیری فلزات را نشان می‌دهد. مشابه این دامنه از تغییرات نیز منجر به چنین نتیجه‌گیری در مطالعه خاسخوسی و همکاران (۲۰۱۵) شده است. بطور نسبی آبیاری با پساب باعث قلیائی شدن (افزایش pH) خاک‌های تخت آبیاری شده است. همانطور که در شکل (۴، الف) نشان داده شده است، متوسط pH اندازه‌گیری شده در لایه ۹۰ سانتی‌متری تیمارهای خاک آبیاری شده با پساب ۷/۳۸ و برای تیمارهای خاک آبیاری شده با آب چاه ۷/۰۸ بوده است. چنانکه فالکینر و اسمیت<sup>۲</sup> (۱۹۹۷)، این افزایش را بین ۰/۳ تا ۰/۷ گزارش نمودند. چنین نتیجه‌ای تا حدود یک واحد نیز در نتایج مطالعات استوارت و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۰) نیز مشاهده می‌گردد. ساسانی (۱۳۹۴)، pH خاک‌های تحت آبیاری با آب چاه را بین ۷/۹ تا ۸/۳ برای اراضی تحت آبیاری با پساب بین ۶/۹ تا ۷/۹ گزارش نمود.

برخی از تحقیقات نشان داد که آبیاری با پساب باعث کاهش pH خاک شده است. این کاهش به دلیل تجزیه مواد آلی و تولید اسیدهای آلی بود. دیگر محققین (استوارت و همکاران، ۱۹۹۰، مانسینو و پیپر<sup>۴</sup>، ۱۹۹۲، راتان و همکاران، ۲۰۰۵، و روشن و همکاران، ۲۰۰۷) نشان دادند که آبیاری با فاضلاب تصفیه شده باعث افزایش pH خاک شد. همچنین، تارچونا و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۰) نیز، افزایش pH خاک را متأثر از خصوصیات شیمیایی و محتوای بالای کاتیون‌های اساسی مانند سدیم، کلسیم و منیزیم موجود در فاضلاب در نتیجه یک دوره آبیاری طولانی با فاضلاب نسبت دادند. که این نتیجه توسط شیپر و همکاران<sup>۶</sup> (۱۹۹۶) و گونزی و مونوندو<sup>۷</sup> (۲۰۰۸) تأیید شده است.

<sup>1</sup> Kirkham

<sup>2</sup> Falkiner & Smith

<sup>3</sup> Stewart et al

<sup>4</sup> Mancino & Pepper

<sup>5</sup> Tarchouna et al

<sup>6</sup> Schipper

<sup>7</sup> Gwenzi & Munondo

مطابق نتایج ارائه شده در شکل (۱۰، ب)، مقدار pH خاک با افزایش عمق، با یک روند مشابه در هر دو تیمار آبیاری افزایش یافته است. مقدار افزایش pH خاک تحت تأثیر آبیاری با پساب در لایه‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری به ترتیب ۳/۸، ۴/۵ و ۴/۴ درصد بدست آمده است. این تغییرات کوچک در pH خاک به عنوان تابعی از پساب مورد استفاده در آبیاری ممکن است در ارتباط با اضافه شدن غلظت‌های بالای سولفات، انتشار کاتیون‌های قابل تبادل در نتیجه معدنی شدن مواد آلی (کزیلوگلو و همکاران؛ ۲۰۰۸)، اکسیداسیون ترکیبات آلی و نیتریفیکاسیون آمونیاک و یا شسته شدن کاتیون‌های اصلی (ژو و همکاران، ۲۰۱۰) رخ دهد.

### بحث

با توجه به بحران کمبود منابع آب و لزوم بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف، بهره‌گیری مطلوب و بهینه از پساب فاضلاب شهری یکی از مباحث مهم پژوهش‌ها است. در ایران تاکنون در مورد امکان بهره‌برداری از این منبع، پژوهش‌هایی صورت گرفته است، ولی به نظر می‌رسد که در زمینه اعمال مدیریت صحیح در بهره‌برداری از پساب فاضلاب تصفیه شده و خام در راستای حفظ شرایط زیست محیطی، لازم است که پژوهش‌های جامع‌تری صورت گیرد. زیرا تکیه کردن بر تجارب سایر کشورها (بدون توجه به شرایط بومی هر منطقه) ممکن است صدمات جبران‌ناپذیری بر خاک و کشاورزی وارد نماید. لذا درک و بررسی تغییرپذیری این پارامترها می‌تواند متضمن مدیریت مناسب و بهره‌وری پایدار باشد (آل‌عمران و همکاران، ۲۰۱۳).

