



Assessment of the sustainability indicators of groundwater resources (case study of Mahidasht aquifer)

Ali Fattahi Chaghabaghi¹ , Ali Mohammad Akhund Ali² , Arash Azari³ 

¹ Ph.D student, water resources engineering, Department of Hydrology and Water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: ali.fattahi.ch@gmail.com

² Corresponding Author, professor, Department of Hydrology and Water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: aliakh@scu.ac.ir

³ Associate professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: arashazari.ir@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

Groundwater is a limited and vulnerable resource that is reversible in the conditions of balance between nutrition and extraction. Mahidasht plain of Kermanshah province, which in the past was one of the most fertile and vast plains in the west of Iran, the trend of decreasing groundwater, especially in recent years, is quite evident.

Methodology

It has been tried in this article by using Mahidasht plain underground water modeling using ModFlow model, Mahidasht plain underground water stability based on analysis of the current situation and four management scenarios (scenario of continuation of the current trend, scenario of adjustment of permits and reduction of 30 The percentage of underground water extraction, the scenario of removing unauthorized wells and adjusting the permits and reducing the extraction of underground water by 40 percent and the scenario of increasing the extraction of underground water and developing unauthorized cultivation) should be investigated.

Results and discussion

The results show the unstable situation of the Mahidasht aquifer, and the application of the management scenario of 30-40% reduction in groundwater extraction will not stabilize the central areas of the aquifer.

Conclusions

The unstable situation of this plain means many social, economic, political, security and environmental risks. In other words, this plain, more than ever, wants to control the harvest and should be prioritized in the water scarcity adaptation programs of politicians, planners, managers and all water guarantors in the region and removed from the list of susceptible areas for agricultural development. It is recommended to follow the principles of quality sustainability of the aquifer, and encourage farmers to change the harvesting pattern from agriculture to industry with incentive policies.

Keywords: Groundwater, Mahidasht aquifer, GMS Model, Resiliency

Article Type: Research Article

Article history: Received: 01 May 2023 Revised: 26 June 2023 Accepted: 18 July 2023 ePublished: 15 September 2023

Cite this article: Fattahi Chaghabagi, A., Akhund Ali, A.M., & Azari, A. (2023). Assessment of the sustainability indicators of groundwater resources (case study of Mahidasht aquifer), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(2), 1-14. DOI:10.22126/ATWE.2023.9082.1050

Publisher: Razi University

© The Author(s).





ارزیابی وضعیت شاخص های پایداری منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان ماهیدشت)

علی فتاحی چقباگی^۱، علی محمد آخوندعلی^۲، آرش آذری^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. رایانامه:

ali.fattahi.ch@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استاد، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. رایانامه: aliakh@scu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: arashazari.ir@gmail.com

چکیده

آب‌های زیرزمینی منابعی محدود و آسیب پذیرند که در شرایط تعادل بین تغذیه و استحصال برگشت پذیر هستند. دشت ماهیدشت استان کرمانشاه که در گذشته به عنوان یکی از حاصلخیزترین و پهناورترین دشتهای غرب ایران بوده است، روند رو به کاهش آب زیرزمینی به ویژه در سال‌های اخیر کاملاً مشهود است. سعی شده است در این مقاله با بهره گیری از مدل سازی آب زیرزمینی دشت ماهیدشت با استفاده از مدل ModFlow، پایداری آب زیرزمینی دشت ماهیدشت بر مبنای تحلیل وضعیت موجود و چهار سناریوی مدیریتی (سناریو ادامه روند کنونی، سناریو تعدیل پروانه‌ها و کاهش ۳۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، سناریو حذف چاه‌های غیرمجاز و تعدیل پروانه‌ها و کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی و سناریو افزایش استحصال آب زیرزمینی و توسعه کشت غیر مجاز) با استفاده از شاخص GSI مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بیانگر وضعیت ناپایدار آبخوان ماهیدشت است و اعمال سناریو مدیریتی بصورت کاهش ۳۰ و ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی نیز مناطق مرکزی آبخوان را پایدار نخواهد کرد و در بالاترین حالت ممکن شاخص مذکور ۰/۶ خواهد بود. وضعیت ناپایدار این دشت بیش از هر زمان، نیاز به کنترل برداشت داشته و باید در اولویت برنامه‌های سازگاری با کم آبی سیاستمداران، برنامه ریزان، مدیران و همه گروداران آب منطقه قرار گرفته و از فهرست مناطق مستعد توسعه کشاورزی حذف گردد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آبخوان ماهیدشت، مدل GMS، بازگشت پذیری

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۱ اسفند ۱۴۰۲ اصلاح: ۰۵ تیر ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۷ تیر ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ شهریور ۱۴۰۲

استناد: فتاحی چقباگی، ع، آخوندعلی، م.ع، و آذری، آ. (۱۴۰۲). ارزیابی وضعیت شاخص های پایداری منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی آبخوان ماهیدشت)، فناوری

های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۲)، ۱-۱۴. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9082.1050



مقدمه

اهمیت روزافزون منابع آب زیرزمینی به عنوان در دسترس ترین منابع آب شیرین در کشورهای خشک و نیمه خشک بر همگان آشکار است. به گزارش یو اس جی اس¹، از یک درصد سهم آب شیرین موجود بر کره خاکی، نود و نه درصد آن مختص آب زیرزمینی و یک درصد باقیمانده سهم دریاچه ها و رودخانه ها است. فراوانی ظاهری این منبع نسبت به دیگر منابع آب شیرین و سهولت دسترسی به آن با بهره گیری از فناوری های نوین نظیر پمپاژ و ...، باعث شده است سهم برداشت از این منبع بر سهم تغذیه طبیعی آن سبقت گیرد و تعادل و پایداری آن را با چالش مواجه سازد. در صورت ادامه این روند، وقوع بحران آب دور از انتظار نیست. افت سطح آب زیرزمینی برای چندین دوره متوالی، می تواند از نشانه های شروع دوران بحرانی برای آب باشد. وضعیتی که در آن آب در دسترس در یک حوضه آبخیز از میزان آب مورد تقاضا برای رفع نیازهای آبی کمتر باشد (طاهری و علیزاده، ۱۳۹۰). بهره برداری از منابع آب به ویژه منابع آب زیرزمینی و تامین آب مورد نیاز بخش صنعت، کشاورزی و شرب امری ضروری است. اما میزان برداشت از آن باید فراخور توان آبخوان و به عبارتی پایدار باشد. از این رو شاخص هایی تعریف شده اند که می توان با بهره گیری از آن ها وضعیت میزان برداشت از این منابع را سنجید. ارزیابی پایداری آبخوان ها در برابر تهدیدها، تنش ها و وقایع کنونی به منظور حفظ و بقای آن ها لازم و ضروری است. دغدغه محققین به ویژه در سال های اخیر، دستیابی به روش های علمی و برگرفته از وضعیت واقعی آبخوان برای توصیف و تحلیل پایداری منابع آب بوده است. شاخص هایی که بیانگر عملکرد سیستم باشند و در آن آب مورد نیاز و مقدار آب تامین شده برای مصرف کننده یا کاربر آب یا یک منبع آب (همانند مخازن آب زیرزمینی که تأمین کننده نیاز شرب، صنعت یا کشاورزی است)، مورد بررسی قرار گیرد (کمالی و نیک سخن، ۱۳۹۶). شاخص هایی که با بهره گیری از متغیرهای قابل درک و اندازه گیری برای معرفی وضعیت سیستم سودمند باشند. بنابراین شاخص های بسیاری در این زمینه در سراسر دنیا متناسب با داده های در دسترس معرفی شده اند (سامانی و همکاران، ۱۳۹۹). شاخص هایی نظیر آسیب پذیری^۲، اطمینان پذیری یا قابلیت اعتماد^۳ و بازگشت پذیری^۴ بر مبنای واقعیت مصرف آب، تامین آب و میزان آب موجود توسط پژوهشگران تعریف شده اند که با توجه به شرایط منطقه، داده های موجود و پژوهش های صورت گرفته در مناطق مشابه در این مقاله از آن ها بهره گرفته شده است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در سال های اخیر همگام با توسعه بهره برداری از منابع آب زیرزمینی، بررسی وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی مورد توجه سیاستگذاران و برنامه ریزان حوزه آب واقع شده است. تلاش جمعی از پژوهشگران، کارشناسان و متخصصان حوزه آب از سال ۲۰۰۷ تا کنون منتهی به توسعه مجموعه ای از شاخص های آب زیرزمینی شده است که به فراخور مکان، زمان و داده های موجود شاخص هایی برای تحلیل شرایط و وضعیت منابع آب زیرزمینی معرفی شده است (لیپونن^۵، ۲۰۰۷). هدف و غایت این شاخص ها کمک به ذینفعان و تصمیم گیرندگان برای دستیابی به پایداری واقعی است. نکته حائز اهمیت این است که تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی با روند کندی اتفاق می افتد و ممکن است سرعت آن به قدری آهسته باشد که گرداران آب با آن سازگار شده و تغییرات را عادی و طبیعی قلمداد نمایند. بنابراین ارزیابی تغییرات و رفتار سیستم سفره های آب زیرزمینی طی زمان، امری ضروری و غیرقابل اجتناب است. در دهه های گذشته، شبیه سازی آبخوان و در نظر گرفتن سناریوهای مدیریتی مختلف (نظیر ادامه روند فعلی، کاهش برداشت و یا افزایش برداشت) مورد توجه پژوهشگران بوده است تا بتوانند با بهره گیری از فناوری های نوین، وضعیت منابع آب زیرزمینی را در آینده - ای نه چندان دور، جهت اخذ تصمیمات مهم مدیریتی تبیین نمایند. برای مثال، با استفاده از شاخص های ارزیابی منابع آب به تحلیل در مورد مباحثی نظیر تغذیه آب زیرزمینی، بیلان، ارتباط هیدرولیکی آب های زیرزمینی با منابع آب سطحی، کیفیت این منابع، کاهش سطح آب زیرزمینی، وضعیت پراکنش و توزیع چاه های مشاهداتی شبکه سنجش منابع آب زیرزمینی، آسیب پذیری ذاتی، کاربری زمین و اثرات تغییر آن، مباحث فرونشست زمین و دیگر مباحث مشابه پرداخته شده است که در ادامه به برخی از این پژوهش ها اشاره شده است (سامانی و همکاران، ۱۳۹۹).

قربانی و همکاران (۱۳۹۱) خطر ناپایداری منابع آب زیرزمینی در دشت داراب استان فارس را با استفاده از تحلیل داده های آب زیرزمینی و شاخص های پایداری اعلام نمودند. حافظ پرست و فاطمی (۱۳۹۵) با بهره گیری از شاخص های پایداری منابع آب در مقیاس

1 United States Geological Survey

2 Vulnerability

3 Reliability

4 Resiliency

5 Lipponen

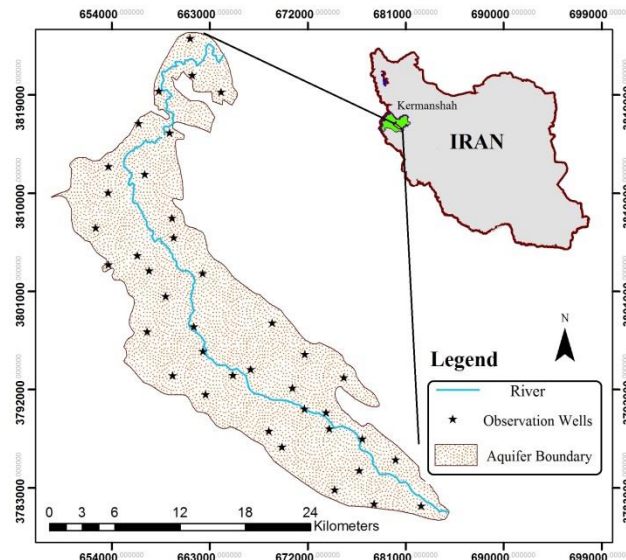
حوضه آبریز (برگشت پذیری، آسیب پذیری و اطمینان پذیری) و سناریو سازی، راهکارهای سازه‌ای را جهت کاهش تلفات بررسی کردند و نشان دادند با توجه به شرایط منطقه، بهترین راهکار کاهش تلفات، استفاده از سازه سد جامیشان، قشلاق و آناهیتا می‌باشد. کمالی و نیک سخن (۱۳۹۶) در پژوهشی با بهره‌گیری از مدل‌های آب زیرزمینی و شاخص‌های پایداری، وضعیت دشت برخوار اصفهان را تحت سناریوهای مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد با ادامه روند فعلی از نظر برداشت از منابع آب زیرزمینی، وضعیت کیفی و به ویژه وضعیت کمی آن بدتر خواهد شد. با افزایش برداشت ۳۰ درصدی از آبخوان، شاخص پایداری به شدت کاهش می‌یابد و در ادامه آن شاخص آسیب پذیری آبخوان نسبت به چالش‌های احتمالی افزایش خواهد یافت. در صورتی که ۳۰ درصد از میزان برداشت از آبخوان کاهش یابد، شاخص پایداری روند صعودی و افزایشی داشته و بهبود وضعیت آبخوان در سال‌های آتی اتفاق خواهد افتاد. محسنی و همکاران (۱۴۰۱) پایداری منابع آب زیرزمینی در منطقه بهشهر بندرگز را با استفاده از دو شاخص بهره برداری آب و کمبود آب سبز بررسی کردند. نتایج نشان داد کشت گندم در فصل بهار باعث کاهش آب و ناپایداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی در منطقه می‌گردد. رجانی و همکاران^۱ (۲۰۰۸) آبخوان ساحلی در هند را از منظر کمی و کیفی (شوری) و میزان پمپاژ آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. بویی و همکاران^۲ (۲۰۱۶) در زمینه محیط زیست شاخص‌هایی را جهت ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی ارائه نمودند. همچنین در سال ۲۰۱۸ نیز از منظر اجتماعی پژوهشی را انجام داده و در آن شاخص‌هایی را برای ارزیابی پایداری اجتماعی منابع آب زیرزمینی معرفی نمودند. کریشنامورتی و همکاران^۳ (۲۰۲۳) با استفاده از بررسی شاخص‌های کیفی نشان دادند کیفیت آب زیرزمینی به طور قابل توجهی تحت تأثیر رودخانه نویال قرار گرفته و آلوده شده است و باید برای حفظ کیفیت آب زیرزمینی اقداماتی صورت گیرد. شناسایی عوامل موثر بر کیفیت و کمیت منابع آب (بهتر با بدتر شدن وضعیت آن) هدف برنامه ریزان، سیاستگذاران و اقدامات مدیریتی آن‌ها است. به بیان دیگر، هدف، توسعه سیاست‌های پیش برنده‌ای است که از منظر اقتصادی، سیاسی، حقوقی، اجتماعی و محیط زیستی آثار مطلوبی بر منابع آب و محیط زیست داشته باشد و در مقابل کنترل عوامل بازدارنده و زیان آور برای این منابع است. بنابراین نیاز است شاخص‌هایی وجود داشته باشند تا به کمک آن‌ها عملکرد را اندازه‌گیری نموده و شرایط مختلف حاکم بر سیستم را در اثر سیاست‌ها و برنامه‌های مختلف (به عبارتی سناریوهای مختلف) ارزیابی و با یکدیگر مقایسه نمود. به طور کلی شاخص‌های ارزیابی پایداری به عنوان یک معیار آماری به محققان کمک می‌نمایند تا تغییرات نسبی یک یا چند متغیر را بیان و توصیف کنند. برای نخستین بار در سال ۱۹۹۷، لوکس^۴ سه معیار برگشت پذیری، آسیب پذیری و اطمینان پذیری سیستم را ارائه نمود و این روابط در سال ۲۰۱۰ توسط سندووال سولیس^۵ اصلاح شد.

منطقه مورد مطالعه

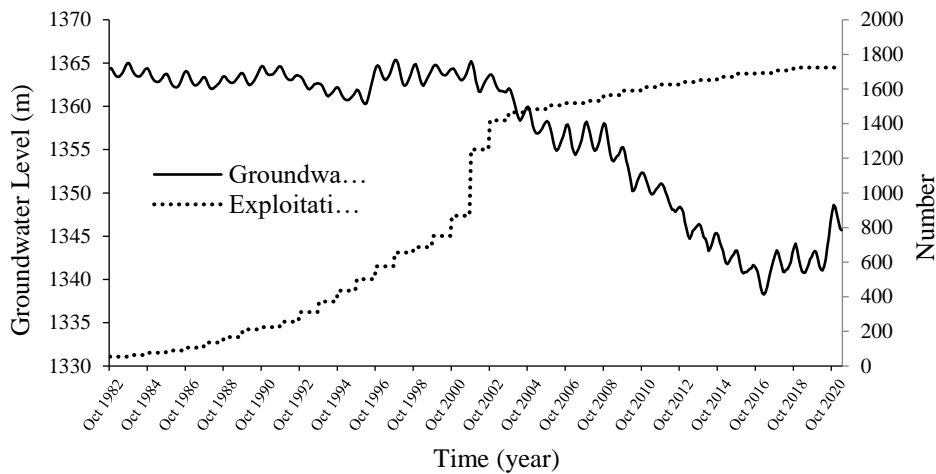
یکی از دشت‌های بسیار مهم و حاصلخیز در استان کرمانشاه، دشت ماهیدشت می‌باشد. این دشت از منظر وسعت، تعداد بهره بردار از چاه‌های آب (با مصارف مختلف کشاورزی، صنعتی و دامپروری و ...)، موقعیت جغرافیایی (هم مرز با مرکز استان)، نقش مهمی در اقتصاد استان ایفا می‌نماید.

دشت ماهیدشت در محدوده مطالعاتی ماهیدشت-سرفیروزآباد (کد ۲۲۲۵) و در استان کرمانشاه واقع شده و یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کرخه می‌باشد. مشخصات جغرافیایی آن سی و چهار درجه و سه دقیقه تا سی و چهار درجه و سی و شش دقیقه عرض شمالی و چهل و شش درجه و سی و دو دقیقه تا چهل و هفت درجه و بیست و یک دقیقه شرقی می‌باشد. مساحت این محدوده ۱۵۰۷ کیلومتر مربع بوده که به ترتیب ۸۹۲/۱ و ۶۱۴/۹ کیلومتر مربع سهم دشت و ارتفاعات بوده و وسعت آبخوان ماهیدشت در این محدوده ۶۳۸ کیلومتر مربع می‌باشد. حداکثر ارتفاع حوزه از سطح دریا ۲۷۵۳ متر و حداقل ارتفاع نیز ۱۳۱۱ متر در خروجی دشت می‌باشد. موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ (۱) نشان داده شده است. رودخانه مرگ زهکش اصلی دشت است که از بخش شرقی سرفیروزآباد سرچشمه گرفته و پس از عبور از دشت سرفیروزآباد و ماهیدشت در منطقه دوآب مرگ از محدوده خارج شده و به رودخانه قره سو می‌پیوندد. افزایش استحصال آب در دهه‌های اخیر از آبخوان ماهیدشت سبب کاهش تراز سطح آب زیرزمینی شده که در شکل ۲ آنمود آبخوان ماهیدشت در برابر تعداد چاه‌های بهره برداری را نشان داده شده است.

1 Rejani et al
2 Bui et al
3 Krishnamoorthy
4 Loucks
5 Sandoval Solis



شکل ۱. موقعیت آبخوان ماهیدشت

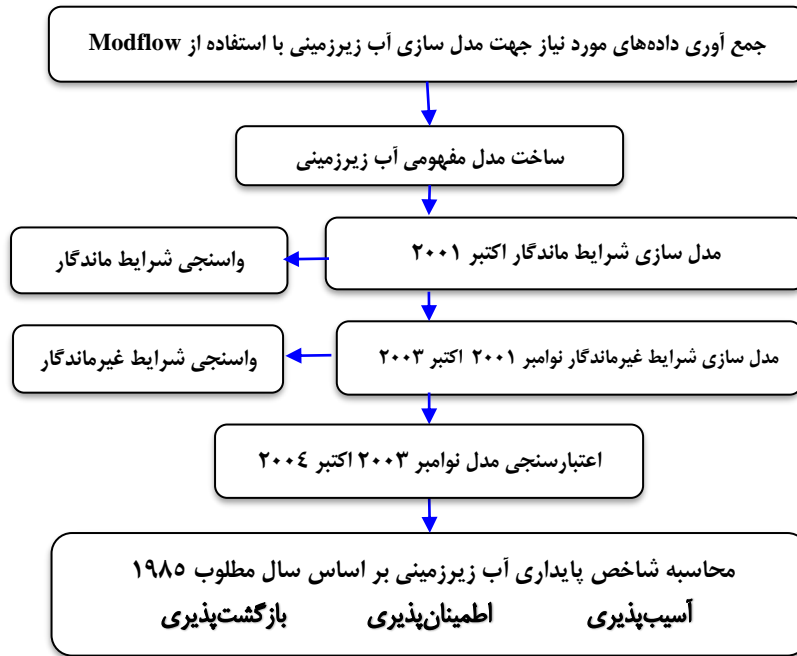


شکل ۲. آبنمود آبخوان ماهیدشت در برابر تعداد چاه های بهره برداری

روش پژوهش

نحوه پایش و ارزیابی سیستم های منابع آب و معیارهای مربوط به آن از دغدغه های محققین و تصمیم گیران در دهه های اخیر بوده است. شاخص ها نماینده ترکیبی از معیارهای عملکرد سیستم می باشند. معیارهای عملکرد سیستم های منابع آب بر اساس پارامترهای آب مورد نیاز و مقدار آب تأمین شده برای مصرف کننده یا کاربر آب یا یک منبع آب (همانند مخازن آب زیرزمینی که تأمین کننده نیاز شرب، صنعت یا کشاورزی است) تعریف می شوند.

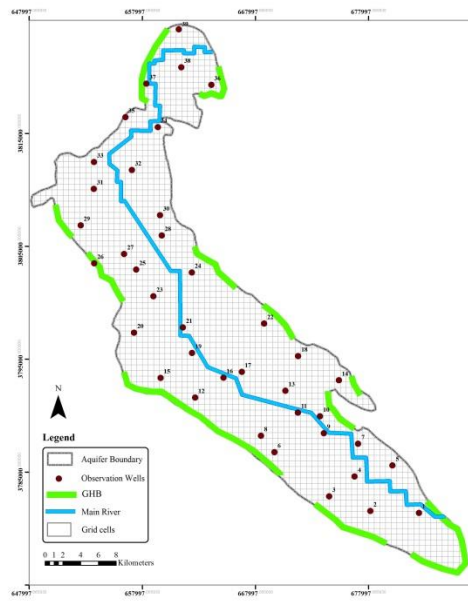
جهت بررسی شاخص پایداری کمی منابع آب زیرزمینی دشت ماهیدشت واقع در استان کرمانشاه از نرم افزار GMS و مدل MODFLOW برای مدل سازی منابع آب زیرزمینی و از معیارهای عملکردی آسیب پذیری، اطمینان پذیری و برگشت پذیری جهت محاسبه شاخص پایداری آب زیرزمینی برای ۴ سناریو مدیریتی استفاده شد در شکل ۳ (۳) فلوچارت بکار رفته در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوجارت ارزیابی شاخص پایداری منابع آب زیرزمینی ماهیدشت

مدل سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از نرم افزار GMS

برای شبیه سازی آبخوان ماهیدشت از مدل MODFLOW و نرم افزار GMS استفاده شد. برای مدل سازی منابع آب زیرزمینی بر اساس داده‌هایی نظیر سطح آب از سال ۱۹۸۱ الی ۲۰۱۹، لوگ‌های زمین شناسی (مربوط به چاه‌های اکتشافی)، مطالعات ژئوفیزیک، گزارش‌های هیدروژئولوژی و هیدرولوژی، داده‌های بارش، اطلاعات تخلیه چاه‌های بهره‌برداری و بیلان منابع آب محدوده استفاده شده است. ورودی به آبخوان شامل بارش، جریان رودخانه فصلی مرگ، انتقال آب، تغذیه سطحی و جذب آب برگشتی و خروجی از آبخوان برداشت آب توسط چاه‌های بهره‌برداری و جریان خروجی زیرسطحی در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ مدل مفهومی آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت نشان داده شده است.



شکل ۴. مدل مفهومی آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت

معیارهای پایداری آب زیرزمینی

آسیب پذیری^۱

آسیب پذیری بیانگر میزان کمبود در سیستم آب زیرزمینی می باشد که شدت شکست های سیستم را بیان می نماید. بر این اساس در گام های زمانی که تراز آب زیرزمینی پایین تر از تراز مطلوب باشد، سیستم آبخوان دارای کمبود می باشد (مایز، ۲۰۱۳).

$$Vul = \frac{N_{Failure}}{T} \times 100 \quad (1)$$

Nfailure = تعداد گام های زمانی دارای کمبود آب

T = تعداد کل گام های زمانی

اطمینان پذیری یا قابلیت اعتماد^۲

این مفهوم بیان می کند با چه میزان احتمال، آبی که در اختیار مصرف کننده قرارداد شده است، نیاز وی را تامین می نماید. در منابع آب زیرزمینی به منظور به تعادل رسیدن آبخوان (تعادل بین تغذیه طبیعی و مصرف) تراز مطلوب محاسبه و رسیدن به این تراز در هر دوره به عنوان تامین آب مورد نیاز مصرف کننده (عدم شکست) در نظر گرفته می شود (مایز، ۲۰۱۳).

$$Rel = \frac{N_{Success}}{T} \times 100 \quad (2)$$

Nsuccess = تعداد گام های زمانی کمبود آب برابر صفر (نیاز تامین شده است)

T = تعداد کل گام های زمانی

بازگشت پذیری^۳

بازگشت پذیری در سیستم های منابع آب، به این صورت تعریف می شود که احتمال اینکه سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برسد، چه میزان است. نسبت تعداد گام های تغییر سیستم از شکست به موفقیت به تعداد کل گام های شکست را بازگشت پذیری گویند (مایز، ۲۰۱۳).

$$Res = \frac{N(Success \text{ follows Failure})}{N_{Failure}} \times 100 \quad (3)$$

شاخص پایداری آب زیرزمینی^۴

با بررسی سه شاخص قبل، می توان شاخص پایداری آب زیرزمینی را محاسبه نمود. شاخص پایداری جمع بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی جهت تسهیل در مقایسه و تصمیم گیری بین گزینه های مختلف مدیریت و برنامه ریزی است. که به صورت زیر تعریف می شود (مایز، ۲۰۱۳).

$$GSI = \sqrt[3]{Res \times Rel \times (1 - Vul)} \quad (4)$$

با بهره گیری از شاخص های پایداری می توان به شناخت وضعیت سیستم، عامل های موثر در شرایط به وجود آمده در آن، شناخت تصمیم صحیح و اولویت بندی برنامه های مدیریتی و گروه داران آب، کمک شایانی نمود (کمالی و نیک سخن، ۱۳۹۶).

1 Vulnerability

2 Mays

3 Reliability

4 Resiliency

5 Groundwater Sustainability Index

معیارهای سنجش خطا در مدل سازی

اعتبار هر مدل به وسیله معیارهای سنجش خطا مورد بررسی قرار می گیرد. در این پژوهش برای بررسی و مقایسه میزان خطای مدل MODFLOW در شبیه سازی آب زیرزمینی از معیارهای ضریب همبستگی، میانگین مطلق خطا (MAE^1) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$) استفاده گردید.

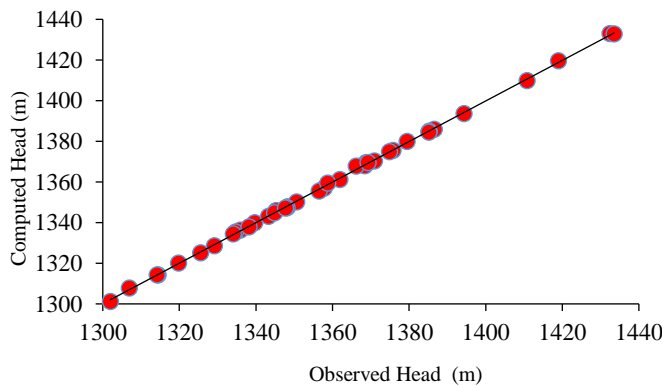
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_o - P_c| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_o - R_c)^2} \quad (7)$$

که در آن P_o ، P_c و \bar{P}_0 به ترتیب پارامتر مشاهداتی، پارامتر محاسباتی و میانگین پارامتر مشاهداتی می باشد.

نتایج مدل سازی جریان آب زیرزمینی

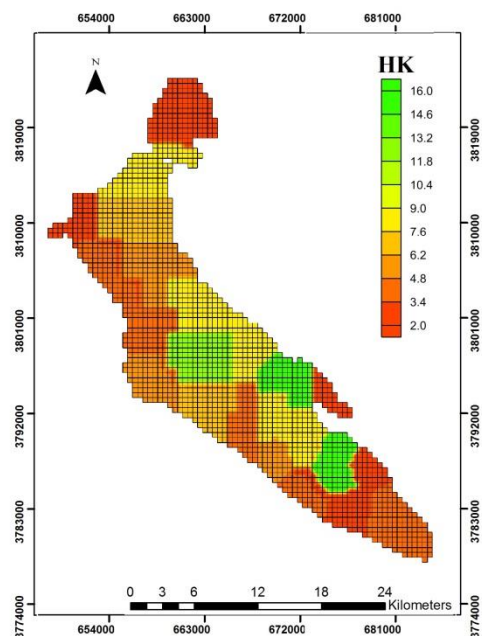
با استفاده از داده های ۳۹ چاه مشاهده ای در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار، شبیه سازی وضعیت منابع آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت انجام گردید. ابتدا به واسطه شرایط پایدار آبخوان، اکتبر سال ۲۰۰۱ به عنوان ماه و سال پایه برای شرایط ماندگار انتخاب شد و مدل بر مبنای آن اجرا، آنالیز حساسیت و واسنجی گردید. شکل ۵ همبستگی تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی را در شرایط ماندگار و شکل ۶ نتایج واسنجی شده پارامتر هدایت هیدرولیکی نشان می دهد. در جدول ۱ نتایج معیارهای ارزیابی خطا شامل ضریب همبستگی، $RMSE$ و MAE آورده شده است.



شکل ۵. همبستگی تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی

جدول ۱. نتایج خطای مدل سازی

Error	Steady-state	Transient	Verification
R ²	0.989	0.97	0.965
MAE	0.543	0.446	0.713
RMSE	0.621	0.719	0.816

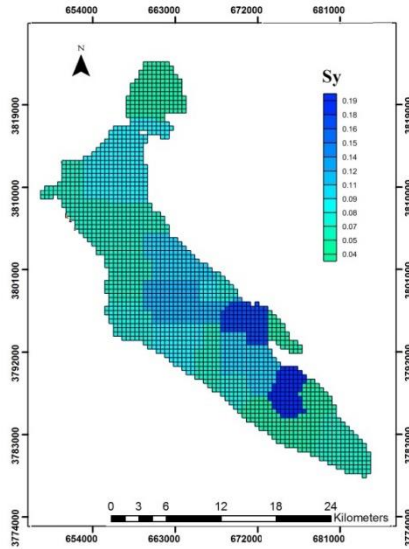


شکل ۶. نتایج واسنجی شده پارامتر هدایت هیدرولیکی

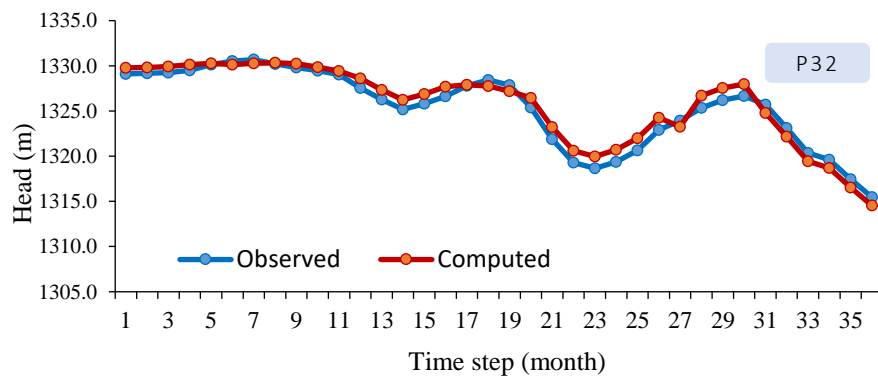
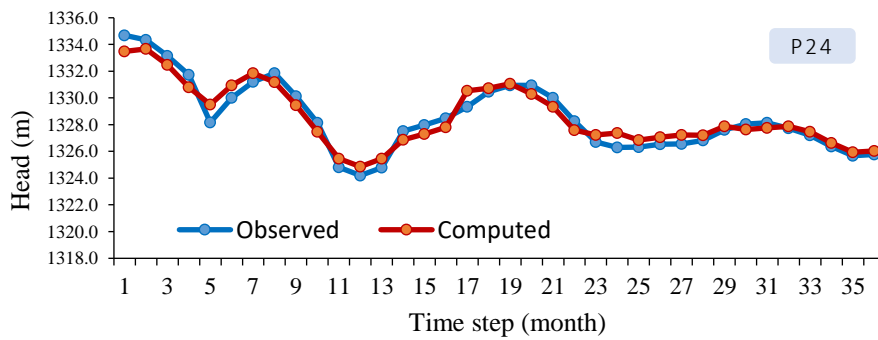
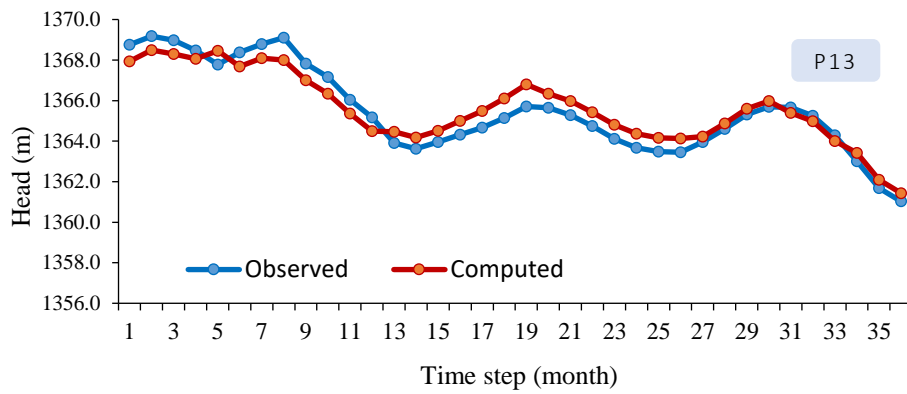
در حالت غیر ماندگار مدل برای ۲۴ گام زمانی و از نوامبر ۲۰۰۱ تا اکتبر ۲۰۰۳ اجرا و واسنجی گردید. نتایج واسنجی پارامتر ذخیره ویژه (Sy) در شکل ۷ و شبیه سازی تراز سطح آب زیرزمینی چاه های مشاهده ای شماره ۱۳، ۲۴ و ۳۲ در شکل ۸ آورده شده است. در این مرحله نیز مقادیر معیارهای ارزیابی خطا قابل قبول بوده که نشان دهنده انطباق مناسب مدل با تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت می باشد. این مطالب در جدول (۱) قابل مشاهده است. در نهایت، داده های یک سال پس از دوره مدل سازی غیرماندگار (نوامبر ۲۰۰۳ تا اکتبر ۲۰۰۴) برای اعتبارسنجی در مدل درج شد. همانطور که در شکل ۸(۸) نشان داده شده تنها یک اختلاف ناچیز بین سطح آب محاسبه شده و مشاهده شده وجود دارد که دقت مدل را در پیش بینی سطح آب ثابت می کند.

¹ Mean Absolute Error

² Root-Mean-Square Error



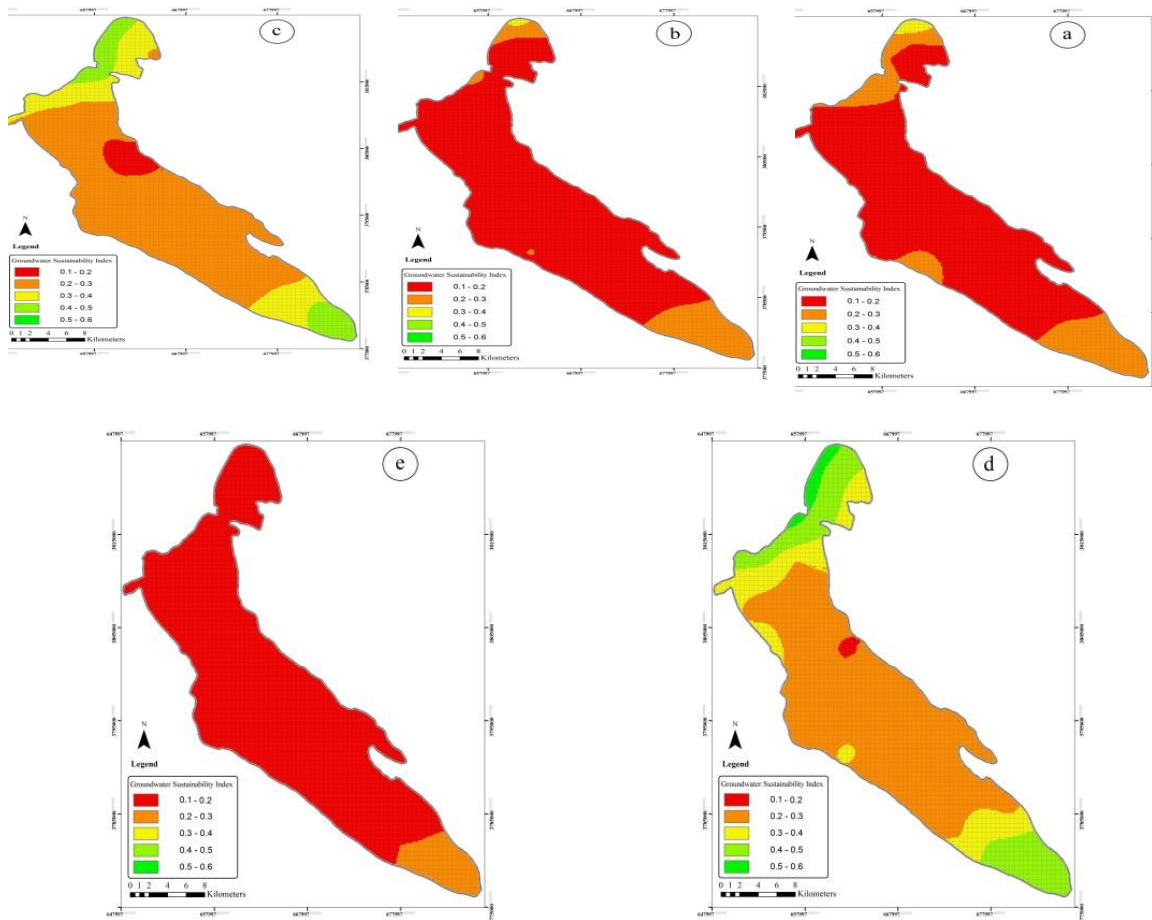
شکل ۷. نتایج واسنجی شده پارامتر ذخیره ویژه (S_y)



شکل ۸. نتایج شبیه سازی چاه های مشاهده ای شماره ۱۳، ۲۴ و ۳۲

نتایج شاخص پایداری آب زیرزمینی

پس از اطمینان از اعتبار سنجی مدل آب زیرزمینی تهیه شده، ابتدا سال ۱۹۸۵ بدلیل شرایط پایدار آبخوان، استحصال کم آب زیرزمینی و شرایط بارندگی نرمال به عنوان سال مطلوب (وضعیت مطلوب تراز آب زیرزمینی) انتخاب شد، سپس شاخص پایداری آب زیرزمینی برای شرایط موجود با شبیه سازی ۱۲۰ گام زمانی ماهانه منتهی به اکتبر ۲۰۱۹ بدست آمد همانگونه که در شکل ۹ (a) مشخص است اوضاع شاخص پایداری برای کل دشت در وضعیت نامطلوب قرار دارد، مناطقی از دشت که مرز جریان ورودی است شاخص بالاتری نشان می دهد. پس از این مرحله مدل سازی طی ۱۲۰ گام زمانی ماهانه انجام و با استفاده از چهار سناریو مدیریتی (۱- ادامه روند کنونی، ۲- تعدیل پروانه ها و کاهش ۳۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، ۳- حذف چاه های غیرمجاز و تعدیل پروانه ها و کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی و ۴- افزایش استحصال آب زیرزمینی و توسعه کشت غیر مجاز) شاخص پایداری آب زیرزمینی مجدد مورد ارزیابی قرار گرفت که شکل ۹ (b)، (c)، (d) و (e) به ترتیب نتایج چهار سناریو مذکور را نشان می دهد. ادامه وضع موجود باعث کاهش بیشتر شاخص پایداری آبخوان و بغرنج شدن وضعیت آب زیرزمینی خواهد شد. با کاهش استحصال تحت سناریو ۲ و ۳ بهبود نسبی در شاخص پایداری آب زیرزمینی خواهیم داشت اما این وضعیت در بهترین شرایط مناطق با مرز بار ورودی نهایتاً عدد ۰/۶ خواهد بود که نشان دهنده وضعیت ناپایدار آبخوان حتی با وجود کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب می باشد. در شرایط سناریو ۴ آبخوان به شرایط بسیار ناپایدار خواهد رفت. جدول (۲) وضعیت شاخص GSI برای هر یک از چاه های مشاهده ای در شرایط حاضر و تحت سناریو های تعریف شده نشان می دهد.