### نتیجه‌گیری

نتیجه بررسی استفاده از پساب شهری در اراضی مورد بررسی که بیش از ۱۰ سال تحت آبیاری با پساب شهری بوده‌اند، نشان داد که به علت دسترسی کافی به این منبع و امکان انجام آبشویی، خطر شور شدن این اراضی مرتفع شده است. ولیکن در برخی مناطق، افزایش یون سدیم و مقادیر کمتر یون‌های کلسیم و منیزیم، خطر سدیمی شدن این اراضی را در پی داشته است که با توجه به درصد بالای رس این اراضی، پیامدهای آتی آن شامل سله و کاهش نفوذپذیری کاملاً مشهود است. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات پارامتر SAR میان دو تیمار آبیاری با پساب و آب چاه معنی‌دار نشده است که این موضوع به نسبت‌های مشابه پارامترهای مؤثر بر SAR بود. از طرفی؛ با توجه به شوری پایین پساب ورودی و حجم بالای آب مورد استفاده برای آبیاری و از سویی شوری نبودن خاک‌های منطقه، استفاده از پساب منجر به افزایش قابل توجه میزان شوری اراضی منطقه در مقایسه با اراضی تحت آبیاری با آب چاه نمی‌گردد. نتایج این تحقیق در بررسی میزان تغییر کربن آلی خاک (OC) در نتیجه آبیاری با پساب شهری نشان داد که این اثر معنی‌دار و به میزان ۵۵ درصد افزایش برای حالت آبیاری با پساب در مقایسه با آبیاری با آب چاه متأثر از مواد آلی موجود در پساب می‌باشد. این موضوع ضمن مزیت حاصلخیزکنندگی خاک، می‌تواند موجب تثبیت و متوقف نمودن حرکت-پذیری فلزات سنگین با ایجاد پیوندهای آلی با فلزات سنگین گردد. مطابق با نتایج این مطالعه، آبیاری با پساب شهری منجر به افزایش معنی‌دار ۰/۳ واحدی pH در خاک‌های تحت آبیاری با پساب نسبت به اراضی مشروب از آب چاه می‌باشد که می‌تواند ناشی از آبشویی زیاد کاتیون‌های پایه و اساسی، ورودی‌های بالای نترات و سولفات و یا اکسایش مواد آلی و به دنبال آن تولید اسیدهای آلی باشد. با توجه به منابع آب موجود در منطقه شامل منابع آب زیرزمینی و پساب منطقه و همچنین بررسی آنالیز شیمیایی آب چاه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اراضی مشروب از آن می‌توان دریافت که ضمن محدود بودن این منبع آبی، کیفیت آبی آن باعث تخریب شرایط خاک از لحاظ شوری و در آینده، احتمال عبور از مرز سدیمی شدن را دارد. لذا نمی‌توان به این منبع آبی اتکای لازم را داشت و از آنجایی که منبع آب مناسب‌تری جهت جایگزینی وجود ندارد، می‌بایست با

<sup>1</sup> Kiziloglu et al

<sup>2</sup> Al-Omran

اقدامات تکمیلی جهت بهبود کیفیت پساب، نسبت به این منبع آبی برنامه‌ریزی‌های بلندمدت را انجام داد. کمبود آب و کیفیت پایین منابع آب زیرزمینی منطقه، مدیریت بهینه پساب‌های ورودی را دیکته می‌کند.