شکل ۹. (a). شاخص پایداری آب زیرزمینی برای شرایط موجود، (b). سناریو ادامه روند کنونی، (c). سناریو تعدیل پروانه ها و کاهش ۳۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، (d). سناریو حذف چاه های غیرمجاز و تعدیل پروانه ها و کاهش ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی، (e). سناریو افزایش استحصال آب زیرزمینی و توسعه کشت غیر مجاز

جدول ۲. نتایج شاخص GSI برای هریک از چاه های مشاهده ای

Well No	GSI				
	Current status	Scenario (1)	Scenario (2)	Scenario (3)	Scenario (4)
1	0.268	0.281	0.459	0.471	0.230
2	0.260	0.301	0.366	0.435	0.203
3	0.170	0.150	0.253	0.281	0.131
4	0.181	0.139	0.279	0.322	0.139
5	0.160	0.150	0.251	0.257	0.132
6	0.164	0.131	0.247	0.281	0.131
7	0.164	0.131	0.266	0.281	0.131
8	0.139	0.130	0.223	0.249	0.130
9	0.158	0.131	0.235	0.260	0.131
10	0.159	0.131	0.235	0.274	0.131
11	0.160	0.140	0.250	0.281	0.140
12	0.271	0.211	0.328	0.312	0.131
13	0.156	0.130	0.228	0.257	0.130
14	0.162	0.138	0.218	0.301	0.138
15	0.175	0.143	0.258	0.281	0.143
16	0.137	0.137	0.268	0.284	0.137
17	0.141	0.130	0.209	0.250	0.130
18	0.146	0.136	0.190	0.249	0.136
19	0.166	0.139	0.248	0.287	0.139
20	0.181	0.132	0.229	0.248	0.132
21	0.154	0.131	0.247	0.253	0.131
22	0.177	0.139	0.232	0.243	0.139
23	0.148	0.131	0.207	0.244	0.131
24	0.139	0.130	0.157	0.192	0.130
25	0.161	0.138	0.212	0.268	0.138
26	0.212	0.183	0.344	0.409	0.132
27	0.162	0.131	0.209	0.221	0.131
28	0.152	0.154	0.169	0.254	0.132
29	0.144	0.133	0.213	0.239	0.133
30	0.147	0.132	0.253	0.259	0.132
31	0.152	0.132	0.213	0.338	0.132
32	0.158	0.131	0.241	0.263	0.131
33	0.194	0.130	0.412	0.452	0.130
34	0.219	0.151	0.437	0.447	0.131
35	0.320	0.235	0.469	0.544	0.144
36	0.136	0.136	0.248	0.312	0.136
37	0.188	0.174	0.512	0.538	0.157
38	0.149	0.134	0.344	0.445	0.116
39	0.431	0.342	0.462	0.522	0.174

بحث

با توجه به مفهوم مدیریت یکپارچه منابع آب و رویکرد امنیت آب، حفاظت محیط زیست و امنیت اجتماع، می توان اهداف ارزیابی پایداری آب های زیرزمینی را در حفاظت از منابع آب زیرزمینی در برابر تخلیه و کاهش ذخایر، حفاظت از کیفیت این منابع در برابر آلودگی،

محافظت از قابلیت زیست پذیری اکوسیستم، دستیابی به رفاه اقتصادی و اجتماعی و استفاده از حکمرانی خوب جست و جو کرد. آب‌های زیرزمینی یک منبع محدود، پویا و آسیب پذیرند که در صورت تعادل در تغذیه و استحصال برگشت پذیر هستند، اما تشدید مصرف آن در بخش کشاورزی و مصرف شرب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا آسیب پذیر تر و در برخی مناطق به سوی بازگشت ناپذیری برده است. بر این اساس در این تحقیق به منظور شناسایی شاخص پایداری آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت ابتدا شبیه سازی آبخوان با استفاده از مدل Modflow انجام شد و سپس مدل عددی تهیه شده در شرایط ماندگار و غیر ماندگار اجرا، واسنجی و اعتبارسنجی گردید.

نتیجه گیری

در این پژوهش با توجه به روند نزولی سطح آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ با وجود عدم روند کاهشی بارش در این دوره پایداری این آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد آبخوان ماهیدشت در وضعیت ناپایدار است که با یافته‌های تحقیق مجیدپور و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. اعمال سناریو مدیریتی بصورت کاهش ۳۰ و ۴۰ درصدی استحصال آب زیرزمینی نیز مناطق مرکزی آبخوان را پایدار نخواهد کرد. بررسی داده‌های آبمنوم واحد آبخوان نشان می‌دهد میزان تغییرات سطح آب در خلال دوره مذکور معادل با ۲۴/۸۹- متر بوده است که این روند نزولی حتی با وجود ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از سال ۲۰۰۵ ادامه داشته است. از عوامل موثر بر این موضوع می‌توان به افزایش تعداد مجوزهای صادره در خلال سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۱، تعداد قابل توجه چاه‌های غیرمجاز، نبود نظارت کافی بر الگوی کشت، عدم اطلاع رسانی و آگاهی بخشی در خصوص وضعیت پایداری آبخوان در شرایط کنونی و آتی اشاره نمود. وضعیت ناپایدار این دشت یعنی مخاطرات اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، امنیتی و محیط زیستی فراوانی را در پی خواهد داشت. به عبارتی این دشت، بیش از هر زمان، نیاز به کنترل برداشت داشته و باید در اولویت برنامه‌های سازگاری با کم آبی سیاستمداران، برنامه‌ریزان، مدیران و همه گروداران آب منطقه قرار گرفته و از فهرست مناطق مستعد توسعه کشاورزی حذف گردد. توصیه می‌گردد با رعایت اصول پایداری کیفی آبخوان، گروداران با سیاست‌های تشویقی به سوی تغییر الگوی برداشت از کشاورزی به صنعت سوق داده شوند.

منابع

- سامانی، سعیده، روزبهانی، رضا، کاوسی حیدری، علیرضا، و کاردان مقدم، حمید. (۱۳۹۹). ارائه چارچوب ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی از طریق شاخص. آب و توسعه پایدار، ۷(۱)، ۶۰-۴۹. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i1.80946>
- طاهری، سیددانیال، و علیزاده، کامیاب. (۱۳۹۰). دسترسی و حفظ منابع آب در بحران. مجله علمی ابن سینا/اداره بهداشت و درمان نهاجا، ۱(۲)، ۶۰-۵۸. <http://ebnesina.ajaums.ac.ir/article-1-130-fa.html>
- فاطمی، سید احسان، و حافظ پرست، مریم. (۱۳۹۵). محاسبه شاخص های پایداری آب و پایداری حوضه آبریز در راستای حفظ توسعه پایدار (مطالعه موردی: حوضه آبریز گاماسیاب). نشریه جغرافیا و پایداری محیط، ۱۸(۱)، ۳۳-۲۱. https://ges.razi.ac.ir/article_553.html
- فلاح، سیف اله، قبادی نیا، مهدی، شکرگزار دارابی، محسن، و قربانی دشتکی، شجاع. (۱۳۹۱). بررسی پایداری منابع آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)، ۲۶(۲ (ب))، ۱۷۲-۱۶۱. <https://sid.ir/paper/196687/fa>
- کمالی، اصغر، و نیک سخن، محمدحسین. (۱۳۹۶). توسعه مدلی برای محاسبه شاخص های پایداری کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی. مجله اکوهیدرولوژی، ۴(۴)، ۱۰۸۷-۱۰۷۱. <https://doi.org/10.22059/IJE.2017.63237>
- محسنی، بهروز، حبیب نژاد روشن، محمود، شاهی، کاکا، و درزی نفت چالی، عبدالله. (۱۴۰۱). ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص های بهره برداری آب و کمبود آب سبز. مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران، ۱۶ (۵۹)، ۳۱-۲۳. <http://jwmsei.ir/article-1044-1-fa.html>

References

- Bui, N.T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du BUI, D., & Truong, N.T. (2016). Environmental sustainability assessment of ground water resources in Hanoi, Vietnam by a sample AHP approach. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Re-Greece. Water, 6(4), 1043-1068*. https://doi.org/10.2208/jscejer.72.L_137.
- Bui, N.T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du Bui, D., Truong, N.T., & Nakagawa, K. (2018). Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. *Ecological indicators, 93, 1034-1042*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.005>.
- Falah, S. E., Qobadinia, M., Shekargar Darabi, M., & Ghorbani Dashtaki, Sh. (2011). Investigating the sustainability of underground water resources in Darab plain, Fars province. *Water Research in Agriculture (Soil and Water Sciences), 26(2(b)), 161-172*. <https://sid.ir/paper/196687/fa>. [In Persian]
- Fatemi, S.E., & Hafez Parast, M. (2015). Calculation of indicators of water stability and watershed stability in order to maintain sustainable development (case study: Gamasiab watershed). *Journal of Geography and Environmental Sustainability, 18(1), 21-33*. https://ges.razi.ac.ir/article_553.html. [In Persian]
- Kamali, A., Khosh Sokhan, & M. H. (1396). Development of a model for calculating quantitative and qualitative sustainability indicators of underground water resources. *Journal of Ecohydrology, 4(4), 1071-1087*. <https://doi.org/10.22059/IJE.2017.63237>. [In Persian]
- Lipponen, A. ed. (2007). *Groundwater resources sustainability indicators*. Paris, UNESCO.
- Loucks, DP. (1997). Quantifying trends in system sustainability, *Hydrological Sciences Journal, 42(4), 513-30*. <https://doi.org/10.1080/02626669709492051>.
- Majidipour, F., Najafi, S.M.B., Taheri, K., Fathollahi, J., & Missimer, T.H. (2021). Index-based Groundwater Sustainability Assessment in the Socio-Economic Context: a Case Study in the Western Iran. *Environmental Management, 67, 648-666*. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01424-7>
- Mays, L. W. (2013). *Groundwater Resources Sustainability: Past, Present, and Future*. *Water Resour Manage*. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0436-7>

- Mohseni, B., Habibnejad Roshan, M., Shahidi, K., & Darzi Naftchali, A. (1401). Assessing the sustainability of underground water resources using water exploitation indicators and green water shortage. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 16 (59), 23-31. <http://jwmsei.ir/article-1044-1-fa.html>. [In Persian]
- Krishnamoorthy, N., Thirumalai, R., Lenin Sundar, M., Anusuya, M., Manoj Kumar, P., Hemalatha, E., Mohan Prasad, M., & Munjal, N. (2023). Assessment of underground water quality and water quality index across the Noyyal River basin of Tirupur District in South India. *Urban Climate*, 49, 101436. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101436>.
- Ranjbarmanesh, N., & Entezari, M. (2013). Crisis caused by falling groundwater level due to tectonic activity in Mahidasht plain. *Applied Geomorphology of Iran*, 1 (2), 1-18. <http://journals.hsu.ac.ir/agi/article-1-46-fa.html>. [In Persian]
- Rejani, R., Jha, M.K., Panda, S.N., Mull, R. (2008). Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India. *Water Resources Management*, 22(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9142-z>.
- Samani, S., Rozbahani, R., Kaousi Heydari, A., & Kardan Moghadam, H. (2019). Providing a framework for assessing the sustainability of underground water resources through an index. *Water and sustainable development*, 7(1), 49-60. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i1.80946>. [In Persian]
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D.C., & Loucks, D.P. (2010). Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5), 381-390. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000134).
- Taheri, S.D., & Alizade, K. (2011). Management and conservation of water resources in crisis. *Ibn Sina scientific journal/ Nahaja health and treatment department*, 1&2. 5-60. <http://ebnesina.ajaums.ac.ir/article-1-130-fa.html>. [In Persian]



Reservoir inflow classification of Jamishan reservoir by K-means method and its effect on stochastic dynamic programming

Hesam Kariminezhad¹ , Seyed Ehsan Fatemi² , Maryam Hafezparast Mavadat³

¹ MSc student, water resources engineering, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hesampavah@yahoo.com

² Corresponding Author, Associate professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: e_fatemi78@yahoo.com

³ Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.hafezparast@razi.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

One of the Principles of water resources management is the optimal use of the reservoirs as the main sources of surface water, and this issue has a special importance in the science of water engineering. In this research, the new K-means clustering method to discretize reservoir inflow has been presented for the Stochastic Dynamic Programming (SDP). In addition, the Moran's method is used to discretize the reservoir storage. By the programming in the Python environment, the historical reservoir inflow in each season is classified to different clusters and obtained the best inflow cluster for each season. The effects of this clustering is also considering in the SDP of Jamishan reservoir. In general, the change in inflow classification will lead to a fundamental change in the transition probability matrix. Thus, the use of K-means method for the reservoir inflow discretization, due to the possibility of optimizing the number of clusters in each time period, can be very useful for the SDP. finally, it is strongly recommended to use K-means method to discretize reservoir inflow for reservoir operation by SDP.

Methodology

K-means is an object-based algorithm that selects representative clusters from the data itself rather than averaging them. K-means of a cluster is the most central element of a cluster. The purpose of this method is to reduce sensitivity to large values in the data set. Each cluster is introduced with one of the data close to the centers. According to the number of data categories (k), the value of the least squares function is minimized and the data are categorized in the best way. In addition, the Moran's method is used to discretize the reservoir storage. In this method, the upper and lower limit of the range of changes and the upper limit of each category are used as indicators of discretization of the reservoir volume. The study area includes Jamishan reservoir sub-basin with an area of 527.07 km² located in the southwest of Sanghar city near the Pirsalman hydrometric station. This watershed is the part of Kermanshah province which is between 32-34° to 34-53° North latitude and 47-22° to 47-52° East longitude. The annual average of rainfall, evaporation and temperature are 441 mm, 1534 mm and 10 degrees Celsius, respectively.

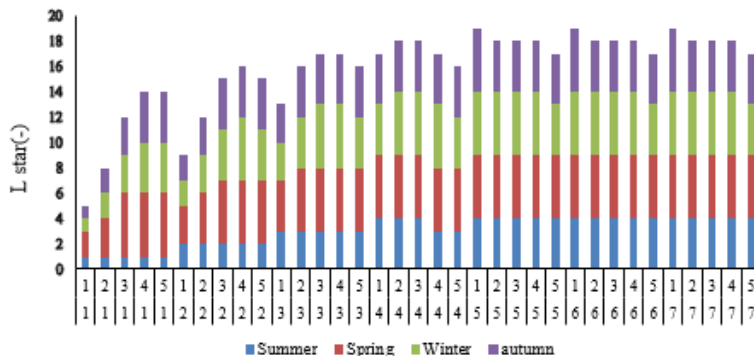
Results and discussion

Evaluating the performance of the K-means model in 4 different seasons, showed that among the 19 considered clusters, the best result in seasonal classification is obtained by the 5 inflow clusters according to the performance rate in fall, winter, spring and summer seasons - 142.57, -176.90, -475.36 and -2.10, respectively. The results of the First-order Markov chain, the possible values are given in Table 1 for 4 seasons in 5 clusters, and in this table, the specified numbers indicate the probability of moving each cluster for each season.

Table 1. First order Markov chain for 4 seasons in 5 cluster

Cluster	Season 1				
	1	2	3	4	5
1	0.263	0.316	0.158	0.211	0.053
2	0.000	0.167	0.389	0.444	0.000
3	0.000	0.000	0.500	0.000	0.500
4	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
Cluster	Season 2				
	1	2	3	4	5
1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.552	0.222	0.000	0.222	0.000
3	0.182	0.273	0.455	0.091	0.000
4	0.154	0.615	0.154	0.077	0.000
5	0.000	0.000	0.667	0.000	0.333
Cluster	Season 3				
	1	2	3	4	5
1	0.429	0.286	0.286	0.000	0.000
2	0.000	0.231	0.308	0.462	0.000
3	0.000	0.222	0.333	0.444	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.750	0.250
5	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
Cluster	Season 4				
	1	2	3	4	5
1	0.833	0.167	0.000	0.000	0.000
2	0.552	0.444	0.000	0.000	0.000
3	0.583	0.417	0.000	0.000	0.000
4	0.154	0.538	0.154	0.077	0.077
5	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000

In the following, using the backward recursive function, the calculations are continued until reaching the stationary state condition. Finally, the value of l^* was obtained for all 4 periods and different combinations of k and i as Fig.1.



The results of Steady-state condition showed that l^* happened mostly in spring up to 5 clusters of the reservoir storage and the least happened in summer with one cluster. Then, the calculations of the reservoir release probability in each period for each class of inflow and storage have been made. The highest value has occurred for reservoir storage class 4 in the autumn, winter, and spring seasons but in the summer season, due to less inflow and high water demand, it has happened in reservoir storage class 5.

Conclusions

In this research, the Stochastic Dynamic Programming (SDP) of the Jamishan dam reservoir is discussed using the K-means method in classifying the inflow discharge seasonally for the 41 years of historical data. Moran's method is also used to classify the storage volume of the reservoir into 7 classes. To calculate the transition probability matrix during the first-order Markov chain process, it is necessary to have the flow class in each period. For this purpose, the k-means method is used. The reservoir inflow in each season is classified from 2 to 20 classes by programming in the Python environment and especially with the Scikit-learn library. Evaluating the performance of the K-means model in 4 different seasons, showed that among the 19 considered clusters, the best result in seasonal classification is obtained by the 5 inflow clusters. Changing the number of inflow clusters leads to changes in the transition probability matrix and this process would change the results of reservoir operation. It can be said that the use of this flow classification method can have a significant impact on the management and optimization of dam reservoir performance. In general, the use of new classification methods such as the K-means method in the discretization of reservoir inflow for the reservoir stochastic dynamic programming can be very beneficial and effective.

Keywords: Reservoir Operation, Stochastic Dynamic Programming, K-means, Markov Chain Process

Article Type: Research Article

Article history: Received: 06 May 2023 Revised: 21 June 2023 Accepted: 08 July 2023 ePublished: 15 September 2023

Cite this article: Kariminezhad, H., Fatemi, S.E., & Hafezparast Mavadat, M. (2023). Reservoir inflow classification of Jamishan reservoir by K-means method and its effect on stochastic dynamic programming, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(2), 15-32. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9111.1052





طبقه‌بندی جریان فصلی سد جامیشان با روش K-means و اثر آن در برنامه‌ریزی پویای تصادفی

حسام کریمی نژاد^۱، سید احسان فاطمی^۲، مریم حافظ پرست مودت^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hesampavah@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: e_fatemi78@yahoo.com

^۳ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: maryam.hafezparast@gmail.com

چکیده

بهره‌برداری بهینه از مخازن سد‌های کشور به‌عنوان اصلی‌ترین منابع آب‌های سطحی دارای اهمیت و جایگاه ویژه‌ی در مدیریت منابع آب می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از روش جدید خوشه‌بندی K-means کلاسه دبی ورودی به مخزن سد در هر فصل بهینه شد و برای گسسته سازی حجم ذخیره مخزن از روش موران در ۷ کلاسه استفاده شد. با کمک برنامه‌نویسی در محیط پایتون، آبدهی ورودی مخزن در هر فصل از ۲ تا ۲۰ کلاسه مختلف طبقه‌بندی شد. از میان ۱۹ خوشه در نظر گرفته شده، برای کلاسه جریان شماره ۵، بهترین نتایج در طبقه‌بندی دبی فصلی حاصل شده است. سپس مقدار I^* در شرایط ایستا در ازای ترکیبات مختلف از k و i به دست آمد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین تغییرات در بهار تا ۵ کلاسه مخزن و کمترین آن در تابستان با یک کلاسه از مخزن اتفاق افتاده است. بیشترین میزان احتمال خروجی از مخزن در فصول پاییز، زمستان و بهار برای کلاسه مخزن ۴ اتفاق افتاده است و برای فصل تابستان به دلیل آبدهی کمتر و بالاتر بودن میزان نیاز، این مقدار در کلاسه ۵ مخزن اتفاق افتاده است. از آنجا که تغییر در کلاسه‌بندی جریان منجر به تغییر اساسی در ماتریس احتمال انتقال خواهد شد لذا استفاده از روش K-means در گسسته‌سازی آبدهی جریان با توجه به امکان بهینه‌شدن تعداد خوشه‌ها در هر دوره زمانی، می‌تواند در برنامه‌ریزی پویای تصادفی مخزن بسیار سودمند و تاثیرگذار باشد. لذا استفاده از این روش در بهره‌برداری از مخازن بصورت برنامه‌ریزی پویای تصادفی قویا توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری مخزن، SDP، پایتون، زنجیره مارکوف

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۲ اصلاح: ۳۱ خرداد ۱۴۰۲ پذیرش: ۱۷ تیر ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ شهریور ۱۴۰۲

استناد: کریمی نژاد، ح.، فاطمی، س.ا.، و حافظ پرست مودت، م. (۱۴۰۲). طبقه‌بندی جریان فصلی سد جامیشان با روش K-means و اثر آن در برنامه‌ریزی پویای

تصادفی، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۲)، ۱۵-۳۲. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9111.1052



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

یکی از مهمترین مسائل مالی و اقتصاد مهندسی موردتوجه پس از ساخت سد، بهره‌برداری اصولی و بهینه از مخازن سد می‌باشد. این مهم در سایر کشورهای مدرن و پیشرفته نیز مورد توجه خاص و ویژه‌ای قرار می‌گیرد. بنابراین این موضوع دارای اهمیت و جایگاه ویژه‌ای در علم مهندسی سد می‌باشد. از این رو در این تحقیق با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویای تصادفی، یک معیار و چارچوب چند مرحله‌ای برای مدیریت و بهینه‌سازی بر عملکرد مخازن سد، ارائه شده است. به دلیل وجود نوسان در میزان آورد رودخانه‌ها و همچنین محدود بودن ظرفیت مخازن سدها، همواره از نظر توزیع زمانی میان میزان ورودی به مخزن و نیاز آبی پایین دست مغایرت وجود دارد؛ بنابراین بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها یکی از مباحث ضروری در مدیریت منابع آب و به‌ویژه منابع آب سطحی است. در بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، هدف دستیابی به میزان خروجی بهینه از سد برای تأمین نیاز بخش‌های مختلف تقاضاکننده آب طی زمان است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مدل‌های مدیریت و برنامه‌ریزی، امکان بهره‌برداری بهینه از منابع آبی محدود موجود را فراهم می‌سازند. برنامه‌ریزی و مدیریت در زمینه مهندسی رودخانه بدون اطلاع از دبی جریان امکانپذیر نیست، ضمن اینکه اطلاع از دبی رودخانه جهت بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، اهمیت آن در عملکرد صحیح و اقتصادی سازه‌های آبی و دریچه سد، طراحی سیستم‌های هشدار سیل و پروژهای ساماندهی رودخانه و... لازم و ضروری می‌باشد. پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت از دقت بیشتری برخوردار بوده و آسانتر به دست می‌آیند اما به علت شرایط اقلیمی می‌تواند پرمخاطره و مستلزم صرف هزینه زیاد باشد در مقابل پیش‌بینی‌های بلندمدت به علل مختلف دارای خطای بیشتری بوده و از پیچیدگی‌های بیشتری در مدل‌سازی و شبیه‌سازی برخوردارند و به همین نسبت اهمیت آنها برای یک سیستم مدیریت منابع آب بسیار زیاد می‌باشد، به‌طوری‌که افزایش میزان اندکی دقت در این پیش‌بینی‌ها، فواید زیادی را عاید سیستم بهره‌برداری خواهد نمود. نخستین و بدیهی‌ترین فایده حاصل از پیش‌بینی‌های بلندمدت، این است که تصمیم‌گیری‌های مبنی بر ذخیره و آزادسازی آب، پویاتر شده و منجر به سودمندی بیشتر تولید برقایی، تأمین نیازها و کاهش خسارت سیل و خشک‌سالی می‌گردد. بنابراین دستیابی به ساختار بهینه برای سیستم‌های منابع آب با توجه به اهداف مختلف طرح‌های توسعه، همواره از چالش‌های مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بوده است. در این زمینه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی پویای تصادفی بر مبنای شبیه‌سازی از نوع الگوریتم‌های جستجوی هوشمند می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فرا ابتکاری به‌صورت گسترده در مسائل بهینه‌سازی مختلف استفاده شده‌اند. در زیر برخی از تحقیقات علمی در این زمینه آورده شده است:

برهانی داریان (۱۳۸۴)، نقش عدم قطعیت پیش‌بینی جریان در بهره‌برداری از مخزن سد دز را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه انواع مدل‌های برنامه‌ریزی پویای تصادفی و همچنین برنامه‌ریزی پویای قطعی برای سد مخزنی چند منظوره دز در جنوب غربی ایران ارائه و مقایسه شده است. ارزیابی نقش پیش‌بینی جریان ورودی در بهره‌برداری بهینه از مخازن، با استفاده از دو نوع مدل برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک صورت گرفته است. نتایج حاصل نشان داده است که عدم توجه به موضوع پیش‌بینی در مدل‌هایی که نیاز به پیش‌بینی جریان دارند و معلوم فرض کردن داده‌ها، نتایجی پر خطا و به دور از واقعیت داشته و فرد را در انتخاب نوع مدل دچار اشتباه می‌کند.

مدرسی و بزرگ حداد (۱۳۸۷)، در تحقیقی بیان داشتند که یکی از روش‌های استخراج قوانین بهره‌برداری از مخازن، روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی می‌باشد. در این روش، عامل دبی ورودی به مخزن به عنوان عامل تصادفی در نظر گرفته می‌شود. در روش SDP یکی از مهم‌ترین عوامل برای رسیدن به جواب بهینه، نحوه گسسته‌سازی حجم مخزن و دبی‌های ورودی به مخزن همچنین تعداد گسسته‌سازی state در حجم مخزن و دبی ورودی به مخزن می‌باشد. در تحقیق ایشان، برای بررسی اثر این عوامل، از اطلاعات سد مخزنی دز استفاده شده است و نتایج نشان داد که از میان روش‌های گسسته‌سازی دبی ورودی به مخزن، روش طول دسته مساوی مناسب‌تر است. همچنین در روش‌های گسسته‌سازی حجم مخزن، روش موران و ساوارنسکی تقریباً دارای نتایج یکسانی هستند. در نهایت هر چه تعداد دسته‌های حجم مخزن بیشتر و تعداد دسته‌های دبی ورودی به مخزن کمتر باشد، نتایج بدست آمده مطلوب‌تر و کمبود کمتر می‌باشد.

نتایج تحقیق فرهمند و کریمی گوغری (۱۳۹۱)، نشان داد که انتخاب و به‌کارگیری روش‌های مدیریتی مناسب جهت حفاظت و نگهداری منابع طبیعی در حوضه‌های آبریز، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. لذا، توانایی دو روش خوشه‌بندی، تجزیه و تحلیل خوشه‌های K-means و تجزیه و تحلیل خوشه‌های فازی، مورد ارزیابی قرار گرفت. ۲۶ زیرحوضه از حوضه آبریز لای کرباس بردسیر در استان کرمان جهت مطالعه موردی، انتخاب شد. تعداد بهینه خوشه‌ها براساس دو شاخص اعتبارسنجی، Davies-Bouldin و Dunn تعیین شد. نتایج خوشه‌بندی زیرحوضه‌ها در حوضه مورد مطالعه برای تحقیق ایشان، تطابق بالایی را نشان داد. بررسی روی تعداد خوشه ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ انجام شد که با کاهش تعداد خوشه‌ها، مقدار شاخص Davies-Bouldin مرتباً افزایش یافت.

انوری (۱۳۹۴)، مقایسه عملکرد مدل‌های SDP، DP و SSDP در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخرن آبی چند منظوره، را در سیستم چند منظوره زاینده‌رود مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که مدل‌های SDP و SSDP نسبت به مدل‌های DP عملکرد بهتری داشتند و مدل SDP با توجه به شاخص‌های کارایی و کمتر بودن بار محاسباتی آن اندکی بر مدل SSDP برتری دارند.

سلیمانی و همکاران^۱ (۲۰۱۶)، به بررسی سیاست بهره‌برداری بهینه با در نظر گرفتن عدم قطعیت جریان ورودی و نیاز کشاورزی استخراج شده به‌وسیله برنامه‌ریزی دینامیکی با روش SDP به‌کاربرده شده و روش SDP کلاسیک بسط داده شده با در نظر گرفتن تنها یک عدم قطعیت در سیاست بهره‌برداری پرداختند. نتایج مطالعه، مزیت در نظر گرفتن عدم قطعیت جریان ورودی و نیاز آبی را نشان داد.

نه تنها روش خوشه‌بندی در آبهای سطحی قابلیت کلاسه‌بندی جریان را داشته بلکه در منابع زیرزمینی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. جوادی و همکاران^۲ (۲۰۱۷)، از روش خوشه‌بندی K-means به عنوان ابزاری برای اصلاح ارزیابی شاخص DRASTIC در آسیب‌پذیری به آبخوان قزوین با مساحت ۴۹۴۲ کیلومتر مربع پرداختند. این روش که بر روی یک آبخوان بزرگ در شمال ایران اعمال شد و نتایج آن به‌صورت آماری با تخمین‌های آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده از روش سنتی DRASTIC مقایسه شد، نتایج نشان داد که با استفاده از روش خوشه‌بندی یک نقشه آسیب‌پذیری ایجاد گردید که بر وزن‌ها و رتبه‌بندی‌های ثابت تکیه نمی‌کند و در نتیجه نمایش عینی‌تری از ویژگی‌های فیزیکی سیستم ارائه می‌کند. این مسئله سبب شد که ضرایب همبستگی پیرسون برای لایه‌های نیترات، کلرید و TDS، به ترتیب، ۱۵، ۲۲ و ۵ درصد بیشتر از روش سنتی DRASTIC محاسبه گردد.

خو و همکاران^۳ (۲۰۱۸)، از یک روش یکپارچه با ترکیب مدل سیلاب شهری، شامل روش وزن آنتروپی بهبود یافته و الگوریتم خوشه k-means برای ارزیابی خطر سیل شهری در منطقه‌ای در هایکو، چین پیشنهاد کردند. رویکرد پیشنهادی بدون در نظر گرفتن استاندارد طبقه‌بندی سطوح مختلف ریسک، از روش‌های داده‌منا استفاده کرده و نتیجه معقول‌تر و عینی‌تری نسبت به روش‌های معمول سنتی ارائه می‌دهد. هفت شاخص ارزیابی با جفت کردن سیستم شاخص خطر طبیعی و مدل‌های هیدرولوژیکی انتخاب می‌شوند. وزن‌های شاخص با یک روش وزن آنتروپی بهبودیافته محاسبه می‌شوند که روش وزن آنتروپی و روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) را ادغام می‌کند. سپس از الگوریتم خوشه‌های k-means برای تهیه نقشه خطر سیل در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مناطق پرخطر ۱۳/۷ درصد از کل مساحت را پوشش می‌دهند که عموماً عمق آبگرفتگی بالاتر و ارتفاعات کمتری را نشان می‌دهند. نتیجه ارزیابی به خوبی با داده‌های تاریخی رویدادهای سیل مطابقت دارد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت سیل شهری ارائه دهد.

مرید و همکاران (۱۳۹۸)، در تحقیقی عملکرد طیف متنوعی از مدل‌ها شامل برنامه‌ریزی پویای قطعی، برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با کلاسه‌بندی جریان (SDP_Class)، برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی مبتنی بر سناریوهای تاریخی جریان (SDP_Scenario) و برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با نمونه‌گیری (SSDP) را در سیستم چند منظوره سد زاینده‌رود ارزیابی و مقایسه کردند. در این تحقیق ابتدا سیاست‌های بهینه بهره‌برداری در شرایط نیاز ثابت کشاورزی و سپس ملاحظه همزمان نیازهای کشاورزی و برقابی در کنار تامین نیازهای شرب، صنعت و زیست محیطی، در نظر گرفته شد و در نهایت عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و معیارهای کارایی همانند اعتمادپذیری زمانی و کمی، بیشینه و میانگین کمبود و نیز زمان اجرای مدل‌ها ارزیابی کردند. نتایج برتری محسوس مدل‌های SDP و

¹ Soleimani et al

² Javadi et al

³ Xu et al

SSDP را در مقایسه با مدل‌های DP نشان داد. این برتری عملکرد برای مدل SSDP و نیز شرایط حدی کم آبی‌ها بارزتر بود. با وجود عملکرد بهتر مدل SSDP، بار محاسباتی و زمان اجرای آن بیشتر بود که روش‌های پیش تخصیص‌دهی متغیرها و برنامه‌نویسی برداری شده، توانست تاثیر زیادی در کاهش زمان اجرای تمامی مدل‌ها و به خصوص SSDP داشته باشد.

فاطمی و کوهی (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای، مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی را به منظور تعیین کلاس بهینه حجم مخزن سد جامیشان در توابع هدف مختلف مورد بررسی قرار دادند. جریان ورودی با روش طول بازه‌های مساوی به ۳ کلاس بصورت فصلی و حجم مخزن با روش موران به کلاس‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ گسسته‌سازی گردید در این تحقیق تابع هدف به صورت حداقل‌سازی خسارات سیستم برای هر ترکیب از کلاس جریان و حجم مخزن (k,i) روش برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی انجام شد. با دستیابی به سیاست پایا برای هر دوره، مقادیر رهاسازی، حجم جریان و حجم مخزن به صورت قطعی برای هر دوره محاسبه شد.

ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۲۰)، یک ماشین یادگیری افراطی تکاملی مبتنی بر کلاس جدید (CEELM) را برای تعیین قانون عملکرد مناسب مخزن برق آبی توسعه دادند. در این تحقیق در CEELM، روش خوشه‌بندی k-means ابتدا برای تقسیم همه عوامل تأثیرگذار به چندین منطقه فرعی ناپیوسته با الگوهای ساده‌تر اتخاذ شد و سپس ELM بهینه‌سازی شده توسط هوش ازدحام ذرات برای شناسایی رابطه پیچیده ورودی-خروجی در هر خوشه اعمال گردید. نتایج حاصل از دو مخزن چین نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ایشان می‌تواند عملکرد رضایت‌بخشی را در استخراج قوانین عملیاتی مخزن برق آبی به دست آورد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که قابلیت تعمیم مدل را می‌توان با جداسازی هر زیر کلاس متشکل از مجموعه داده مشابه بهبود بخشید.

نوربه و همکاران^۲ (۲۰۲۰)، در تحقیقی از مدل احتمالی شبکه‌های بیزی (BNs) برای ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی جریان ورودی به مخازن با توجه به عدم قطعیت‌ها با استفاده از BN‌های پیوسته و همچنین ادغام خوشه‌بندی K-means و BN‌های گسسته به ترتیب برای پیش‌بینی بزرگی و دامنه جریان‌های ورودی بر حسب سناریوهای پیش‌بینی سالانه و ماهانه در مخزن سد زاینده‌رود استفاده کردند. برای دستیابی به بهترین ساختار شبکه در این سناریوها، الگوهای مختلفی بر اساس ترکیبی از پیش‌بینی کننده‌ها تعریف شد. با توجه به نتایج پیش‌بینی دامنه ورودی، دقت پیش‌بینی الگوهای سالانه و ماهانه به ترتیب ۷۵ و ۸۳ درصد بود. نتایج مدل‌سازی نشان داد که BN در پیش‌بینی محدوده جریان ورودی بهتر از پیش‌بینی عددی آن عمل می‌کند. مدل پیشنهادی می‌تواند تصمیم‌گیری در مورد بهره‌برداری از مخازن را بهبود بخشد.

لیو و همکاران^۳ (۲۰۲۲)، در تحقیقی مدل CVaR-SCHOM را ایجاد کردند و با استفاده از مدل و خوشه‌بندی k-means برای طبقه‌بندی دنباله جریان پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های برق آبی آبشار جینگوان در حوضه رودخانه یالونگ به توصیف دقیقی از عدم قطعیت پیش‌بینی جریان کوتاه‌مدت دست یافتند. نتایج نشان داد که در مقایسه با مدل بهینه‌سازی قطعی سنتی، CVaR-SCHOM پیشنهاد شده در این مقاله در کاربردهای دنیای واقعی به خوبی عمل می‌کند و مدل پیشنهادی درجات مختلفی از بهبود مزایا و خطرات را برای مقادیر مختلف پیش‌بینی به همراه دارد و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با توجه به نگرش ریسک خود، طرح‌های مختلفی را انتخاب کنند.

لیو و همکاران (۲۰۲۳)، از روش خوشه‌بندی در افزایش دقت مدل پیش‌بینی کوتاه‌مدت استفاده کردند چراکه پیش‌بینی رواناب با دقت بالا برای محافظت از خواص و جان افراد حیاتی است. در این مطالعه، یک چارچوب کوتاه‌مدت پیش‌بینی جریان با ترکیب روش LSTM با نقشه خودسازمان‌دهنده (SOM) پیشنهاد گردید که عوامل آبی-هواشناسی را از طریق شبکه SOM خوشه‌بندی می‌کند تا جریان را به چندین حالت جریان با حالت‌های مختلف خوشه‌بندی کند. این مدل برای پیش‌بینی جریان ۱ تا ۳ روز آینده در حوضه رودخانه Qingxi در چین استفاده شد و عملکرد آن با مدل‌های LSTM, ANN, SVR, SOM-ANN, SOM-SVR, FCM-LSTM مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که SOM-LSTM به طور قابل توجهی دقت پیش‌بینی پیش‌بینی کوتاه‌مدت جریان را بهبود می‌بخشد و قابل‌اعتمادترین پیش‌بینی

¹ Zhang et al

² Noorbeh et al

³ Liu et al

را زمانی که زمان تحویل ۱ تا ۲ روز است، دارد. همچنین اگر تعداد خوشه‌هایی که روی ۴ تنظیم شوند برای چارچوب پیش‌بینی پیشنهادی بسیار مناسب‌تر است. نتایج کلی نشان می‌دهد که SOM-LSTM یک روش کارآمد برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت جریان ارائه می‌دهد. بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد انواع روش‌های پویای تصادفی در حل مسئله مدیریت و بهینه‌سازی بر عملکرد مخازن سد در مقایسه با روش‌های قطعی مانند برنامه‌ریزی‌های خطی، غیرخطی و دینامیکی عملکرد رضایت‌بخشی دارند. اما تاکنون از روش خوشه‌بندی K-means در کلاسه بندی جریان ورودی به مخزن و بررسی اثر آن در نتایج برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP) برای بهینه‌سازی عملکرد مخازن سد استفاده نشده است. لذا در پژوهش حاضر پس از معرفی روش خوشه‌بندی k میانگین (K-means) و برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP)، عملکرد این روش‌ها در مسئله مدیریت و بهینه‌سازی عملکرد سد جامیشان واقع در استان کرمانشاه ارزیابی شده است.

موارد و روش‌ها

در برنامه‌ریزی در شرایط پویای تصادفی، حجم مخزن و جریان ورودی به مخزن در کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی و گسسته‌سازی می‌شوند. از آنجاییکه مقدار جریان ورودی مخزن در این رویکرد به صورت غیرقطعی بیان می‌شود، می‌توان تابع احتمال انتقال آن را با توجه به فرآیند احتمالاتی زنجیره مارکوف مرتبه اول نوشت. در این روش هدف محاسبه احتمال وقوع متغیر دارای عدم قطعیت در دوره زمانی بعدی در هر یک از بازه‌های گسسته‌سازی شده است. یک فرآیند مارکوف مرتبه اول دارای این ویژگی است که وابستگی مقادیر آینده فرآیند به مقادیر گذشته، صرفاً به مقدار اخیر آن و نه به مقادیر گذشته یا مشاهدات بستگی دارد و رابطه ریاضی آن به صورت زیر بیان می‌شود (لاکس و همکاران^۱، ۲۰۰۵):

$$P_{ij}^t = [[Q_{t+1}|Q_t]] \quad (1)$$

P_{ij}^t : تابع احتمال انتقال است که نشان‌دهنده‌ی میزان احتمال وابستگی دبی وقوع یافته در دوره $t+1$ به وقوع دبی در دوره t است.

Q_{t+1} : دبی در دوره $t+1$

Q_t : دبی در دوره t

باید توجه داشت که میزان تابع ماتریس فوق از طریق سری زمانی تاریخی آینده‌ی ورودی به مخزن سد به دست می‌آید.

روابط حاکم در برنامه‌ریزی پویای تصادفی:

با استفاده از رابطه پیوستگی در مخزن سد برای تعیین ظرفیت مخزن معادله بیان می‌توان نوشت:

$$S_{lt+1} = S_{kt} + Q_{it} - E_{klt} - R_{kilt} \quad (2)$$

که در این رابطه شاخص‌های k و l مربوط به کلاس‌بندی مخزن به ترتیب در ابتدای دوره‌های t و $t+1$ می‌باشند و شاخص i مربوط به کلاس‌بندی جریان ورودی مخزن در دوره‌ی t می‌باشد.

E_{klt} : میزان تبخیر از مخزن متناظر با کلاس بندی‌های k و l می‌باشد.

R_{kilt} : مقدار جریان خروجی در طول دوره t می‌باشد.

اگر مقدار عملکرد کل سیستم B_{kilt} باشد و تابع هدف حداقل کردن کاهش مقدار امید ریاضی بهره‌وری سیستم باشد تابع تکرار مربوط به برنامه‌ریزی پویای تصادفی به صورت زیر می‌باشد:

$$f_t^n(k,i) = \text{Min} \left[B_{kilt} + \sum_j P_{ij}^t f_{t+1}^{n-1}(l, j) \right] \quad (3)$$

¹ Loucks et al

تابع تکرار در هر مرحله محاسبه می شود و در حالت پایدار یعنی زمانی که مقدار تابع هدف در سال های متفاوت برای دوره های زمانی یکسان و در هر کلاسه جریان و مخزن مقدار آن برابر شود ادامه خواهد یافت. لذا در شرایط پایدار میزان اختلاف $f_t^{n+T}(k \text{ و } i) - f_t^n(k \text{ و } i)$ مقدار ثابتی خواهد شد و پس از ارضای این شرط مقدار سیاست بهینه تحت عنوان $I^*(k \text{ و } i \text{ و } t)$ به دست خواهد آمد. با رسیدن به سیاست پایای بهینه و مشخص بودن $I^*(k \text{ و } i \text{ و } t)$ در هر دوره مقادیر احتمال برای رهاسازی از مخزن، جریان ورودی و حجم مخزن از روابط ۴ تا ۶ محاسبه می شود (لاکس و همکاران، ۲۰۰۵).

$$PR_{ljt+1} = \sum_k \sum_i PR_{kit} P_{ij}^t \quad (۴) \text{ رابطه پیوستگی در شرایط پایدار:}$$

$$PS_{kt} = \sum_i PR_{kit} \quad (۵)$$

$$PQ_{it} = \sum_k PR_{kit} \quad (۶)$$

تابع هدف:

تابع هدف به صورت حداقل سازی خسارات سیستم بیان می شود:

$$B_{kilt} = \left[(R_{kilt} - T_r^t)^2 + (S_{kt} - T_s^t)^2 \right] \quad (۷)$$

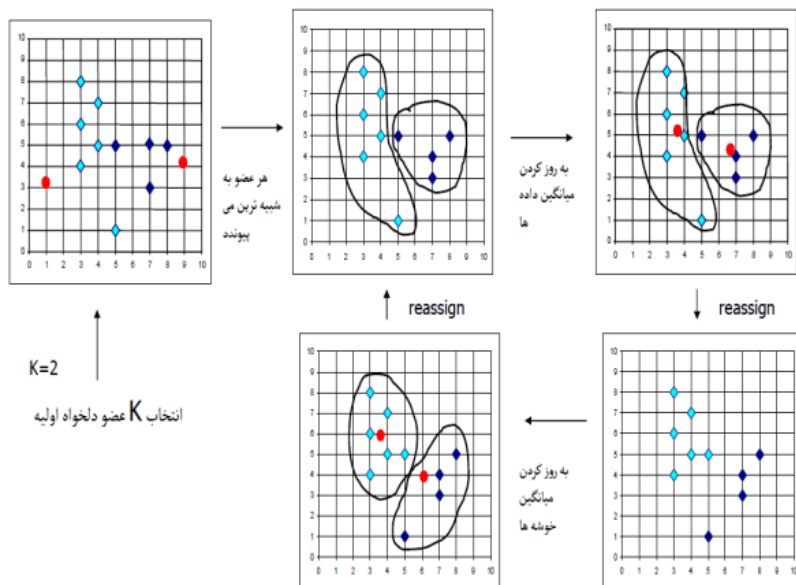
که در این فرمول، S_{kt} ذخیره مخزن در ابتدای دوره، T_s^t مقدار خروجی هدف در هر دوره، R_{kilt} مقدار رهاسازی از مخزن در هر دوره و T_r^t مقدار هدف حجم خروجی از مخزن (نیاز پایاب سد) در هر دوره است (لاکس و همکاران، ۲۰۰۵).