## منابع

- بیگی هرچگانی، حبیب‌اله، و بنی طالبی، گلنوش. (۱۳۹۲). اثر بیست و سه سال آبیاری سطحی با پساب شهری بر انباشت بعضی فلزات سنگین در خاک، انتقال به دانه‌های گندم و ذرت و خطرات بهداشتی مرتبط. *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۷(۳)، ۵۸۰-۵۷۰. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26085>
- ساسانی فاطمه. (۱۳۹۴). تحلیل چند متغیره خاک‌های اراضی کشاورزی تحت آبیاری بلند مدت با پساب شهری. پایان نامه دکتری، دانشگاه رازی، کرمانشاه.
- سلگی. عیسی، شاهوردی نیک. مهدی. و رضانی. مهدی. (۱۳۹۹). تأثیر آبیاری با فاضالب تصفیه نشده شهری بر تجمع فلزات سنگین در خاک سطحی و زیرسطحی. *نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۳)، ۳۳۳-۳۱۷. <https://doi.org/10.22034/jest.2018.22585.3165>
- شایان جزی، مینا، قربانی، هادی، و فیضی، محمد. (۱۳۸۹). تأثیر استفاده از پساب در کشاورزی بر برخی خواص شیمیایی خاک. *دومین سمینار ملی جایگاه آب‌های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب- کاربردها در کشاورزی و فضای سبز*، مشهد. <https://civilica.com/doc/103537>
- فرمانی فرد، میلاد، قمرنیا، هوشنگ، پیرصاحب، مقداد، و فتاحی. نظیر. (۱۳۹۶). تأثیر آبیاری بلند مدت با فاضالب تصفیه شده شهری کرمانشاه بر برخی خصوصیات فیزیکی لایه‌های خاک. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۱(۳)، ۴۹۳-۵۰۸. <https://doi.org/10.22092/jwra.2017.113682>
- فرمانی فرد، میلاد، قمرنیا، هوشنگ، پیرصاحب، مقداد، و فتاحی. نظیر. (۱۳۹۵). مطالعه تجمع فلزات سنگین در محصولات مختلف تحت تأثیر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری کرمانشاه. *مجله مدیریت آب و آبیاری*، ۶(۲)، ۱۴۳-۱۳۳. <https://doi.org/10.22059/jwim.2016.64498>

## References

- Abu-Awwad, A.M. (1996). Irrigation water management for onion trickle irrigated with saline drainage water. *Dirasat*, 23, 46-55. <https://eurekamag.com/research/002/879/002879877.php>
- Alghobar, M.A., & Suresha, S. (2015). Evaluation of nutrients and trace metals and their enrichment factors in soil and sugarcane crop irrigated with wastewater. *J. Geosci. Environ, Protect*, 3, 46-56. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.38005>
- Alghobar, M.A., Ramachandra, L., & Suresha, S. (2014). Effect of sewage water irrigation on soil properties and evaluation of accumulation of elements in grass crop in Mysore city, Karnataka, India. *Am. J. Environ. Protect*, 3(5), 283-291. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajep.20140305.22>
- Al-Nakshabandi, G.A., Saqqar, M.M., Shatanawi, M.R., Fayyadand, M., & Al-Horani, H. (1997). Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan. *Agric. Water Manage*, 34 (1), 81-94. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v34y1997i1p81-94.html>
- Al-Omran, A.M., Al-Wabel, M.I., El-Maghraby, S.E., Nadeem, M.E., & Al-Sharani. S. (2013). Spatial variability for some properties of the wastewater irrigated soils. *J. Saudi Soc. Agric. Sci*, 12(2), 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2012.12.001>