گسسته سازی جریان - روش خوشه بندی K-means:

اصطلاح k-means clustering برای اولین بار توسط جیمز مک کوین در سال ۱۹۶۷ مورد استفاده قرار گرفت. K-means الگوریتمی مبتنی بر شی می باشد و نماینده خوشه ها را از میان خود داده ها و نه میانگین گیری از آنها انتخاب می کند. در واقع K-means یک خوشه، مرکزی ترین عنصر یک خوشه است. هدف این روش، کم کردن حساسیت نسبت به مقادیر بزرگ در مجموعه داده هاست. در این الگوریتم هر خوشه با یکی از داده های نزدیک به مرکز معرفی می شود؛ بنابراین این روش، روشی در کمی سازی بردار هاست که در اصل از پردازش سیگنال گرفته شده و برای آنالیز خوشه بندی در داده کاوی محبوب است. k - میانگین، خوشه بندی با هدف تجزیه مشاهدات n به k خوشه است که در آن هر یک از مشاهدات متعلق به خوشه های با نزدیک ترین میانگین آن است، این میانگین به عنوان پیش نمونه استفاده می شود. در این الگوریتم با توجه به تعداد دسته بندی داده ها (k) مقدار تابع حداقل مربعات زیر مینیمم شده و داده ها به بهترین شکل از هم گسسته و دسته بندی می شوند (استینلی و بروسکا، ۲۰۰۷).

$$J = \sum_k \sum_{p_i} (p_i - c_k)^2 \quad (۸)$$

که p_i یا (X_i, Y_i) یک نمونه داده از مجموعه داده های C_k یا (C_{kx}, C_{ky}) به مرکز خوشه k اشاره دارد. نمونه ای از این طبقه بندی در الگوریتم k-means در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. مراحل طبقه‌بندی در الگوریتم k-means (استینلی و بروسکا، ۲۰۰۷)

گسسته‌سازی مخزن - روش موران

در این مطالعه برای گسسته‌سازی حجم مخزن از روش موران استفاده شده است. در این روش حد بالا و پایین دامنه تغییرات و مرز بالای هر دسته به عنوان شاخص‌های گسسته‌سازی حجم مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرند (دامنه تغییرات بر $n-1$ دسته تقسیم می‌شود).

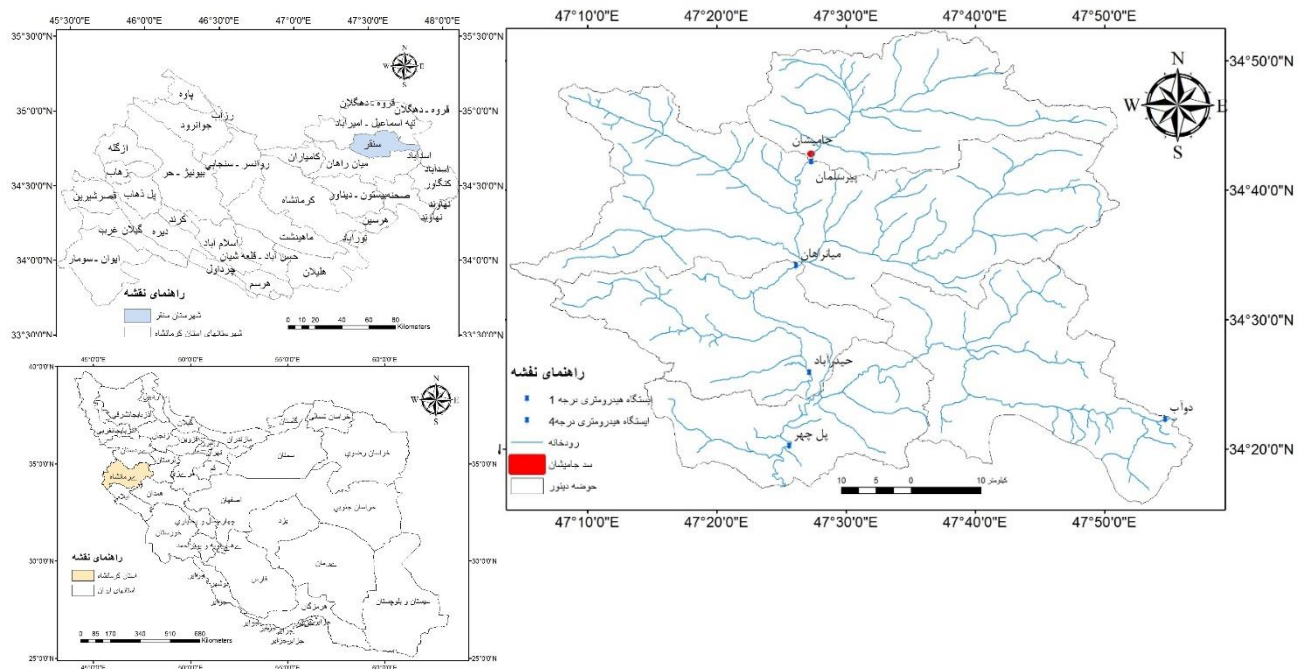
$$S_k = (k-1) \frac{CAP}{SDN-1}; \quad k=1,2,3,\dots,SDN-1 \quad (9)$$

که S_k حجم گسسته شده k ام، CAP محدوده حجم فعال مخزن (Capacity)، SDN تعداد تراز حجم ذخیره گسسته شده (Storage Discrete Number) می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه:

در این تحقیق از داده‌های حوضه آبریز سد جامیشان با مساحت ۵۲۷/۰۷ کیلومتر مربع در جنوب غربی شهرستان سنقر و کلیایی در نزدیکی ایستگاه هیدرومتری پیرسلیمان استفاده شده است. این حوضه آبریز از نظر تقسیمات کشوری جزء استان کرمانشاه و بخشی از سرشاخه‌های حوضه رودخانه سیمره محسوب می‌شود. حوضه آبریز مورد استفاده در این تحقیق در حد فاصل $32^\circ - 34^\circ$ تا $53^\circ - 54^\circ$ عرض شمالی و $22^\circ - 47^\circ$ تا $47^\circ - 52^\circ$ طول شرقی می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه آن ۴۴۱ میلی‌متر، متوسط تبخیر از سطح آزاد آن ۱۵۳۴ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مشخصات فنی سد جامیشان در جدول ۱ آورده شده و همچنین موقعیت سد جامیشان در این حوضه آبریز در شکل (۲) نشان داده شده است. آبدهی فصلی در ۴۱ سال آمار (۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰) مورد استفاده قرار گرفته است.

¹ Steinley & Brusco



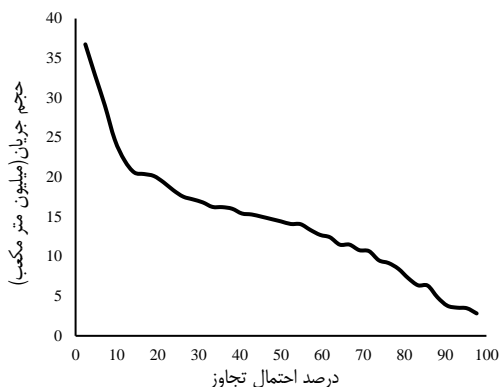
شکل ۲. موقعیت سد جامیشان واقع در استان کرمانشاه در حوضه آبریز

این سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با حجم مفید ۵۳/۱۸ میلیون متر مکعب می‌باشد. اهداف احداث این سد عبارتند از: تنظیم و ذخیره آب رودخانه جامیشان جهت آبیاری حدود ۳۰۰۰ هکتار اراضی دشت دینور و تنظیم حقا به ۲۲۰۰ هکتار از اراضی دشت چمچمال؛ تامین آب صنایع منطقه؛ کنترل سیلاب و بهبود محیط زیست منطقه می‌باشد. نیازهای پایاب سد شامل کشاورزی، صنعت و زیست‌محیطی است که عدد مربوط به نیاز هر ماه یا فصل، حاصل مجموع ۳ نیاز ذکر شده می‌باشد. مشخصات سد جامیشان در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات سد جامیشان

نوع سد	سنگریزه‌ای با هسته رسی
طول تاج	۲۷۷/۶ متر
ارتفاع از بستر	۵۳ متر
حجم بدنه سد	۱/۰۸ میلیون مترمکعب
حجم مخزن در نرمال	۶۲/۸ میلیون مترمکعب
حجم مفید	۵۳/۱۸ میلیون مترمکعب

مقدار خروجی هدف در هر دوره که در این تحقیق میزان نیاز فصلی پایاب سد جامیشان در هر فصل می‌باشد که به ترتیب ۱۳/۲، ۱/۵، ۵/۶ و ۲۰/۲ میلیون مترمکعب از پاییز تا تابستان می‌باشد مقدار حجم مخزن هدف در هر دوره که در سد جامیشان برابر ۳۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. مخزن سد جامیشان با استفاده از روش موران نیز به ۷ کلاستر (۰/۵، ۹/۲، ۱۷/۹، ۲۶/۶، ۳۵/۳، ۴۴ و ۵۲/۷) تقسیم‌بندی شده است (فاطمی و کوهی ۱۳۹۸). برای انجام این تحقیق، از سری تاریخی جریان ورودی به مخزن سد جامیشان در یک دوره ۴۱ ساله استفاده شده است، که منحنی تداوم جریان آن به صورت شکل (۳) می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود این رودخانه صورت دائمی بوده و دارای میانه ۱۴/۴ میلیون مترمکعب در ماه می‌باشد.



شکل ۳. منحنی تداوم جریان رودخانه جامیشان

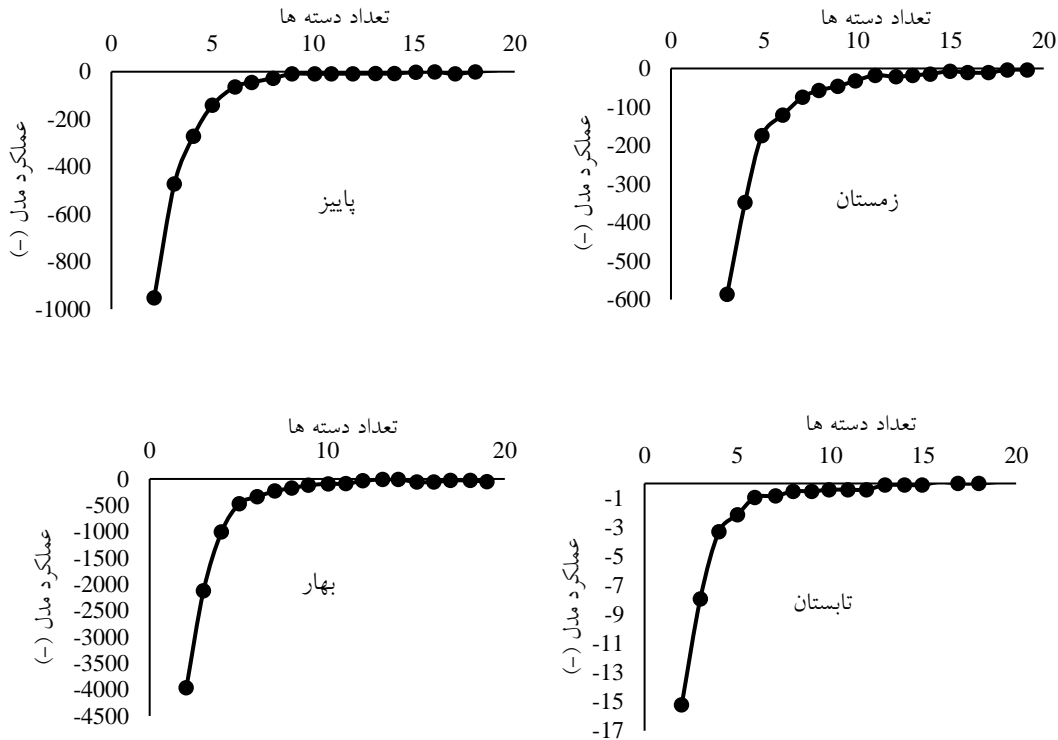
با توجه به کلاس‌های موجود ماتریس‌های احتمال انتقال برای هر دوره (فصل) با استفاده از برنامه نوشته شده در محیط پایتون با استفاده از قاعده زنجیره مارکوف مرتبه اول بین دبی‌های ورودی محاسبه شد. سری تاریخی جریان ورودی به مخزن به صورت یک ماتریس 4×4 تبدیل می‌شود و با روش k-means مرکز هر دسته به عنوان شاخص آن دسته لحاظ شد. در ادامه، با استفاده از تابع تکرار پسروری تعریف شده، محاسبات به صورت پس رو صورت تا رسیدن به شرایط مانا ادامه یافت. نهایتاً مقدار l^* برای هر ۴ دوره و به ازای ترکیبات مختلف از k و i به دست آمد. با استفاده از روش ماتریس معکوس جواب دستگاه معادلات احتمال خروجی از مخزن در هر دوره و هر کلاس گسسته‌سازی شده دبی و مخزن محاسبه در محیط پایتون با کتابخانه numpy محاسبه گردید.

نتایج

در این مطالعه، برنامه‌ریزی پویای تصادفی سد مخزنی جامیشان با در نظر گرفتن حجم گسسته مخزن سد توسط روش موران در هفت بازه (فاصلی و کوهی، ۱۳۹۸) و همچنین استفاده از ۴۹۲ داده ورودی به مخزن سد، ابتدا کلاس بهینه دبی ورودی به مخزن سد با روش K-means مشخص شد. با این روش جدید کلاس‌های مختلف جریان ورودی مخزن سد برای ۴ دوره فصلی (پاییز، زمستان، بهار و تابستان) تقسیم شده و نتایج عملکرد در کلاس‌های مختلف جریان و در هر فصل به صورت شکل (۳) ارائه شده است. میزان عملکرد مربوطه هر کلاس جریان از رابطه ۸ محاسبه شده است. همانطور که از شکل (۳) قابل مشاهده است بهترین کلاس دبی جریان از بین کلاس‌های ۲ تا ۱۹ گانه با توجه به میزان عملکرد که برای فصول پاییز، زمستان، بهار و تابستان به ترتیب $142/57$ ، $176/90$ ، $475/36$ و $2/10$ در کلاس پنجم جریان ورودی مخزن اتفاق می‌افتد. کلاس‌های جریان ورودی برای ۴ فصل (پاییز، زمستان، بهار و تابستان) که با روش K-means به ۵ کلاس تقسیم شده به صورت جدول (۲) آورده شده است. همچنین جهت مقایسه نتایج حاصل با مقادیر دبی شاخص با استفاده از روش طول بازه یکسان برای ۵ کلاس جریان فصلی ورودی سد جامیشان در دوره مشابه که توسط (کوهی، ۱۳۹۶) انجام شده است در جدول (۲) ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تغییر معنی‌داری در مقادیر شاخص دبی در هر فصل برای ۵ کلاس در دوروش وجود دارد و روش k_means به خوبی توانسته است در یک فصل مشخص، این شاخص را با توجه به تعداد فراوانی دبی‌ها بصورت متغیر نه مساوی بین کلاس‌های مختلف محاسبه نماید. این مطلب به ویژه در فصل تابستان که آبدی کمتری وجود دارد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و کاملاً مشهود می‌باشد. بدیهی است ایت تغییرات در کلاس دبی با روش k_means نسبت به طول بازه یکسان برای فصل‌های مختلف منجر به تغییرات معنی دار در ماتریس احتمال انتقال و نهایتاً محاسبه متفاوت احتمال خروجی مخزن به ازای هر کلاس ورودی جریان و مخزن در هر فصل خواهد بود.

سپس با توجه به انتخاب کلاس جریان مناسب (پنج کلاس)، درایه‌های ماتریس احتمال انتقال برای هر دوره (فصل) با استفاده از زنجیره مارکوف مرتبه اول محاسبه و نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است. زنجیره مارکوف مدلی تصادفی برای توصیف یک توالی از رویدادهای احتمالی است که در آن احتمال هر رویداد فقط به حالت رویداد قبلی بستگی دارد و با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که برای فصل‌های موجود در کلاستر ۵ تایی احتمال انتقال هر خوشه (تابع احتمال انتقال) و وابستگی خوشه‌ها در هر سطر با یک (۱۰۰ درصد) می‌باشد و در هر سطر احتمال

انتخاب داده‌های تصادفی در خوشه‌های مورد نظر را نشان می‌دهد که هرچه این اعداد به یک نزدیک‌تر شود احتمال انتخاب آن خوشه بیشتر می‌باشد و اگر صفر شود می‌توان گفت احتمال انتخاب دبی وقوع یافته در دوره بعدی نسبت به وقوع دبی در دوره قبل آن خوشه برای سطر مورد نظر بسیار پایین و در حد صفر می‌باشد.



شکل ۳. عملکرد مدل K-means در ۴ فصل

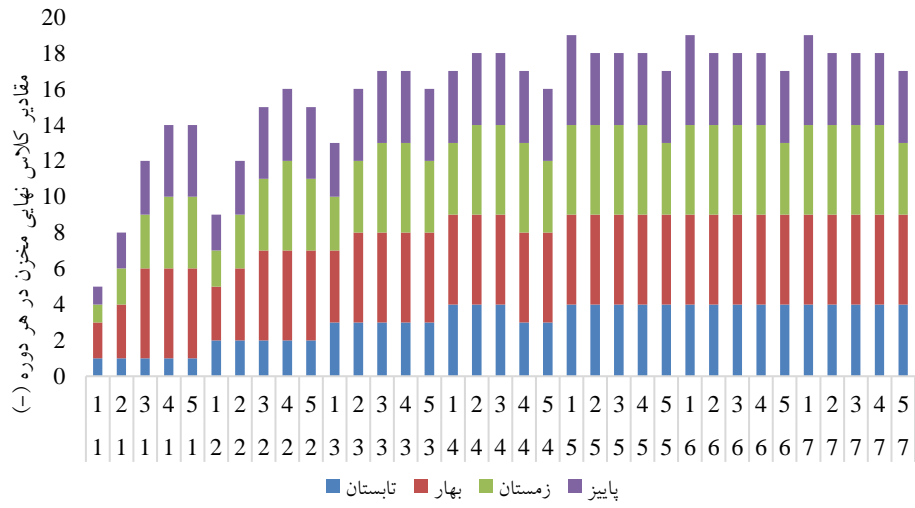
جدول ۲. کلاس‌های جریان ورودی به مخزن سد جامیشان با روش K-means بر حسب میلیون متر مکعب

روش طول بازه مساوی (کوهی ۱۳۹۶)					روش K-means				
تابستان	بهار	زمستان	پاییز	کلاس	تابستان	بهار	زمستان	پاییز	کلاس
Qit	Qit	Qit	Qit	i	Qit	Qit	Qit	Qit	i
0.69	11.7	6.3	5.2	1	0.42	10.7	4.5	3.3	1
1.55	26.8	15.4	12.9	2	1.06	23.9	12.7	9.2	2
2.46	41.1	24.5	21.7	3	1.67	37.8	20.8	21.7	3
3.20	53.7	31.5	30.8	4	2.58	53.7	26.6	36.8	4
4.35	71.9	43.2	44.5	5	5.3	85.0	46.9	52.1	5

جدول ۳. زنجیره‌ی مارکفی مرتبه اول برای ۴ فصل در ۵ cluster

پاییز					
کلاس	1	2	3	4	5
1	0.263	0.316	0.158	0.211	0.053
2	0.000	0.167	0.389	0.444	0.000
3	0.000	0.000	0.500	0.000	0.500
4	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
زمستان					
1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.556	0.222	0.000	0.222	0.000
3	0.182	0.273	0.455	0.091	0.000
4	0.154	0.615	0.154	0.077	0.000
5	0.000	0.000	0.667	0.000	0.333
بهار					
1	0.429	0.286	0.286	0.000	0.000
2	0.000	0.231	0.308	0.462	0.000
3	0.000	0.222	0.333	0.444	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.750	0.250
5	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
تابستان					
1	0.833	0.167	0.000	0.000	0.000
2	0.552	0.444	0.000	0.000	0.000
3	0.583	0.417	0.000	0.000	0.000
4	0.154	0.538	0.154	0.077	0.077
5	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000

مقادیر نهایی حجم مخزن در انتهای هر دوره (l^*) به ازای کلاس‌های مختلف جریان و مخزن در شرایط مانا محاسبه و در شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات این متغیر در بهار تا ۵ کلاس مخزن و کمترین آن در تابستان با یک کلاس از مخزن اتفاق افتاده است. پس از محاسبه این پارامتر با استفاده از روابط شرایط مانا محاسبات مقادیر احتمال خروجی از مخزن در هر دوره و به ازای هر کلاس ورودی از جریان و مخزن صورت گرفت که نتایج آن در جدول (۴) بیان شده است.



شکل ۴. مقادیر فصلی بهینه شده کلاسه حجم مخزن در انتهای دوره به ازای هر K و i مشخص

جدول ۴. سیاست بهره‌برداری و احتمال هر تصمیم در هر فصل و به ازای هر کلاس ورودی جریان و مخزن

k	i	پاییز				زمستان				بهار				تابستان			
		l*	Prkit	Pqit	PSkt	l*	Prkit	Pqit	PSkt	l*	Prkit	Pqit	PSkt	l*	Prkit	Pqit	PSkt
1	1	1	0.000	0.463		1	0.000	0.122		2	0.000	0.341		1	0.000	0.146	
1	2	2	0.000	0.439		2	0.000	0.22		3	0.000	0.317		1	0.000	0.22	
1	3	3	0.000	0.049	0.00	3	0.000	0.268	0.00	5	0.000	0.22	0.00	1	0.000	0.293	0.00
1	4	4	0.000	0.024		4	0.000	0.317		5	0.000	0.098		1	0.000	0.317	
1	5	4	0.000	0.024		4	0.000	0.073		5	0.000	0.024		1	0.000	0.024	
2	1	2	0.000	0.463		2	0.000	0.122		3	0.000	0.341		2	0.000	0.146	
2	2	3	0.000	0.439		3	0.000	0.22		4	0.000	0.317		2	0.000	0.22	
2	3	4	0.000	0.049	0.00	4	0.000	0.268	0.00	5	0.000	0.22	0.00	2	0.000	0.293	0.00
2	4	4	0.000	0.024		5	0.000	0.317		5	0.000	0.098		2	0.000	0.317	
2	5	4	0.000	0.024		4	0.000	0.073		5	0.000	0.024		2	0.000	0.024	
3	1	3	0.000	0.463		3	0.000	0.122		4	0.000	0.341		3	0.000	0.146	
3	2	4	0.000	0.439		4	0.000	0.22		5	0.000	0.317		3	0.000	0.22	
3	3	4	0.000	0.049	0.00	5	0.000	0.268	0.00	5	0.000	0.22	0.00	3	0.000	0.293	0.00
3	4	4	0.000	0.024		5	0.000	0.317		5	0.000	0.098		3	0.000	0.317	
3	5	4	0.000	0.024		4	0.000	0.073		5	0.000	0.024		3	0.000	0.024	
4	1	4	0.463	0.463		4	0.122	0.122		5	0.122	0.341		4	0.000	0.146	
4	2	4	0.439	0.439		5	0.220	0.22		5	0.000	0.317		4	0.000	0.22	
4	3	4	0.049	0.049	1.00	5	0.268	0.268	1.00	5	0.049	0.22	0.20	4	0.000	0.293	0.00
4	4	4	0.024	0.024		5	0.317	0.317		5	0.000	0.098		3	0.000	0.317	
4	5	4	0.024	0.024		4	0.073	0.073		5	0.024	0.024		3	0.000	0.024	
5	1	5	0.000	0.463		5	0.000	0.122		5	0.220	0.341		4	0.146	0.146	
5	2	4	0.000	0.439		5	0.000	0.22		5	0.317	0.317		4	0.220	0.22	
5	3	4	0.000	0.049	0.00	5	0.000	0.268	0.00	5	0.171	0.22	0.80	4	0.293	0.293	1.00
5	4	4	0.000	0.024		5	0.000	0.317		5	0.098	0.098		4	0.317	0.317	
5	5	4	0.000	0.024		4	0.000	0.073		5	0.000	0.024		4	0.024	0.024	
6	1	5	0.000	0.463		5	0.000	0.122		5	0.000	0.341		4	0.000	0.146	
6	2	4	0.000	0.439		5	0.000	0.22		5	0.000	0.317		4	0.000	0.22	
6	3	4	0.000	0.049	0.00	5	0.000	0.268	0.00	5	0.000	0.22	0.00	4	0.000	0.293	0.00
6	4	4	0.000	0.024		5	0.000	0.317		5	0.000	0.098		4	0.000	0.317	
6	5	4	0.000	0.024		4	0.000	0.073		5	0.000	0.024		4	0.000	0.024	
7	1	5	0.000	0.463		5	0.000	0.122		5	0.000	0.341		4	0.000	0.146	
7	2	4	0.000	0.439		5	0.000	0.22		5	0.000	0.317		4	0.000	0.22	
7	3	4	0.000	0.049	0.00	5	0.000	0.268	0.00	5	0.000	0.22	0.00	4	0.000	0.293	0.00
7	4	4	0.000	0.024		5	0.000	0.317		5	0.000	0.098		4	0.000	0.317	
7	5	4	0.000	0.024		4	0.000	0.073		5	0.000	0.024		4	0.000	0.024	

همانطور که از جدول فوق قابل مشاهده است بیشترین میزان احتمال خروجی از مخزن در سه فصل پاییز، زمستان و بهار به ازای هر کلاس جریان دلخواه در کلاس مخزن ۴ اتفاق افتاده است. این در حالی است که این میزان در فصل تابستان در هر کلاس دلخواه جریان در کلاس ۵

مخزن اتفاق افتاده است. دلیل این امر نیز میزان آبدهی کمتر این ماه و بالاتر بودن میزان نیاز پایاب سد در این فصل نسبت به سایر فصول دیگر است که مخزن برای تامین نیازهای پایاب به حجم بیشتری نیاز داشته است. از سوی دیگر حداکثر میزان احتمال جریان ورودی در کلاس‌های جریان ۱، ۴، ۲ و ۴ از ۵ کلاس ممکن به ترتیب در فصول پاییز، زمستان، بهار و تابستان اتفاق افتاده است.

بحث

در این تحقیق به برنامه‌ریزی پویای تصادفی مخزن سد جامیشان با استفاده از روش K-means در کلاسه‌بندی دبی جریان ورودی مخزن بصورت فصلی برای داده‌های تاریخی ۴۱ سال دبی جریان ورودی به سد پرداخته شد. برای گسسته سازی حجم ذخیره مخزن از روش موران و در ۷ کلاسه صورت گرفت. جهت محاسبه ماتریس احتمال انتقال طی فرآیند زنجیره مارکوف مرتبه اول نیاز به داشتن کلاسه موثر جریان در هر دوره می‌باشد که برای این منظور از روش k-means استفاده شد. آبدهی تاریخی ورودی سد در هر فصل از ۲ تا ۲۰ کلاسه مختلف طبقه‌بندی شد که این کار با کمک برنامه‌نویسی در محیط پایتون و بویژه کتابخانه Scikit-learn صورت گرفت.

نتیجه‌گیری

بررسی عملکرد مدل K-means در ۴ فصل مختلف، نشان داد که از میان ۱۹ خوشه در نظر گرفته شده، برای کلاسه جریان ۵ بهترین نتایج در طبقه‌بندی دبی فصلی محاسبه شده است. از آنجا که تغییر در کلاسه‌ها منجر به تغییرات ماتریس احتمال انتقال شده و این فرآیند نتایج بهره‌برداری مخزن را دستخوش تغییر خواهد داد. می‌توان گفت که استفاده از این روش کلاسه‌بندی دبی می‌تواند در زمینه مدیریت و بهینه‌سازی بر عملکرد مخزن سد، تاثیر به‌سزایی داشته باشد.

سپس با استفاده از تابع تکرار تعریف شده، محاسبات به صورت پس‌رو صورت تا رسیدن به شرایط مانا ادامه یافت و مقدار I^* برای هر ۴ دوره و به ازای ترکیبات مختلف از k و i به دست آمد. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات در بهار تا ۵ کلاسه مخزن و کمترین آن در تابستان با یک کلاسه از مخزن اتفاق افتاده است. در ادامه با استفاده از روابط شرایط مانا محاسبات مقادیر احتمال خروجی از مخزن در هر دوره و به ازای هر کلاسه ورودی از جریان و مخزن صورت گرفت که بیشترین میزان احتمال خروجی از مخزن در فصول پاییز، زمستان و بهار برای کلاسه مخزن ۴ اتفاق افتاده است و برای فصل تابستان به دلیل آبدهی کمتر و بالاتر بودن میزان نیاز، این مقدار در کلاسه ۵ مخزن اتفاق افتاده است. بطور کلی استفاده از روش‌های نوین طبقه‌بندی مانند روش K-means در گسسته‌سازی آبدهی جریان در برنامه‌ریزی پویای تصادفی مخزن با توجه به امکان بهینه‌شدن تعداد خوشه‌ها در هر دوره زمانی برای هر سری تاریخی آبدهی، می‌تواند بسیار سودمند و تاثیرگذار باشد. چراکه تغییر در کلاسه‌بندی جریان منجر به تغییر معنی‌دار در ماتریس احتمال انتقال و نهایتاً سبب تغییر در معیار تصمیم‌گیری حجم مخزن (I^*) در انتهای هر دوره به ازای هر k و i خواهد شد.

تقدیر و تشکر

در پایان از شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه که اطلاعات موردنیاز این پژوهش را در اختیار نویسندگان قرار دادند، سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

انوری، صدیقه، موسوی، سید جمشید، و مرید، سعید. (۱۳۹۴). مقایسه عملکرد مدل‌های DP، SDP و SSDP در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن‌های آبی چندمنظوره (مطالعه موردی: مخزن سد زاینده‌رود). پژوهش آب ایران، ۹(۱)، ۱۲۱-۱۱۱.

https://iwrij.sku.ac.ir/article_11037.html

برهانی داریان، علیرضا، و افتخار جواد، الهام. (۱۳۸۴). نقش عدم قطعیت پیش بینی جریان ورودی در بهره‌برداری بهینه از مخازن. تحقیقات

منابع آب ایران، ۱۱(۳)، ۱۵-۱۰۱. <https://sid.ir/paper/100186/fa.۱-۱۵>

- فاطمی، سیداحسان، و کوهی، هیوا. (۱۳۹۸). تعیین و آنالیز گسسته سازی حجم مخزن سد جامیشان با برنامه ریزی پویای احتمالاتی در توابع هدف مختلف. پژوهش های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۶(۲)، ۹۷-۱۱۵.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15193.3038>
- فرهمند، رحیم، و کریمی گوگری، شهرام. (۱۳۹۱). مقایسه عملکرد دو روش خوشه‌بندی، K-means و فازی، براساس خصوصیات مورفولوژیکی زیرحوضه‌ها. سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، ساری. <https://civilica.com/doc/335666/>.
- کوهی، هیوا. (۱۳۹۶). تأثیر رویکردهای برنامه ریزی پویا در بهره برداری بهینه از مخزن. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی.
- مدرسی، فرشته، و بزرگ حداد، امید. (۱۳۸۷). ارزیابی اهمیت نحوه گسسته‌سازی در روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی در بهره‌برداری از مخزن. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تبریز. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1080543.html>.

References

- Anvari, S., Mousavi, S., & Morid, S. (2015). Comparing the performance of the DP, SDP and SSDP models for optimizing the operation of multi-purpose reservoirs (Case study: Zayandeh-Rood dam). *Iranian Water Researches Journal*, 9(1), 111-121. https://iwrij.sku.ac.ir/article_11037.html [In Persian]
- Bahrani Dariane, A., & Eftekhar Javadi, E. (2005). Assessment of Inflow Forecast Uncertainty in Optimal Reservoir Operation. *Iran-Water Resources Research*, 1(3), 1-15. <https://sid.ir/paper/100186/fa> [In Persian]
- Farahmand, R., & Karimi Goghari, Sh. (2011). Performance comparison of two clustering methods, K-means and phase, based on morphological characteristics of sub-basins. The third national conference on comprehensive management of water resources, Sari. <https://civilica.com/doc/335666/> [In Persian]
- Fatemi, S. E., & Koohi, H. (2019). Determination and analysis of reservoir storage discretization in Jamishan dam using stochastic dynamic programming with different objective functions. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(2), 97-115. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15193.3038> [In Persian]
- Javadi, S., Hashemy, S.M., Mohammadi, K., Howard, K.W.F., & Neshat, A. (2017). Classification of aquifer vulnerability using K-means cluster analysis. *J. Hydrol*, 549, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.060>
- Koohi, H. (2016). The effect of dynamic planning approaches on the optimal exploitation of the reservoir. Master's thesis, Razi University. [In Persian]
- Liu, Sh., Zhou, X., Li, B., He, X., Zhang, Y., & Fu, Y. (2023). Improving short-term streamflow forecasting by flow mode clustering. *Stoch Environ Res Risk Assess* 37, 1799–1819. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02367-z>
- Liu, Y., Ji, C., Wang, Y., Zhang, Y., Hou, X., & Xie, Y. (2022). Quantifying streamflow predictive uncertainty for the optimization of short-term cascade hydropower stations operations. *Journal of Hydrology*, 605, 127376. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127376>
- Loucks, D.P., & Eelco Van Beek. (2005). *Water resources systems planning and management, An introduction to methods, models and applications*, UNESCO. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Madrasi, F., & Bozorg Haddad, O. (2007). Evaluation of the importance of discretization in stochastic dynamic programming method in reservoir operation, the third water resources management conference, Tabriz. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1080543.html> [In Persian]
- Noorbeh, P., Roozbahani, A., & Kardan Moghaddam, H. (2020). Annual and monthly dam inflow prediction using Bayesian networks. *Water Resources Management*, 34(9), 2933-2951. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02591-8>

- Soleimani, SH., Bozorg Hadad, O., & Loaiciga, A. (2016). Reservoir Operation Rules with Uncertainties in Reservoir Inflow and Agricultural Demand Derived with Stochastic Dynamic Programming. *American Society of Civil Engineers*, 142(11), 99–121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.000106](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000106)
- Steinley, D., & Brusco, M. J. (2007). Initializing k-means batch clustering: A critical evaluation of several techniques. *Journal of Classification*, 24(1), 99–121. <https://doi.org/10.1007/s00357-007-0003-0>
- Xu, H., Ma, C., Lian, J., Xu, K., & Chaima, E. (2018). Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China. *Journal of Hydrology*, 563, 975–986. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.06.060>
- Zhang, H., Basu, S., & Davidson, I. (2020). A framework for deep constrained clustering-algorithms and advances. In *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, Cham, 57-72. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46150-8_4



The effect of irrigation systems on yield, yield components and water use efficiency in three wheat genotypes in Kermanshah province

Jalal Jalili¹ , Meisam Palash² , Khalil Jalili³ , Ali Akbarabadi⁴ 

¹ Faculty member, Department of Environmental Resources management, ACECR, Kermanshah, Iran. E-mail: j.jalili@acecr.ac.ir

² Corresponding Author, Researcher of Environmental Resources management Department, ACECR, Kermanshah, Iran. E-mail: Meisampalash1371@gmail.com

³ Assistant Professor, Department of Environmental Resources management, ACECR, Kermanshah, Iran. E-mail: jalili@acecr.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran. E-mail: ali.akbarabadi65@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

Iran is the thirteenth country in terms of wheat production in the world. Kermanshah Province is known as the west agricultural pole of the country. It has about 700,000 hectares of agricultural land, and more than 173,000 hectares of high-quality water land. Irrigation is one of the most important effective factors in grain production in hot and dry climates. About 90% of the country's renewable water is consumed in the agricultural sector, and the lack of water is the main factor limiting production. Research has shown that the use of modern pressurized irrigation systems reduces water consumption and increases water use efficiency. Considering the issue of water shortage that has been raised in the country in recent years, The simultaneous investigation of the effects of sprinkler and strip drip irrigation systems in three wheat cultivars including Baharan, Rakhshan and Heydari cultivars on yield, yield components and water use efficiency in this province seemed necessary.

Methodology

This research was carried out in the research farm of ACECR, Kermanshah province unit (located at 47 degrees and 6 minutes east longitude and 34 degrees and 26 minutes north latitude with 1320 Meters above sea level) year 2021. At the end of October 2020 year, plowing and preparation of the cultivation substrate was done by tractor. Based on the soil test results, 150 kg/ha of triple super phosphate fertilizer and 100 kg/ha of potassium sulfate were used at the same time as planting. The amount of 200 kg/ha of urea fertilizer was also distributed in several stages (50 kg/ha at the same time as planting and the rest in two stages, 100 kg/ha at the time of multi-leafing and 50 kg/ha at the beginning of stem growth) in the field. Wheat seeds of Baharan, Rakhshan and Heydari cultivars were cultivated on 08/30/2020 after health control and detoxification. This study was conducted in the form of a split plot in a randomized complete block design with three replications. In the main plots, the irrigation methods including sprinkler and strip drip irrigation were evaluated and in the sub-plots, wheat cultivars including Baharan, Rakhshan and Heydari were evaluated. From each treatment, one square meter of samples was taken from the middle of the plot. These samples were placed separately in special bags (by installing specifications on each sample) and were immediately transferred to the laboratory. The investigated parameters included the number of seeds per spike, plant height, 1000 seeds weight, crop yield, biomass yield, harvest index and, finally, water use efficiency. The average annual rainfall in the research area was 303 mm. According to the dimensions of the plots (60 m²), during the growth period of the wheat plant, the irrigation amount was 633.50 mm in sprinkler irrigation method and 436 mm in strip drip irrigation method. Finally, after data collection, statistical analysis, including an analysis of variance and comparison of means, was performed using Duncan's multi-range test at a five percent probability level with SAS Ver 9.4 software.

Results and discussion

Based on the results of the statistical analysis of the irrigation method, there was a significant effect on the characteristics of plant height, number of seeds per spike, seed yield, biomass yield, and water use efficiency of the crop. Additionally, the effect of cultivars was significant in plant height, number of seeds per spike, seed yield, biomass yield, and water use efficiency. The results of the analysis of variance showed significant effects of irrigation method and cultivars for crop yield traits and water use efficiency. The comparison of means revealed that the highest yield of 9458 kg/ha was observed in the strip drip irrigation treatment in Baharan cultivar, which had a statistical difference with the sprinkler irrigation treatment in similar cultivars. Furthermore, the sprinkler irrigation treatment in Heydari cultivar with a yield of 6539 kg/ha had the lowest yield. Based on the obtained results, the highest and lowest water use efficiency productivity with values of 2.13 and 1.03 kg/m³ were observed in the strip drip irrigation treatments of Baharan variety and sprinkler irrigation of Heydari variety, respectively. The results of the research showed that the use of strip drip irrigation method compared to the sprinkler irrigation method in Baharan, Rakhshan, and Heydari cultivars resulted in an increase of 20.07%, 29.76%, and 20.50% in crop yield, respectively.

Conclusions

Optimum use of water seems necessary considering the climatic conditions of the country and the recent droughts. One of the important and effective solutions is to use modern irrigation systems. Therefore, this research was carried out in the research farm of ACECR, Kermanshah

province unit during 2021 to assessing of the effect of irrigation systems on yield, yield components and water use efficiency in three wheat genotypes the results revealed that the use of different irrigation systems caused a significant difference at the levels of 1% and 5% on the yield and yield components of wheat in investigated cultivars. Based on the results in the tape irrigation method, the yield increased in most of the analyzed parameters compared to the sprinkler irrigation method. The results exhibited that the use of tape method saved water consumption by 31% and increased the yield of the product and finally increased the water efficiency compared to the sprinkler irrigation method.

Keywords: Strip drip irrigation, Sprinkler irrigation, Wheat cultivars, Yield

Article Type: Research Article

Article history: Received: 22 June 2023 Revised: 16 August 2023 Accepted: 05 September 2023 ePublished: 15 September 2023

Cite this article: Jalili, J., Palash, M., Jalili, Kh., & AkbarAbadi, A. (2023). The effect of irrigation systems on yield, yield components and water use efficiency in three wheat genotypes in Kermanshah province, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(2), 33-50. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9434.1057

Publisher: Razi University

© The Author(s).





بررسی اثر سامانه های آبیاری بر عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره وری مصرف آب در سه ژنوتیپ گندم در استان کرمانشاه

جلال جلیلی^۱، میثم پالاش^۲ ✉، خلیل جلیلی^۳، علی اکبرآبادی^۴

^۱ عضو هیأت علمی گروه مدیریت منابع محیطی جهاد دانشگاهی استان کرمانشاه، ایران. رایانامه: j.jalili@acecr.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، پژوهشگر گروه مدیریت منابع محیطی جهاد دانشگاهی کرمانشاه، ایران. رایانامه: Meisampalash1371@gmail.com

^۳ استادیار، گروه مدیریت منابع محیطی، جهاد دانشگاهی استان کرمانشاه، ایران. رایانامه: jalili@acecr.ac.ir

^۴ استادیار، گروه تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

رایانامه: ali.akbarabadi65@gmail.com

چکیده

مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر سامانه های آبیاری بر عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره وری مصرف آب در سه ژنوتیپ گندم در مزرعه تحقیقاتی جهاد دانشگاهی استان کرمانشاه در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در کرت های اصلی روش آبیاری شامل بارانی و تیپ (قطره ای) و در کرت های فرعی ارقام گندم شامل بهاران، رخشان و حیدری مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج تحلیل آماری روش آبیاری، بر صفات ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، عملکرد دانه، عملکرد زیست توده و بهره وری مصرف آب محصول دارای اثر معنی دار بودند، همچنین اثر ارقام کشت شده نیز در صفات ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله، عملکرد دانه، عملکرد زیست توده، بهره وری مصرف آب و تعداد بوته در متر مربع معنی دار بودند. نتایج تجزیه واریانس اثرات متقابل روش آبیاری و ارقام برای صفات عملکرد محصول و بهره وری مصرف آب معنی داری را نشان داد. مقایسه میانگین ها نشان داد بیشترین میزان عملکرد محصول با مقدار ۹۴۵۸ کیلوگرم در هکتار در تیمار روش آبیاری تیپ در رقم بهاران مشاهده شد که با تیمار آبیاری بارانی در ارقام مشابه اختلاف آماری داشت. همچنین تیمار آبیاری بارانی در رقم حیدری با عملکرد ۶۵۳۹ کیلوگرم در هکتار کمترین میزان عملکرد را به خود اختصاص داد. بر اساس نتایج بدست آمده به ترتیب بیشترین و کمترین میزان بهره وری مصرف آب با مقادیر ۲/۱۳ و ۱/۰۳ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمارهای آبیاری تیپ رقم بهاران و آبیاری بارانی رقم حیدری مشاهده شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که استفاده از روش آبیاری تیپ نسبت به روش آبیاری بارانی در ارقام بهاران، رخشان و حیدری به ترتیب افزایش ۲۰/۰۷، ۲۹/۷۶ و ۲۰/۵۰ درصدی عملکرد محصول را در پی داشت. لذا، بر اساس نتایج و با توجه به کمبود آب و اهمیت تولید بیشتر محصولات کشاورزی، استفاده از روش های نوین آبیاری میکرو همانند روش تیپ نسبت به روش آبیاری ماکرو در ارقام گندم مخصوصاً رقم بهاران در استان کرمانشاه پیشنهاد می گردد.