- Amin, N., Hussain, A., Alamzeb, S., & Begum, S. (2012). Accumulation of heavy metals in edible parts of vegetables irrigated with waste water and their daily intake to adults and children, District Mardan Pakistan. *Food Chem*, 136(3-4), 1515–1523. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.058>
- Amiri, S.S., Maralian, H., & Aghabarati, A. (2008). Heavy metal accumulation in under crown *Olea europaea* L. forest irrigated with wastewater. *Afr. J. Biotechnol*, 7(21). <https://core.ac.uk/reader/30640730>
- Ammeri, R.W., Hidri, Y., Souid, F., Simeone, G.D.R., Hajjaji, F., Moussa, M., Hassen, A., & Eturki, S. (2023). Improvement of degraded agricultural soil in an arid zone following short- and long-term treated municipal wastewater application: A case study of Gabes perimeter, Tunisia. *Applied Soil Ecology*, 182, 104685. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104685>
- Andrews, D.M., Robb, T., Elliott, H., & Watson, J.E. (2016). Impact of long-term wastewater irrigation on the physicochemical properties of humid region soils: The Living Filter site case study. *Agric. Water Manage*, 178, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.001>
- Angelakis, A.N., Bontoux, L., Lazarova, V. (2003). Challenges and prospectives for water recycling and reuse in EU countries. *Water Sci, Technol, Water Supply*, 3(4), 59–68. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2003.0046>
- Ayers, R.S., & Westcot, D.E.W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. Rome. 29 Rev, FAO Irrigation and drainage paper. <https://www.fao.org/3/t0234e/T0234E00.htm>
- Bame, I.B., Hughes, J.C., Titshall, L.W., & Buckley, C.A. (2014). The effect of irrigation with anaerobic baffled reactor effluent on nutrient availability, soil properties and maize growth. *Agric. Water Manage*, 134, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.011>
- Bao, Z., Wu, W., Liu, H., Chen, H., & Yin, S. (2014). Impact of long-term irrigation with sewage on heavy metals in soils, crops, and groundwater – a case study in Beijing. *Pol. J. Environ. Stud*, 23(2), 309–318. [http://www.pjoes.com/pdf-89196-23055?filename=Impact%20of%20Long\\_Term.pdf](http://www.pjoes.com/pdf-89196-23055?filename=Impact%20of%20Long_Term.pdf)
- Beigi Harchgani, H.A., & Bani Talebi, G. (2012). The effect of twenty-three years of surface irrigation with urban wastewater on the accumulation of some heavy metals in the soil, transfer to wheat and corn seeds and related health risks. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 27(3), 580–570. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26085> [In Persian]
- Belaid, N., Neel, C., Kallel, M., Ayoub, T., Ayadi, A., & Baudu, M. (2012). Long term effects of treated wastewater irrigation on calcisol fertility: a case study of Sfax-Tunisia. *Agric. Sci*, 3, 702–713. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2012.35085>
- Bichai, F., Polo-López, M.I., & Ibanez, P.F. (2012). Solar disinfection of wastewater to reduce contamination of lettuce crops by *Escherichia coli* in reclaimed water irrigation. *Water Res*. 46, 6040–6050. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.08.024>
- Candela, L., Fabregat, S., Josa, A., Suriol, J., Vignes, N., & Mas, J. (2007). Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: application in a golf course (Girona, Spain). *Sci. Total Environ*, 374, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.028>
- Chen, W., Lu, S., Pan N, Wang, Y., & Wu, L. (2015). Impact of reclaimed water irrigation on soil health in urban green areas. *Chemosphere*, 119, 654–661. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.035>
- Chen, W.P., Lu, S.D., Pan, N., & Jiao, W.T. (2013). Impacts of long-term reclaimed water irrigation on soil salinity accumulation in urban green land in Beijing. *Water Resour. Res*, 49, 7401–7410. <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20550>
- Drechsel, P., Ascott, Ch., Raschid-sally, L., Redwood, M., & Bahri, A. (2010). *Wastewater Irrigation and Health Assessing and Mitigating Risk in Low-income Countries*. Earthscan, London. <https://idrc-rdi.ca/sites/default/files/openebooks/475-8/index.html>



- Emongor, V.E., & Ramolemana, G.M. (2004). Treated sewage effluent (water) potential to be used for horticultural production in Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 1101-1108. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.003>
- Falkiner, R.A., & Smith, C.J. (1997). Changes in soil chemistry in effluent-irrigated *Pinus radiata* and *Eucalyptus grandis*. *Aust. J. Soil Res*, 35(1), 131-147. <https://doi.org/10.1071/S95080>
- Farhadkhani, M., Nikaeen, M., Hadi, M., Gholipour, S., Yadegarfar, Gh. (2020). *Campylobacter* risk for the consumers of wastewater-irrigated vegetables based on field experiments. *Chemosphere* 251, 126408. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126408>.
- Farhadkhani, M., Nikaeen, M., Yadegarfar, Gh., Hatamzadeh, M., Pourmohammadbagher, H., Sahbaei, Z., & Rahmani, H.R. (2018). Effects of irrigation with secondary treated wastewater on physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area. *Water Res.* 144, 356-364. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.047>
- Farmanifard, M., Ghamarnia, H., Pirsahab, M., & Fatahi, N. (2016). Investigation of heavy metal accumulation on different crop under irrigation with Kermanshah treated municipal wastewater. *Water and Irrigation Management*, 6(2), 347-365. <https://doi.org/10.22059/jwim.2016.64498> [In Persian]
- Farmanifard, M., Ghamarnia, H., Pirsahab, M., & Fatahi, N. (2017). Impact of Long-Term Irrigation with Kermanshah Municipal Treated Wastewater on Some Soil Physical Properties. *Impact of Long-Term Irrigation with Kermanshah Municipal Treated Wastewater on Some Soil Physical Properties. Journal of Water Research in Agriculture*, 31(3), 493-508. <https://doi.org/10.22092/jwra.2017.113682> [In Persian]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). *Water NEWS: Climate Change & Water*. <http://www.fao.org/nr/water/news/climchange.html>
- Gambrell, R.P. (1994). Trace and toxic metals in wetlands-a review. *J Environ Quality*, 23(5), 883-891. <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300050005x>
- García-Orenes, F., Caravaca, F., Morugán-Coronado, A., & Roldán, A. (2015). Prolonged irrigation with municipal wastewater promotes a persistent and active soil microbial community in a semiarid agroecosystem. *Agric. Water Manage*, 149, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.030>
- Ghanbari, A., Abedikoupai, J., & TaieSemiromi, J. (2007). Effect of municipal wastewater irrigation on yield and quality of wheat and some soil properties in sistan zone. *Journal of Science and Technology Agricultural and Natural Recourse*, 10(4), 59-74. <https://www.researchgate.net/publication/26622333>
- Gunston, H. (2008). Wastewater use in irrigated agriculture: confronting the livelihood and Environmental realities. In: Scott, C.A., Faruqui, N.I., Raschid-Sally, L. (Eds.), *Experimental Agriculture*. CABI Publishing. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9780851998237.0000>
- Gwenzi, W., & Munondo, R. (2008). Long-term impacts of pasture irrigation with treated sewage effluent on nutrient status of a sandy soil in Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 82, 197-207. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-008-9181-3>
- Hassanli, A., Javan, M., & Saadat, Y. (2008). Reuse of municipal effluent with drip irrigation and evaluation the effect on soil properties in a semi-arid area. *Environ. Monit. Assess*, 144, 151-158. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9953-2>
- Hussain, M.I., Muscolo, A., Farooq, M., & Ahmad, W. (2019). Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agric. Water Manag*, 221, 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.014>
- Jeong, H., Bhattarai, R., Adamowski, J., & Yu, D.J. (2020). Insights from socio-hydrological modeling to design sustainable wastewater reuse strategies for agriculture at the watershed scale. *Agric. Water Manag*, 231, 105983. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105983>.

- Khaskhoussy, K., Kahlaoui, B., & Nefzi, B.M. (2015). Effect of treated wastewater Irrigation on heavy metals distribution in a Tunisian soil engineering. *Eng. Technol. Appl. Sci.Res*, 5(3), 805-810. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.18803>
- Kirkham, M.B. (2006). Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*, 137(1-2), 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.024>
- Kiziloglu, F.M., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y., & Dursun, A. (2008). Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. *Agricultural Water Management*, 95,716 -724. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.008>
- Klay, S., Charef, A., Ayed, A., Houman, B., & Rezgu, F. (2010). Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). *Desalination*, 253, 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.10.019>
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and Diffusivity: Laboratory methods. In: A. Klute (Ed.), *Method of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. SSSA Publisher, 687-734. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
- Lado, M., & Ben-Hur, M. (2009). Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: A review. *Soil. Till. Res*, 106, 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.011>
- Laurenson, S., Bolan, N.S., Smith, E., & McCarthy, M. (2012). Review: use of recycled wastewater for irrigating grapevines. *Aust. J. Grape Wine Res*, 18, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00170.x>
- Levy, G.J., Fine, P., Goldstein, D., Azenkot, A., Zilberman, A., Chazan, A., & Grinhut, T. (2014). Long term irrigation with treated wastewater (TWW) and soil sodification. *Biosyst. Eng*, 128, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.05.004>
- Levy, G.J., Mamedov, A.I., & Goldstein, D. (2003). Sodicty and water quality effects on slaking of aggregates from semiarid soils. *Soil. Sci*, 168(8), 552–562. <http://dx.doi.org/10.1097/01.ss.0000085050.25696.52>
- Li, P., Wang, X., Allinson, G., Li, X., & Xiong, X. (2009). Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang, China. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 516–521. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.130>
- Maldonado, V.M., Arias, H.O.R., Quintana, R., Saucedo, R.A., Gutierrez, M., Ortega, J.A., & Nevarez, G.V. (2008). Heavy metal content in soils under different wastewater irrigation patterns in Chihuahua, Mexico. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 5(5), 441-449. <https://doi.org/10.3390/ijerph5050441>
- Mancino, C.F., & Pepper, I.L. (1992). Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: soil quality. *Agron. J*, 84, 650–654. <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400040023x>
- Maryam, B., Buyukgungor, H. (2019). Wastewater reclamation and reuse trends in Turkey: opportunities and challenges. *J. Water Process Eng*, 30, 100501. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.10.001>
- Melgar, J.C., Mohamed, Y., Serrano, N., Garcia-Galavis, P.A., Navarro, C., Parra, M.A., Benlloch, M., & Fernandez-Escobar, R. (2009). Long term responses of olive trees to salinity. *Agric. Water Manag.* 96, 1105-1113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.009>
- Mohammad, M. J., & Mazahreh, N. (2003). Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. *Comm. Soil Sci. Plant Anal*, 34, 1281–1294. <https://doi.org/10.1081/CSS-120020444>