واژه های کلیدی: آبیاری تیپ، آبیاری بارانی، ارقام گندم، عملکرد

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۱ تیر ۱۴۰۲ اصلاح: ۲۵ مرداد ۱۴۰۲ پذیرش: ۱۴ شهریور ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ شهریور ۱۴۰۲

استناد: جلیلی، ج.، پالاش، م.، جلیلی، خ.، و اکبرآبادی، ع. (۱۴۰۲). بررسی اثر سامانه های آبیاری بر عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره وری مصرف آب در سه ژنوتیپ گندم در استان کرمانشاه، *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۳(۳)، ۳۳-۵۰. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9434.1057



مقدمه

گندم یکی از محصولات کلیدی کشاورزی ایران است که تأمین نیاز آن برای جمعیت فعلی یکی از چالش‌های مهم بخش کشاورزی می‌باشد. بررسی روند تغییرات سطح زیر کشت و تولید گندم در جهان نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۲ میزان تولید گندم حدود ۷۹۴ میلیون تن بوده است، بر اساس اطلاعات گزارش شده از سازمان خوار بار کشاورزی ایران در سال ۲۰۲۲ با تولید ۱۳ میلیون تن گندم سیزدهمین کشور تولیدکننده گندم در جهان بوده است (فائو^۱، ۲۰۲۲).

در کشور ایران، استان کرمانشاه با بهره‌مندی از حدود ۷۰۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی که در این بین بیش از ۱۷۳ هزار هکتار زمین مرغوب آبی وجود دارد، به عنوان قطب کشاورزی غرب کشور شناخته می‌شود. این استان با سهم تولید ۶/۳ درصدی گندم در کشور در جایگاه پنجم قرار دارد. کل سطح زیر کشت گندم در استان کرمانشاه ۴۵۸/۶ هزار هکتار می‌باشد که در این بین کشت آبی ۱۱۳ هزارهکتار و کشت دیم ۳۴۵/۵ هزار هکتار را به خود اختصاص داده است (آمارنامه کشاورزی، ۱۴۰۱). حدود ۹۰ درصد آب تجدیدپذیر کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و در مقابل کمبود آب عامل اصلی محدودکننده تولید است. از طرفی رشد جمعیت و افزایش نیاز غذایی، نیازمند افزایش تولید از همان منابع محدود آب است. بر همین اساس در آینده نزدیک توجه جدی به افزایش کارایی مصرف آب (WUE)^۲ و راهکارهای مربوطه جزء چالش‌های مهم خواهد بود (اسکینر^۳، ۲۰۰۲). از جمله راهکارهای مناسب جهت ارتقاء بهره‌وری آب و حفاظت از منابع آبی کشور، ترویج استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار بجای سیستم آبیاری سطحی و غرقابی می‌باشد (کیانیان، ۱۳۹۴). در سیستم‌های سنتی آبیاری مانند روش‌های سطحی معمولاً آب در تمام سطح مزرعه پخش شده و خاک در تمام قسمت‌های زمین خیس می‌شود و این امر موجب تلف شدن آب می‌گردد، در صورتی که اکثر روش‌های نوین آبیاری مانند سیستم‌های بارانی و قطره‌ای متمرکز بر آبیاری گیاه است نه آبیاری زمین (علیزاده، ۱۳۸۹). آبیاری از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید غلات در اقلیم گرم و خشک است. گندم معمولاً به سه صورت دیم، آبی و آبیاری تکمیلی کشت می‌گردد. در حال حاضر روش آبیاری مورد استفاده برای محصولات گندم و جو عمدتاً انواع روش‌های سطحی (کرتی، نواری، شیاری و جویچه‌ای) می‌باشد، که نسبت به روش‌های نوین آبیاری، بازده آبیاری کمتر و حجم آب مصرفی بیشتری دارند. تحقیقات نشان داده که استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری تحت فشار باعث کاهش مصرف آب و همچنین افزایش کارایی مصرف آب می‌گردد (یانگ و همکاران^۴، ۲۰۲۳). کاربرد سامانه‌های آبیاری با کارایی مصرف آب بالاتر از راهکارهای مؤثر جهت پایداری توسعه در بخش کشاورزی است. محققان گزارش کرده‌اند که کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی با توسعه روش آبیاری موضعی نواری در مناطق اصلی تولید گندم منجر به کاهش ۱۳۴/۱ میلیون مترمکعب آب کشاورزی می‌شود (پورغلام و همکاران، ۱۴۰۱).

تحقیقات متعددی در سرتاسر دنیا و از جمله ایران در رابطه با مقایسه سامانه‌های آبیاری سطحی و آبیاری تحت فشار از نظر میزان مصرف آب، بهره‌وری آب و عملکرد محصول گندم صورت گرفته است. نتایج پژوهش انجام شده بر روی گندم در منطقه سیستان با دو روش آبیاری نواری انتها بسته و شیاری نشان داد که اثر روش آبیاری بر صفات مورد بررسی معنی‌دار نبود؛ اما تیمار میزان آب آبیاری، کلیه فاکتورهای رشد گیاه را به صورت معنی‌دار تحت تأثیر قرار داد. میانگین آب مصرفی در تیمار آبیاری کامل، ۷۵ درصد آبیاری کامل و ۵۵ درصد آبیاری کامل به ترتیب برابر با ۴۴۷۳، ۳۵۰۵ و ۲۷۳۰ متر مکعب در هکتار و بهره‌وری مصرف آب در دامنه ۰/۹۵ تا ۱/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد (کیخایی و گنجی‌خرمدل، ۱۳۹۵). سلامتی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهش خود به بررسی بهره‌وری مصرف آب در سامانه‌های آبیاری سطحی و بارانی گندم پرداختند، و گزارش کردند که میانگین بهره‌وری مصرف آب گندم در مزارع با سامانه آبیاری بارانی و سطحی در شهرستان بهبهان معادل ۰/۹۲ کیلوگرم بر مترمکعب است. قدمی فیروزآبادی و باغانی (۱۳۹۸) در آزمایشی به بررسی اثر آرایش‌های مختلف کشت در آبیاری نواری قطره‌ای (تیپ) بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آبیاری گندم در همدان پرداختند در این تحقیق متوسط بهره‌وری مصرف آب در تیمارهای آبیاری قطره‌ای (تیپ) ۱/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه شد. همچنین نتایج نشان داد که آبیاری قطره‌ای نواری باعث کاهش ۳۳ درصدی در آب مصرفی و افزایش ۷۳ درصدی بهره‌وری مصرف آب نسبت به روش آبیاری جویچه‌ای شده است. طاووسی و توانا پور (۱۳۹۹) در شهرستان خواف به بررسی عملکرد گندم و بهره‌وری آب در سیستم آبیاری قطره‌ای در مقابل آبیاری سنتی پرداختند؛ نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد میانگین بهره‌وری مصرف آب در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای به ترتیب ۱/۰۵ و ۱/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. آبیاری قطره‌ای علاوه بر کاهش مصرف آب به میزان ۱۶ درصد، باعث افزایش عملکرد به میزان ۲۸ درصد و در نهایت اثرات اجرایی سیستم آبیاری قطره‌ای باعث افزایش ۵۰ درصدی بهره‌وری مصرف آب گردید. نتایج پژوهشی نشان داد ۶۰ درصد ظرفیت زراعی

¹ Food and Agriculture Organization

² Water Use Efficiency

³ Smit and Skinner

⁴ Yang et al

در آبیاری قطره‌ای بیش‌ترین بهره‌وری آب را داشته است و عملکرد گندم زمستانه در این تیمار ۹/۵۳ تن در هکتار بود (جها و همکاران^۱، ۲۰۱۷). بر اساس نتایج گزارش شده از تحقیق قدمی فیروزآبادی و باغی^۲ (۲۰۱۷) کشت گندم به روش آبیاری قطره‌ای در مقایسه با آبیاری بارانی در شهر همدان باعث افزایش ۴۵/۵۰ درصدی بهره‌وری مصرف آب محصول گردید. نتایج تحقیق شارما و همکاران^۳ (۲۰۱۸) نشان داد که صرفه‌جویی در مصرف آب در آبیاری بارانی در مقایسه با آبیاری سطحی ۱۲/۵ بیشتر بود. عملکرد دانه در آبیاری بارانی نسبت به آبیاری سطحی به اندازه ۱۶/۲۲ درصد بیشتر بود. نتایج همچنین نشان داد که بهره‌وری آب در آبیاری بارانی نسبت به آبیاری سطحی ۳۰/۷۶ درصد افزایش داشت. نتایج حاصل از تحقیق پاندی و همکاران^۴ (۲۰۲۱) با عنوان تأثیر ارقام و روش های آبیاری بر رشد و عملکرد گندم نشان داد بیشترین میزان وزن تر و خشک گیاه، عملکرد دانه و عملکرد کاه در رقم گندم HUW 234 تحت آبیاری جویچه‌ای مشاهده شد. یانگ و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای مروری به بررسی محصولات مختلف کشت شده تحت آبیاری قطره‌ای از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۲۰ پرداختند و گزارش دادند که آبیاری قطره‌ای در مقایسه با آبیاری به روش غرقابی، نواری، جوی و پشته‌ای و بارانی به ترتیب عملکرد محصول را ۲۸/۹۲، ۱۴/۵۵، ۸/۰۳ و ۲/۳۲ درصد افزایش می‌دهد.

با توجه به این که استان کرمانشاه یکی از قطب‌های تولید گندم در غرب کشور است، و با توجه به مسئله کم‌آبی که در سال‌های اخیر در کشور مطرح است. بررسی همزمان اثرات سامانه‌های آبیاری بارانی و تیپ در سه رقم گندم شامل ارقام بهاران، رخشان و حیدری بر عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در این استان ضروری به نظر می‌رسید. لازم به ذکر است وجه تمایز این تحقیق با سایر تحقیقات صورت گرفته در منطقه انتخاب ژنوتیپ‌های گندم مناسب با شرایط آب و هوایی این استان می‌باشد بنابراین تحقیق حاضر به این منظور صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه

تحقیق حاضر در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی جهاد دانشگاهی در محدوده‌ای به مساحت ۰/۳ هکتار در شهر کرمانشاه با موقعیت مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه ۱۹ دقیقه و ۳۳ ثانیه شمالی و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا انجام شد و در شکل (۱) نشان داده شده است. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز برای اجرای تحقیق شامل (درجه حرارت و بارندگی در طی دوره رشد گیاه گندم) از ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه اخذ گردید. بر اساس دوره آماری ۳۰ ساله، متوسط بارش سالیانه منطقه نیز ۴۳۰/۳ میلی‌متر برآورد شده است. از لحاظ اقلیمی و براساس تقسیم‌بندی آمبرژه، منطقه دارای آب و هوای نیمه‌خشک سرد و بر اساس اقلیم نمای دومارتن^۵ دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشد. به لحاظ پارامترهای دمایی، منطقه دارای دمای متوسط سالیانه ۱۵/۶ درجه سانتی‌گراد بوده و متوسط درجه حرارت گرم‌ترین و سردترین ماه سال نیز به ترتیب ۳۰/۴ و ۰/۱- درجه می‌باشد. معمولاً در این منطقه به علت طولانی بودن دوره رشد از ارقام مقاوم به سرما استفاده می‌شود. ارقام گندم بهاران، رخشان و حیدری علاوه بر مقاومت به سرما دارای عملکرد و تولید بالایی هستند و به همین دلیل در این منطقه و در تحقیق حاضر از این ارقام استفاده شد. با توجه به توضیحات فوق و هم‌چنین انجام عملیات خاکورزی مناسب، کشت گندم در پاییز صورت گرفت.

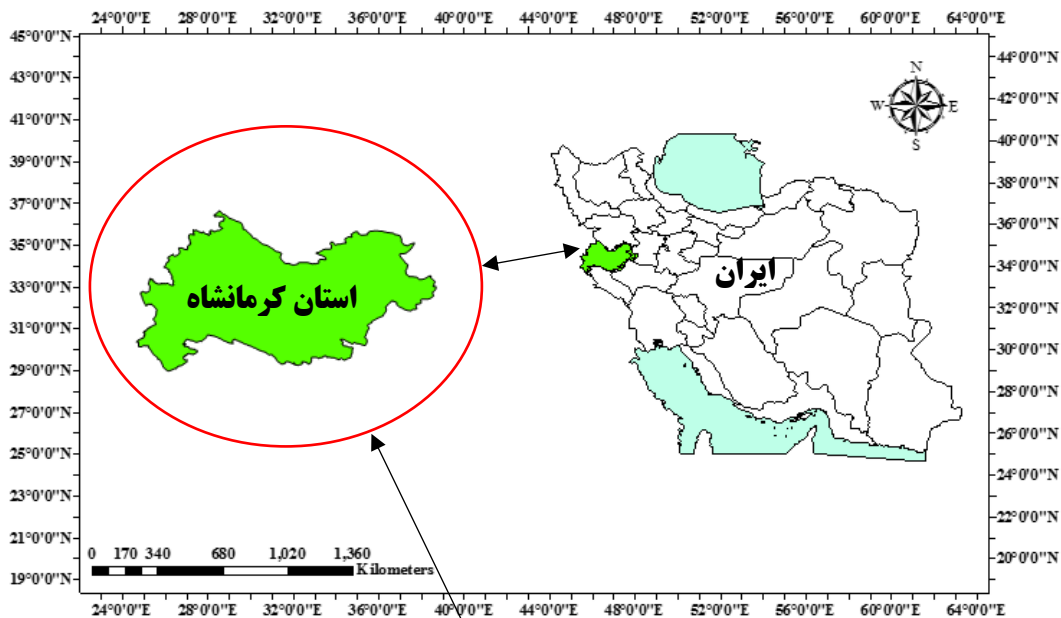
¹ Jha et al

² Ghadami Firouzabadi & Baghani

³ Sharma et al

⁴ Pandey et al

⁵ De Martonne



شکل ۱. محل اجرای طرح آزمایشی

قبل از کاشت به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی از خاک محل آزمایش نمونه برداری شد. نتایج مربوط به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش تا عمق ۳۰ سانتی متری در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش (آزمایشگاه شیمی و مرکز تخصصی آنالیز گیاهان ارگانیک

جهاد دانشگاهی)

نوع بافت	روی (ppm)	آهن (ppm)	منگنز (ppm)	مس (ppm)	پتاسیم (ppm)	فسفر (ppm)	درصد کربن آلی	اسیدیته اشباع	املاح محلول $EC \times 10^6$	درصد مواد خشتی شوند	عمق (Cm)
سیلتی رسی	۰/۹۰	۱۱/۹۲	۲۲/۹۴	۱/۷۸	۴۴۸	۶/۴۳	۰/۹۹	۷/۴۳	۱/۹۲	۲۵	۳۰-۰

نتایج آزمایش آب مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است آب آبیاری برای کلیه تیمارها از یک حلقه چاه عمیق کشاورزی برداشت شد.

جدول ۲. نتایج آزمایش نمونه آب مزرعه محل انجام آزمایش (آزمایشگاه شیمی و مرکز تخصصی آنالیز گیاهان ارگانیک جهاد

دانشگاهی)

SAR	Na ⁺	میلی اکی والان در لیتر							pH	TDS (mg/L)	هدایت الکتریکی EC×10 ⁶
		مجموع کاتیون و آنیون	Na ⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻			
۰/۴۸	۱۴/۱۴	۴/۹۵	۰/۷۰	۴/۲۵	۱/۲۵	۰/۶۰	۳/۱	۰/۰۰	۷/۳۸	۲۱۹	۳۴۳

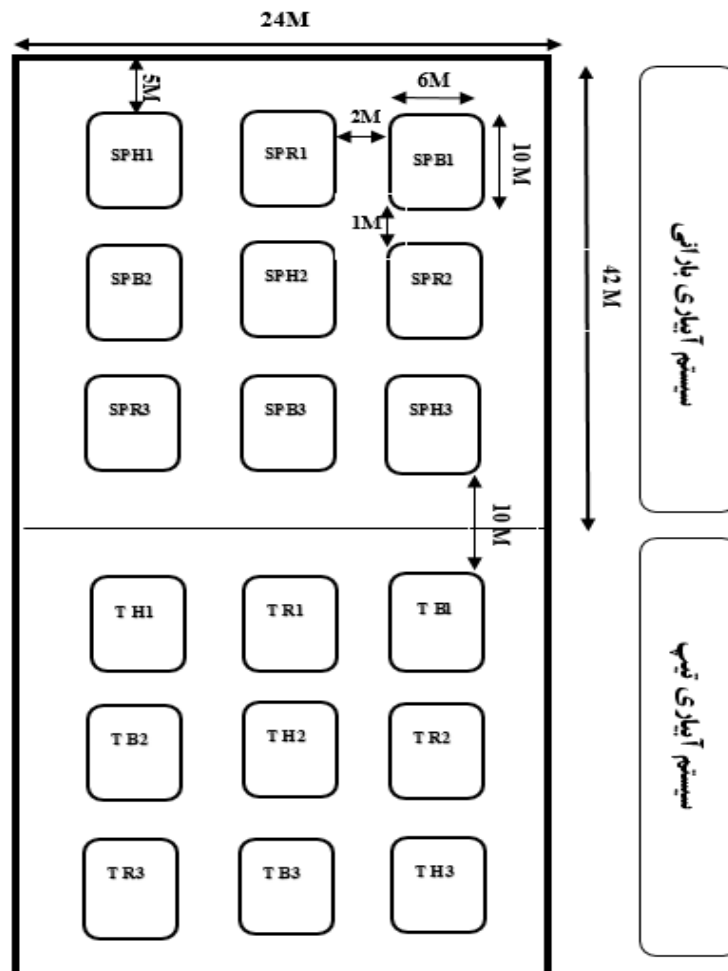
در اواخر مهرماه سال ۱۳۹۹ عملیات شخم‌زنی و آماده‌سازی بسترکشت به‌وسیله تراکتور انجام شد. پس از انجام شخم، عملیات دیسک زنی جهت آماده‌سازی زمین صورت گرفت. بذر گواهی شده گندم ارقام بهاران، رخشان و حیدری پس از کنترل از نظر سلامت و سم‌زدایی شدن، در تاریخ ۱۳۹۹/۸/۳۰ با استفاده از دستگاه ردیف کارکشت گردید. ارقام کشت شده دارای سابقه کشت در منطقه و مناسب محل اجرای طرح هستند. بر اساس نتایج آزمایش خاک، مقادیر ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هر هکتار هم‌زمان با کاشت پخش شد. مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره نیز در طی چند مرحله (مقدار ۵۰ کیلوگرم هم‌زمان با کاشت و مابقی آن طی دو مرحله ۱۰۰ کیلوگرم در زمان چند برگی شدن و پنجه زنی و ۵۰ کیلوگرم ابتدای ساقه رفتن) در سطح مزرعه پخش گردید. کلیه شرایط اقلیمی، محیطی و تغذیه‌ای برای تیمارها یکسان بود. سایر عملیات دوره داشت از قبیل مبارزه با آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و کوددهی نیز به‌طور یکنواخت در کلیه تیمارها انجام شد. جهت از بین بردن آفات و علف‌های هرز در تاریخ ۱۴۰۰/۰۲/۵ از سموم تو-فور-دی (یک لیتر در هکتار) و دلتامترین (۳۰۰ سی‌سی در هکتار) استفاده شد. به‌منظور بررسی اثر روش آبیاری قطره‌ای با نوارهای تیپ بر عملکرد گندم و مقایسه آن با روش بارانی، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در کرت‌های اصلی روش آبیاری شامل بارانی (SP) و تیپ (T) و در کرت‌های فرعی ارقام گندم شامل بهاران (B)، رخشان (R) و حیدری (H) مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول (۳) مشخصات آبیاری و نوار تیپ مورد استفاده در طرح حاضر ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات آبیاری و نوار تیپ مورد استفاده

مقدار	مشخصات	نوع سیستم آبیاری
Zm8035	مدل	
۳۰	فشار متوسط کارکرد (متر)	آبیاری
۰/۹۰ (لیتر در ثانیه)	دبی	
۱۲/۰۰	قطر پاشش (متر)	
نوار تیپ ۲۰ سانتی‌متری پلاک‌دار	مدل	
۱/۸ (لیتر در ساعت)	دبی	نوار تیپ
۱۷ (میلی‌متر)	قطر نوار تیپ	
۲۰۰ (میکرون)	ضخامت نوار تیپ	

با توجه به فاصله‌های استاندارد طراحی در روش آبیاری بارانی آرایش آبپاش‌ها ۱۸×۱۲ متر بود به‌نحوی که یکنواختی پاشش در تمام کرت‌ها رعایت شده باشد ابعاد کرت‌ها با طول هر کرت ۱۰ متر و عرض آن ۶ متر در نظر گرفته شد. جهت انجام آبیاری به روش قطره‌ای نیز از نوار تیپ پلاک‌دار با فاصله پلاک ۲۰ سانتی‌متری و فاصله بین هر لاین نوار ۵۰ سانتی‌متری با دبی ۱/۸ لیتر در ساعت استفاده شد. حجم کل آب ورودی به هر تیمار در طول دوره کشت در سیستم‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای با کنتور حجمی و اندازه‌گیری فشار آب داخل لوله‌های فرعی توسط فشارسنج و میزان آب مصرفی طبق اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری و ثبت گردید.

در جدول (۴) تیمارهای اجرایی در این تحقیق معرفی و در شکل (۲) نقشه چیدمان این تیمارها ارائه شده است.



شکل ۲. نقشه چیدمان تیمارهای مختلف اعمال شده در طرح آزمایشی

جدول ۴. معرفی تیمارهای اعمال شده در تحقیق

کد تیمار	تیمار اعمال شده بر گندم
SPB	کشت گندم رقم بهاران به روش آبیاری بارانی
SPR	کشت گندم رقم رخشان به روش آبیاری بارانی
SPH	کشت گندم رقم حیدری به روش آبیاری بارانی
TB	کشت گندم رقم بهاران به روش آبیاری تیپ
TR	کشت گندم رقم رخشان به روش آبیاری تیپ
TH	کشت گندم رقم حیدری به روش آبیاری تیپ

برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق روزانه گیاه گندم از فرمول پنمن مانیتیت اصلاح شده استفاده شد (رابطه ۱)، به این منظور پارامترهای مورد نیاز از جمله دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی حداکثر و حداقل، سرعت باد و ساعات آفتابی بصورت روزانه از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه (با طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳۲ دقیقه و با ارتفاع ۱۳۱۸/۶ از سطح دریا) اخذ و با استفاده از نرم افزار Cropwat تبخیر-تعرق پتانسیل محاسبه گردید.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} M_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

در رابطه (۱) ET_o تبخیر و تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (MJm^{-2}/d)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1})، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (kpa)، Δ شیب منحنی فشار بخار (kpa/c)، γ ضریب رطوبتی (kpa/c)، G شار گرما به داخل خاک (MJm^{-2}/d) می‌باشد.

به منظور محاسبه بارندگی مؤثر نیز از روش ارائه شده توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) طبق رابطه (۲) استفاده شد.

$$P_e = \frac{P_{tot} \times (125 - 0.2 \times P_{tot})}{125} \quad (2)$$

در رابطه فوق P_e میزان بارندگی مؤثر بر حسب میلی‌متر و P_{tot} باران کل ماهیانه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. در نهایت محاسبات آبیاری با اطلاعات به‌دست آمده صورت گرفت.

جهت محاسبه نیاز خالص آبی گندم در روش‌های آبیاری از رابطه (۳) استفاده گردید.

$$I_n = ET_c - R_e \quad (3)$$

در این رابطه I_n : نیاز خالص آبیاری (mm/day)، ET_c : تبخیر و تعرق روزانه اصلاح شده گیاه (mm/day)، R_e : بارندگی مؤثر (mm) می‌باشد.

جهت محاسبه میزان تبخیر تعرق اصلاح شده (T_c) در سیستم آبیاری قطره‌ای نیز از رابطه (۴) استفاده شد.

$$T_c = ET_c [Ps/100 + 0.15(1 - Ps/100)] \quad (4)$$

در این رابطه T_c : تبخیر و تعرق روزانه اصلاح شده گیاه (mm/day)، ET_c : تبخیر و تعرق گیاه (mm/day)، Ps : سطح سایه‌انداز گیاه (%) که در گندم ۱۰۰ درصد می‌باشد. جهت محاسبه میزان آب قابل دسترس و مقادیر عمق آبیاری به ترتیب از روابط (۵) و (۶) استفاده گردید.

$$AW = (F_c - PWP) \times P_b \quad (5)$$

$$d_n = AW \times MAD \times Z_r \quad (6)$$

d_n : عمق خالص آبیاری (mm)، AW : آب قابل دسترسی در خاک (mm/m)، p_b : وزن مخصوص ظاهری خاک (g/cm^3)، MAD : حداکثر تخلیه مجاز رطوبت از خاک که بر اساس خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه گندم مقدار آن ۰/۵۵ و Z_r : عمق ریشه گیاه (m) ۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. محدوده راندمان‌های آبیاری برای طرح نیز در سیستم بارانی ۶۵ درصد و در قطره‌ای ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. جهت محاسبه دور آبیاری در سیستم‌های آبیاری مذکور از رابطه (۷) استفاده شد. در این رابطه f : حداکثر برآورد دور آبیاری (day)، d_n : حداکثر عمق آبیاری (mm)، ET_c : نیاز آبی روزانه گیاه (mm/day)

$$f (day) = \frac{d_n (mm)}{ET_c (mm/day)} = day \quad (7)$$

با توجه به محاسبات انجام شده دور آبیاری اصلاحی در دو سیستم آبیاری برای گندم ۱۰ روز بود. لازم به ذکر است دلیل انتخاب دور آبیاری ده روزه در سیستم آبیاری تیپ انتخاب فواصل ۵۰ سانتی‌متری بین نوارهای تیپ بود زیرا با توجه به زمان آبیاری لازم جهت رسیدن جبهه‌های رطوبتی بین نوارهای تیپ و میزان عمق خالص آبیاری متأثر از این عامل و ضریب مدیریتی مجاز رطوبتی مناسب‌ترین دور آبیاری، انتخاب

گردید. زمان برداشت محصول اواخر خرداد ماه ۱۴۰۰ بود. در هر تیمار نمونه‌هایی با مساحت یک متر مربع از هر کرت که معرف تمام کرت باشد برداشت شد. این نمونه‌ها بطور جداگانه داخل کیسه‌های مخصوص (با نصب مشخصات روی هر نمونه) قرار داده شد و بلافاصله به آزمایشگاه انتقال یافتند و فاکتورهای تولید شامل تعداد دانه در سنبله، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، عملکرد محصول، عملکرد زیست‌توده، شاخص برداشت و نهایتاً بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و محاسبه شدند. برای تعیین وزن هزار دانه، دانه‌های مربوط به گیاهان نمونه‌برداری شده را از سنبله‌ها جدا کرده و وزن هزار دانه با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای تعیین عملکرد محصول، دانه‌های تفکیک شده مربوط به هر تیمار به صورت جداگانه توسط ترازوی دیجیتال مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. سپس وزن دانه در سطح نمونه‌برداری شده به عملکرد در هکتار تبدیل گردید. جهت محاسبه پارامترهای شاخص برداشت و بهره‌وری مصرف آب نیز به ترتیب از روابط (۸) و (۹) استفاده گردید.

$$\%HI = \left(\frac{\text{Yield}}{\text{Biomass}} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$\text{WP grain} = \frac{\text{Ygrain}}{\text{W}} \quad (9)$$

در این روابط Yield: عملکرد محصول، Biomass: میزان عملکرد زیست‌توده، WPgrain: بهره‌وری مصرف آب نسبت به دانه برحسب کیلوگرم بر مترمکعب آب، Ygrain: عملکرد دانه، W: مقدار آب آبیاری برحسب مترمکعب در هکتار می‌باشند.

آبیاری

در جدول (۵) اطلاعات مربوط به مقادیر آبیاری در تیمارهای مختلف ارائه شده است.

جدول ۵. اطلاعات مربوط به زمان و مقدار آبیاری

مرحله آبیاری	تاریخ آبیاری	روز ژولایوسی	مدت زمان آبیاری (ساعت)		مقدار آب آبیاری (mm)	
			روش بارانی	روش تیپ	روش بارانی	روش تیپ
۱	۱۴۰۰/۰۱/۱۴	۱۴۸	۵/۰۰	۴/۳۰	۷۰	۴۵
۲	۱۴۰۰/۰۱/۲۴	۱۵۳	۶/۳۰	۵/۳۵	۹۱	۵۶
۳	۱۴۰۰/۰۲/۰۳	۱۵۹	۶/۰۰	۶/۰۰	۸۴	۶۰
۴	۱۴۰۰/۰۲/۱۳	۱۶۷	۷/۰۰	۶/۳۰	۹۸	۶۵
۵	۱۴۰۰/۰۲/۲۳	۱۷۰	۷/۱۵	۷/۱۵	۱۰۱/۵	۷۰
۶	۱۴۰۰/۰۳/۰۲	۱۷۹	۷/۳۰	۷/۳۰	۱۰۵	۷۰
۷	۱۴۰۰/۰۳/۱۲	۱۸۶	۶/۰۰	۷/۰۰	۸۴	۷۰
جمع کل ارتفاع آب مصرفی در هر تیمار در کل دوره رشد (میلی‌متر)			۶۳۳/۵۰	۴۳۶		

لازم به ذکر است که به دلیل بارش‌های مناسب در فصل پاییز در این زمان آبیاری صورت نگرفت و آبیاری انجام شده طبق محاسبات و متوسط بارندگی سالانه در محل اجرای تحقیق که ۳۰۳ میلی‌متر بود، و با توجه به ابعاد کرت‌های اجرایی در تحقیق حاضر (۶۰ متر مربع) در طول دوره رشد گیاه گندم، در روش آبیاری بارانی ۶۳۳/۵۰ و در روش آبیاری تیپ ۴۳۶ میلی‌متر بود. در نهایت تجزیه و تحلیل آماری شامل

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد و با استفاده از نرم‌افزار SAS Ver 9.4 انجام شد، و همچنین نمودارها و گراف‌های مربوطه نیز در محیط نرم‌افزار Excel ترسیم شد.

یافته‌ها

اجزاء عملکرد

در جدول ۶ نتایج تجزیه واریانس صفات مورد بررسی متأثر از اعمال روش‌های آبیاری بارانی و تیپ در ارقام مختلف کشت شده ارائه شده است.

جدول ۶. تجزیه واریانس عملکرد و برخی صفات اندازه‌گیری شده ارقام مختلف گندم متأثر از روش‌های آبیاری مورد بررسی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		ارتفاع بوته	تعداد دانه در سنبله	وزن هزار دانه	عملکرد محصول	عملکرد زیست‌توده	شاخص برداشت بهره‌وری مصرف آب
بلوک	۲	۲/۸۹	۸۱/۵۱*	۲/۱۹	۸۴۱۸۴/۳۱*	۵۶۴۳۴/۳۴	۱/۳۲
آبیاری	۱	۱۷۸/۳۳***	۱۷/۵۵*	۳۸/۴۱	۸۹۶۹۵۰۱/۴۰***	۷۹۴۵۳۵۱۸/۱۳*	۱/۵۱
خطا	۲	۰/۲۳	۰/۳۹	۵/۵۳	۵۱۶۵/۴۴	۲۴۸۸۲۱۶/۹۳	۲/۱۹
رقم	۲	۵۴/۲۶*	۱۴۵/۲۶***	۳۴/۵۸	۳۱۹۰۵۷۵/۴۶***	۳۴۰۱۴۸۶۱/۸۸***	۰/۳۴
آبیاری×رقم	۲	۱۳/۴۳	۹/۰۱	۷/۰۷	۱۲۹۹۲۹/۹۲***	۱۴۱۴۶۶۱/۶۰	۰/۵۷
خطا	۸	۱۰/۳۸	۱۱/۹۹	۱۱/۷۴	۱۴۳۲۶/۹۰	۶۵۹۵۸۲/۷	۰/۷۳
ضریب تغییرات (%)		۴/۲۱	۷/۱۲	۸/۰۵	۱/۵	۳/۰۱	۲/۹۱

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد.

براساس نتایج به‌دست آمده از جدول ۶ اعمال روش‌های مختلف آبیاری در صفات ارتفاع بوته، عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب سبب ایجاد اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد و در صفات تعداد دانه در سنبله و عملکرد زیست‌توده سبب ایجاد اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد گردید. نتایج تجزیه واریانس براساس تیمار ارقام در صفات تعداد دانه در سنبله، عملکرد محصول، عملکرد زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد، و در صفت ارتفاع بوته تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد را نشان داد. براساس تجزیه واریانس اثرات متقابل حاصل تیمار روش‌های مختلف آبیاری و رقم، صفات عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد را نشان دادند. صفات وزن هزاردانه و شاخص برداشت براساس تیمارهای ساده و اثرات متقابل عدم معنی‌داری را نشان دادند. در این راستا صفرزاده و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیق خود مبنی بر بررسی عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره‌وری آب گندم در سه سامانه آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری، بیان کردند که روش‌های مختلف آبیاری باعث معنی‌داری صفات مزبور در سطح احتمال یک درصد شده است. همچنین نتایج پژوهش مکاری (۱۳۹۹) نیز نشان داد اعمال روش‌های مختلف آبیاری سبب ایجاد اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد در صفات عملکرد دانه، وزن هزار دانه، بهره‌وری مصرف آب، شده است. سلیم و همکاران^۱ (۲۰۱۰) نیز در تحقیق خود در بررسی تأثیر دو

^۱ Saleem et al

روش آبیاری قطره‌ای و سطحی بر عملکرد سه رقم گندم بیان کردند که روش‌های مختلف آبیاری در ارقام گوناگون سبب ایجاد تغییرات معنی‌دار در صفات مورد بررسی داشته است.

نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده رقم و نوع سیستم آبیاری در جدول (۷) ارائه شده است. از نظر مقایسه میانگین ارتفاع بوته در بین ارقام مورد مطالعه، بیشترین تعداد دانه مربوط به رقم بهاران (۸۰ سانتی‌متر) بود. در ارقام رخشان و حیدری کمترین ارتفاع بوته مشاهده گردید و از نظر مقایسه میانگین بدون اختلاف معنی‌دار در گروه آماری b قرار گرفتند. از نظر نوع سیستم آبیاری بیشترین ارتفاع بوته در روش بارانی (۸۰/۲۲ سانتی‌متر) و کمترین ارتفاع در روش تیپ (۷۲/۷۷ سانتی‌متر) بدست آمد. دلیل این امر را می‌توان در توانایی سیستم آبیاری بارانی در مهیا کردن رطوبت نسبی هوای اطراف گیاه دانست که به رشد طولی گیاه کمک شایانی می‌کند. اما روش آبیاری تیپ تنها قادر به تأمین رطوبت اطراف ریشه گیاه می‌باشد و نقش چندانی در افزایش رطوبت نسبی محیط اطراف گیاه ندارد و از این نظر دارای اشکال هستند. نتایج حاصل از تحقیق قدمی فیروز آبادی و همکاران (۱۳۹۸) نیز با نتایج طرح حاضر از نظر برتری سیستم آبیاری بارانی در پارامتر ارتفاع بوته هم‌خوانی دارد. در بررسی صفت میانگین تعداد دانه در سنبله بر اساس مقایسه میانگین صورت گرفته نتایج نشان داد که براساس میانگین صفت مذکور، ارقام بهاران و رخشان (به ترتیب با ۵۳/۳ و ۴۸/۹ دانه در سنبله) دارای بیشترین دانه در سنبله بود. کم‌ترین تعداد دانه در سنبله مربوط رقم حیدری با میانگین ۴۳/۵ دانه بود. براساس تیمار نوع سیستم آبیاری، بیش‌ترین تعداد دانه در سنبله مربوط به سیستم آبیاری تیپ با میانگین ۵۰/۱۱ دانه در سنبله بود. کم‌ترین تعداد دانه در سنبله مربوط به تیمار روش آبیاری بارانی با میانگین ۴۷/۰۵ دانه بود. از جمله دلایل عملکرد بیشتر روش آبیاری تیپ در این صفت راندمان بالا در یکنواختی توزیع آب در این سیستم می‌باشد که سبب قرارگیری مناسب آب در اطراف ریشه گیاه گندم و عملکرد مناسب‌تر در رشد طولی خوشه و نهایتاً افزایش وزن و تعداد دانه تولیدی گردیده است. نتایج میانگین عملکرد زیست‌توده در نوع سیستم آبیاری نشان داد که بیشترین و کمترین عملکرد زیست‌توده به ترتیب در روش تیپ (۲۹۳۱۳ کیلوگرم در هکتار) و روش بارانی (۲۴۵۳۷/۹ کیلوگرم در هکتار) بدست آمد. نتایج میانگین عملکرد زیست‌توده برای ارقام نشان داد که رقم بهاران با عملکرد ۲۹۱۲۰ کیلوگرم در هکتار بیشترین و رقم حیدری با عملکرد ۲۴۳۶۴/۹ کیلوگرم در هکتار کمترین مقدار زیست‌توده را نشان دادند. در تحقیقات پیشین نیز گزارش شده است که عملکرد زیست‌توده تحت تأثیر روش آبیاری، در سطح یک درصد معنی‌دار شده است (ربانی و امام، ۱۳۹۰). دی ویتا و همکاران^۱ (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که همبستگی بین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک قوی و مثبت است و معمولاً در مورد ارقام جدید گندم افزایش عملکرد بیولوژیک (کل ماده خشک) افزایش عملکرد دانه را نیز به دنبال دارد.

جدول ۷. مقایسه میانگین اثرات ساده نوع سیستم آبیاری و رقم به روش دانکن در سطح ۵٪

نوع سیستم آبیاری	ارتفاع بوته (cm)	تعداد دانه در سنبله	عملکرد زیست‌توده (Kg/ha)
بارانی	۸۰/۲۲a	۴۷/۰۵ b	۲۴۵۳۷/۹ b
تیپ	۷۲/۷۷ b	۵۰/۱۱ a	۲۹۳۱۳/۰ a
بهاران	۸۰/۰ a	۵۳/۳ a	۲۹۱۲۰/۰ a
رخشان	۷۵/۰ b	۴۸/۹ a	۲۷۲۹۱/۵ b
حیدری	۷۴/۵ b	۴۳/۵ b	۲۴۳۶۴/۹ c

در هر ستون اعدادی که دارای حروف مشترک هستند تفاوت معنی‌داری به روش دانکن و در سطح ۵ درصد با هم ندارند

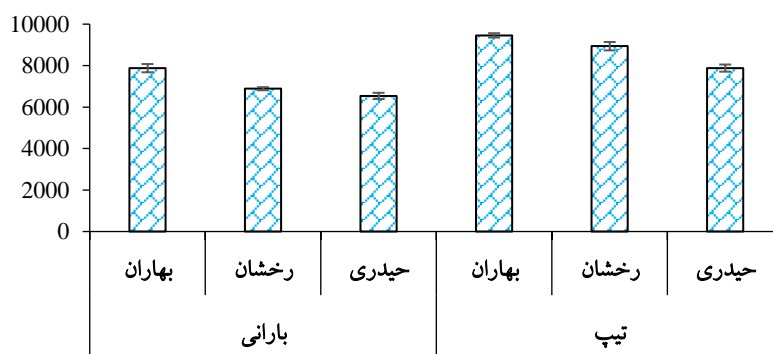
عملکرد محصول

از جمله مهم‌ترین صفات مورد بررسی در این پژوهش بررسی وضعیت عملکرد دانه در ارقام و روش‌های مورد بررسی بود، و طبق نتایج بدست آمده ترتیب روند عملکرد در نوع سیستم آبیاری تیپ و بارانی در ارقام بهاران، رخشان و حیدری به صورت کاهشی بود که در شکل (۳) نشان داده شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین میزان عملکرد محصول با مقدار ۹۴۵۸ کیلوگرم در هکتار در تیمار روش آبیاری تیپ

¹ De Vita et al

در رقم بهاران مشاهده شد که با تیمار آبیاری بارانی در ارقام مشابه اختلاف آماری داشت. همچنین تیمار آبیاری بارانی در رقم حیدری با عملکرد ۶۵۳۹ کیلوگرم در هکتار کم‌ترین میزان عملکرد را به خود اختصاص داد. نتایج نشان داد در روش آبیاری تیپ نسبت به روش آبیاری بارانی میزان عملکرد دانه به ترتیب در ارقام بهاران، حیدری و رخشان ۲۰/۰۷، ۲۹/۷۶ و ۲۰/۵۰ افزایش داشته و این در حالی است که میزان آب مصرفی در روش تیپ نسبت به روش بارانی ۳۱ درصد کاهش داشته است. در این راستا پرایونگ^۱ (۲۰۱۳) نیز در بررسی تأثیر آبیاری بارانی و قطره‌ای در کشت گیاهان مختلف بیان کردند که عملکرد محصولات در آبیاری تیپ نسبت به آبیاری بارانی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، گوا و همکاران^۲ (۲۰۲۲) در بررسی تأثیر آبیاری قطره‌ای و مقایسه آن با آبیاری بارانی در کشت گندم زمستانه گزارش کردند که آبیاری قطره‌ای سبب افزایش عملکرد محصول به میزان ۱۰/۴ درصد بیشتر از روش آبیاری بارانی می‌گردد، که مطابق با نتایج بدست آمده می‌باشد. از دلایل عملکرد بالای محصول در سیستم تیپ مواردی هم‌چون راندمان بالای کاربرد، یکنواختی بالای آبیاری در این روش و عدم تأثیرپذیری نسبت به شرایط محیطی از جمله وزش باد و تلفات بادرده‌گی و هم‌چنین کاهش میزان تبخیر آب نسبت به روش آبیاری بارانی می‌باشد. آبیاری بارانی به صرف وابسته بودن به میزان شدت باد و طول مدت آن می‌تواند یکنواختی آبیاری و بالتبع میزان عملکرد را به علت کاهش راندمان آبیاری، به شدت تحت تأثیر قرار دهد که از ایرادات اصلی وارده به این روش آبیاری است. نتیجه مطالعه وجید و همکاران^۳ (۲۰۰۲) مشابه نتایج این آزمایش، افزایش عملکرد گندم را با افزایش راندمان آبیاری نشان داد. واکنش ارقام مختلف گندم به سطوح آبیاری در ورامین نشان داد که عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار دارد (عیدی‌زاده و همکاران^۴، ۲۰۱۶). در رابطه با تأثیر تنش خشکی در گندم، نتایج مطالعه‌های انجام‌شده نشان داده است که بیش‌ترین تأثیر کاهش در تعداد سنبله بارور در صورت بروز تنش در مرحله پنجه‌زنی روی می‌دهد (کُن و همکاران^۵، ۱۹۹۵؛ داگان و فاولر^۶، ۲۰۰۶). در بررسی عملکرد زیست‌توده نیز روش تیپ دارای ارجحیت بود. در این رابطه نتایج تحقیقات نشان داده است که عملکرد زیست‌توده تحت تأثیر روش آبیاری، در سطح یک درصد معنی‌دار شده است (ربانی و امام، ۱۳۹۰) که با نتایج طرح حاضر هم‌خوانی دارد. دی ویتا و همکاران (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که همبستگی بین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک قوی و مثبت است و معمولاً در مورد ارقام جدید گندم افزایش عملکرد بیولوژیک (کل ماده خشک) افزایش عملکرد دانه را نیز به دنبال دارد.

عملکرد دانه (kg/ha)



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع سیستم آبیاری × رقم برای صفت عملکرد دانه به روش دانکن در سطح ۵٪

¹ Prayong

² Guo et al

³ Wajid et al

⁴ Eidizadeh et al

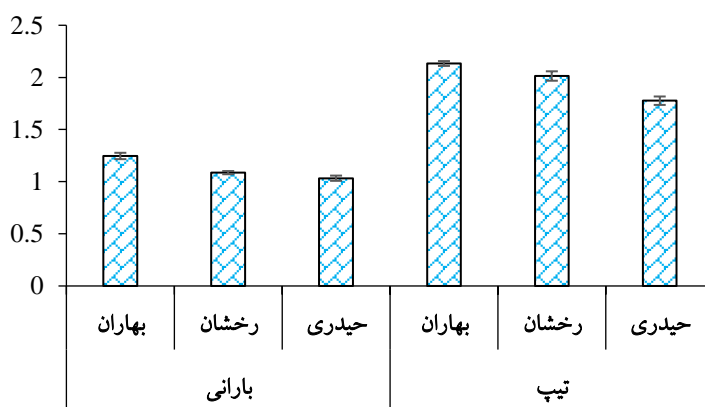
⁵ Cone et al

⁶ Duggan and Fowler

بهره‌وری مصرف آب

نتایج میانگین بهره‌وری مصرف آب مربوط به تیمارهای اعمال شده در شکل (۴) ارائه شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیش‌ترین میزان این پارامتر با مقدار ۲/۱۳ کیلوگرم بر متر مکعب در تیمار روش آبیاری تیپ در رقم بهاران مشاهده شد که با تیمار آبیاری بارانی در ارقام مختلف اختلاف آماری در سطح یک درصد داشت. در روش آبیاری تیپ نسبت به روش آبیاری بارانی میزان پارامتر بهره‌وری مصرف آب نسبت به عملکرد دانه به ترتیب در ارقام بهاران، حیدری و رخشان ۷۱/۵۱، ۸۵/۳۵ و ۷۲/۱۲ درصد افزایش داشته و این در حالی است که میزان آب مصرفی در روش تیپ نسبت به روش بارانی ۳۱ درصد کم‌تر بوده است. با توجه به اهمیت میزان بهره‌وری مصرف آب، این صفت در تحقیقات مختلفی در سراسر دنیا مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا علی و همکاران^۱ (۲۰۰۷) طی سه سال آزمایش روی بهره‌وری آب در کشت گندم در بنگلادش، گزارش کرده‌اند بهره‌وری آب آبیاری این محصول ۱/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. این محققین با اعمال مدیریت‌های مختلف آبی در مزرعه اعلام کرده‌اند که می‌توان میزان این صفت را تا ۲/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش داد. نتایج پژوهش سلامتی (۱۳۹۷) نیز نشان داد که میزان بهره‌وری مصرف آب در روش تیپ نسبت به روش آبیاری بارانی ۶۷/۷ درصد رشد داشته است. از جمله دلایل کاهش بهره‌وری مصرف آب نسبت به عملکرد دانه در روش آبیاری بارانی را افت میزان تولید محصول و حجم آب مصرفی بیشتر نسبت به روش تیپ، می‌توان اعلام کرد که با نتایج تحقیقات پالاش و همکاران (۱۴۰۰) و اوکتم و همکاران^۲ (۲۰۰۳) مبنی بر افزایش بهره‌وری با افزایش عملکرد دانه و کاهش آن با افزایش حجم آبیاری مطابقت دارد.

بهره‌وری مصرف آب (Kg/m^3)



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع سیستم آبیاری × رقم برای صفت بهره‌وری مصرف آب به روش دانکن در سطح ۰.۵٪

بحث

استفاده بهینه از آب با توجه به شرایط اقلیمی کشور و خشکسالی‌های اخیر ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راه‌های مهم و موثر استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری است. لذا، این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی جهاد دانشگاهی واحد استان کرمانشاه در سال ۱۴۰۰ به منظور بررسی تأثیر سیستم‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای (تیپ) بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در کرت‌های اصلی روش آبیاری شامل بارانی و قطره‌ای (تیپ) و در کرت‌های فرعی ارقام گندم شامل بهاران، رخشان و حیدری مورد ارزیابی قرار گرفت. فاکتورهای مورد ارزیابی شامل تعداد دانه در سنبله، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، عملکرد محصول، عملکرد زیست‌توده، شاخص برداشت و بهره‌وری مصرف آب بود.

¹ Ali et al

² Oktem et al

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از سامانه‌های مختلف آبیاری سبب به وجود آمدن اختلاف معنی‌داری بر عملکرد و اجزاء عملکرد گندم در ارقام تحت کشت شد. در این تحقیق بیشترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب نسبت به محصول در تیمار آبیاری تیپ رقم بهاران مشاهده شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که استفاده از روش آبیاری تیپ نسبت به روش آبیاری بارانی در ارقام بهاران، رخشان و حیدری به ترتیب افزایش ۲۰/۰۷، ۲۹/۷۶ و ۲۰/۵۰ درصدی عملکرد محصول را در پی دارد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از روش تیپ باعث صرفه‌جویی در مصرف آب به میزان ۳۱ درصد و افزایش عملکرد محصول و نهایتاً افزایش بهره‌وری آب در مقایسه با روش آبیاری بارانی شد. در این تحقیق کم‌ترین حجم آب کاربردی مربوط به سامانه آبیاری تیپ بود و بهره‌وری آب در این روش نسبت به روش آبیاری بارانی به ترتیب در ارقام بهاران، رخشان و حیدری ۷۱/۵۱، ۸۵/۳۵ و ۷۲/۱۲ درصد رشد را نشان داد. لذا، پیشنهاد می‌شود که با توجه به کمبود آب از یک طرف و اهمیت تولید بیشتر محصولات کشاورزی از طرف دیگر استفاده از روش‌های نوین آبیاری به خصوص آبیاری میکرو در کشت گندم مخصوصاً رقم بهاران در استان کرمانشاه مورد توجه قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

در پایان از سازمان جهاد دانشگاهی استان کرمانشاه جهت فراهم ساختن زیر ساخت های لازم جهت انجام این پژوهش، سپاسگزاری می گردد.

منابع

آمارنامه کشاورزی. (۱۴۰۱). محصولات زراعی. وزارت جهاد کشاورزی معاونت برنامه ریزی و اقتصادی مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. جلد اول.

پالاش، میثم، بافکار، علی، فرهادی بانسوله، بهمن، و قبادی، مختار. (۱۴۰۰). بررسی اثرات کم آبیاری بر خصوصیات کمی، کیفی و بهره وری آب در ذرت دانه ای رقم سینگل کراس ۷۰۶ در کرمانشاه. نشریه فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، (۱)، ۸۸-۶۸.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2021.6686.1003>

پورغلام آمیجی، مسعود، حاجی راد، ایمان، نایی، جاوید، علوی، سید راشد، نوذری، فرناز، و اکبرپور، منصوره. (۱۴۰۱). ارتقاء بهره وری آبیاری گندم در ایران (بخش اول: از دیدگاه سامانه آبیاری و مدیریت آب). مدل سازی و مدیریت آب و خاک.
<https://doi.org/10.22098/mmws.2023.11937.1189>

ربانی، جواد، و امام، یحیی. (۱۳۹۰). پاسخ عملکرد دانه هیبریدهای ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد. مجله تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی. (۱)، ۷۸-۶۵.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.22518517.1390.1.2.5.0.65-78>

سلامتی، نادر، باغانی، جواد، و عباسی، فریبرز. (۱۳۹۷). تعیین بهره وری مصرف آب در سامانه های آبیاری سطحی و بارانی گندم (مطالعه موردی بهبهان). تحقیقات آب و خاک ایران. ۴ (۴۹)، ۸۳۰-۸۲۱.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.240752.667747.821-830>

صفرزاده، سیروس، صارمی، مریم، فرشید، امیر، و دهقانی، منیر. (۱۳۹۹). بررسی عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره وری آب گندم در سه سامانه آبیاری سطحی، بارانی و قطره ای نواری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. (۱)، ۹۷-۸۷.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.8.8>

طاووسی، مجتبی، و توانپور، اسماعیل. (۱۳۹۹). مقایسه عملکرد گندم و بهره وری فیزیکی آب در آبیاری سطحی و قطره ای. دهمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار. تهران.
<https://civilica.com/doc/1036978>

علیزاده، امین. (۱۳۸۹). آبیاری قطره ای (اصول و عملیات). دانشگاه امام رضا (ع). مشهد. چاپ دوم.

قدمی فیروزآبادی، علی، و باغانی، جواد. (۱۳۹۸). اثر آرایش های مختلف کشت در آبیاری نواری قطره ای بر عملکرد و بهره وری مصرف آب آبیاری گندم در همدان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. (۲)، ۵۳۹-۵۲۸.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.2.22.0.528-539>

کیانیان، علی. (۱۳۹۴). راهنمای جامع آبیاری گندم. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و دفتر ترویج کشاورزی و منابع طبیعی.

مکاری، مهدی. (۱۳۹۹). بررسی اثر روش آبیاری بر شاخص برداشت و بهره وری آب دو رقم گندم در شرایط استفاده از کود ازته. نشریه علوم آب و خاک. (۴)، ۱۵۶-۱۴۲.
<http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.4.22993>

References

- Agricultural statistics. (2021). Agricultural products. Ministry of Agricultural Jihad, Vice President of Planning and Economic Information and Communication Technology Center, First volume. [in Persian]
- Alizadeh, A. (2010). Drip irrigation (principles and operations). Imam Reza University. Mashhad. Second edition. [in Persian]
- Ali, M. H., Hoque, M. R., Hassan, A. A., & Khair, A. (2007). Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat. *Agricultural water management*, 92(3), 151-161.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.010>

- Cone, A. E., Slafer, G. A., & Halloran, G. M. (1995). Effects of moisture stress on leaf appearance, tillering and other aspects of development in *Triticum tauschii*. *Euphytica*, 86(1), 55-64. <https://doi.org/10.1007/BF00035939>
- De Vita, P., Di Paolo, E., Fecondo, G., Di Fonzo, N., & Pisante, M. (2007). No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and tillage research*, 92(1-2), 69-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2006.01.012>
- Duggan, B. L., & Fowler, D. B. (2006). Yield structure and kernel potential of winter wheat on the Canadian prairies. *Crop science*, 46(4), 1479-1487. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2005.06-0126>
- Eidizadeh, K., Ebrahimpour, F., & Ebrahimi, M. A. (2016). Effect of different irrigation regimes on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in Ramin climate. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(1), 29-36. <https://doi.org/10.22077/escs.1395.297>
- FAO. (2022). FAOSTAT: Production: Crops and livestock products. *Agricultural production statistics, 2000–2021*.
- Ghadami Firouzabadi, A., Ch, M., & Seyedan, S. M. (2017). Effects of different irrigation systems on yield, some agronomic traits, and water productivity of different wheat genotypes and their economic assessment in Hamedan. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(2), 139-149. <https://doi.org/10.22092/jwra.2017.113159>
- Ghadami Firouzabadi, A., & Baghani, J. (2019). Effects of different wheat planting patterns in drip tape irrigation on yield and water productivity of bread wheat in Hamedan. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), 528-539. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.2.22.0> [in Persian]
- Guo, X., Zhao, Q., Li, J., Wang, Z., Zhang, Y., & Xue, X. (2022). Daily drip irrigation based on real-time weather improves winter wheat grain yield and water use efficiency. *Irrigation and Drainage*, 71(3), 589-603. <https://doi.org/10.1002/ird.2673>
- Jha, S. K., GAO, Y., Liu, H., Huang, Z., Wang, G., Liang, Y., & Duan, A. (2017). Root development and water uptake in winter wheat under different irrigation methods and scheduling for North China. *Agricultural water management*, 182, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.015>
- Kiyanian, A. (2014). A comprehensive guide to wheat irrigation. Institute of Technical Research and Agricultural Engineering and Office of Promotion of Agriculture and Natural Resources.
- Mokari, M. (2021). Investigation the Effect of Changing the Irrigation Method on the Harvest Index and Water Productivity of Two Wheat Cultivars with the Use of Nitrogen Fertilizer. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 24(4), 141-158. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.4.22993> [in Persian]
- Oktem, A., Simsek, M., & Oktem, A. G. (2003). Deficit irrigation effects on sweet corn (*Zea mays saccharata* Sturt) with drip irrigation system in a semi-arid region: I. Water-yield relationship. *Agricultural water management*, 61(1), 63-74. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00161-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00161-0)
- Palash, M., Bafkar, A., Farhadi Bansouleh, B., & Ghobadi, M. (2022). Effects of deficit irrigation on, quantity, quality Characteristics and water productivity in Grain Maize (KSC 706) in Kermanshah. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 16-37. <https://doi.org/10.22126/atwe.2021.6686.1003> [in Persian]
- Pandey, B. K., Verma, N. K., Devi, S., Jalikatti, V. N., Kumar, A., & Kumar, P. (2021). Effect of Varieties and Irrigation Methods on Growth and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 9(4), 304-307. https://ijair.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJAIR_3027_FINAL.pdf

- Pourgholam-Amiji, M., Hajirad, I., Nayebi, J., Alavi, S. R., Nozari, F., & Akbarpour, M. (2023). Improving Wheat Irrigation Productivity in Iran (Part One: From the View Point of Irrigation System and Water Management). *Water and Soil Management and Modelling*, <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.11937.1189>
- Prayong, K. (2013). Comparison of drip and sprinkler irrigation system for the cultivation plants vertically. *Journal of agriculture & biological sciences*, 8, 740-744. <https://www.semanticscholar.org/paper/COMPARISON-OF-DRIP-AND-SPRINKLER-IRRIGATION-SYSTEM-Keeratiurai/cd52d0aaaa22b4619b1572102d8e1fc4c78a914e>
- Rabbani, J., & Emam, Y. (2011). Yield response of maize hybrids to drought stress at different growth stages. *Isfahan University of Technology-Journal of Crop Production and Processing*, 1(2), 65-78. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22518517.1390.1.2.5.0> [in Persian]
- Salamati, N., Baghani, J., & Abbasi, F. (2018). Determination of wheat water productivity in sprinkler and surface irrigation systems (Case Study in Behbahan). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(4), 821-830. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.240752.667747> [in Persian]
- Saleem, M., Waqas, A., & Ahmad, R. N. (2010). Comparison of three wheat varieties with different irrigation systems for water productivity. *International Journal of Agriculture and Applied Sciences (Pakistan)*, 2(1), 7-17. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PK2014000769>
- Safarzadeh, S., Saremi, M., Farshid, A., & Dehghani, M. (2021). Investigation Yield, Yield Components and Water Efficiency of Wheat in Three Systems: Surface, Sprinkler and Strip Drip Irrigation. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(1), 87-97. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.8.8> [in Persian]
- Sharma, S. K., Mishra, P. K., Panse, R., & Jamliya, G. (2018). Effect of irrigation methods on yields attributes and water productivity of wheat in Vertisol of Betwa River Basin commands of Vidisha District of MP, India. *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, 7(8), 2670-2673. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2018.708.277>
- Smit, B., & Skinner, M. W. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7(1), 85-114. <https://doi.org/10.1023/A:1015862228270>
- Tavousi, M., & Tawanapour, E. (2019). Comparison of wheat yield and physical productivity of water in surface and drip irrigation. 10th national conference on sustainable agriculture and natural resources. Tehran. <https://civilica.com/doc/1036978> [in Persian]
- Wajid, A., Hussain, A., Maqsood, M., Ahmad, A., & Awais, M. (2002). Influence of sowing date and irrigation levels on growth and grain yield of wheat. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 39 (1), 22-24. https://www.researchgate.net/publication/291431806_Influence_of_sowing_date_and_irrigation_levels_on_growth_and_grain_yield_of_wheat
- Yang, P., Wu, L., Cheng, M., Fan, J., Li, S., Wang, H., & Qian, L. (2023). Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield, Quality, and Water Productivity in China. *Water*, 15(9), 1733. <https://doi.org/10.3390/w15091733>



Evaluation of Golin River water quality in Kermanshah Province by using National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI)

Houshang Ghamarnia¹, Zoleikha Palash², Miesam Palash³

¹ Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir

² M. Sc graduated of Irrigation and drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: Zoleikhapalash1373@gmail.com

³ Corresponding Author, Researcher of Environmental Resources management Department, ACECR, Kermanshah, Iran. E-mail: Meisampalash1371@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

Water is one of the main factors in human life and, in addition to drinking, it plays an important role in other uses related to human life and nature. Rivers, lakes, glaciers, running waters, rainwater, groundwater, etc. are different forms of water resources (Effendi, 2016). Among the water resources, rivers are more important because those water resources are considered as open systems and are therefore subject to change (Nayeri and Zandi, 2015). The quality of these water resources is one of the most important characteristics that leads to sustainable development. Therefore, ignoring the chemical and physical quality of water, in addition to causing health damage, will also cause economic damage (Farzadkia et al., 2016). One of the most practical and cost-effective methods to determine the ecological health of water and determine whether the quality of water has decreased with human activities is the biological study of these water resources. (Lenat, 1993). To achieve this result, the use of water quality index is very useful. By the above-mentioned Indexes, a large amount of information obtained from the study of water quality is converted into a dimensionless number, which has an interpreted quality concept and definition on a graded scale (Jafari Salim et al., 2009). In Iran, two indices (NSFWQI) and (IRWQISC) have been used. Brown et al. (1970), and the National Institutes of Health, were presented the NSFWQI Index based on a survey of experts in various fields. The parameters discussed in the index are: temperature changes, dissolved oxygen, biochemical oxygen, total phosphate, acidity, nitrate, total solids, final coliform and turbidity (Ebrahimpour and Mohammadzadeh, 2014). Due to tropical climate conditions of Golin region and increasing of water shortage in the past years, and also because of the construction of Zagros dam on the river which use for irrigation of agricultural lands, measuring the water quality of the Golin River is important. Therefore, to investigate the temporal changes of Golin river water quality, the present study was carried out at the station located downstream of Najargolin village during 4 different seasons and qualitative studies were performed on them based on the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI).

Methodology

The river under study is located in Golin, 33 km from Sarpol-e Zahab, Gilan-e-Gharb road. The Golin river Basin is located between 45° 60' and 45° 44' east longitude and 34°26' and 34°9' north latitude and 3450 meters above sea level. There are 5 villages in the Golin river basin with a population of over 2800 people. The location of this station was downstream of the river and near the Najjar village that, located at latitude 34°14'27" north and longitude 45° 58' 57" east. The parameters studied were DO, pH, BOD₅, NO₃⁻, PO₄³⁻, turbidity, water temperature and TDS. During the experiments, the total number of samples was 24, which were sampled twice a month. Sampling hours were chosen the same for each sampling time, and it was done near noon, from 10:30 to 13:30. It should be noted that the samples taken were placed in clean polyethylene bottles with a volume of 1 liter for analysis. Sampling was done in four periods of spring, summer, autumn and winter during the years 2019-2020, based on the standard method. Equation 1 is used to obtain the final value of this index. The water quality was determined by using equation 1 and index was classified from 0 to 100. In this regard, W_i is the value of the sub-index (qualitative parameter), n is the number of parameters in the index calculation system and Q_i is the weight factor of each parameter (Terrado et al., 2010). Finally, by determining the amount of sub-index in the parameters considered through the relevant curves, the numerical amount of the index and water quality status are determined. In this study, SAS Ver 9.4 software was used to statistically analyze the data and check their normality. One-Way ANOVA was used to compare the effect of time conditions at the sampling station on the water quality parameters of the Golin River. Also, the means were compared with Duncan's test at the level of 0.05%.

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^n W_i Q_i \quad (1)$$

Results and discussion

According to the obtained results, the value of DO in November with the value of 9.23 mg/L was the highest value and in July, with the value of 7.55 mg/L was in the lowest range. The study of the pH parameter in Golin River showed that the highest values of the mentioned parameter were observed during January and December and the lowest parameter observed in March. The highest amount of BOD₅ parameter was observed in June and the lowest in September, with values of 9.60 and 4.75 mg/L, respectively. The results of statistical analysis also indicated that the values of this parameter in the mentioned months in terms of the Duncan index were in two different statistical groups. In June, October, November, December, January and February, the BOD₅ parameter showed higher values than other months. By evaluating the value of nitrate

in the water during a year, it was found that the highest value of this parameter was observed in April, November, December, January and February, respectively. According to the results, the highest value of phosphate parameter observed in June with a rate of 1 mg/L and the lowest amount of this parameter was observed in November with a rate of 0.18 mg/L. The study of statistical analysis also indicated that the value of this parameter in May, January, November and March was lower than other months and the value of phosphate in these months was statistically insignificant.

The results of water turbidity in the river during the year showed that the highest value of this parameter was in November and the lowest were in January, July and September. According to results, dissolved oxygen (DO) with an annual average of 8.45 mg/L according to the drinking standard (WHO, 2004) and the FAO irrigation standard (FAO, 2005) were in the appropriate range. The pH value also was in the desired range, with an annual average of 7.8 in terms of irrigation and drinking. The results of examining the annual average of BOD₅ also showed that this parameter was unfavorable based on the drinking standard, but it was in the desired range according to the FAO irrigation standard. The annual average of TDS showed that this parameter is in the unfavorable category in terms of irrigation, but in the favorable category in terms of drinking consumption. According to the results, the water quality of the river was in the Medium category in all different seasons and months during the year. The highest numerical value of NSFQI was obtained in March with the value of 60.59 and the lowest numerical value of the mentioned index was measured at a value 54.21 in June.

Conclusions

The present study was conducted to Evaluation of Golin River water quality in Kermanshah Province by using National Sanitation Foundation Water Quality Index. The total results which obtained from the study of Golin river water quality during one year (2019-2020) showed that the water of the river in terms of NSFQI was in the medium category in all seasons. Disposal of household waste, animal waste, rural waste, agricultural wastewater and hot climate are the main reasons for the decrease in river water quality at the sampling station. Examination of physical and chemical parameters of Golin river and comparison of results with WHO drinking standard and FAO irrigation standard showed that DO, pH, NO₃⁻, PO₄³⁻ were in the desired category and BOD₅, turbidity and TDS were classified as undesirable condition. However, it can be suggested that based on the results obtained from the index at the Najjar station, the water of the Golin River cannot be used directly for drinking and requires advanced treatment. For recreational purposes, the water must be used with caution. It was also found that the river water could be used for irrigation in agriculture and drinking of domestic animals. Continuous monitoring, treatment of effluents from human activities, domestic wastewater and preventing their discharge into the river in an untreated manner can be suggested as a number of management strategies to improve the condition of the river and reduce pollution.

Keywords Water Pollution, Quality Index, Water resource, management

Article Type: Research Article

Article history: **Received:** 18 February 2023 **Revised:** 10 May 2023 **Accepted:** 03 June 2023 **ePublished:** 15 September 2023

Cite this article: Ghamarnia, H., Palash, Z., & Palash, M. (2023). Evaluation of Golin River water quality in Kermanshah Province by using National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(2), 51-67. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9040.1048

Publisher: Razi University

© The Author(s).





فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

homepage: <https://atwe.razi.ac.ir>



ارزیابی کیفیت آب رودخانه گلین در استان کرمانشاه با استفاده از شاخص NSFQI

هوشنگ قمرنیا^۱ ID، زلیخا پالاش^۲ ID، میثم پالاش^۳ ID

^۱ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hghamarnia@razi.ac.ir

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: Zoleikhapalash1373@gmail.com

^۳ نویسنده مسئول، پژوهشگر گروه مدیریت منابع محیطی جهاد دانشگاهی کرمانشاه، ایران. رایانامه: Meisampalash1371@gmail.com

چکیده

هدف از انجام این پژوهش بررسی وضعیت کیفی رودخانه گلین با استفاده از شاخص NSFQI است. برای این منظور از آب رودخانه در ایستگاه روستای نجار در یک دوره یک ساله از اردیبهشت ۱۳۹۸ تا فروردین ۱۳۹۹ در تناوب هر ماه دو بار نمونه برداری انجام شد. پارامترهای مورد بررسی شامل اکسیژن محلول، pH، BOD₅، نیترات، فسفات، کدورت، دمای آب و کل مواد جامد محلول بودند. بررسی پارامترهای کیفیت آب نشان داد که میزان شاخص های کدورت، نیترات، BOD₅ و pH در فصل پاییز بیشتر بود. همچنین بیشترین میزان اکسیژن محلول در فصل زمستان مشاهده شد. مقایسه میزان شاخص NSFQI در ماه های مختلف نمونه برداری نشان داد که به ترتیب بیشترین و کمترین میزان عددی شاخص با مقادیر ۶۰/۵۹ و ۵۴/۲۱ در ماه های اسفند و خرداد مشاهده شد. بر اساس عددی شاخص در فصل زمستان با میزان ۵۹/۶۹ در بیشترین حالت و در فصل تابستان با میزان ۵۶/۲۶ در کمترین حالت بود. بر اساس میانگین سالیانه شاخص NSFQI که مقدار عددی آن برابر با ۵۷/۸۷ بود آب رودخانه در رده کیفی متوسط قرار گرفت. از جمله دلایل این نتیجه را می توان بی توجهی به ورود فاضلاب و فعالیت های کشاورزی در روستاهای همجوار رودخانه دانست. در نتیجه در حوزه ایستگاه بررسی شده، آب این رودخانه را نمی توان به طور مستقیم به منظور شرب استفاده کرد و برای مصرف شرب نیاز به تصفیه پیشرفته دارد. برای هدف های تفریحی نیز، آب این رودخانه باید با احتیاط مصرف شود. همچنین مشخص شد که می توان از آب رودخانه مذکور برای آبیاری در کشاورزی و شرب حیوانات اهلی استفاده نمود.

واژه های کلیدی: آلودگی آب، شاخص کیفیت، منابع آب، مدیریت

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۹ بهمن ۱۴۰۱ اصلاح: ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۲ پذیرش: ۱۳ خرداد ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ شهریور ۱۴۰۲

استناد: قمرنیا، ه.، پالاش، ز.، و پالاش، م. (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت آب رودخانه گلین در استان کرمانشاه با استفاده از شاخص NSFQI، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، (۳)، ۶۷-۵۱، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9040.1048



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

یکی از عوامل اصلی حیات بشر آب می‌باشد و علاوه بر شرب، جهت سایر مصارف مرتبط با انسان و طبیعت دارای اهمیت ویژه‌ای است. رودخانه، دریاچه، یخچال‌های طبیعی، آب‌های روان، آب باران، آب‌های زیرزمینی و غیره اشکال مختلف منابع آبی هستند (افندی^۱، ۲۰۱۶) و در این بین رودخانه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند زیرا این منابع آبی جزء سیستم‌های باز محسوب می‌شوند و به این علت در معرض تغییر و تحول قرار دارند و اکثر محتوای آب شیرین در دسترس در این منابع آبی قرار دارد (افندی، ۲۰۱۶) و جزء منابع مهم آب شرب می‌باشند. لذا از این منظر برای حیات بشر دارای اهمیت بیشتری هستند (برد^۲، ۲۰۱۰). کیفیت این منابع آبی از مهم‌ترین خصوصیات است که باعث رسیدن به توسعه پایدار می‌شود، لذا بی‌توجهی به کیفیت شیمیایی و فیزیکی آب، علاوه بر ایجاد آسیب‌های بهداشتی، سبب بروز آسیب‌های اقتصادی نیز خواهد شد (فرزادکیا و همکاران^۳، ۲۰۱۶). یکی از مناسب‌ترین روش‌های عملی و به‌صرفه از نظر اقتصادی برای مشخص ساختن میزان سلامت اکولوژیکی آب‌ها و تعیین اینکه آیا با انجام فعالیت‌های انسانی میزان کیفیت آب روندی کاهشی داشته، بررسی بیولوژیکی این منابع آبی می‌باشد (لنات^۴، ۱۹۹۳). جهت حصول این نتیجه استفاده از شاخص‌های کیفی آب بسیار قابل توجه می‌باشد. به‌وسیله شاخص‌های مذکور حجم زیادی از اطلاعات حاصل از بررسی میزان کیفیت آب به‌صورت یک عدد بدون بعد تبدیل می‌شود که این عدد در یک مقیاس درجه‌بندی شده، دارای مفهوم و تعریف کیفی تفسیر شده‌ای است (جعفری سلیم و همکاران، ۱۳۸۸). در مجموع شاخص‌های کیفیت منابع آب به دو گروه تقسیم می‌شوند: شاخص‌هایی که با افزایش مقدار آلودگی، عدد شاخص افزایشی می‌شود همچون BCWQI^۵ و شاخص‌هایی که با افزایش آلودگی، عدد شاخص آن‌ها کاهشی می‌باشد مانند شاخص‌های: IRWQISC^۶، WQI^۷ و OWQI^۸ (ورام^۹، ۲۰۱۱). در اکثر مواقع در ایران از دو شاخص (NSFWQI) و (IRWQISC) استفاده شده است. شاخص NSFWQI به معنای شاخص کیفیت آب مؤسسه بهداشت ملی هست. براون و همکاران در سال ۱۹۷۰ با کمک مؤسسه ملی بهداشت آمریکا شاخص NSFWQI را براساس نظرسنجی از افراد متخصص با تخصص‌های گوناگون در این زمینه ارائه دادند. پارامترهای موردبحث در شاخص مذکور عبارت‌اند از: تغییرات دما، اکسیژن محلول، اکسیژن بیوشیمیایی، فسفات کل، خاصیت اسیدی، نیترات، کل مواد جامد، فینال کلی فرم و کدورت (ابراهیم پور و محمد زاده، ۱۳۹۲).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در رابطه با بررسی کیفیت منابع مختلف آبی تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: در تحقیقی کیفیت آب دریاچه سد مخزنی اکباتان همدان با استفاده از شاخص (NSFWQI) بررسی شد و نتایج نشان داد که کیفیت آب موجود در دریاچه در ماه‌های سرد سال نسبت به ماه‌های گرم سال وضعیت بهتری دارد (سمرقندی و همکاران^{۱۰}، ۱۳۹۲). نتایج پژوهش علیزاده و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی کیفیت آب رودخانه‌های کرج و کن با استفاده از شاخص‌های، NSFWQI، IRWQISC و WQI، نشان داد شاخص NSFWQI کیفیت آب رودخانه‌های تحت مطالعه را بد تا متوسط، شاخص IRWQISC آن‌ها را دارای کیفیت بسیار بد تا نسبتاً خوب و بالاخر شاخص WQI کیفیت رودخانه‌های مزبور را خوب تشخیص دادند. مریخ‌پور و همکاران (۱۴۰۰) به ارزیابی کیفیت آب دریاچه سد کلان ملایر با استفاده از شاخص NSFWQI و پهنه‌بندی نتایج آن با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداختند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی کیفیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه در فصل زمستان به دلیل افزایش حجم دبی آب رودخانه و آب ذخیره شده در پشت سد، کاهش دما و کاهش فعالیت‌های کشاورزی شرایط مطلوب‌تری دارد. بنا بر مطالعات صورت گرفته توسط پوری و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۱) در

¹ Effendi

² Baird

³ Farzadkia et al

⁴ Lenat

⁵ British Columbia Water Quality Index

⁶ National Sanitation Foundation Water Quality Index

⁷ Iran Water Quality Index for Surface Water

⁸ Water Quality Index

⁹ Oram

¹⁰ Puri et al

بررسی کیفیت آب‌های سطحی شهر ناگپور^۱ هندوستان با استفاده از شاخص NSFQI رودخانه‌های ناتالا، آمبازاری و گندهیساگر در طبقه ضعیف شاخص قرار داشتند. این محققین دلیل این تغییرات را در نتیجه فعالیت‌های انسانی، رواناب‌های سطحی و رشد و نمو گیاهان آبی دانستند. افندی و واردیاتنو^۲ (۲۰۱۵) به بررسی وضعیت کیفیت رودخانه چیمبیلایونگ^۳ در کشور اندونزی با استفاده از شاخص NSFQI و شاخص آلودگی (PI^۴) پرداختند، نتایج نشان داد که میزان شاخص NSFQI در محدوده ۷۸-۸۸ و میزان شاخص آلودگی در محدوده ۷۸/۵۶-۰/۰ قرار داشت و در کل کیفیت آب این رودخانه در محدوده خوب قرار گرفت. دواتا^۵ (۲۰۱۹) به بررسی کیفیت آب ۴ رودخانه اصلی در پادانگ کشور اندونزی، یعنی رودخانه کندیس، رودخانه هودینگین، رودخانه کورنجی و رودخانه آرا با استفاده از شاخص (RPI^۶) و شاخص NSFQI پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص آلودگی کلیه رودخانه‌ها در دامنه ۱۱/۶ تا ۶/۶ قرار گرفته و همچنین محاسبه شاخص NSFQI نشان داد کیفیت آب رودخانه در محدوده ۲۹/۲۷-۴۸/۷۵ قرار دارد. چابوک و همکاران^۷ (۲۰۲۰) به تجزیه و تحلیل کیفیت آب رودخانه دجله در کشور عراق با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) و نرم افزار GIS پرداختند. آن‌ها از ۱۴ ایستگاه در امتداد رودخانه نمونه‌برداری انجام دادند. نتایج بررسی ۱۴ پارامتر نشان داد که وضعیت کیفیت آب رودخانه دجله در پایین دست به شدت کاهش پیدا کرده است. نتایج حاصل از تحقیق امید و شریعتی^۸ (۲۰۲۱) در بررسی کیفیت رودخانه پاسیخان با استفاده از شاخص NSFQI نشان داد مقادیر کیفی آب ایستگاه‌ها در فصول مختلف از ۴۶ تا ۷۰ متغیر بود. و بر این اساس، کیفیت آب رودخانه در رده کیفی متوسط قرار گرفت. نتایج ارزیابی کیفیت آب با استفاده از شاخص WQI در دو رودخانه تانزانیا نیز نشان داد که کیفیت آب در رودخانه پانگانی در محدوده خوب و در رودخانه زیگی در محدوده آلوده قرار دارد (می‌هاله^۹، ۲۰۲۲).

تا کنون تحقیقات زیادی مبنی بر بررسی کیفیت منابع آب سطحی مخصوصاً رودخانه‌ها با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب در کشور ایران انجام شده است اما نتایج و گزارشات ارائه شده در این تحقیقات مخصوص منطقه مورد مطالعه می‌باشد، لذا به نظر می‌رسد بررسی شرایط کیفی منابع آبی در مکان‌هایی که این منابع دارای پتانسیل مناسب جهت مصارف مختلف می‌باشند بسیار ضروری و حائز اهمیت می‌باشد. بررسی و سنجش میزان کیفیت آب رودخانه گلین از یک سو به دلیل شرایط آب و هوایی گرمسیری این منطقه و از سوی دیگر افزایش کم آبی در سال‌های اخیر که نیاز آب را دو چندان کرده و همچنین به دلیل اینکه از آب رودخانه گلین سدی به نام سد زاگرس احداث شده و به صورت کانال و تونلی به طول ۱۸۰۰ متر آب به سد ذخیره تنگه کورک گیلانغرب برای آبیاری زمین‌های کشاورزان منطقه هدایت می‌شود بسیار لازم و ضروری به نظر می‌رسد. لذا پژوهش حاضر به منظور بررسی زمانی تغییرات کیفی آب، در ایستگاه واقع در پایین دست روستای نجارگلین طی مدت ۴ فصل مختلف انجام شده و مطالعات کیفی بر روی آن‌ها بر اساس شاخص کیفیت آب مؤسسه بهداشت ملی (NSFWQI) مورد بررسی قرار گرفت.

روش پژوهش

معرفی منطقه

رودخانه مورد مطالعه واقع در گلین، در ۳۳ کیلومتری سرپل ذهاب، جاده گیلانغرب قرار دارد. گلین از توابع بخش مرکزی گیلانغرب واقع در استان کرمانشاه می‌باشد. حوزه آبریز رودخانه گلین در مختصات جغرافیایی ۴۵°۶۰' تا ۴۵°۴۴' طول شرقی و ۳۴°۲۶' تا ۳۴°۹' عرض

¹ Nagpur

² Effendi and Wardiatno

³ Ciambulawung River

⁴ Pollution Index

⁵ Dewata

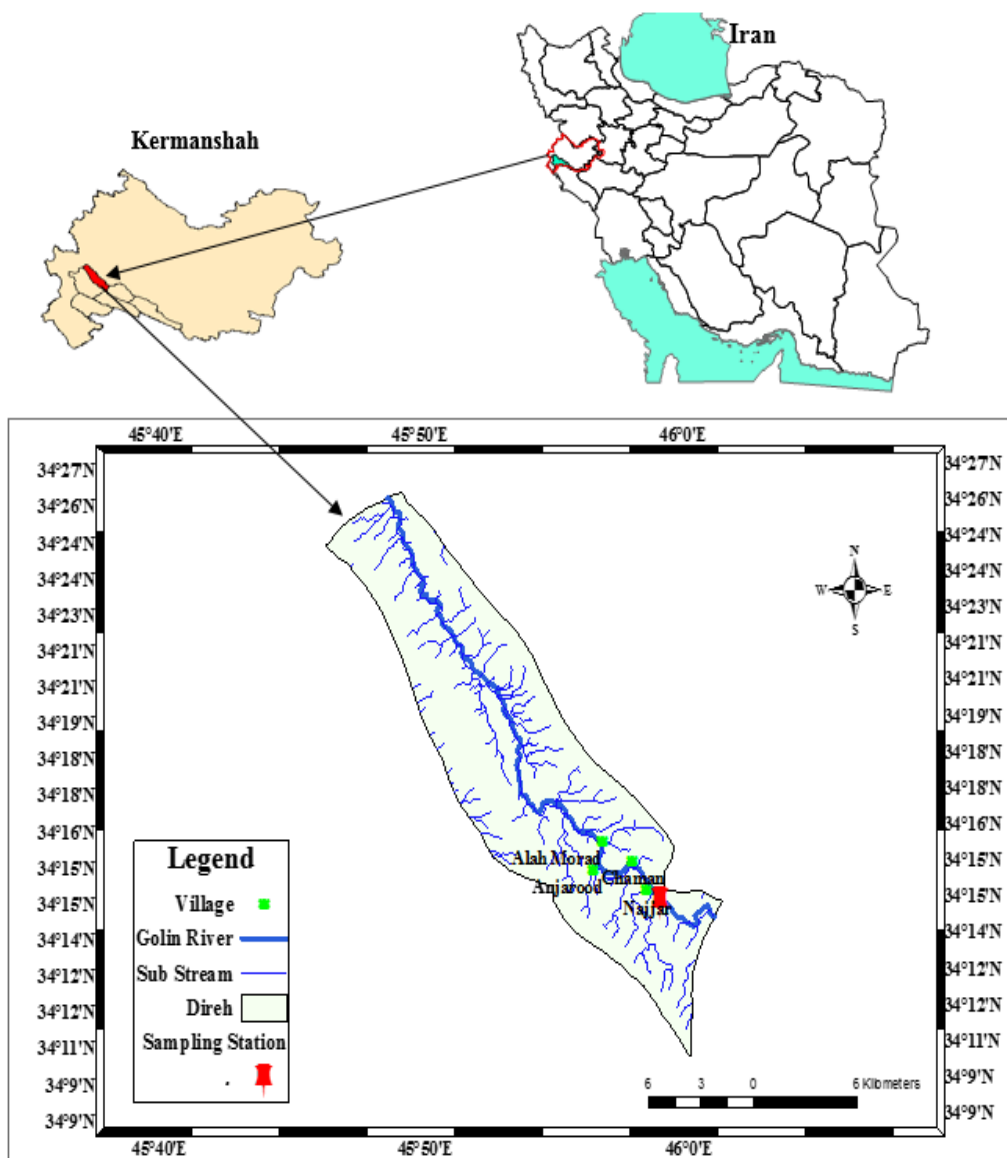
⁶ River Pollution Index

⁷ Chabuk et al

⁸ Omidi & Shariati

⁹ Mihale

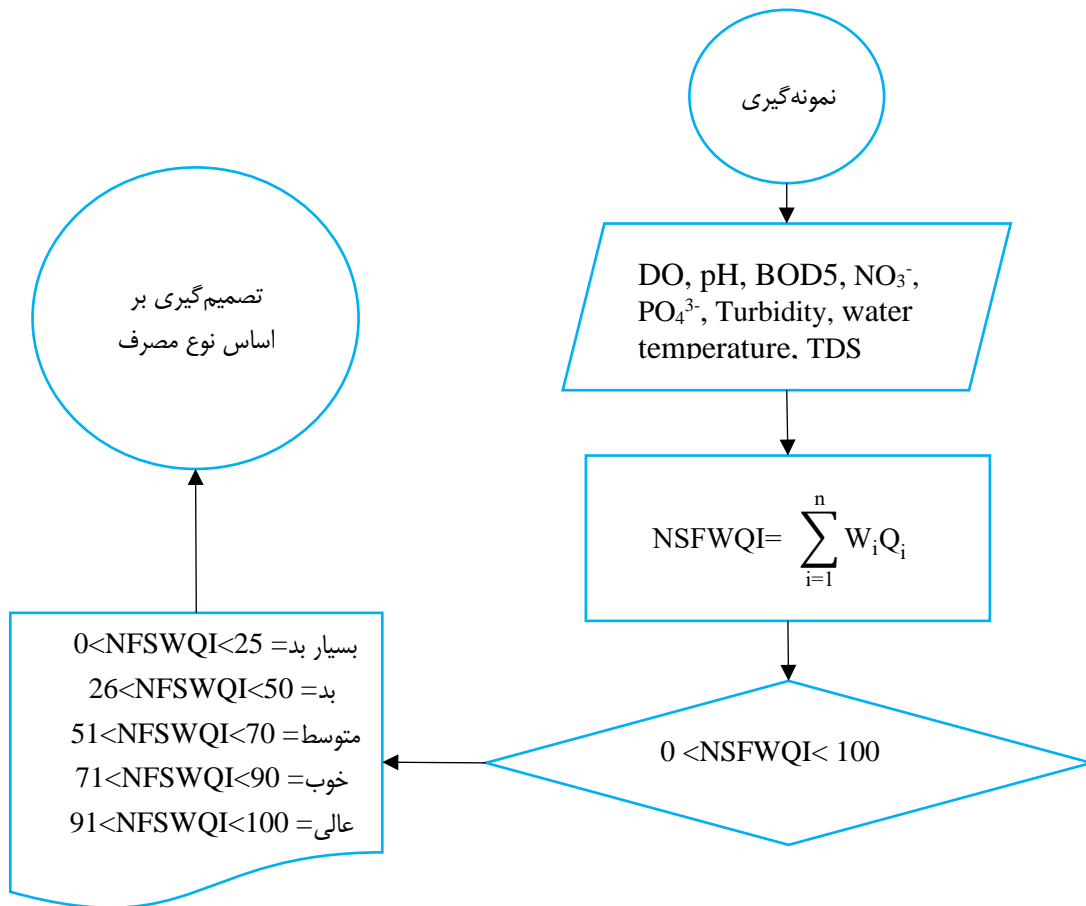
عرض شمالی و ارتفاع ۳۴۵۰ متر از سطح دریا قرار دارد که در شکل (۱) نشان داده شده است. در حوضه رودخانه گلین ۵ روستا با جمعیتی بالغ بر ۲۸۰۰ نفر وجود دارد. شغل و منبع درآمد آن‌ها کشاورزی، باغداری، دامداری و طیور به روش سنتی است.