- Monnett, G.T., Reneau, R.B., & Hagedorn, C. (1996). Evaluation of spray irrigation for on-site wastewater treatment and disposal on marginal soils. *Water Environmental Research*, 68, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.032>
- Morugán-Coronado, A., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., & Mataix-Beneyto, J. (2011). Short-term effects of treated wastewater irrigation on Mediterranean calcareous soil. *Soil and Tillage Research*, 112(1), 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.11.004>
- Mounzer, O., Pedrero-Salcedo, F., Nortés, P.A., Bayona, J.-M., Nicolás-Nicolás, E., & Alarcón, J.J. (2013). Transient soil salinity under the combined effect of reclaimed water and regulated deficit drip irrigation of Mandarin trees. *Agric. Water Manag.*, 120, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.014>
- Murtaza, G., Usman, M., & Ahmad, H.R. (2015). Monitoring and management of wastewater for safer crop production. *Global Journal on Advances Pure and Applied Sciences (GJPAS)*, 5, 78-85. <https://www.researchgate.net/publication/344335510>
- Muyen, Z., Moore, G.A., & Wrigley, R.J. (2011). Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agric. Water Manage.*, 99(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.021>
- Olfia Hentati, O., Chaker, S., Wali, A., Ayoub, T., & Ksibi, M. (2013). Effects of long-term irrigation with treated wastewater on soil quality, soil-borne pathogens, and living organisms: case study of the vicinity of El Hajeb (Tunisia). *Environ. Monit. Assess.*, 186(5), 2671-2683. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-013-3570-z>
- Pena, A., Delgado-Moreno, L., & Rodríguez-Liébana, J.A. (2020). A review of the impact of wastewater on the fate of pesticides in soils: effect of some soil and solution properties. *Sci. Total Environ.*, 718, 134468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134468>
- Pinto, U., Maheshwari, B.L., Grewal, H.S. (2010). Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties. *Resour. Conserv. Recycl.*, 54 (7), 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.09.007>
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P.G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P.S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agric. Water Manage.*, 97(4), 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>
- Radingoana, M.P., Dube, T., & Mazvimavi, D. (2020). Progress in greywater reuse for home gardening: opportunities, perceptions and challenges. *Phy. Chem. Earth.* <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102853>.
- Rahman, M.M., Hagare, D., Maheshwari, B., & Dillon, P. (2015). Impacts of prolonged drought on salt accumulation in the root zone due to recycled water irrigation. *Water Air Soil Pollut.* 226, 90–108. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-015-2370-1>
- Rana, L., Dhankhar, R., & Chhikara, S. (2010). Soil characteristics affected by long-term application of sewage wastewater. *Int. J. Environ. Res.*, 4(3), 513-518. <https://www.researchgate.net/publication/285800192>
- Rattan, R.K., Datta, S.P., Chhonkar, P.K., Suribabu, K., & Singh, A.K. (2005). Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agric. Ecol. Environ.*, 109(3), 310–322. <https://www.researchgate.net/publication/285800192>
- Romano, G., Rapposelli, A., & Marrucci, L. (2019). Improving waste production and recycling through zero-waste strategy and privatization: an empirical investigation. *Resour. Conservat. Recycl.*, 146, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.030>
- Rusan M., Hinnawi S., & Rousan L. (2007). Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, 215, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.032>
- Salgi, I., Shahvardi Nik, M., & Ramazani, Mehdi. (2019). The effect of irrigation with untreated urban wastewater on the accumulation of heavy metals in surface and subsurface soil. *Journal of*