شکل ۱. موقعیت محدوده و محل استقرار ایستگاه نمونه برداری واقع بر رودخانه گلین مورد مطالعه در استان

پس از بازدید میدانی، با توجه به موقعیت آب‌های ورودی به رودخانه، منابع تولید آلاینده منطقه (فاضلاب‌های روستایی، خانگی و زهاب‌های کشاورزی)، مکان ورود آلاینده‌ها و نیز امکان نمونه‌برداری از آب رودخانه، ایستگاه واقع در پایین دست رودخانه و در نزدیکی روستای نجارگلین از توابع دهستان دیره با موقعیت مختصات جغرافیایی عرض $34^{\circ}14'27''$ شمالی و طول $45^{\circ}58'57''$ شرقی انتخاب گردید. پارامترهای مورد بررسی شامل اکسیژن محلول، pH، BOD₅، نیترات، فسفات، کدورت، دمای آب و کل مواد جامد محلول بودند. در طی آزمایشات تعداد کل نمونه‌ها ۲۴ نمونه بود که هر ماه دو بار نمونه‌برداری می‌شد. ساعات نمونه‌گیری برای هر زمان نمونه‌گیری یکسان انتخاب شد و نزدیک ظهر از ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۳:۳۰ انجام شد. لازم به ذکر است که نمونه‌های گرفته شده برای آنالیز در بطری‌های

پلی اتیلن تمیز به حجم ۱ لیتر قرار داده شد. نمونه‌گیری در چهار دوره بهار، تابستان، پاییز و زمستان طی سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۹۹ بر اساس روش استاندارد انجام شد. مراحل روش انجام کار در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲. مراحل انجام مطالعه کیفیت رودخانه گلین

جدول (۱) پارامترهای مختلف اندازه‌گیری، روش اندازه‌گیری و مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای اندازه گیری شده فیزیکی و شیمیایی برحسب روش آزمایش استاندارد (برد و برید واتر، ۲۰۰۵)

ردیف	پارامتر	مشخصات	دقت
۱	اکسیژن محلول (DO)	دستگاه پرتابل HACH-HQ ۴۰ D	۰/۰۱ mg/L
۲	pH	دستگاه پرتابل HACH-HQ ۴۰ D	MPN/100mL
۳	اکسیژن مورد نیاز زیستی (BOD)	دستگاه BOD سنج مدل ۶۰۰ BD	۰/۰۱ mg/L
۴	فسفات (PO ₄ ³⁻)	اسپک ترو فتومتر - ۵۷۰۵ UV/Vis JENWAY	۰/۰۱ mg/L
۵	نیترات (NO ₃ ⁻)	اسپک ترو فتومتر - ۶۷۰۵ UV/Vis JENWAY	۰/۰۱ mg/L
۶	کدورت (Turbidity)	دستگاه کدورت سنج HACH N۲۱۰۰	۰/۱ NTU
۷	کل جامدات محلول (TDS)	دستگاه پرتابل HACH-HQ ۴۰D	۰/۰۱ mg/L
۸	کل ذرات معلق	مدل inolab WTW	۰/۰۱ mg/L
۹	کل مواد جامد	مدل inolab WTW	۰/۰۱ mg/L
۱۰	دمای آب	دماسنج معمولی استاندارد	-
۱۱	فیکال کلیفرم	MPN	-

شاخص کیفی NSFQW به معنی شاخص کیفیت آب موسسه بهداشت ملی می باشد. کاربر شاخص مذکور طبقه بندی کیفیت آب های سطحی می باشد. از جمله مزایای این روش سادگی، قابلیت دسترسی ویژگی های کیفی مورد استفاده است که بیشتر در بررسی های کیفی بدست می آید. ارزیابی و شناخت کیفیت آب رودخانه ها با استفاده از طبقه بندی این شاخص موجب ارایه نتایج دقیق تر می گردد و این شرایط را فراهم می کند که با تفسیری ساده بتوان کیفیت آب رودخانه را در ایستگاه های مختلف بررسی و رده بندی کرد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲). در شاخص مذکور برای منظور کردن میزان اثر هر پارامتر و یا زیر شاخص مربوط به آن، به هر یک از پارامترها یک وزن و یا ارزش عددی نسبت داده شده است که در جدول (۲) به آن اشاره شده است. بر اساس این جدول بیشترین وزن مربوط به غلظت اکسیژن محلول (۰/۱۷) و کمترین وزن مربوط به کل مواد جامد محلول (۰/۰۷) می باشد. برای به دست آوردن مقدار نهایی این شاخص از رابطه (۱) استفاده می شود. شاخص کیفیت آب از صفر تا صد طبقه بندی شده و در جدول (۳) گردآوری شده است. در این رابطه W_i میزان مربوط به زیر شاخص (پارامتر کیفی)، n تعداد پارامتر موجود در سیستم محاسبه شاخص و Q_i فاکتور وزنی هر پارامتر می باشد (ترادو^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). در نهایت با تعیین میزان زیر شاخص در پارامترهای مد نظر از طریق منحنی های مربوطه میزان عددی شاخص و وضعیت کیفی آب مشخص می شود.

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^n W_i Q_i \quad (1)$$

¹ Terrado

جدول ۲. صفات مورد بررسی و عامل وزن نهایی در NSFQI (Mirzaei et al., 2016)

پارامتر	فاکتور وزنی	پارامتر	فاکتور وزنی
اکسیژن محلول	۰/۱۷	فسفات	۰/۱۰
کلیرم مدفوعی	۰/۱۶	درجه حرارت	۰/۱۰
pH	۰/۱۱	کدورت	۰/۰۸
BOD ₅	۰/۱۱	کل مواد جامد	۰/۰۷
نیترات	۰/۱۰		

در جدول (۳) مقادیر طبقه‌بندی شاخص NSFQI و تفسیر هر بخش ارائه شده است.

جدول ۳. بخش بندی شاخص NSFQI طبق پارامترهای (رنگ، کیفیت و مقادیر عددی شاخص) (Mirzaei et al. 2016)

مقادیر عددی	معادل تفسیری	رنگ	توضیحات
۲۵-۰	بسیار بد	قرمز	برای هیچ یک از کاربردهای زیر مناسب نمی‌باشد
۵۰-۲۶	بد	نارنجی	مناسب برای آبیاری زمین‌های کشاورزی
۷۰-۵۱	متوسط	زرد	در صورت مصرف آب شرب نیازمند تصفیه پیشرفته است. مناسب برای پرورش شیلات و گونه‌های مقاوم آبی، برای آب شرب حیوانات اهلی مناسب.
۹۰-۷۱	خوب	سبز	در صورت استفاده از آن جهت تامین آب شرب نیازمند تصفیه متداول است. مناسب برای پرورش ماهی و گونه‌های حساس آبی، مناسب برای مقاصد تفریحی چون شنا.
۱۰۰-۹۱	عالی	آبی	دارای حالت طبیعی، در صورت استفاده از آن جهت تامین آب شرب نیاز به پرورش شیلات و گونه‌های حساس آبی

تحلیل آماری داده‌ها

در این مطالعه به منظور تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و بررسی نرمال بودن آن‌ها از نرم افزار SAS Ver 9.4 استفاده شد. جهت مقایسه تأثیر شرایط زمانی ایستگاه نمونه‌برداری بر پارامترهای کیفیت آب رودخانه گلین، از آزمون آنالیز واریانس یک طرفه (One-Way ANOVA) استفاده گردید. همچنین مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن (Duncan's Test) در سطح ۰/۰۵ درصد انجام گرفت. و به منظور ترسیم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

یافته‌ها

میانگین و انحراف معیار پارامترها در جدول (۴) آورده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده پارامتر اکسیژن محلول (DO) که تحت تأثیر عواملی مانند: قابلیت محلول شدن گاز اکسیژن در آب، فشار جزئی گاز اکسیژن در هوا، دما و درجه خلوص آب قرار می‌گیرد (ابراهیم پور و محمد زاده، ۱۳۹۲). بر اساس نتایج بدست آمده میزان این پارامتر در ماه آبان با میزان ۹/۲۳ میلی‌گرم در لیتر بیشترین مقدار را داشته

و در ماه تیر با مقدار ۷/۵۵ میلی گرم در لیتر کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. بررسی میزان پارامتر pH در رودخانه گلین نشان داد بیشترین مقادیر پارامتر مذکور در طول سال در ماه های دی و آذر و کمترین میزان پارامتر مورد بحث در اسفند ماه مشاهده شد. بیشترین میزان پارامتر BOD₅ در خرداد ماه و کمترین میزان آن در ماه شهریور به ترتیب با مقادیر ۹/۶۰ و ۴/۷۵ میلی گرم در لیتر، مشاهده شد. و نتایج تحلیل های آماری نیز نشان دادند مقادیر این پارامتر در ماه های مذکور از لحاظ شاخص دانکن در دو گروه متفاوت آماری قرار گرفتند. در ماه های خرداد، مهر، آبان، آذر، دی و بهمن، میزان پارامتر BOD₅ نسبت به سایر ماه ها مقادیر بالاتری را نشان داد. با ارزیابی مقادیر نترات موجود در آب طی یکسال مشخص شد بیشترین میزان این پارامتر در ماه های فروردین، آبان، آذر، دی و بهمن مشاهده شده است.

جدول ۴. مقایسه اختلاف میانگین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب در ایستگاه مورد مطالعه در طول سال

پارامتر ماه	TDS(mg/L)	کدورت (NTU)	دما(°C)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	pH	DO (mg/L)
فروردین	۶۱۶ab	۴d	۱۸/۴b	۰/۳۸bcd	۲/۲۶ab	۵/۵cd	۷/۸۷bcd	۸/۷۷abcd
اردیبهشت	۵۷۰ab	۱۰cd	۲۰/۳abc	۰/۳۰cdef	۱/۳۳cd	۷/۰۵ad	۷/۶ef	۸/۳bcde
خرداد	۶۱۹a	۸cd	۲۱/۳a	۱/۰a	۱/۲۷cd	۹/۶a	۷/۶ef	۸/۲۵bcde
تیر	۵۶۹ab	۲d	۲۰/۲abc	۰/۴۸b	۰/۸۸d	۸/۶۵ab	۷/۷de	۷/۵۵e
مرداد	۵۵۷/۵ab	۶d	۲۰/۵۵ab	۰/۴۱bc	۱/۷۷abc	۶/۱۵bcd	۷/۸de	۸/۰de
شهریور	۵۴۴b	۲d	۱۸cd	۰/۴۹b	۱/۱۰cd	۴/۷۵d	۷/۸۵bcd	۸/۲cde
مهر	۶۰۴ab	۸cd	۱۵/۶de	۰/۹۲a	۱/۹abc	۸/۲ab	۷/۸۲cd	۸/۴۲bcd
آبان	۵۸۳ab	۳۰۰a	۱۴e	۰/۱۸f	۲/۶۲a	۷/۹abc	۷/۹bcd	۹/۲۳a
آذر	۵۷۰ab	۵۲b	۱۳/۸e	۰/۴۹b	۲/۲۲ab	۸/۲ab	۸/۰۲abc	۸/۳۳bcde
دی	۶۵۲a	۲d	۱۴/۲e	۰/۲۱ef	۱/۸۹abc	۷/۹abc	۸/۱۵a	۸/۹۵abc
بهمن	۶۲۹a	۱۰cd	۱۵/۹de	۰/۳۶bcde	۱/۸۹abc	۶/۰bcd	۷/۹bcd	۹/۰۵ab
اسفند	۶۲۹a	۱۸c	۱۸cd	۰/۲۴۵def	۱/۵bcd	۶/۳bcd	۷/۴۵f	۸/۳bcde

حروف نامشابه اختلاف در سطح (P≤0.05) را بین ماه های مختلف نشان می دهد.

با توجه به نتایج مندرج در جدول (۴) بیشترین میزان پارامتر فسفات در ماه خرداد با میزان ۱/۰۰۵ میلی گرم در لیتر و کمترین میزان این پارامتر در آبان ماه با میزان ۰/۱۷۵ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. بررسی تحلیل های آماری نیز نشان داد که میزان پارامتر مذکور در ماه های اردیبهشت، دی، آبان و اسفند نسبت به سایر ماه های سال کمتر بوده و میزان فسفات در این ماه ها در گروه های آماری مشترکی قرار گرفته و از لحاظ آماری بی معنی بودند. نتایج بررسی میزان کدورت آب در رودخانه در طول سال نشان داد بیشترین میزان این پارامتر در ماه آذر و کمترین میزان آن در اردیبهشت ماه بوده است. نتایج بررسی این پارامتر نشان داد که در ماه های دی، بهمن و اسفند میزان کدورت آب نسبت به سایر ماه های سال بیشتر بوده است اما با بررسی نتایج حاصل از آنالیزهای آماری مشاهده گردید در تمام فصول سال بین ماه های مختلف از لحاظ آماری در این پارامتر اختلاف معنی داری وجود نداشت. در جدول (۵) بررسی میانگین مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده در طول دوره نمونه برداری و مقایسه نتایج با استانداردهای مختلف نشان داد که میانگین سالیانه پارامتر اکسیژن محلول ۸/۴۵

میلی گرم در لیتر به دست آمد و بر اساس استاندارد شرب (سازمان بهداشت جهانی^۱، ۲۰۰۴) و استاندارد آبیاری فائو (فائو^۲، ۲۰۰۵) در محدوده مناسب قرار دارد. پارامتر pH نیز با میانگین سالیانه ۷/۸ از لحاظ آبیاری و شرب در محدوده مطلوب قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی میانگین سالیانه پارامتر BOD₅ نیز نشان داد که این پارامتر بر اساس استاندارد شرب نامطلوب است ولی از نظر استاندارد آبیاری فائو در محدوده مطلوب قرار دارد. بر اساس جدول (۵)، بررسی میانگین سالانه فراسنج کل مواد جامد محلول در آب نشان داد که این پارامتر از نظر آبیاری در رده نامطلوب، اما از نظر مصرف شرب در رده مطلوب قرار دارد.

جدول ۵- مقایسه پارامترهای کیفی آب جهت کاربری‌های گوناگون با استاندارد شرب و آبیاری

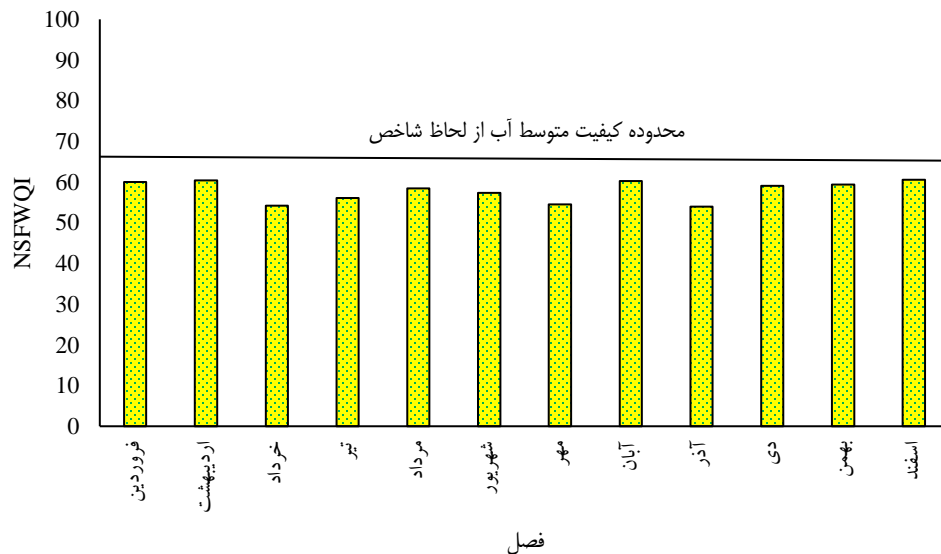
پارامتر	میانگین سالانه	انحراف معیار	حد مجاز شرب (WHO)	نتیجه	حد مجاز آبیاری (FAO)	نتیجه
اکسیژن محلول (mg/L)	۸/۴۵	± ۳/۹۴	< ۴	مطلوب	< ۲	مطلوب
pH	۷/۸	± ۱/۱۱	۸-۵	مطلوب	۸-۴	مطلوب
BOD ₅ (mg/L)	۷/۱۸	± ۱۷/۰۴	> ۳	نامطلوب	> ۱۰۰	مطلوب
نیتрат (mg/L)	۱/۷۲	۲۰±۴۶	> ۵۰	مطلوب	۵	مطلوب
فسفات (mg/L)	۰/۴۵۵	۱۳±۷۰	> ۵	مطلوب	-	مطلوب
دما (C°)	۱۷/۵۰	۵±۸۲	> ۱۵	نامطلوب	-	-
کدورت (NTU)	۱۰/۹	±۸/۸۴	> ۵	نامطلوب	> ۵	نامطلوب
کل مواد جامد محلول (mg/L)	۵۹۳/۷	۵±۱۱	> ۱۰۰۰	مطلوب	> ۴۵۰	نامطلوب

پارامترهای نیترات و فسفات نیز به ترتیب با مقادیر میانگین سالیانه ۰/۴۵۵ و ۱/۷۲ میلی گرم در لیتر از لحاظ استاندارد شرب و آبیاری در رده مطلوب قرار گرفتند. میانگین سالانه فراسنج کدورت نیز نشان داد که این پارامترها از نظر استانداردهای شرب و آبیاری در رده نامطلوب قرار دارند. دمای آب رودخانه گلین تحت تأثیر دمای هوا بوده که به تناسب هر فصل تغییر می‌کند. به طور کلی میانگین دمای سالیانه رودخانه مذکور ۱۷/۵۰ درجه سانتی گراد اندازه‌گیری شد.

نتایج حاصل از محاسبه شاخص NSFQI بر اساس مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در شکل (۳) ارائه شده است. بر اساس اطلاعات حاصله از شکل مذکور در طول سال در تمام فصول و ماه‌های مختلف وضعیت کیفی آب رودخانه در رده توصیفی متوسط قرار دارد. بیشترین مقادیر عددی شاخص NSFQI به ترتیب در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت با میزان ۶۰/۵۹، ۶۰/۴۵ و ۶۰/۰ به دست آمد و کمترین مقادیر عددی شاخص مذکور نیز به ترتیب با مقادیر ۵۳/۹۹، ۵۴/۲۱ و ۵۴/۵۵ در ماه‌های آذر، خرداد و مهر به دست آمد.

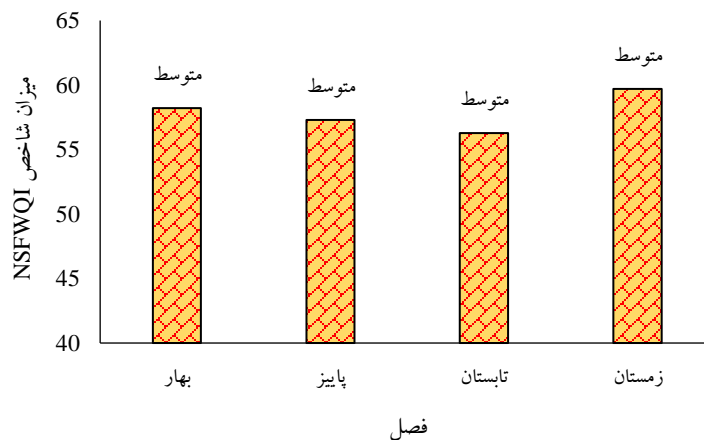
¹ WHO

² FAO



شکل ۳. نتایج ارزیابی کیفیت آب بر اساس شاخص NSFQI در ایستگاه نمونه برداری

مقدار NSFQI در فصول مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، بیشترین مقدار شاخص در فصل زمستان با میانگین ۵۹/۷۰ و کمترین آن در تابستان با میانگین ۵۶/۲۷ به دست آمد.



شکل ۴. میزان شاخص NSFQI در فصول مختلف

بحث

در بررسی پارامتر pH در طول دوره نمونه برداری، نتایج نشان می دهد که آب رودخانه گلین کمی قلیایی بوده است. میزان اسیدیته آب تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر میزان مواد معلق، مواد کلوییدی، مواد آلی وجود آنیون های هالوژنه و راهیابی رواناب های کشاورزی در

آب قرار می‌گیرد. از جمله عوامل افزایش میزان پارامتر pH در ماه‌های دی و بهمن پدیده اوتری فیکاسیون در رودخانه می‌باشد. در پیکره اوتریفیک میزان سوخت وساز کمتر از فتوستنتر است. و تشدید تجمع جلبک‌ها نماینگر پدیده مذکور است. لذا با افزایش فتوستنتر مصرف بیکربنات بیشتر شده و در نتیجه pH افزایش می‌یابد (کارگر، ۱۳۸۳).

بر اساس نتایج، میزان DO در ماه‌های مرداد، شهریور و خرداد کاهش بود که دلیل این عامل را می‌توان کاهش میزان بارندگی در این ماه‌ها و به تبع آن افزایش میزان املاح در آب دانست. زیرا املاح جایگزین اکسیژن مولکولی می‌شوند. همچنین فعالیت میکروارگانیسم‌ها با افزایش دما بیشتر شده، در نتیجه مصرف اکسیژن بالا رفته و منجر به کاهش اکسیژن محلول می‌شود.

بر اساس نتایج، میزان فراسنج BOD₅ در خرداد، مهر، آبان، آذر، دی و بهمن بیشتر از سایر ماه‌ها بود. ورود پساب‌های کشاورزی به دلیل افزایش عملیات کشاورزی در ماه‌های مذکور یکی از عوامل دخیل در افزایش میزان پارامتر مذکور بوده است. بر اساس نتایج گزارش شده توسط کاظمی و همکاران (۱۳۹۷)، مقدار BOD₅ در فصول مختلف متأثر از مقدار دبی جریان و حجم آب، ورود فاضلاب کشاورزی و فاضلاب انسانی نیز می‌باشد.

بر اساس اندازه‌گیری‌ها، میانگین سالانه پارامتر نیترات در رودخانه گلین ۱/۷۲ میلی‌گرم در لیتر بود که نشان دهنده وضعیت مطلوب رودخانه بر اساس این پارامتر در طول دوره نمونه‌برداری می‌باشد (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۰۴؛ فائو، ۲۰۰۵). مهم ترین منابع نیترات در آب‌ها فعالیت‌های انسانی مانند تولید مواد غذایی، کشاورزی، فاضلاب‌های صنعتی و خانگی است. بر این اساس نتایج نشان داد که در ماه‌های فروردین، آبان، آذر، دی و بهمن با توجه به افزایش مصرف کودهای شیمیایی به دلیل افزایش فعالیت‌های کشاورزی، میزان نیترات رودخانه افزایش یافته است. قربانپور و کریمی (۱۳۹۸) همچنین بیان کردند که استفاده از کودهای شیمیایی باعث شده است که رودخانه اشکم کوچصفهان در معرض آلودگی فیزیکی و شیمیایی قرار گیرد. که با نتایج مقاله حاضر مطابقت دارد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از بررسی کیفی آب رودخانه گلین، میانگین سالانه پارامتر کدورت آب ۵۹۳/۷۰ میلی‌گرم در لیتر برآورد شد که نشان‌دهنده وضعیت مطلوب آب رودخانه بود (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۰۴)، و فائو، ۲۰۰۵)). بر اساس نتایج، غلظت این پارامتر در فصل زمستان و بهار به دلیل وجود جریان‌های فصلی و سیلابی و افزایش املاح محلول در اثر این عوامل و همچنین عملیات کشاورزی و سمپاشی محصولاتی مانند گندم نسبت به سایر فصول بیشتر است. کاظمی و همکاران (۱۳۹۷) نیز افزایش فعالیت‌های کشاورزی را یکی از دلایل افزایش کدورت آب ذکر کردند. سمرقندی و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی کیفیت مخزن سد اکباتان بیان کرد که در زمستان میزان TDS روند صعودی را نشان داده است.

در نهایت با توجه به مقادیر پارامترهای ارزیابی شده در طول دوره نمونه برداری، بررسی مقادیر شاخص NSFQI در طول سال نشان داد که آب رودخانه گلین از نظر کیفیت در رده متوسط قرار دارد.

بررسی میزان شاخص NSFQI در فصول مختلف حاکی از کاهش کیفیت آب در فصل تابستان است. یکی از دلایل این امر افزایش مصرف کودها، سموم و بقایای شیمیایی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و همچنین کاهش اکسیژن محلول در اثر افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها به دلیل افزایش دمای آب است. در فصول زمستان و بهار به دلیل سردی هوا، فعالیت‌های کشاورزی کاهش یافته و پساب به رودخانه کاهش می‌یابد. همچنین میزان بالای بارندگی و افزایش اکسیژن محلول در این فصول از دلایل کیفیت بالاتر آب رودخانه است. در تحقیقی مشابه به ارزیابی کیفیت آب رودخانه لنگرودرودخان با استفاده از شاخص کیفی NSFQI، پرداخته شد و گزارش گردید که کیفیت آب رودخانه در فصل زمستان نسبت به تابستان بهتر است (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۴). که با مطالعه حاضر همخوانی دارد.

در مجموع نتایج به دست آمده نشان داد که بر اساس میانگین سالیانه شاخص NSFQI که مقدار عددی برابر با ۵۷/۸۷ به‌دست آمد. آب رودخانه گلین در رده کیفی متوسط قرار می‌گیرد. از جمله دلایل این نتیجه می‌تواند بی توجهی به ورود فاضلاب و همچنین فعالیت‌های کشاورزی در روستاهای همجوار رودخانه باشد. در مطالعه صباحی و همکاران (۱۳۸۹) در زمینه بررسی تأثیر فعالیت‌های کشاورزی بر کیفیت آب رودخانه سیکان، مقدار افزایشی در پارامترهای کیفی آب مانند BOD، COD، فسفات و نیترات مشاهده شد. آن‌ها فعالیت‌های کشاورزی را به‌عنوان دلیل اصلی افزایش نسبی عوامل ذکر شده معرفی کردند. همین‌طور انتخاب ایستگاه نمونه‌برداری در پایین دست رودخانه در نتیجه به‌دست آمده بی‌تأثیر نیست. زیرا در طول مسیر به تدریج میزان آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، مسکونی، دامداری به علت افزایش منابع آلودگی روندی افزایشی می‌یابد و معمولاً در پایین دست اکثر رودخانه‌ها شاهد حداکثر میزان آلودگی هستیم.

نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج (صادقی و همکاران، ۱۳۹۴)، (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۶)، و (چابوک و همکاران، ۲۰۲۰) مبنی بر کاهش کیفیت آب در پایین دست رودخانه مطابقت دارد. همچنین نتایج تحقیق زمانی احمد محمودی و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد که کیفیت آب رودخانه پیرغاز براساس شاخص NSFQI در ایستگاه پایین دست نسبت به ایستگاه‌های بالادست، افول داشته و در رده کیفی متوسط قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از بررسی وضعیت کیفی آب رودخانه گلین در طی یک سال (۱۳۹۸-۱۳۹۹) نشان داد که در مجموع آب این رودخانه از لحاظ شاخص NSFQI در تمام فصول سال در وضعیت متوسط قرار داشت. تخلیه فاضلاب‌های خانگی، فضولات حیوانی، زباله‌های روستایی، زهاب‌های کشاورزی و اقلیم گرم از دلایل عمده کاهش کیفیت آب رودخانه در ایستگاه نمونه‌برداری است. بررسی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی رودخانه گلین و مقایسه نتایج با استاندارد شرب سازمان بهداشت جهانی و استاندارد آبیاری فائو نشان داد که پارامترهای PO_4^{3-} ، NO_3^- ، pH، DO از لحاظ آب شرب و آبیاری در رده مطلوب و پارامترهای BOD_5 ، کدورت و کل مواد جامد محلول در رده نامطلوب قرار دارند. با این وجود می‌توان بیان کرد که بر اساس نتایج بدست آمده از میزان شاخص در ایستگاه نجار، آب رودخانه گلین را نمی‌توان به طور مستقیم به منظور شرب استفاده کرد و برای مصرف شرب نیاز به تصفیه پیشرفته دارد. برای اهداف تفریحی نیز، آب این رودخانه باید با احتیاط مصرف شود. همچنین مشخص شد که می‌توان از آب این رودخانه برای آبیاری در کشاورزی و شرب حیوانات اهلی استفاده کرد. پایش و بررسی پیوسته، تصفیه پساب‌های حاصل از فعالیت‌های انسانی، فاضلاب‌های خانگی و جلوگیری از تخلیه آن‌ها به صورت تصفیه نشده به داخل رودخانه به عنوان تعدادی از راه کارهای مدیریتی برای بهبود وضعیت رودخانه و کاهش بار آلودگی پیشنهاد می‌شود.

منابع

- ابراهیم‌پور، صلاح‌الدین، و محمدزاده، حسین. (۱۳۹۲). ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب دریاچه زریوار با استفاده از شاخص‌های کیفیت NSFQI، CWQI، LOWQI. مجله پژوهش‌های محیط زیست، ۷(۴)، ۱۳۷-۱۴۲.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089597.1392.4.7.13.5>
 برد، کالین. (۱۳۸۹). شیمی محیط زیست. چاپ سوم، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- جعفری سلیم، بابک، نبی بیدهدنی، غلامرضا، سالمی، امیر، طاهریون، مسعود، و اردستانی، مجتبی. (۱۳۸۸). بررسی کیفیت آب رودخانه قشلاق با استفاده از شاخص‌های کیفی آب. مجله محیطی، ۶(۴)، ۲۷-۱۹.
https://envs.sbu.ac.ir/article_96800.html
- حسینی، پگاه، ایلدرومی، علی رضا، و حسینی، علی رضا. (۱۳۹۲). بررسی کیفیت آب رودخانه ی کارون با استفاده از شاخص NSFQI در بازه زرگان تا کوت امیر (طی ۵ سال). انسان و محیط زیست، ۱۱(۲)، ۱۱-۱.
https://he.srbiau.ac.ir/article_3264.html?lang=fa
- زمانی احمد محمودی، رسول، قائدامینی، فاطمه، و نجفی، مریم. (۱۴۰۰). الگوی توزیع مکانی کیفیت آب رودخانه پیرغاز با استفاده از شاخص کیفیت آب (NSFWQI) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). ۲۳(۲)، ۷۳-۸۶.
<https://doi.org/10.30495/jest.2021.21822.3090>
- سمرقندی، محمد رضا، ویسی، کیوان، ابوبی مهریزی، احسان، کاسب، پیمان، و دانایی، عرفان. (۱۳۹۲). بررسی کیفیت آب دریاچه سد مخزنی اکباتان شهرستان همدان با بهره‌گیری از شاخص کیفی NSFQI. مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، ۵(۱)، ۶۹-۶۹.
<http://dx.doi.org/10.29252/jnkums.5.1.6363>
- صادقی، مهدی، بای، ابوطالب، بای، ناصر، سفلائی، نفیسه، مهدی نژاد، محمدهادی، و ملاح، مرتضی. (۱۳۹۴). تعیین وضعیت کیفیت آب رودخانه زرین گل استان گلستان با کاربرد شاخص کیفی آب (NSFWQI) و شاخص کیفیت آب های سطحی ایران (IRWQISC). فصلنامه بهداشت در عرصه، ۳(۳)، ۳۳-۲۷.
<https://journals.sbmu.ac.ir/en-jhf/article/view/15546>
- صباحی، حسین، فیضی، محمد، ویسی، هادی، و اسیلان، کمال سادات. (۱۳۸۹). بررسی تاثیر فعالیت های کشاورزی بر کیفیت آب رودخانه سیکان. فصلنامه علوم محیطی، ۷(۴)، ۳۰-۲۲.
https://envs.sbu.ac.ir/article_96633.html

- علیزاده مریم، میرزایی روح الله، و کیا، سید حسین. (۱۳۹۶). بررسی روند مکانی شاخص‌های کیفی آب در حوضه رودخانه‌های کن و کرج. *مجله مهندسی بهداشت محیط*، ۴ (۳)، ۲۵۶-۲۴۳. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jehe.4.3.253>.
- فرزادکیا، مهدی، پورعشق، یوسف، جنیدی جعفری، احمد، و چاوشی، ابراهیم. (۱۳۹۳). بررسی کیفیت آب رودخانه آغلاغان شهرستان نیر با شاخص کیفی آب (NSFWQI) و پهنه بندی آن با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). *دومین همایش ملی برنامه ریزی، حفاظت، حمایت از محیط زیست و توسعه پایدار، تهران*. <https://civilica.com/doc/358542>.
- فرزادکیا، مهدی، ناصر، سیمین، رضایی کلانتری، روشنگر، اصغر نیا، حسینعلی، گوهری، محمودرضا، اسرافیلی، علی، دادبان شهامت، یوسف، و قنبری، نعمت اله. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی کیفی آب رودخانه بابلرود بر مبنای شاخص کیفی NSFQI و نرم افزار GIS. *مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران* ۲۵ (۱۳۴)، ۳۵۷-۳۶۲. <http://jmums.mazums.ac.ir/article-1-7230-fa.html>.
- قربانپور، بیژن، و کریمی، شهرام. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات غلظت نیترات و فسفات در آب رودخانه اشمک کوچه‌صفهان - زیبا کنار. *نشریه علمی اکویولوژی تالاب-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز*، ۱۱ (۳)، ۸۴-۷۳. <http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-802-fa.html>.
- کارگر، مهدی. (۱۳۸۳). بررسی لایه بندی حرارتی و تاثیر آن بر کیفیت آب و وقوع اوتریفیکاسیون در مخزن سد، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه اصفهان.
- کاظمی، پریسا، شریعتی، فاطمه، و کشاورز شکری، عبدالکریم. (۱۳۹۷). ارزیابی کیفی آب رودخانه لنگرودرودخان با استفاده از شاخص کیفی NSFQI. *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۶ (۳)، ۷۸-۶۵. https://envs.sbu.ac.ir/article_97970_6a458e4b6da1a275827cadd6524a3cd0.pdf
- مریخ پور، هاجر، لرستانی، بهاره، و چراغی، مهرداد. (۱۴۰۰). ارزیابی کیفیت آب دریاچه سد کالان ملایر با استفاده از سنجه NSFQI و پهنه بندی نتایج آن با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۹ (۲)، ۱۶۸-۱۵۱. <https://doi.org/10.52547/envs.33909>

References

- Alizadeh, M., Mirzaei, R., & Kia, S. H. (2017). Determining the spatial trend of water quality indices across Kan and Karaj River Basins. *Journal of Environmental Health Engineering*, 4(3), 243-256. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jehe.4.3.253>. [In Persian]
- Baird, C. (2010). *Environmental Chemistry*. 3th ed. Tehran: University Publication Center, 464. [In Persian]
- Baird, R., & Bridgewater, L. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21rd edition. Washington, D.C. American Public Health Association.
- Chabuk, A., Al-Madhlom, Q., Al-Maliki, A., Al-Ansari, N., Hussain, H.M., & Laue, J. (2020). Water quality assessment along Tigris River (Iraq) using water quality index (WQI) and GIS software. *Arabian journal of geosciences*, 13 (14), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05575-5>
- Dewata, I. (2019). Water quality assessment of rivers in Padang using water pollution index and NSF-WQI method. *International Journal of GEOMATE*, 17(64), 192-200. <http://dx.doi.org/10.21660/2019.64.16793>
- Ebrahimpour, S., & Mohammadzadeh, H. (2014). Comparing the Recreational Value of "Sorkheh Hesar National Park and Geno Protected area by Travel Cost Method. *Environmental Researches*, 4(7), 137-146. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089597.1392.4.7.13.5>. [In Persian]
- Effendi, H. (2016). River water quality preliminary rapid assessment using pollution index. *Procedia Environ Sci*, 33, 562-567. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.108>
- Effendi, H., & Wardiatno, R. Y. (2015). Water Quality Status of Ciambulawung River, Banten Province Based on Pollution Index and NSF-WQI. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 228-237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.030>
- FAO. (2005). Introduction to agricultural water pollution. <https://www.fao.org/3/w2598e/w2598e04.htm>

- Farzadkia, M., Nasser, S., Rezaei Kalantary, R., Asgharnia, H. A., Gohari, M. R., Esrafil, A., Dadban Shahamat, Y., & Ghanbari, N. (2016). Water Quality Zoning in Babolrood River Using National Sanitation Foundation Water Quality Index and Geographic Information System. *Journal of Mazandaran University Medical Sciences*, (134), 357-62. <http://jmums.mazums.ac.ir/article-1-7230-en.html>. [In Persian]
- Farzadkia, M., Poureshgh, Y., Junidi Jafari, A., & Chavoshi, I. (2013). Investigating the water quality of Aghlaghan river in Nair city with water quality index (NSFWQI) and its zoning with geographic information system (GIS). The second national conference on planning, protection, environmental protection and sustainable development, Tehran. <https://civilica.com/doc/358542>. [In Persian]
- Ghorbanpoor, B., Karimy, S. (2019). Study the changes in concentration of nitrate and phosphate in water river Oshmak Kochesfahan-Zibakenar. *Wetland Ecobiology*, 11 (3) ,73-84. <http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-802-fa.html>. [In Persian]
- Hernández, J., Fernandez, L., Carrasco-Ochoa, J., & Martínez, J. (2012). Immediate water quality assessment in shrimp culture using fuzzy inference systems. *Expert Systems with Applications*. 39(12), 10571-10582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.141>
- Hoseini, P., Ildorumi, A. R., & Hoseini, A. R. (2013). Investigation of quality of Karun River using NSFWQI between Zargan and Kut-e-amir (in 5 years). *Human and the Environment*, 11(2), 1-11. https://he.srbiau.ac.ir/article_3264.html. [In Persian]
- Jafari Salim, B., Nabi Bidhendi, G., Salemi, A., Taheryioun, M., & Ardestani, M. (2009). Water Quality Assessment of Gheshlagh River Using Water Quality Indices. *Environmental Sciences*, 6(4), 19-27. https://envs.sbu.ac.ir/article_96800.html. [In Persian]
- Kargar, M. (2004). Investigating thermal stratification and its effect on water quality and the occurrence of eutrophication in the reservoir of the dam, master's thesis of Isfahan University. [In Persian]
- Kazemi, P., Shariati, F., & Keshavarz Shokri, A. (2018). Langroud river water quality assessment using NSFWQI qualitative indicators. *Environmental Sciences*, 16(3), 65-78. https://envs.sbu.ac.ir/article_97970_6a458e4b6da1a275827cad6524a3cd0.pdf. [In Persian]
- Lenat David, R. (1993). A Biotic Index for the Southeastern United States: Derivation and List of Tolerance Values, with Criteria for Assigning Water-Quality Ratings, *Journal of the North American Benthological Society*, 12(3), 279-290. <http://dx.doi.org/10.2307/1467463>
- Merrikhpour, H., Lorestani, B., & Cheraghi, M. (2021). Water quality assessment of Kalan Malayer Dam Lake using NSFWQI index and its zoning using GIS. *Environmental Sciences*, 19(2), 151-168. <https://doi.org/10.52547/envs.33909>. [In Persian]
- Mihale, M. J. (2022). Water quality evaluation in selected coastal rivers of Tanzania using Water Quality Index. *Open Science Journa*, 7(1), 1-18. https://www.researchgate.net/publication/361024608_Water_Quality_Evaluation_in_Costal_Rivers_of_Tanzania_Using_Water_Quality_Index
- Omidi, A., & Shariati, F. (2021). Evaluation of Pasikhan River, north of Iran using water quality index (NSFWQI). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(2), 219-230. <https://doi.org/10.22124/cjes.2021.4732>
- Oram, B. (2011). Calculating NSF Water Quality Index, Wilkes University Center for Environmental Quality Geo Environmental Sciences and Engineering Department. <http://www.waterresearch.net/Watershed/temperature.html>.
- Puri, P. J., Yenkie, M. K. N., Sangal, S. P., Gandhare, N. V., Sarote, G. B. & Dhanorkar, D. B. (2011). Surface water (lakes) quality assessment in Nagpur City (India) based on water quality index (WQI). *Rasayan Journal of Chemistry*, 4(1), 43-48. <https://www.researchgate.net/journal/Rasayan-Journal-of-Chemistry-0974-1496>
- Sabahi, H., Faizi, M., Viesi, H., & Asilan, K. S. (2010). Study on the Influence of Agricultural Activities on Water Quality of Sikan River. *Environmental Sciences*, 7(4), 22-30. https://envs.sbu.ac.ir/article_96633.html. [In Persian]

- Sadeghi, M., Bay, A., Bay, N., Soflaie, N., Mehdinejad, M. H., & Malla, M. (2015). The survey of Zarin-Gol of river water quality in Golestan Province using NSF-WQI and IRWQISC. *Journal of Health in the Field*, 3(3), 27-33 <https://journals.sbm.ac.ir/en-jhf/article/view/15546>. [in Persian]
- Samarghandi, M., Weysi, K., Aboee Mehrizi, E., Kaseb, P., & Danai, E. (2013). Evaluation of water quality in Ekbatan reservoir of Hamadan by NSF-WQI index. *North Khorasan University of Medical Sciences*, 5(1), 63-69. <http://journal.nkums.ac.ir/article-1-35-en.html>. [In Persian]
- Terrado, M., Barcel, D., Tauler, R., Borrell, E. & Campos, S. d. (2010). Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. *Journal TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 29(1), 40-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2009.10.001>
- WHO. (2004). World Health Organization, Guidelines for drinking- water quality, 3rd Edition, World Health Organization (WHO) Geneva. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789241547611>
- Zamani-Ahmadm Mahmoodi, R., Ghaedamini, F., & Najafi, M. (2021). Spatial Distribution Pattern of Water Quality of Pireghar River with Using Water Quality Index (WQI) and Geographic Information System (GIS). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(2), 73-86. <https://doi.org/10.30495/jest.2021.21822.3090>. [In Persian]



Investigating the effect of using coastal barriers as a shear stress factor in weakening waves by using of the 3D numerical model

Saba Bahrami Samani¹ , Gholamreza Shams Ghahfarokhi² , Elham Ghanbari Adivi³ 

¹ M.Sc graduated of Water and Hydraulic structure, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: saba.bahrami2021@gmail.com

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water and Hydraulic structure, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: g.shams@sku.ac.ir

³ Co-Corresponding Author, Faculty member, Department of Water Science Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: ghanbariadiivi@sku.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Many coastal areas in the world are among the population and economic areas, so managing these areas and protecting them against natural factors such as coastal storms and the resulting damage are among the priorities of coastal development. One of the ways to weaken the coasts is to create a force against the driving force. This movement helps to remove the driving force by increasing the shear stress on the beaches and creating friction. Therefore, in this research, creating tension and reducing speed and height in Open Foam software platform has been discussed.

Methodology

The finite volume method was used in the OpenFOAM software to discretize the domain space and transform the differential equations into algebraic equations. The interFoam solver was used to solve two-phase flows in this software. In this simulation, hexahedral blocks were used for geometry meshing. After the meshing process, the Courant number was used to control stability and determine the maximum time step size. The pimple algorithm was used in this simulation for pressure-velocity coupling. For the first-order time derivative term, the second-order Crank-Nicolson Euler scheme was used, and for the gradient and Laplacian terms, the Gauss linear interpolation scheme was utilized. The Gauss Upwind scheme was employed for the divergence terms. The numerical data was compared with experimental data, and the wave forces and wave characteristics were analyzed.

Results and discussion

The effect of fluid pressure on the coastal structure increases with an increase in wave height. Research indicates that the sea level decreases near the coast due to the presence of coastal structures. In this case, the geometry changes and the associated risks, including the magnitude of the force exerted on the coast, decrease. As the force increases, the absorption by the seawall increases while the reflection decreases because it reaches the seawall at a higher velocity and the contact surface area increases. However, the water level rises, so the forces may increase. This force was estimated to be, on average, 106% higher compared to unobstructed models, as when waves hit the coast, some of their energy is transferred into it, and the strong pressure thrust generated results in energy dissipation, reducing the excessive pressure. The wave height decreases after reaching the coastal seawall structure. The impact of force is also evident in the consumed force and energy of the waves, leading to destruction. Comparing the experimental results with the results of the numerical model shows the accuracy of the model. The root-mean-square error is smaller, equal to 0.47, and the coefficient of determination is higher than 0.98, which is an appropriate and acceptable value.

Conclusions

When waves hit the coast, a portion of their energy is consumed by the forces acting on the obstacles, and due to the rigidity of these obstacles, they withstand high pressures, resulting in the loss of wave energy and a decrease in wave height after encountering the obstacles. The effects of coastal structure barriers can be observed in terms of energy consumption and wave attenuation, and the absorption of wave energy has increased compared to the unobstructed state, leading to a reduction in the destructive effects of waves.

Keywords: Shear stress, force absorption, coast protection, wave damping, Open Foam software

Article Type: Research Article

Article history: Received: 11 June 2023 Revised: 16 August 2023 Accepted: 09 September 2023 ePublished: 15 September 2023

Cite this article: Bahrami Samani, S., Shams Ghahfarokhi, Gh.R., & Ghanbari Adivi, E. (2023). Article title, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(2), 68-90. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9221.1054





بررسی تاثیر استفاده از موانع ساحلی به عنوان عامل ایجاد تنش برشی در تضعیف امواج با کمک مدل سازی عددی ۳ بعدی

صبا بهرامی سامانی^۱ ، غلامرضا شمس قهفرخی^۲ ، الهام قنبری عدیوی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: saba.bahrami2021@gmail.com
^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: g.shams@sku.ac.ir
^۳ نویسنده مسئول دوم، عضو هیات علمی گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: ghanbariadi@sku.ac.ir

چکیده

بسیاری از مناطق ساحلی در دنیا جزو مناطق مهم جمعیتی و اقتصادی می باشند بنابراین مدیریت این مناطق و حفاظت از آنها در برابر عوامل تهدید کننده طبیعی مانند امواج خروشان ساحلی و نیروی مخرب ناشی از آنها جزو اولویتهای توسعه سواحل به حساب می آید. یکی از راه های تضعیف امواج در سواحل استفاده از موانع به عنوان عامل مقاوم در برابر نیروی محرک موج می باشد. این موانع از طریق افزایش تنش برشی در سواحل و ایجاد اصطکاک به از بین بردن نیروی محرک موج کمک می نماید. از این رو در این تحقیق به اثر استفاده از موانع در ایجاد تنش و کاهش نیرو و ارتفاع موج در بستر نرم افزار Open Foam پرداخته شده است. در این تحقیق با در نظر گرفتن شرایط مختلف در مدل سازی، مجموعاً تعداد ۱۰ حالت که ۵ حالت در ساحل دارای سازه به عنوان مانع حفاظت کننده مربوط به حالت سازه دیوار ساحلی و ۵ حالت در ساحل بدون سازه، به ازای ۵ ارتفاع موج ورودی متفاوت مورد بررسی و مدل سازی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حضور موانع با افزایش تنش برشی در ساحل دارای مانع نسبت به ساحل بدون مانع باعث افزایش استهلاک و تضعیف مشخصات موج شده است، به طوری که وجود سازه توانسته تا در میرایی موج به میزان ۱/۳۷ برابر، بیشتر اثرگذار بوده و از طرفی در کاهش نیروی موج نیز تا ۱۲ درصد نسبت به حالت ساحل بدون موانع موثرتر عمل نماید.

واژه های کلیدی: تنش برشی، جذب نیرو، حفاظت از ساحل، میرایی موج، نرم افزار Open Foam

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۱ خرداد ۱۴۰۲ اصلاح: ۲۵ مرداد ۱۴۰۲ پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ شهریور ۱۴۰۲

استناد: بهرامی سامانی، ص.، شمس قهفرخی، غ.ر.، و قنبری عدیوی، ا. (۱۴۰۲). بررسی تاثیر استفاده از موانع ساحلی به عنوان عامل ایجاد تنش برشی در تضعیف امواج با کمک مدل سازی عددی ۳ بعدی، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۲)، ۹۰-۶۸. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9221.1054



مقدمه

از آنجا که بخش قابل توجهی از جمعیت جهان در حاشیه‌ی سواحل سکنا گزیده‌اند، همچنین بسیاری دیگر به طور مرتب از آن‌ها استفاده می‌کنند، نیاز به توسعه خانه‌سازی و تمهیدات تفریحی چندبرابر شده و اهمیت حفاظت سواحل از طوفان‌ها و طغیان امواج را فراهم می‌سازد. مهمترین عامل در تعیین وضعیت هندسی سواحل موج‌ها هستند. مقدار قابل توجهی از انرژی امواج در کرانه‌های ساحلی مستهلک می‌شود که منجر به شکل‌دهی سواحل، طبقه‌بندی و جابجایی مواد رسوبی کف دریا به سوی ساحل یا به طرف دریا و یا در امتداد ساحل و اعمال بسیاری از نیروهای ایجاد شده به سازه‌های دریایی و ساحلی می‌شود (قنبری عدیوی و همکاران، ۱۳۹۳). حفاظت از ساحل بر پایه‌ی حفاظت سازه‌ای و غیر سازه‌ای است. اثرات ناشی از این امواج را می‌توان به کمک ابزار و روش‌های مختلف حفاظت که شامل آبشکن‌ها، موج‌شکن‌ها، دیوارها و صخره‌های مصنوعی و پوشش جنگلی هستند مورد مطالعه قرار داد (قنبری عدیوی و فتحی‌مقدم، ۱۳۹۴). با توجه به اهمیت حفاظت سواحل در دنیا، در شهرهایی که در حاشیه دریا قرار دارند، ساحل‌سازی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. سکونت ۲۰ درصد از جمعیت جهان در فاصله ۲۵ کیلومتری و ۴۰ درصد از جمعیت جهان در فاصله ۱۰۰ کیلومتری دریا و همچنین وجود بیش از ۱۲ درصد کل ذخایر نفتی جهان و ۲۵ درصد کل منابع گاز جهان در نواحی ساحلی، تاثیر حفاظت از سواحل را در نگهداری منابع طبیعی و اموال عمومی و غیره بهتر می‌توان درک کرد. امروزه فرسایش سواحل باعث از بین رفتن میلیون‌ها دلار و خسارت بر سواحل و اموال عمومی در تمام دنیا می‌شود. بدون محافظت کافی و صحیح سواحل، قسمت‌های زیادی از کرانه‌های ساحلی ما در معرض حمله امواج دریا قرار می‌گیرند.

سواحل تحت تاثیر پدیده فرسایش و رسوبگذاری دستخوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به تغییر راستا، جابجایی‌های عرضی و طولی، تغییر تراز بستر و ... اشاره کرد. جهت محافظت از ساحل روشهای متعددی وجود دارد که استفاده از آبشکن از جمله آنهاست (آرمان و همکاران، ۱۳۹۶). سازه‌های ساحلی مانند دیوار ساحلی، موج‌شکن، دستک و ... بر روی اکوسیستم تاثیرات منفی می‌گذارد و همچنین از لحاظ اقتصادی به صرفه نیستند، ولی با مقاومت و پایداری بالایی که در برابر امواج از خود نشان می‌دهند، برای حفاظت از ساحل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. بنابراین مهندسان گرایش به سمت روش‌های سازه‌ای برای حفاظت از ساحل داشته‌اند، که در ادامه به چند مورد از این مطالعات پرداخت شده است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

هاشمی جوان (۱۳۸۶) بیان می‌کند امواج مهم‌ترین عامل در تعیین وضعیت هندسی سواحل است، همچنین نقش عمده‌ای در طراحی بنادر، آبراهه‌ها، سازه‌های حفاظت ساحلی و سایر کارهای دریایی دارند. همچنین دریافت که، میزان قابل توجهی از انرژی امواج در کرانه‌های ساحلی مستهلک شده، باعث شکل‌دهی سواحل، انتقال مواد رسوبی کف دریا به سمت ساحل، بالعکس و یا در امتداد نوار ساحلی، اعمال نیرو به سازه‌های ساحلی و تخریب آن‌ها می‌شود.

لی^۱ (۲۰۱۹) با مدل‌سازی عددی بر مبنای هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی و همچنین بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار Open FOAM^۲ برای شبیه‌سازی جریان یک موج منفرد در یک ساحل شیب‌دار استفاده و سپس با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرد و دریافت که شبیه‌سازی انجام شده دقیق است. همچنین نتایج نشان داد که با استفاده از مدل عددی می‌توان نتایج مشاهده در آزمایشگاه همچون شکست موج و پرش هیدرولیکی را به صورت منطقی تولید کرد.

نیلسن^۳ (۲۰۰۱) با مطالعاتی که در خصوص حفاظت ساحل انجام دادند، دریافتند که سازه‌هایی همچون دیوارهای ساحلی، روش‌های مصنوعی، دیوارهای تفکیک شده، موج‌شکن‌ها و تپه‌های شنی برای تثبیت جریان‌ها می‌تواند موثر باشد.

^۱ Li

^۲ Open source Field Operation and Manipulation

^۳ Nielsen

عبداللهی و همکاران (۱۳۸۵) با مطالعه بر روی آبشکن‌ها برای جلوگیری از فرسایش نواحی ساحلی، به این نتیجه رسیدند که فرسایش پایین دست آبشکن‌ها به دلیل انتقال ذرات رسوبی در طول ساحل، همچنین انحراف دانه‌های درشت رسوب توسط آبشکن به سمت ساحل پیش می‌رود.

وفایی (۱۳۹۱) با مطالعه عددی با نرم‌افزار MIKE 21/3 بر روی آبشکن‌های مستقیم به منظور حفاظت از سواحل ماسه‌ای دریافتند که با افزایش طول آبشکن یک مانع بزرگتر در مسیر انتقال رسوبات ایجاد می‌شود و همچنین رسوب‌گذاری در بالادست سازه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

لطف‌اللهی (۱۳۹۵) با مطالعه و مقایسه سازه‌های مختلف با استفاده از مدل عددی دریافتند که سازه‌های منحنی و شیب‌دار در مقایسه با سازه‌های کیسون در شرایط یکسان در اثر شکست امواج نیروی بیشتری به بدنه آن‌ها وارد می‌شود.

هانگ^۱ (۲۰۲۰) با مدل سازی بر روی بارهای وارد شده به یک اسکله به همراه یک موج‌شکن شمع دریافتند که با افزایش ارتفاع موج میزان جریان سرریزی نیز افزایش می‌یابد. در مقایسه با سطح بدون پوشش، سطحی که دارای پوشش قلوه‌سنگ بوده می‌تواند به میزان قابل توجهی میزان آب‌شستگی را کاهش دهد.

هنرمند و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعات فیزیکی خود در نرم‌افزار Open FOAM، به بررسی انتشار و بالاروی موج سونامی در نزدیکی سواحل موج منفرد، به عنوان تخمینی از موج‌سونامی در شرایط مختلف شبیه‌سازی کردند و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و دریافتند که داده‌های عددی نتایج استخراج شده از مدل از دقت بالایی برخوردار هستند.

جیانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۹) در نرم‌افزار Open FOAM، امواج منفرد را در برخورد با یک ردیف شمع شکاف‌دار عمودی مدل کردند و مشخصات جریان را یک‌بار برای یک شمع و یک‌بار برای یک ردیف شمع بررسی کردند، نتایج نشان داد که ارتفاع موج، آرایش شمع‌ها و شیب ساحل در استهلاك انرژی تاثیرگذار است.

ژنگ و همکاران^۳ (۲۰۱۶) با مدل سازی عددی در نرم‌افزار Open FOAM به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، به بررسی ساختار امواج و شرایط مرزی موج پرداختند، نتایج با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار بود. بنابراین عنوان کردند که این نرم‌افزار، می‌تواند ابزاری مناسب برای مهندسی ساحلی و فراساحلی برای پیش‌بینی امواج به صورت دوبعدی و سه‌بعدی مناسب باشد.

هدف از این مطالعه مدل کردن برخورد امواج با سازه دیوار ساحلی و بررسی میزان تنش ایجاد شده ناشی از حضور سازه و عملکرد آن در جذب نیروی موج و کاهش ارتفاع موج است. در این راستا جهت صحت سنجی مدل عددی به کار رفته از نتایج آزمایشگاهی موجود در تحقیق (رضاپوران، ۱۴۰۰) استفاده شد.

روش پژوهش

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتم‌های حل عددی، مسائل مربوط به سیالات را تجزیه و تحلیل می‌کند و از کامپیوترها برای شبیه‌سازی برهم‌کنش مایعات و گازها با سطوح شرایط مرزی استفاده می‌کند. در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیالات به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات داده می‌شود سپس با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل المان‌های کوچک‌تر و اعمال شرایط مرزی برای گروه‌های مرزی با اعمال تقریب‌هایی، یک معادله خطی به دست می‌آید. با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت، دما، فشار در ناحیه‌ی مورد نظر به دست می‌آید. امروزه با بهره‌گیری از تکنیک‌های قدرتمند در دینامیک سیالات و استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی می‌توان علاوه بر دقت در زمان و هزینه در مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی صرفه جویی نمود. نرم‌افزار متن باز Open FOAM از جمله نرم‌افزارهای معروف است که دارای حلگرها، کتابخانه‌ها، اشیا و کدهای نرم‌افزاری به زبان C^{++} است. در این نرم‌افزار، برای مدل‌سازی هر شاخه از مکانیک سیالات محاسباتی، احتیاج به تعریف کردن و وارد کردن پارامترهای مسئله است و سپس می‌توان مسئله را حل نمود. به طور کلی نرم‌افزار Open FOAM دارای سه بخش پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است. در پیش‌پردازش اقدامات مربوط به انتخاب حلگر، هندسه، شرایط مرزی و اولیه، ثابت‌های فیزیکی

¹ Huang

² Jiang et al

³ Zheng et al

مسئله، گام زمانی، میزان دقت، نحوه کنترل و بررسی فرآیند حل در زمان اجرا و تعیین نمودن نوع خروجی و نحوه ذخیره سازی انجام میگیرد. در مرحله پردازش حلگر اجرا می گردد و سپس در مرحله پس پردازش، نمایش خروجی داده ها، رسم نمودار، تصویر و انیمیشن صورت می گیرد. باید توجه داشت که اغلب جریان های طبیعی و مصنوعی در طبیعت معمولاً ترکیبی از چند فاز هستند. جریان چند فاز به صورت مایع-مایع، مایع-جامد-گاز و ... وجود دارد. برای جریان های چند فاز باید شرایط و ویژگی های هر فاز را بررسی کرد و سپس نسبت به انتخاب روش حل اقدام کرد. عمده تاً از دو روش محاسباتی روش اویلری-لاگرانژی^۱ و روش اویلری-اویلری^۲ برای حل جریان های چند فاز استفاده می شود، که جریان آب در یک فلوم از نوع جریان دو فاز (مایع، گاز) مجزا است، بنابراین می توان از روش مدل اویلری-اویلری روش کسر حجمی سیال (VOF) استفاده نمود.

روش کسر حجم سیال (VOF)

روش کسر حجم سیال یک تکنیک شبیه سازی دقیق سطح آزاد با استفاده از یک مش اویلری ثابت است. این روش برای حل دو یا چند سیال غیر قابل تراکم اختلاط با یکدیگر طراحی شده است، به عبارتی روشی است که در آن مرز مشترک دو سیال به صورت ضمنی ردیابی می شود. در این روش مرز از روی کمیت α که در شبکه اویلری ذخیره می شود، این کمیت نشان می دهد که کدام سیال در آن مکان وجود دارد. از مزایای این روش، حل معادلات حاکم بر سیال و مرز بر روی یک شبکه است که باعث ساده تر شدن انجام آن می شود. شرایط زیر برای α برقرار است.

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{سلول پر از سیال باشد} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سلول ترکیبی از هوا و سیال باشد} \\ 0 & \text{سلول پر از هوا (خالی از سیال) باشد} \end{cases}$$

از حل معادله کسر حجمی سیال می توان مرز بین فازها را تعیین نمود.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه \mathbf{V} بردار سرعت است. خواص سیال (μ و ρ) در هر سلول، مخلوط وزنی خواص هر دو سیال است؛ بدین معنی که:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (2)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (3)$$

مقدار α به دست آمده از رابطه (۱) معمولاً با خطای کمی همراه است، اما همین خطای ناچیز، مخصوصاً در سیالات با چگالی بالا باعث خطای محسوس در خواص سیال می شود لذا تحقیقات زیادی برای بهبود رابطه (۱) انجام شده است. ولر^۳ ترم دیگری را به نام تراکم مصنوعی^۴ به معادله اضافه کرد (ولر، ۲۰۰۵).

با این تغییر، معادله (۴) به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \bar{\mathbf{V}}) + \nabla \cdot [V_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (4)$$

در این رابطه V_r سرعت تراکمی یا سرعت نسبی بین دوفاز نامیده می شود. $\bar{\mathbf{V}}$ نیز از متوسط گیری وزنی سرعت های دو سیال به صورت زیر به دست می آید:

¹ Euler-Langrange approach

² Euler-Euler approach

³ Weller

⁴ Artifical compression term

$$V_r = V_1 - V_2 \quad (5)$$

$$\bar{V} = \alpha \bar{V}_1 + (1 - \alpha) \bar{V}_2 \quad (6)$$

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارت است از معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و بقای انرژی. با حل معادله بقای جرم و معادله اندازه حرکت، میدان های سرعت و فشار به دست می آید. زمانی که سیال تراکم ناپذیر باشد، توزیع دما ثابت فرض می شود و نیازی به حل معادلات انرژی برای تعیین دما نمی باشد. به منظور مدل سازی در نرم افزار Open FOAM، از حلگر دو فازي اینترفوم^۱ استفاده می شود. این حلگر، معادلات متوسط گیری شده معادله های تنش آشفته رینولدز را به صورت همزمان با معادله پیوستگی برای میدان سرعت و فشار در جریان آشفته حل می کند.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\omega) = -\nabla_p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (8)$$

در رابطه پیوستگی، \mathbf{T} تانسور فشار انحرافی^۲ (برشی، محوری، کشش سطحی) فشار انحرافی است که می تواند برای جریان تراکم ناپذیر به صورت رابطه (۹) تعریف گردد.

$$\mathbf{T} = 2\nu \mathbf{s} \quad (9)$$

در این رابطه S میانگین نرخ تانسور کرنش^۳ است که به صورت رابطه (۱۰) تعریف می شود.

$$\mathbf{S} = 0.5(\nabla_u + \nabla_u^T) \quad (10)$$

قسمت تنش در معادله (۴) برای سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر را می توان با کمک عملکرد دیورژانس در محاسبات برداری به صورت رابطه (۱۱) تعریف کرد.

$$\nabla \cdot \mathbf{T} = \nabla \cdot (\nu \nabla_u) + \nabla_u \cdot \nabla_v \quad (11)$$

در این رابطه \mathbf{f} نیروی خارجی است که شامل نیروی گرانش نیز هست، همچنین U بردار سرعت، ν ویسکوزیته و p فشار است. معادله انتقال جرم (۸) را می توان با استفاده از رابطه (۱۱) به فرمت رابطه (۱۲) نوشت.

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\omega) - \nabla \cdot (\nu \nabla_u) - \nabla_u \cdot \nabla_v = -\nabla_p + \mathbf{f} \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\omega) = -\frac{1}{\rho} + \nabla_p \cdot \nabla \cdot (\nu \nabla_u) + \mathbf{g} + \frac{F_s}{\rho} \quad (13)$$

در رابطه مومنتوم، F_s نشان دهنده نیروی کشش سطحی، g ثابت گرانش است. میدان جریان را می توان با استفاده از روابط (۷) و (۱۳) بدست آورد (تانهیل و همکاران^۴، ۱۹۹۷).

¹InterFOAM

² the deviatoric stress tensor

³ mean rate of strain tensor

⁴ Tannehill et al

مدل سازی آشفتگی^۱

اکثر جریان های موجود در طبیعت آشفته هستند، بنابراین تلاش پیوسته ای برای حل این نوع جریان ها صورت می گیرد. یکی از این روش های عددی که امروزه به طور گسترده مورد بحث بوده و از آن ها استفاده می شود، معادلات ناویراستوکس متوسط گیری شده رینولدز (RANS^۲) است. جریان مورد بررسی در این مسئله آشفته است از روش RANS و مدل $k - \omega SST$ برای مدل سازی جریان آشفته استفاده شده است. معادلات آشفتگی $k - \omega SST$ برای اولین بار توسط منتر توسعه داده شد (منتر^۳، ۱۹۹۲). این معادلات از مزیت های مدل $k - \omega$ برای نزدیک دیواره ها و درون لایه مرزی و از مزیت های مدل $k - \epsilon$ برای جریان های آزاد استفاده کرده است (پنتینن^۴، ۲۰۱۱؛ کارل آکد فونگ^۵، ۲۰۱۸). این معادلات به صورت ترکیبی از دو مدل ذکر شده استفاده می کنند. در اینجا به علت وجود هندسه پیچیده مدل سازی که بخشی از جریان مخصوصا در بالای سازه ارتفاع نسبتا کمی داشته است و برخی نقاط از کانال اصلی مخصوصا بعد از دریچه عمق زیادی دارد، به منظور محاسبه دقیق ویسکوزیته آشفتگی از مدل $k - \omega SST$ استفاده شد. در واقع علت استفاده از این مدل این است که این مدل در هندسه های پیچیده به خوبی عمل کرده و مقدار ویسکوزیته آشفتگی را به درستی حدس می زند (منتر و همکاران، ۲۰۰۳). مقدار ویسکوزیته آشفتگی با کمک معادلات تنش برشی آشفتگی به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است.

$$\frac{\partial(k)}{\partial t} + \nabla \cdot (Uk) = \nabla \cdot [(v + \sigma_k v_t) \nabla k] + \tilde{p}_k - \beta^* k \omega \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (U\omega) = \nabla \cdot [(v + \sigma_\omega v_t) \nabla \omega] + \alpha S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} (\nabla k)(\nabla \omega) \quad (15)$$

روابط (۱۴) و (۱۵) به ترتیب به نام های معادله k و ω معرفی می شوند که در آن ها S با روابط (۱۵) محاسبه می شود. این معادلات برای جریان های با رینولدز بالا گزارش می شود. در این معادلات F_1 تابع ترکیبی بوده و به صورت رابطه (۱۶) تعریف می شود.

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (16)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left[\tilde{f}_0; \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} (\nabla k)(\nabla \omega), 10^{-10} \right) \right] \quad (17)$$

در روابط (۱۶) و (۱۷)، y برابر با فاصله نزدیک ترین دیوار به این نقطه است. F_1 در فواصل بسیار دور از دیواره ها برابر با صفر است (مدل $k - \epsilon$) و در لایه مرزی و نزدیک جدارها به عدد یک (مدل $k - \omega$) است. بعد از محاسبه روابط بالا ویسکوزیته گردابه ای آشفتگی از رابطه (۱۸) محاسبه می گردد. در رابطه (۱۸)، F_2 را تابع ترکیبی دوم معرفی می کنند که طبق رابطه (۱۹) محاسبه می شود.

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (18)$$

$$F_2 = \tanh \left[\max \left[\tilde{f}_0; \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (19)$$

برای اجتناب از تولید پارامترهای آشفتگی در مناطق بدون تحرک در رابطه (۱۴) از رابطه (۲۰) به دست می آید.

$$\tilde{p}_k = \min \left[\tilde{f}_0; \left(p, 10^* \beta^* \rho k \omega \right) \right] \quad (20)$$

$$p_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (21)$$

¹ turbulence

² Reynolds averaged Navier- stocks

³ Manter

⁴ Penttinen

⁵ Karl akd Fung

در رابطه (۲۱)، \vec{i} و \vec{j} جهت‌های محورهای مختصات هستند. تمامی ضراب ثابت به کمک رابطه ترکیبی (۲۲) به دست می‌آید که به صورت خودکار بین مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ تغییر می‌کند به این صورت که به جای α مقادیر ضرایب ثابت جدول زیر قرار دارند و ضرایب مدل $k - \omega SST$ را محاسبه می‌کنند (منتر و همکاران، ۲۰۰۳).

$$\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2 (1 - F) \quad (22)$$

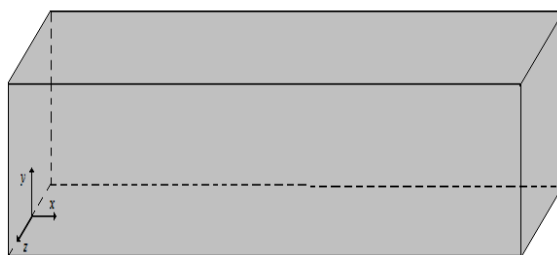
ضریب ثابت به کار رفته در معادلات بالا در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ضرائب ثابت در مدل $k - \omega SST$

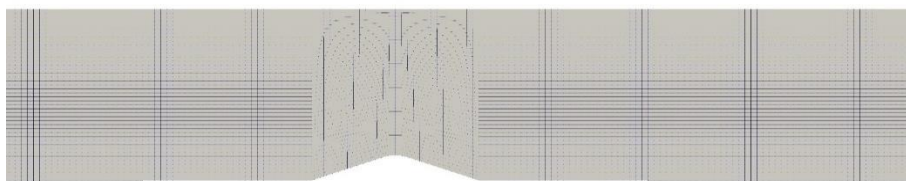
β^*	α_1	β_1	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 1}$	α_2	β_2	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 2}$
0.09	5.9	3.40	0.85	0.5	0.44	0.0828	1	0.856

مشخصات مدل عددی

در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی در جهت شبکه‌بندی از بلوک‌های شش وجهی^۱ استفاده گردید. عدم وجود محدودیت در شکل حجم کنترل و امکان ریز کردن شبکه در ناحیه با گرادیان زیاد بدون صرف زمان از مزیت‌های این نوع شبکه‌بندی است. هندسه در این مدل‌سازی یک فلوم سه‌بعدی است که با فضایی شبیه به یک مکعب مستطیل شبیه‌سازی شده است. با توجه به عرض فلوم که ۶۰ سانتی‌متر است، عرض فضای مدل‌سازی در راستای محور Z از -۳ متر تا +۳ متر است. از نقطه‌ی $x=0$ تا $x=2$ متر طول مخزن تامین هد موج، از نقطه $x=2$ تا $x=4.2$ متر طول ساحل قبل از برخورد موج به سازه، از $x=4.2$ تا $x=5.2$ متر هم طول ساحل حفاظت شده با سازه است. بعد از بازه‌ی ساحلی مورد بررسی هم به طور دلخواه ۲ متر فاصله در نظر گرفته شده است. شکل (۱) فضای شبیه‌سازی شده و شکل (۲) نحوه مش‌بندی در فلوم و سازه دیوار ساحلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. فضای شبیه‌سازی



شکل ۲. نمایش مش‌بندی فلوم و اطراف سازه‌ی دایک

¹ Hexahedral

در شبیه‌سازی از مش یک‌نواخت ۱۲ میلی‌متر استفاده شد. در نرم‌افزار Open FOAM برای کنترل پایداری از معیار عدد کورانت برای محاسبه حداکثر گام زمانی استفاده می‌شود. عدد کورانت میزان سرعت عبور سیال از هر سلول را نشان می‌دهد. عدد کورانت بیانگر نسبت سرعت به تغییرات مکان به زمان ($\frac{\partial x}{\partial t}$) است و بدون بعد است. اگر عدد کورانت بزرگ‌تر از یک باشد، سرعت ذره بسیار بالا است (فرزین و همکاران^۱، ۲۰۱۳). در این صورت ذره در کمتر از یک گام زمانی از سلول عبور می‌کند و مسئله باعث ناپایداری حل می‌شود. عدد کورانت در این تحقیق ۰/۸۵ و براساس آن گام زمانی برابر با ۰/۰۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شد. در Open FOAM قابلیت تنظیم تعداد حلقه‌های درونی و بیرونی معادلات کوپل شده سرعت و فشار وجود دارد که در پیمپل این حلقه‌ها بیش از یک‌بار تکرار خواهند شد. با افزایش تعداد تکرار حلقه تصحیح همراه با ضرایب زیر تخفیف مناسب، گام زمانی نیز افزایش یافته و در نهایت باعث کاهش زمان کلی محاسبات می‌گردد. بنابراین، در این پژوهش از برای حل معادلات کوپل سرعت و فشار از الگوریتم پیمپل فوم^۲ استفاده شد.

مدل‌سازی موج

پژوهش حاضر، مستلزم تولید امواج شکسته شده می‌باشد. زمانی که ارتفاع موج افزایش یابد و یا بنابه دلایلی زبری بستر افزایش یابد (مانند پیشروی موج به ساحل) هر کدام به ترتیب باعث افزایش سرعت ذرات موج و کاهش سرعت انتشار موج می‌شود و در نهایت در زمان یکسان این دو سرعت و پس از آن با پیشی گرفتن سرعت ذرات در قله موج از سرعت ذرات پای موج، باعث فروپاشی و یا اصطلاحاً شکست موج می‌شود (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۳). در پدیده مورد بررسی در این پژوهش فرض بر این خواهد بود که با پیشروی موج در ناحیه آب‌های کم عمق ساحلی، سرعت ذرات موج تحت تاثیر کاهش ژرفا (کاهش عمق آب) افزایش یافته، و سرعت انتشار (پیشروی) موج کاهش می‌یابد. در زمانی که سرعت ذرات موج با سرعت انتشار موج برابر باشد، موج تقارن خود را از دست می‌دهد، تیزی آن افزایش یافته و در یک حالت حدی ناپایدار و شکست موج حاصل می‌شود (سورنسن و همکاران^۳، ۲۰۰۸). موج شکسته شده انرژی خود را با ایجاد تلاطم از دست می‌دهد و می‌تواند منجر به کنده شدن و یا جابه‌جایی رسوبات به اطراف و در کف دریا می‌گردد. امواج شبیه‌سازی شده در این پژوهش از نوع امواج بلند در محدوده آب‌های کم عمق ساحلی می‌باشد. از نظریه موج منفرد در مورد شبیه‌سازی این امواج در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد توسط رضاپوران انجام شد. در چنین شرایطی باتوجه به مطالعات چگینی (چگینی و همکاران، ۱۳۹۲) آخرین نیم‌رخ قبل از شکست موج، موج منفرد می‌باشد. بنابراین؛ باتوجه به این نکته در این پژوهش از امواج منفرد برای شبیه‌سازی استفاده شد که در مدل عددی برای مدل‌سازی این نیم‌رخ موج از مدل‌سازی مربوط به پدیده شکست سد استفاده شد، زیرا که در اثر شکست سد، موج ناگهانی با شرایط مشابه موج ایجاد شده در آزمایشگاه هیدرولیکی مربوط به این بررسی، ایجاد می‌شود.

شرایط مرزی

در مرز بالا دست عمق جریان به دو قسمت آب و هوا تقسیم بندی شده است و شرط سرعت ورودی به آن‌ها اعمال گردید. در جدول (۲) شرایط مرزی مورد استفاده پس از بررسی و آنالیز حساسی به شرایط مرزی مختلف ارائه شده است.

¹ Farzin

² pimple (merged PISO-SIMPLE)

³ Sorenson et al

جدول ۲. شرایط مرزی در مدل سازی عددی

مرز	U	P	K	ω	ϵ	alpha.water
دیوار سمت چپ	عدم لغزش ^۵	فشار شار ثابت ^۴	تابع دیواره کا کیو آر ^۳	تابع دیواره امگا ^۲	تابع دیواره اپسیلون ^۱	مقدار یکنواخت صفر
دیوار سمت راست	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
بستر	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
سطح آب (اتمسفر)	فشار ورودی خروجی سرعت ^۸	فشار کل ^۷	ورودی خروجی ^۶	تابع دیواره امگا	ورودی خروجی	ورودی خروجی
درخت و پلیت	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
دایک	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
جلو و عقب	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر

مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی فیزیکی

در مدل سازی حاضر، پارامترها به سه دسته طبقه بندی می شوند. دسته اول پارامترهای مربوط به کانال اصلی مانند: ارتفاع (y) و عرض کانال (B) و ارتفاع آب پایه یا همان عمق ساکن آب پای ساحل (y0)، دسته بعدی پارامترهای مربوط به سازه دیوار ساحلی مورد بررسی مانند: طول ساحل مورد بررسی (L)، موقعیت قرارگیری سازه روی ساحل (X)، ارتفاع سازه (H_s) و شیب وجه جلویی سازه دیوار (S) که در این جا مساوی شیب وجه پشت سازه دیوار ساحلی است. دسته آخر پارامترهای مربوط به موج است که عبارتند از: ارتفاع موج ورودی (H_w) و سرعت موج ورودی (V). پارامترهای ذکر شده به منظور فراهم نمودن شرایط بهینه، از نظر کاهش حداکثری انرژی و میرایی موج مورد بررسی قرار می گیرند. ابتدا اطلاعات مرتبط تهیه و جمع آوری می گردند و سپس جهت تولید هندسه و شبکه محاسباتی اقدام می شود. و سپس پارامترهای حل عددی در نرم افزار وارد و در ادامه شبیه سازی برخورد موج با سازه دیوار ساحلی انجام شد. در نهایت داده های خروجی از مدل عددی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و با نتایج مدل آزمایشگاهی هیدرولیکی مقایسه خواهد شد. نتایج از آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد استخراج شده است. آزمایش ها با مقیاس ۱:۵۰ در فلوم (کانال) با طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر انجام شده

¹ epsilonWallFunction

² omegaWallFunction

³ kqRWallFunction

⁴ fixedFluxPressure

⁵ noSlip

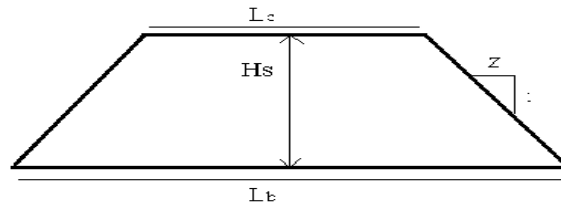
⁶ inletOutlet

⁷ totalPressure

⁸ pressureInletOutletVelocity

است. فلوم دارای کفی فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای فایبرگلاسی است. برای اندازه‌گیری نیرو در آزمایشگاه از یک فلوم دارای کف متحرک و لودسل استفاده شده است (رضاپوران و همکاران، ۱۴۰۰).

مشخصات سازه دیوار ساحلی برای مدل‌سازی عبارت است از ارتفاع (H_s)، قاعده پایین (L_b)، قاعده بالا (L_c) و شیب وجه بالادست $Z:1$ است. شکل (۳) شماتیکی از مشخصات سازه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. طرح شماتیک سازه دیوار ساحلی مورد نظر جهت مدل‌سازی

مدل‌سازی انجام شده در حالت سازه ساحلی با ارتفاع ثابت $7/5$ سانتی‌متر، قاعده بالا 3 سانتی‌متر و قاعده پایین 33 سانتی‌متر و با ارتفاع موج‌های $0/255$ ، $0/322$ ، $0/395$ ، $0/427$ و $0/470$ متر انجام شد و در نهایت کل آزمایش‌ها، معادل 5 آزمایش در حالت سازه دیوار ساحلی و 5 حالت بدون مانع و در کل 10 آزمایش انجام شد. جدول (۳) شرح پارامترهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی آورده شده است.

جدول ۳. محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش

پارامتر	محدوده تغییرات
$S=1/z$	۱
x	L
H_s (cm)	$7/5$
H_w (cm)	6 ، $7/5$ ، 9 ، $10/5$ ، 12

تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر بر میرایی موج و نیروی موج در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴. معرفی پارامترهای مؤثر بر میرایی و نیروی موج

نماد	ابعاد	پارامتر
H	L	ارتفاع موج ورودی
H_{dam}	L	ارتفاع مخزن
H_s	L	ارتفاع سازه
z	-	شیب سازه
X	L	موقعیت قرار گیری
V_w	LT^{-1}	سرعت موج
ρ_w	ML^{-3}	دانسیته جرمی
μ_w	$ML^{-1}T^{-1}$	لزجت دینامیکی
g	LT^{-2}	شتاب ثقل
σ	MT^{-2}	کشش سطحی
F	MLT^{-2}	نیروی کششی موج

پارامترهای مؤثر در مسئله میرایی موج و نیروی موج به صورت رابطه (۲۳) است:

$$f_1(H, H_{dam}, H_s, z, X, V_w, \rho_w, \mu_w, g, \sigma, S) = 0 \quad (23)$$

از آنجایی که عرض بالایی و پایینی سازه ثابت است می توان گفت که شیب سازه و ارتفاع سازه به صورت متناظر با هم تغییر کرده است، بنابراین می توان یکی از آن ها را نوشت. ارتفاع مخزن و ارتفاع موج نیز به همین صورت است یعنی برای دستیابی به ارتفاع موج مورد نظر ارتفاع مخزن تغییر می کند بنابراین یکی از آن ها را در نظر می گیریم. به دلیل افقی بودن ساحل می توان از شیب ساحل نیز صرف نظر نمود.

$$f_1(H, H_s, X, V_w, \rho_w, \mu_w, g, \sigma) = 0 \quad (24)$$

با استفاده از روش پی باکینگهام در تحلیل ابعادی و انتخاب H_s, ρ_w, V_w به عنوان متغیرهای تکراری، گروه های بدون بعد مطابق رابطه (۲۵) استخراج گردید.

$$g\left(\frac{H}{H_s}, \frac{X}{H_s}, \frac{\mu_w}{V_w \cdot H_s \cdot \rho_w}, \frac{g \cdot H_s}{V_w^2}, \frac{\sigma}{V_w^2 \cdot H_s \cdot \rho_w}, \frac{F_s}{V_w^2 \cdot H_s^2 \cdot \rho_w}\right) = 0 \quad (25)$$

F_s بیانگر میزان نیروی موج (نیروی کششی موج بر سازه) است که می توان آن را به دو شکل یعنی نیروی کشش موج وارد به سازه و نیروی کشش موج در حالت بدون سازه در نظر گرفت، که از تقسیم آن ها برهم $\left(\frac{F_s}{F_0}\right)$ ، شدت تغییرات نیرو یا نرخ جذب نیرو به دست می آید که در ادامه از این نسبت بدون بعد جهت بررسی عملکرد سازه استفاده خواهد شد.

نیروی وارد شده به ساحل در حالت مانع سازه دیوار ساحلی و حالت بدون مانع با نرم افزار Open FOAM محاسبه شده است. برای بررسی تاثیر موانع سازه دیوار ساحلی و بر کاهش نیروی امواج از پارامتر بدون بعد نیرو (F_t) که به صورت رابطه (۲۶) تعریف می شود ارائه شده است.

$$F_t = \frac{F_s - F}{F} \quad (26)$$

در این رابطه F_s و F به ترتیب نیرو در حالت با مانع و نیرو در حالت بدون مانع است.

برای بررسی میزان تغییرات ارتفاع موج از پارامتر میرایی موج که براساس نسبت بدون بعد $\frac{H}{H_s}$ و طبق رابطه (۲۶) تعریف می شود برای مقایسه دو حالت سازه دیوار ساحلی و حالت بدون مانع استفاده می شود. اختلاف ارتفاع موج در ابتدا و انتهای ساحل تقسیم بر ارتفاع موج در ابتدای ساحل مد نظر است.

$$\left(\frac{H-H_s}{H}\right) \times 100 \quad (27)$$

در این رابطه H و H_s به ترتیب اولین و آخرین موج عبوری می باشد.

آنالیز آماری

به دلیل مقایسه و ارزیابی میزان نیروی وارد شده به سازه دیوار ساحلی و ارتفاع موج ثبت شده در نرم افزار Open FOAM با مقادیر آزمایشگاهی، از معیار آماری، جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده^۲ (NRMSE) و ضریب تبیین^۳ (R^2) به صورت معادلات زیر استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2)} \quad (28)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{max} - O_{min}} \quad (29)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)(P_i - \bar{P}_m)}{(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_m)^2)^{0.5}} \quad (30)$$

در این رابطه P_i داده های آزمایشگاهی، O_i داده های عددی، N تعداد داده ها، \bar{O}_m میانگین داده های عددی و \bar{P}_m مقدار میانگین داده های آزمایشگاهی، O_{max} بیشترین مقدار داده های عددی و O_{min} کمترین مقدار داده های عددی است. زمانی که مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال به صفر برسد نشان دهنده بالا بودن دقت پیش بینی است. ضریب همبستگی مقداری مابین -1 و $+1$ دارد. مقدار $+1$ نشان دهنده بدون خطا است.

آنالیز حساسیت مش بندی

بررسی y^+

عدد بدون بعد y^+ یکی از راه های بررسی کیفیت شبکه بندی در جریان های آشفتنه است. y^+ در مواقعی که پدیده های نزدیک دیواره دارای اهمیت است، حضور تعداد کافی سلول در لایه مرزی، برای مشاهده گرادیان و پروفیل سرعت است و همچنین برای ارزیابی مدل از بررسی این مقادیر استفاده می شود. در بیشتر جریان ها، لایه مرزی به صورت بی بعد در گستره ای از y^+ قرار دارد. با توجه به گرادیان بالای سرعت در این فاصله، بسته به نوع دیدگاه نزدیک دیواره، حداقل تعداد مشخصی سلول در راستای عمود بر سطح نیاز است. این بدین معنا است که داده های ترسیم شده در یک مقدار یکسان از y^+ ، در موقعیت های مکانی متفاوت (y) قرار دارد. رابطه (۳۱) فاصله از بستر را نشان می دهد.

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu} \quad (31)$$

¹ Root Mean Square Error

² Normalized Root Mean Square Error

³ Correlation Coefficient

در این رابطه y فاصله از بستر، u^* سرعت برشی، U لزجت سینماتیکی سیال است. در مسئله حاضر y^+ برای ساحل و موانع در Open FOAM محاسبه شده و مقدار متوسط آن ۱۳۰ است و با توجه به این که در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قرار دارد مقداری مناسب است (پاپ^۱، ۲۰۰۰).

یافته‌ها

مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

بعد از بررسی مقادیر نیروی محاسبه شده در نرم افزار Open FOAM به مقایسه آن‌ها با مقادیر نیروهای آزمایشگاهی پرداخته شده است تا از این طریق صحت مدل سازی انجام شده بررسی گردد. در جدول (۵) بررسی معیارهای گفته شده برای نیروها انجام شده که بیانگر تطابق قابل قبول مدل عددی با مدل آزمایشگاهی است، نشان داده شده است.