- Environmental Sciences and Technology, 22(3), 333-317. <https://doi.org/10.22034/jest.2018.22585.3165> [In Persian]
- Samia, K., Abdelkarim, C., Hidri-Yassin, H., & Teruo, H. (2013). The effect of long-term soil irrigation by wastewater on organic matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, and heavy metals evolution: case study of Zaouit Sousse (Tunisia). *Arab. J. Geosci*, 6(11), 4337–4346. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-012-0666-7>
- Sassani, F. (2014). Multivariate analysis of agricultural soils under long-term irrigation with municipal wastewater. PhD thesis, Razi University, Kermanshah. [In Persian]
- Schipper, L.A., Williamson, J.C., Kettles, H.A., & Speir, T.W. (1996). Impact of land-applied tertiary-treated effluent on soil biochemical properties. *J. Environ. Qual*, 25, 1073–1077. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500050020x>
- Shayan Jazi, M., Ghorbani, H., & Feizi, M. (2010). The effect of wastewater uses in agriculture on some soil chemical properties. The second national seminar on the role of recycled water and wastewater in water resource management - applications in agriculture and green space, Mashhad. <https://civilica.com/doc/103537> [In Persian]
- Silva, L.V.B.D., de Lima, V.L.A., Pearson, H.W., Silva, T.T.S., Maciel, C.L.S., & Sofiatti, V. (2016). Chemical properties of a Haplustalf soil under irrigation with treated wastewater and nitrogen fertilization. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 20(4), 308-315. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n4p308-315>
- Singh, P.K., Deshbhratar, P.B., & Ramteke, D.S. (2012). Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties. crop yield and environment. *Agric. Water Manage*, 103, 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.022>
- Singh, R.P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28 (2), 347-358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- Smith, S.R. (1996). Agricultural recycling of sewage sludge and the environment. CABI Press. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500060044x>
- Sparling, D.W., & Lowe, T.P. (1998). Metal concentrations in aquatic macrophytes as influenced by soil and acidification. *Water, Air and Soil Pollution*, 108(1-2), 203-221. <https://doi.org/10.1023/A:1005090224878>
- Stevens, D., McLaughlin, M., & Smart, M.K. (2003). Effects of long-term irrigation with reclaimed water on soils of the Northern Adelaide Plains, South Australia. *Soil Res*, 41, 933–948. <http://dx.doi.org/10.1071/SR02049>
- Stewart, H., Hopmans, P., Flinn, D., & Hillman, T. (1990). Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia. *Environ. Pollut*, 63(2), 155-177. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(90\)90065-K](https://doi.org/10.1016/0269-7491(90)90065-K)
- Tabari, M., & Salehi, A. (2009). Long-term impact of municipal sewage irrigation on treated soil and black locust trees in a semi-arid suburban area of Iran. *J. Environ. Sci (China)*, 21, 1438–1445. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62437-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62437-7)
- Tarchouna, L.G., Merdy, P., Raynaud, M., Pfeifer, H.R., & Lucas, Y. (2010). Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: Evolution of soil physic-chemical properties. *Applied Geochemistry*, 25, 1703–1710. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.08.018>
- United Nations. (2017). World Population Prospects: 2017 Revision Population Database online at <http://www.un.org/esa/population/unpop.htm> (accessed on 22nd May 2018).

- Usman, A.R.H., & Ghallab, A. (2006). Heavy-metal fractionation and distribution in soil profiles short-term-irrigated with sewage wastewater. *Chem. Ecol*, 22(4), 267-278. <https://doi.org/10.1080/02757540600812859>
- World Health Organization (WHO). (2003). *Guidelines for Drinking Water Quality*. 3rd Ed. Geneva. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>