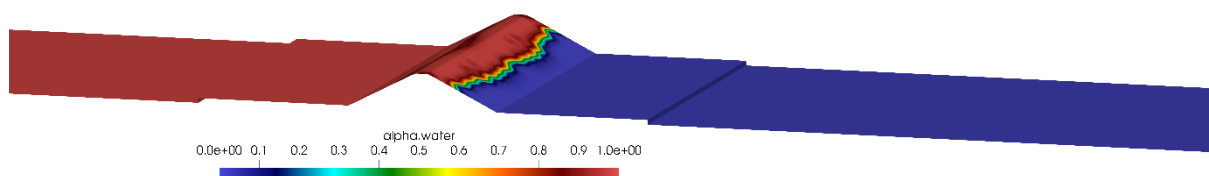
جزر میانگین مربعات خطای نرمال در دو مدل کوچک تر و مساوی با ۰/۴۷ است که مقداری مناسب و بیانگر دقت نسبتاً بالای مدل عددی است. ضریب تبیین بالاتر از ۰/۹۸ است که بیانگر میزان خطای بسیار کمی است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که داده های مدل عددی از دقت خوبی برخوردار هستند.

جدول ۵. مقایسه نیروهای عددی و آزمایشگاهی

R2	NRMSE	RMSE	نیرو آزمایشگاهی (نیوتن)	نیرو عددی (نیوتن)	ارتفاع موج (متر)	نوع حفاظت
			۳۴/۰۱	۲۵/۱۲	۰/۲۲۵	سازه دیوار ساحلی (s)
			۴۶/۴۸	۳۵/۴۵	۰/۳۲۲	
۰/۹۹۸	۰/۴۷	۱۶/۷۷	۶۱/۷۸	۴۸/۵۶	۰/۳۹۵	
			۷۳/۹۰	۵۲/۲۰	۰/۴۲۷	
			۸۴/۸۳	۶۱/۱۶	۰/۴۷۰	

ارتفاع موج

شکل (۴) میرایی موج را در اثر برخورد با سازه ساحلی در شرایط زمانی $t=2.6s$ و در ارتفاع موج ۰.۲۵۵ متر نشان می دهد.



شکل ۴. میرایی موج در زمان $t=1s$ و در ارتفاع موج ۰.۴۷۰ سانتی متر

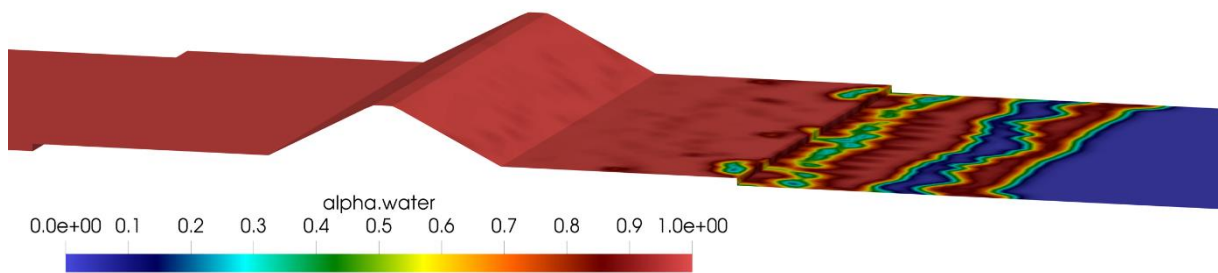
¹ pope

پیشروی موج در ساحل

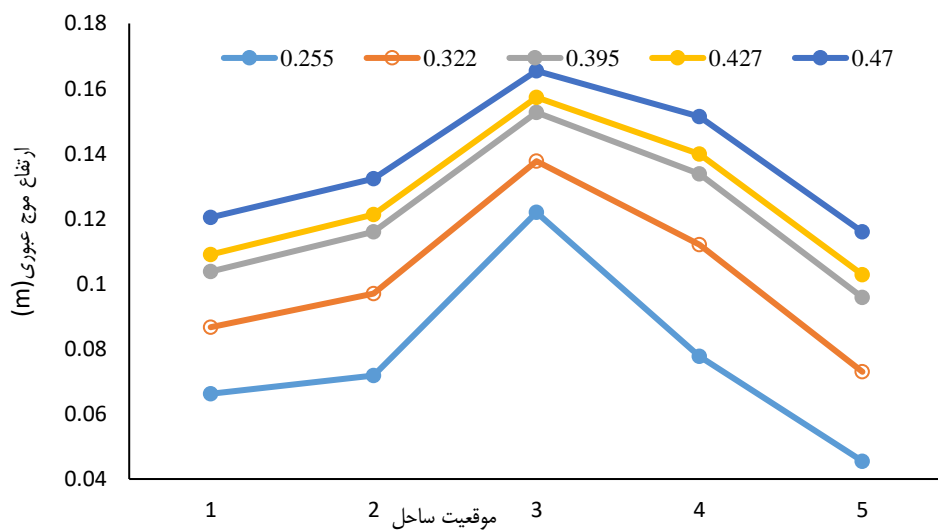
با توجه به شکل (۵) و (۶) وضعیت موج عبوری از ساحل در شرایط بدون مانع در نقاط مختلف ساحل قابل ملاحظه است. این وضعیت به عنوان شرایط شاهد بر عملکرد سازه دیوار ساحلی در این پژوهش در نظر گرفته شد. جدول (۶) موقعیت های مورد بررسی در ساحل (محدوده یک متری مدل شده) را نشان می دهد. قابل ذکر است صفر مختصات افقی شروع مخزن تامین هد موج می باشد و موقعیت های ذکر شده در ادامه، موقعیت ابتدا و انتها و چند نقطه میانی از ساحل مورد بررسی است.

جدول ۶- موقعیت ساحل (متر)

h1	h2	h3	h4	h5
۴/۳۲۵	۴/۴۴۵	۴/۵۹۵	۴/۸۸۵	۵/۰۰۵



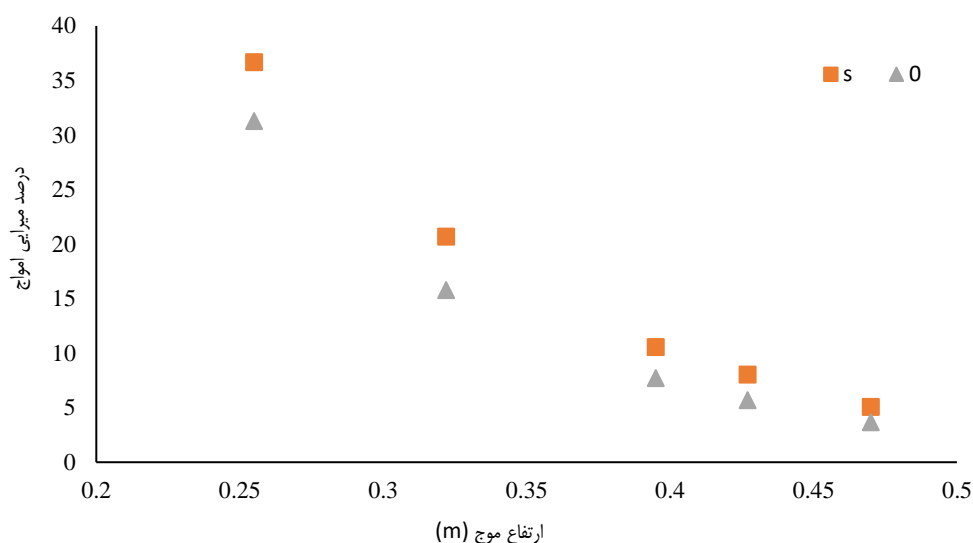
شکل ۵. لحظه‌ی عبور آب از روی سازه در زمان $t=1.2s$



شکل ۶. پیشروی موج در ساحل قبل از نصب موانع

بررسی میرایی امواج

یکی از پارامترهای موثر در تخریب سواحل و تغییر نیمرخ سواحل ارتفاع موج است. در شکل (۷) ارتفاع آب قبل و بعد از سازه تحت ارتفاع موج‌های متفاوت و موقعیت‌های مختلف سازه دیوار ساحلی ارائه شده است و در ادامه به بررسی میزان تاثیر دایک در کاهش ارتفاع موج پرداخته شده است.



شکل ۷. درصد میرایی موج در حالت‌های مختلف

جدول ۷. مقادیر میزان اثر گذاری سازه و جنگل ساحلی در نرخ کاهش ارتفاع موج نسبت به حالت بدون موانع

نوع حفاظت	ارتفاع موج (m)	درصد اثر گذاری موانع (%)
سازه دیوار ساحلی (S)	۰/۲۵۵	۱۷/۳۱
	۰/۳۲۲	۳۱/۱۴
	۰/۳۹۵	۳۷/۱۲
	۰/۴۲۷	۴۱/۲۶
	۰/۴۷۰	۳۷/۴۶

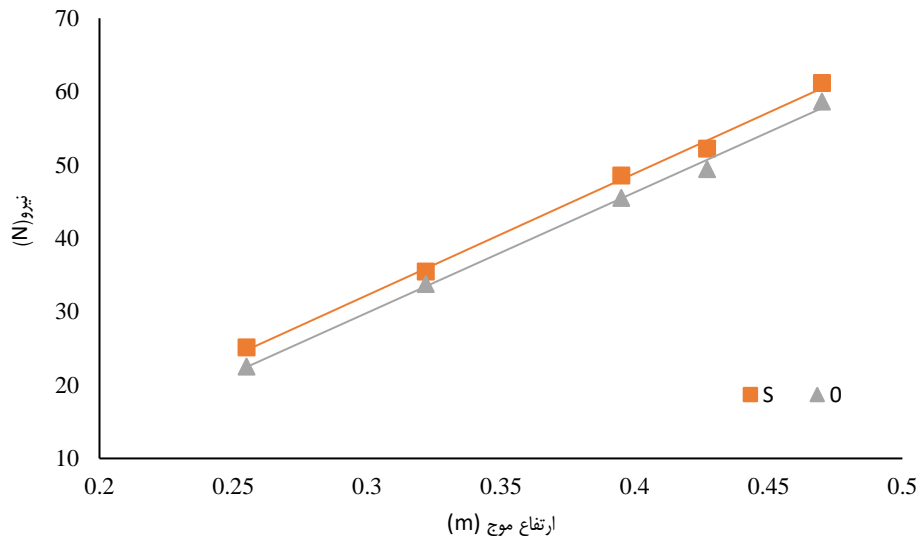
باتوجه به جدول (۷) میرایی موج در حالت سازه دیوار ساحلی برای پنج ارتفاع موج مورد بررسی در این تحقیق به میزان متوسط ۳۲/۸۶ درصد نسبت به حالت بدون مانع افزایش یافته است. بنابراین موج عبوری از ساحل دارای موانع ۱/۳۷ برابر نسبت به حالت ساحل بدون مانع ارتفاع کمتری خواهد داشت که این خود نشان از عملکرد مناسب موانع در تضعیف امواج از نظر ارتفاع موج عبوری دراد.

بررسی نیروی امواج

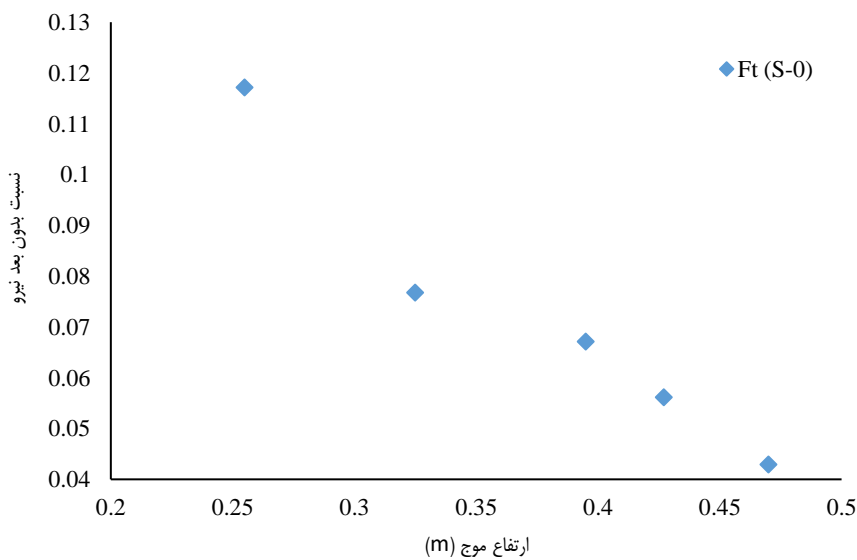
نیروهای وارده به سازه شامل نیروهای لزجت و فشار است. فرض بر آن است که اصطکاک بستر فلوم ناچیز است، به همین دلیل میزان نیروهای ناشی از لزجت سیال اندک و نزدیک به صفر است و تنها به نیروهای ناشی از فشار پرداخته شده است. با توجه به شکل (۸) می‌توان گفت که در حالتی که ساحل دارای مانع سازه دیوار ساحلی (S) است نیروی جذب موج بیشتری نسبت به حالت بدون مانع (0) دارد، از این رو

می توان گفت که موانع تاثیر قابل قبولی در کاهش نیروی موج دارد. نتایج در قالب نمودار F_t بر حسب ارتفاع موج وردی مختلف، در شکل (۹) برای حالت سازه دیوار ساحلی و حالت بدون مانع ارائه شده است.

باتوجه به جدول (۸) در حالت با مانع سازه، نیروی جذب شده توسط ساحل و سازه دیوار ساحلی نسبت به حالت ساحل بدون مانع افزایش قابل قبولی دارد. نتایج بدست آمده گویای تاثیر موانع بر کاهش نیروی امواج است، همچنین نتایج نشان می دهند که هر چه ارتفاع موج بیشتر باشد درصد نیروی مستهلک شده نیز بیشتر می شود. به طور کلی در بین ارتفاع موج های مختلف در این پژوهش، مقدار نیروی مستهلک شده برابر از ۵ تا ۱۲ درصد بیشتر از حالت بدون سازه است.



شکل ۸. نیروی جذب شده توسط سازه دیوار ساحلی (S) در مقایسه با ساحل بدون مانع (0)



شکل ۹. نسبت بدون بعد نیرو (F_t) برای ارتفاع موج های متفاوت

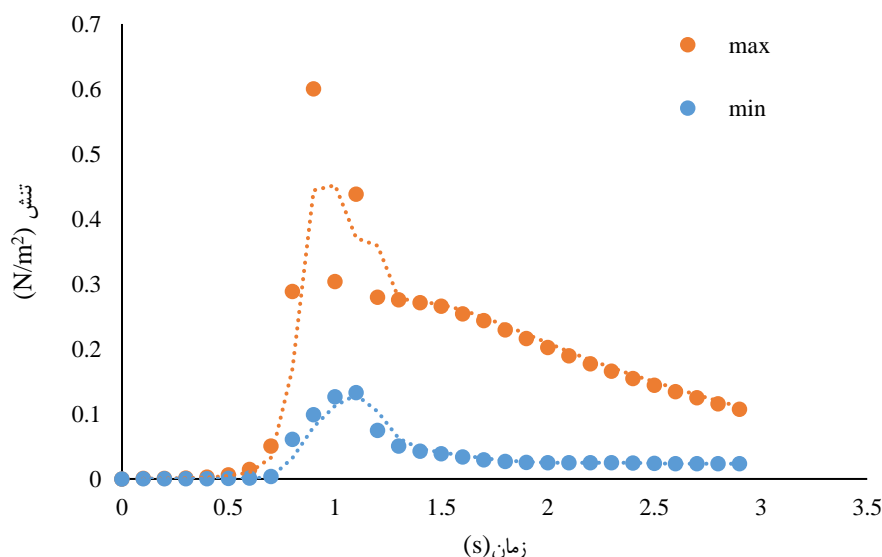
جدول ۸. مقادیر نیروی مستهلک شده نسبت به حالت بدون مانع

نوع حفاظت	ارتفاع موج (متر)	نیرو (نیوتن)	نیروی مستهلک شده نسبت به بدون مانع (%)
	۰/۲۵۵	۲۵/۱۲	۱۱۱/۷۱
	۰/۳۲۲	۳۵/۴۵	۱۰۴/۹۸
سازه دیوار ساحلی (S)	۰/۳۹۵	۴۸/۵۶	۱۰۶/۷۱
	۰/۴۲۷	۵۲/۲۰	۱۰۵/۶۱
	۰/۴۷۰	۶۱/۱۶	۱۰۴/۲۹

بررسی تنش برشی

مقایسه تنش برشی در بستر برای بررسی اثر سازه دیوار ساحلی بر عملکرد موج مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۰) نحوه تغییرات تنش برشی در حالت‌های ماکزیمم و مینیمم در شرایط سازه دیوار ساحلی، برای ارتفاع موج ورودی ۰/۴۷۰ بدست آمده از مدل سازی عددی را نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل ارائه شده (۱۰)، مشاهده می‌شود که حضور سازه باعث افزایش تنش شده است این افزایش تنش در لحظه‌ای که موج با بیشترین ارتفاع خود به سازه می‌رسد تا از روی سازه عبور نماید افزایش چشمگیری دارد این بازه زمانی برای موج با ارتفاع اولیه ۰/۴۷ بین زمان ۰/۹ ثانیه تا ۱/۲ ثانیه می‌باشد. از مقایسه این نتایج نسبت به تنش‌های ثبت شده در حالت بدون سازه، می‌توان اظهار داشت که حضور سازه توانسته به‌طور متوسط تا ۳۰ درصد میزان تنش برشی را افزایش دهد که این افزایش تنش به‌صورت نیروی مقاوم در مقابل نیروی محرکه موج عمل نموده و باعث کاهش نیروی موج می‌گردد.



شکل ۱۰. تنش برشی سازه، در کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار

بحث

در این پژوهش سعی شد تا با استفاده از مدل سازی عددی و محیط نرم افزار Open FOAM اقدام به بررسی اثر استفاده از سازه دایک ساحلی بر کاهش مشخصه های موج و تضعیف آن در راستای تثبیت سواحل شود. یافته های بدست آمده از این پژوهش نشان از کارایی قابل قبول سازه مذکور دارد. برای این منظور از دو پارامتر مهم موج یکی نیروی موج و دیگری ارتفاع موج جهت تعیین میزان اثرگذاری حضور سازه در ساحل استفاده شد.

در خصوص نیرو همانطور که در بخش قبل نشان داده شد این اثر گذاری قابل توجه است. زمانی که امواج بلند از ساحل بدون مانع حرکت می کنند، تنها مقاومتی که در برابر امواج وجود دارد بستر ساحل خواهد بود، بنابراین بخش کمی از نیرو صرف غلبه بر این مقاومت می شود. در مقابل در ساحل دارای سازه دیوار ساحلی هنگام عبور امواج از این بازه نیاز به صرف انرژی بیشتری می باشد. می توان گفت که با وجود موانع نیروی مقاوم در برابر نیروی محرک امواج بیشتر شده و امواج برای عبور ناچار به صرف نیروی بیشتری از خود است و می توان اذعان داشت، موج عبوری در حالت سازه دیوار ساحلی، موجی با نیروی کمتر و ضعیف شده ای است. مقایسه داده های آزمایشگاهی و عددی استخراج شده در این پژوهش نیز به نوعی این ادعا را ثابت می کند. میزان تاثیر گذاری موانع سازه دیوار ساحلی تاییدی بر انجام طرح های حفاظت از سواحل در مقابل امواج و توسعه پایدار سواحل است. با افزایش ارتفاع موج ورودی تا حد معین که در این پژوهش معادل $0/470$ متر می باشد، میزان عملکرد سازه دیوار ساحلی و تاثیر گذاری آن ها نیز بیشتر است و از این ارتفاع به بعد تاثیر گذاری کمتر می شود، بنابراین قبل از پیاده سازی این گونه طرح ها، باید بررسی های بیشتر و حتی اجرای طرح هایی به صورت پایلوت در دستور کار قرار گیرد. با این حال می توان گفت مدل عددی با دقت قابل قبولی که دارد فرصتی فراهم نموده که بتوان کلیه پارامترهای موثر را بررسی نمود، سپس نسبت بین این پارامترها و شدت اثرگذاری آن ها را محاسبه کرد و سپس به پیاده سازی طرح پایلوت پرداخت، تا علاوه بر صرف وقت و هزینه بهترین طرح برای حفاظت از ساحل در مقابل امواج یافت.

در خصوص ارتفاع موج نیز بررسی ها در جهت تایید کارایی سازه در میرایی و استهلاک موج است. قطعاً هر چه ارتفاع موج عبوری بیشتر کاهش داده شود خطرات ناشی از این موج در سواحل نیز کمتر خواهد شد و به توسعه سواحل و حفاظت از آنها در مقابل تخریب ناشی از امواج کمک بیشتری می شود. بنابراین انتخاب ارتفاع مناسب برای سازه بعنوان عامل اثر گذار بر میزان میرایی موج یکی از موارد مهم در اقدامات مهندسی سواحل است. البته بدیهی است که در تمام این موارد ملاحظات اقتصادی نیز باید مد نظر قرار گیرد.

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر سازه دیوار ساحلی در ساحل با شیب ثابت، بر الگوی جریان و حرکت امواج با مدل سازی عددی در نرم افزار Open FOAM است. مدل سازی ها در دو حالت با و بدون مانع برای ۵ ارتفاع موج متفاوت انجام شد. در ادامه خلاصه ای از نتایج آورده شده است:

- نتایج نیروهای استخراج شده از مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. در این بررسی مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال $0/47$ و ضریب تبیین $0/98$ بدست آمد که بیانگر دقت قابل قبول نتایج استخراج شده از مدل عددی حاضر می باشد.
- در مورد نیروی امواج، در مقایسه بین حالت سازه دیوار ساحلی نسبت به حالت بدون مانع در ساحل، توانایی مانع در کاهش نیروی موج و استهلاک آن معادل ۱۲ درصد افزایش داشته است.
- در بحث مقایسه نیروها به صورت بدون بعد، مشخص شد که با افزایش ارتفاع موج ورودی میزان جذب نیرو نیز روند افزایشی داشته است که این روند نشانه کارایی بهتر طرح حفاظتی استفاده شده به ازای ارتفاع موج های بزرگتر می باشد.
- علاوه بر نیروی موج، ارتفاع موج و میرایی آن نیز به عنوان یک فاکتور مهم در کنترل اثر تخریبی موج در ساحل نیز جهت بررسی قرار گرفت. میرایی موج، در حالت با مانع نسبت به حالت بدون مانع، افزایش قابل توجهی معادل $1/37$

برابر داشته است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع موج ورودی، میزان میرایی موج هنگام برخورد امواج به ساحل کاهش می‌یابد.

- از مقایسه این نتایج نسبت به تنش‌های ثبت شده در حالت بدون سازه، می‌توان گفت که حضور سازه توانسته به‌طور متوسط تا ۳۰ درصد میزان تنش برشی ناشی از حضور موانع را افزایش دهد.

منابع

- آرمان، علی، فتاحی، پریا، و ظهیری، جواد. (۱۳۹۶). شبیه سازی الگوی جریان و رسوب با حضور سری آبشکن ها در قوس ۹۰ درجه ملایم با استفاده از مدل CCHE2D مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۴(۳)، ۳۹-۲۱. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.12018.2654>
- رضاپوران، اکرم، قنبری عدیوی، الهام، و فتاحی، روح‌الله. (۱۴۰۰). مطالعه آزمایشگاهی حفاظت ساحلی با استفاده از ساختار موج شکن در مقایسه باترکیب ساختار دایک و پوشش درخت. دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی رودخانه. <https://civilica.com/doc/1451051>
- شیریان، ناصر، شفیع فر، مهدی، اقطمان، پیمان، و چگینی، وحید. (۱۳۹۴). بررسی تاثیر تغییرات خصوصیات ساختاری بر سرعت عبور امواج دریا از بدنه موج شکن های چکش خوار مجله هیدرولیک، ۱(۲)، ۵۵-۴۵. https://jhyd.iha.ir/article_85369.html
- عبداللهی، محمد، خانبانی، محمدجواد. (۱۳۸۵). بررسی عملکرد موج شکن ها در جلوگیری از فرسایش نواحی ساحلی. اولین همایش آب منطقه‌ای. بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان. <https://www.sid.ir/paper/821932/fa>
- قاسمی، علی، شفیع فر، مهدی، پناهی، روزبه، و رضایی، حمید. (۱۳۹۳). بررسی عددی اثر پارامترهای دریایی و سازه ای درمیزان روگذری موج از موجشکن توده سنگی با آرمور Xblock. شانزدهمین همایش صنایع دریایی، بندرعباس. <https://civilica.com/doc/474250>
- قنبری عدیوی، الهام، فتحی مقدم، منوچهر، و صدری نسب، مسعود. (۱۳۹۳). مطالعه آزمایشگاهی اثر کمربند سبز ساحلی بر میرایی امواج دریا. مجله علوم و فنون دریایی، ۱۳(۴)، ۵۰-۴۰. https://jmst.kmsu.ac.ir/article_7987.html
- قنبری عدیوی، الهام، و فتحی مقدم، منوچهر. (۱۳۹۴). تأثیر پوشش گیاهی بر ضریب کشش و مقاومت درختان در برابر امواج ساحل، مجله مهندسی آبیاری و آب، ۲(۳۸)، ۱۰۳-۱۱۲. <https://www.sid.ir/paper/217138/fa>
- لطف الهی یقین، محمدعلی، و نصیری، حسین. (۱۳۹۵). شبیه سازی عددی نیروهای امواج سونامی بر سازه های ساحلی. مجله اقیانوس شناسی، ۶(۲۴)، ۳۰-۲۳. <http://joc.inio.ac.ir/article-1-873-fa.html>
- وفایی، فریدون، صباغ یزدی، سعیدرضا، نقوی، احمد، و بختیاری، آرش. (۱۳۹۱). بررسی عملکرد موج شکن های مستقیم برای حفاظت از سواحل شنی با استفاده از مدل سازی ریاضی. نهمین کنفرانس بین المللی سواحل. بنادر و سازه های دریایی، تهران. <https://www.sid.ir/paper/385581/fa>
- ولی پور، حسین، شمس، غلامرضا، و قنبری عدیوی، الهام. (۱۴۰۱). بررسی میزان نیروهای ناشی از امواج منفرد بر دیوارهای ساحلی با استفاده از نرم افزار OpenFOAM مهندسی دریا. ۱۸(۳۷)، ۱-۱۵. http://marine-eng.ir/browse.php?a_code=A-10-1580-۱۵-۱&slc_lang=fa&sid=1
- هاشمی جوان، علی. (۱۳۸۶). شبیه سازی عددی پدیده شکست موج بر موج شکن مستغرق. پایان نامه کارشناسی ارشد. رشته سازه های هیدرولیکی. دانشکده مهندسی عمران تهران، دانشگاه علم و صنعت تهران.
- هنرمند، مسیح، آرمان، وحید، زندی، سید مهدی، و شانه ساززاده، احمد. (۱۳۹۷). مجله اقیانوس شناسی، ۹(۳۶)، ۳۸-۳۱. <https://www.sid.ir/paper/60840/fa>

References

- Abdullahi, M., & Khanjani, M. (1385). Investigating the performance of breakwaters in preventing coastal erosion. The first regional water conference. Behbahan Islamic Azad University, Behbahan branch. <https://www.sid.ir/paper/821932/fa.html> [In Persian]
- Arman, A., Fatahi, P., & Zahiri, J. (2016). Simulation of the flow and sediment pattern with the presence of a series of breakwaters in a gentle 90 degree bend using the CCHE2D model. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 24(3), 21-39. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.12018.2654> [In Persian]
- Artan, M., Arman, V., Zandi, S., & Shane Sazzadeh, A. (2017). *Journal of Oceanography*, 9(36), 31-38. <https://www.sid.ir/paper/60840/fa>
- Balogh, M., Alessandro, P., & Carlo, B. (2012). RANS Simulation of Abl Flow over Complex Terrains Applying an Enhanced K-E Model and Wall Function Formulation: Implementation and Comparison for Fluent and Openfoam. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 104, 360-368. https://www.researchgate.net/publication/257011546_RANS_simulation_of_ABL_flow_over_complex_terrains_applying_an_Enhanced_k-e_model_and_wall_function_formulation_Implementation_and_comparison_for_fluent_and_OpenFOAM
- Ghanbari Adavi, E., & Fathi Moghadam, M. (2014). The effect of vegetation on the coefficient of elasticity and resistance of trees against coastal waves. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 2(38), 103-112. <https://www.sid.ir/paper/217138/fa.html> [In Persian]
- Ghanbari Adavi, E., Fathi Moghadam, M., & Sadri Nasab, M. (2013). Laboratory study of the effect of coastal green belt on the attenuation of sea waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 13(4), 40-50. https://jmst.kmsu.ac.ir/article_7987.html [In Persian]
- Ghasemi, A., Shafiei Far, M., Panahi, R., & Rezaei, H. (2013). Numerical investigation of the effect of marine and structural parameters on the rate of wave passage through a rock mass breakwater with Xblock armor. 16th Marine Industries Conference, Bandar Abbas. <https://civilica.com/doc/474250> [In Persian]
- Gonçalves, S., Pedro, A., & João, M. (2013). Talitrid and Tyloid Crustaceans Bioecology as a Tool to Monitor and Assess Sandy Beaches' Ecological Quality Condition. *Ecological indicators*, 29, 549-557. https://www.researchgate.net/publication/235699334_Talitrid_and_Tyloid_crustaceans_bioecology_as_a_tool_to_monitor_and_assess_sandy_beaches'_ecological_quality_condition
- Gracia, A., Nelson, R., Judith, O., & Williams, AT. (2018). Use of Ecosystems in Coastal Erosion Management. *Ocean & coastal management* 156, 277-289. <https://daneshyari.com/article/preview/8060779.pdf>
- Hashemi Jovan, A. (2007). Numerical simulation of wave breaking phenomenon on submerged breakwater. Master's Thesis. Hydraulic Structures. Tehran School of Civil Engineering. Tehran University of Science and Technology. [In Persian]
- Huang, J., & Guoping, C. (2020) Experimental Modeling of Wave Load on a Pile-Supported Wharf with Pile Breakwater. *Ocean Engineering*, 201, 107149. https://www.researchgate.net/publication/339774624_Experimental_modeling_of_wave_load_on_a_pile-supported_wharf_with_pile_breakwater
- Jiang, C., Xiaojian, L., Yu, Y., & Bin, D. (2019). Numerical Investigation of Solitary Wave Interaction with a Row of Vertical Slotted Piles on a Sloping Beach. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1(11), 530-541. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678218300074>
- Karl, A., & Hung Fung, J. (2018). An Improved Sst K- Ω Model for Pollutant Dispersion Simulations within an Isothermal Boundary Layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,

- 179 ,369-384.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167610517309406>
- Leewis, L., Peter M van , B ., Jelte, R., & Gerard M., J. (2012). Does Beach Nourishment Have Long-Term Effects on Intertidal Macroinvertebrate Species Abundance?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113 ,172-181.
https://www.researchgate.net/publication/257105669_Does_beach_nourishment_have_long-term_effects_on_intertidal_macroinvertebrate_species_abundance
- Li, J., Meilan, Qi., & David , F. (2019). Numerical Modeling of Flow and Morphology Induced by a Solitary Wave on a Sloping Beach. *Applied Ocean Research* 82, 259-273.
<https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/160642481/AcceptedManuscript.pdf>
- Lotfollahi, S., Mohammad, A., & Nasiraei, H. (2015). Numerical simulation of tsunami wave forces on coastal structures. *Journal of Oceanography*, 6(24), 23-30. <http://joc.inio.ac.ir/article-1-873-fa.html>.
 html[In Persian]
- Martins, M., Carlos, N., & José, C.(2013). The Meaning of Mainland Portugal Beaches and Dunes' Psammophilic Plant Communities: A Contribution to Tourism Management and Nature Conservation." *Journal of Coastal Conservation* ,3(17) , 279-299.
https://www.researchgate.net/publication/257762061_The_meaning_of_mainland_Portugal_beaches_and_dunes'_psammophilic_plant_communities_A_contribution_to_tourism_management_and_nature_conservation
- Menter, F. (1992). Influence of Freestream Values on K-Omega Turbulence Model Predictions. 6 (30), 1657-59. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992AIAAJ..30.1657M/abstract>
- Menter, Fl., Martin, K., & Robin, L. (2003). Ten Years of Industrial Experience with the Sst Turbulence Model. *Turbulence, heat and mass transfer*, 1(4), 625-632.
https://www.researchgate.net/publication/228742295_Ten_years_of_industrial_experience_with_the_SST_turbulence_model
- Nielsen, L.(2001). Newcastle Coastal Zone Management Plan: Coastal Engineering Advice. Technical report for Umwelt (Australia) Pty Ltd.
https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789814412216_0087
- Penttinen, O., Ehsan, Y., & Håkan, N. (2011). A Pimplefoam Tutorial for Channel Flow, with Respect to Different Les Models. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 2(23), 1-23.
https://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2011/OlofPenttinen/projectReport.pdf
- Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*. university of Cambridge. United Kingdom.
<https://www.cambridge.org/highereducation/books/turbulent-flows/C58EFF59AF9B81AE6CFAC9ED16486B3A>
- Rezapouran, A., Ghanbari Adivi, E., & Fatahi, R. (1400). Experimental study of coastal protection using breakwater structure comparing the combination of dyke structure and tree cover, 12th International Conference on River Engineering. <https://civilica.com/doc/1451051.html>[In Persian]
- Shirian, N., Shafii Far, M., Aqtaman, P., & Chegini, V. (2014). Investigating the effect of changes in structural characteristics on the speed of sea waves passing through the body of hammerhead breakwaters. *Journal of Hydraulics. Period* ,1(2), 45-55. https://jhyd.iha.ir/article_85369.html.
 html[In Persian]
- Sorenson, RM. (2006) .Basic Coastal Engineering. Spring Science and Business Media, New York.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=072592ad59202c19d1e0091012c2698eb9999f99>
- Vafaei, F., Sabbagh Yazdi, S., Naqvi, A.,& Bakhtiari, A. (2011). Investigating the performance of direct breakwaters to protect sandy beaches using mathematical modeling. 9th international conference of beaches. Ports and marine structures. Tehran. <https://www.sid.ir/paper/385581/fa.html>[In Persian]

Valipour, H, Shams, , Ghanbari Adivi, E. (1401). Investigating the amount of forces caused by individual waves on coastal walls using OpenFOAM software. *Marine engineering*, 18(37), 1-15. http://marine-eng.ir/browse.php?a_code=A-10-1580-3&slc_lang=fa&sid=1.html [In Persian]

Zheng, H., Deborah, G., & Aloson, R. (2016). Numerical wave tank study of extreme waves and wave-structure interaction using OpenFoam. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801816303936>



Application of pump as turbine in extracting surplus energy of water transmission lines

Fereshteh Azizieh¹ , Javad Zahiri^{2✉} , Adell Moradi Sabzkouhi³ , Mehdi Zamani Fekri⁴ 

¹ M.Sc of Water Structures, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: aziziyehfereshte@gmail.com

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

³ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: adellmoradi@asnrukh.ac.ir

⁴ Instructor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Behbahan, Iran. E-mail: zamanifekri@behbahaniau.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Electricity production is very important in developing countries. Undoubtedly, energy production is a key factor for the economic and social development of these countries. Institutions involved in electricity supply have recently recommended pump as turbine as an option for electrifying villages due to economic benefits. Electricity generation from transmission lines and water distribution networks is one of the new topics in the optimal management of water systems. In water transmission and distribution networks, despite the additional water load on the downstream equipment, which is often controlled by pressure control valves, a pump can be used as a turbine in electricity production. By taking energy from the pump and transferring it to the incompressible fluid, the pumping system increases the energy of the fluid and transfers it from a lower height to a higher level, while the reverse pump system works in the opposite direction of the pump. One of the most important factors in choosing the type of turbine for the construction of a power plant is the estimation of the initial costs of the project for the initial cost return in the shortest time. For this reason, according to the results of the investigations, one of the economic methods to replace the turbine is to use a reverse pump. These types of pumps have features such as lower maintenance costs than turbines and can be widely used.

Methodology

The case study in the present research includes the water supply plan to the cities and villages in the northeast of Khuzestan, which consists of a set of transmission lines, pressure relief valves, balance tanks and water storage tanks. The studied area in Khuzestan province includes the cities of Baghmalek, Izeh, Seydun and Ramhormoz. Seydun reservoirs in the east, Haftgel reservoirs in the west, Ramhormoz reservoirs in the south, and Izeh reservoirs in the north of the study area. According to the profile of the studied water supply line, there can be excess energy in the pressure relief valves, the inlet of the water tanks and the balance tanks. Based on this, eight points in the form of Helaijan branch, Seydun reservoirs, PRV6 pressure relief valve, RES5 equilibrium reservoir, RES6 equilibrium reservoir, Haftgel reservoirs, Ramhormoz reservoirs and Baghmalek reservoirs were selected as points with the potential of using reverse pump for energy production. Manufacturers of pumps usually do not provide the curve of pump behaviors in reverse operation, which causes problems in using the pump as a turbine. It is not easy to use the pump as a turbine, and the pump shows different behavior, which makes it difficult to predict the characteristic curve. For this purpose, it is necessary to convert the characteristic curve of the selected pump into the characteristic curve of the reverse pump. In this research, Sharma's method (1985) was used to determine the suitable pump for a small hydroelectric power plant. This method helps to select a pump with reverse operation capability according to the available line information so that it can be used as a turbine for energy extraction with the help of a generator. According to all the available methods for selecting the pump, this method provides the closest results to the user, and along with the practicality of its use, empirical equations are used in this method.

Results and discussion

Based on the amount of production power calculated for each of the points with energy production potential, it was determined that the maximum production power of RES6 balance tank and PRV6 pressure relief valve is 758.7 and 719.5 kW, respectively. The RES6 balance tank has the maximum head and the PRV6 pressure relief valve has the highest flow rate among all the studied points. The lowest production power is related to Helaijan branch with 32 kW, which is the lowest flow rate among all the studied points. Based on the obtained results, the proposed power plants are able to supply 1512 kilowatts of production power. In the next part, the proposed replacement of small hydropower plants on the transmission line with diesel generators with similar production capacity was analyzed from an economic point of view. In these calculations, the efficiency of the power plant is considered to be 75%. The total power produced by small hydropower plants with reverse pump is equal to 2717.29 kilowatts, which, considering 8000 hours per year for a period of 25 years, will be equal to 302400 megawatt hours. Considering that 10.96 kilowatt hours of power is produced per liter of diesel, the total amount of fuel required for a period of 25 years will be equal to 27600000 liters. Considering the world price of diesel, which is about \$0.5 per liter, the cost of fuel required for energy production will be about \$13,800,000.

Conclusions

In this research, it was tried to determine the points with energy production potential in the water supply plan for the cities and villages of the North East of Khuzestan. RES6 balance tank, Haftgol tanks, Ramhormoz tanks and Baghmolek tanks were selected as points with the potential to use the reverse pump. In the next step, Sharma's method was used to determine the type of pump needed to design the reverse pump hydroelectric power plant. The calculations show that the power produced by the eight selected points is equal to 2.7 megawatts, which, considering a 25-year period, will provide a power equal to 302,400 megawatt hours. To produce such power, it is necessary to burn 27,591,241 liters of diesel, which, in addition to its high cost, has destructive environmental effects. Among these effects, we can mention the high production of CO₂ gas, which calculations show that the mentioned amount of diesel fuel will produce about 74 thousand tons of CO₂ gas, which can have destructive effects on the environment.

Keywords: Energy, water systems, reverse pump, CO₂

Article Type: Research Article

Article history: Received: 01 July 2023 Revised: 02 September 2023 Accepted: 14 September 2023 ePublished: 15 September 2023

Cite this article: Azizieh, F., Zahiri, J., Moradi Sabzkouhi, A., & Zamani Fekri, m. (2023). Application of pump as turbine in extracting surplus energy of water transmission lines, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(2), 91-106. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9476.1058

Publisher: Razi University

© The Author(s).





کاربرد پمپ معکوس در استحصال انرژی مازاد خطوط انتقال آب

فرشته عزیزیه^۱، جواد ظهیری^۲، عادل مرادی سبزوکی^۳، مهدی زمانی فکری^۴

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران. رایانامه: ziziyefereshte@gmail.com

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

^۳ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران. رایانامه: adellmoradi@asnrukh.ac.ir

^۴ مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد بهبهان، ایران. رایانامه: zamanifekri@behbahaniau.ac.ir

چکیده

بدون شک تولید انرژی عامل کلیدی برای توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورهای در حال توسعه به حساب می‌آید. تولید برق از خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب از موضوعات جدید در مدیریت بهینه سامانه‌های آبی است. از مهم‌ترین فاکتورهای انتخاب نوع توربین برای احداث نیروگاه، برآورد هزینه‌های اولیه طرح برای بازگشت سرمایه هزینه اولیه در کمترین زمان است. به همین دلیل با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته یکی از ارزان‌ترین روش‌های جایگزین توربین، استفاده از پمپ معکوس است. در محدوده طرح مورد مطالعه هشت نقطه انشعاب هلالیجان، مخازن صیدون، شیر فشارشکن PRV6، مخزن تعادلی RES5، مخزن تعادلی RES6، مخازن هفتگل، مخازن رامهرمز و مخازن باغملک به عنوان نقاط دارای پتانسیل استفاده از پمپ معکوس جهت تولید انرژی انتخاب گردید. پمپ به عنوان توربین رفتار متفاوتی نسبت به پمپ از خود نشان می‌دهد و این امر باعث می‌شود پیش‌بینی منحنی مشخصه آن سخت شود. به همین منظور نیاز است تا منحنی مشخصه پمپ انتخابی را به منحنی مشخصه پمپ معکوس تبدیل کرد. در این تحقیق از روش شارما (۱۹۸۵) جهت تعیین پمپ مناسب برای نیروگاه برق آبی کوچک استفاده شد. این روش کمک می‌کند تا با توجه به اطلاعات خط موجود، پمپی را با قابلیت کارکرد معکوس انتخاب کرد تا بتوان به کمک ژنراتور از آن به عنوان توربین برای استحصال انرژی استفاده کرد. محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد که توان تولیدی توسط هشت نقطه انتخابی برابر با برابر با ۲/۷ مگاوات بوده که با در نظر گرفتن یک دوره ۲۵ ساله توانی برابر با ۳۰۲۴۰۰ مگاوات ساعت ارائه خواهد داد. برای تولید چنین توانی نیاز است تا ۲۷,۵۹۱,۲۴۱ لیتر گازوئیل سوخته شود که علاوه بر هزینه بالای آن، اثرات زیست محیطی مخربی به دنبال دارد. از جمله این اثرات می‌توان به تولید بالای گاز CO₂ اشاره کرد که محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد سوخت مقدار گازوئیل اشاره شده، حدود ۷۴ هزار تن گاز CO₂ تولید خواهد کرد که می‌تواند اثرات مخربی بر محیط زیست داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: انرژی، سامانه‌های آبی، پمپ معکوس، گاز CO₂

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۰ تیر ۱۴۰۲ اصلاح: ۱۱ شهریور ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۳ شهریور ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ شهریور ۱۴۰۲

استناد: عزیزیه، ف.، ظهیری، ج.، سبزوکی، ع.، و زمانی فکری، م. (۱۴۰۲). کاربرد پمپ معکوس در استحصال انرژی مازاد خطوط انتقال آب، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۲)، ۹۱-۱۰۶. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9476.1058



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

تولید برق در کشورهای در حال توسعه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بدون شک تولید انرژی عامل کلیدی برای توسعه اقتصادی و اجتماعی این کشورها به حساب می‌آید. تولید برق از خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب از موضوعات جدید در مدیریت بهینه سامانه‌های آبی است. در شبکه‌های انتقال و توزیع آب، با وجود بار آبی اضافی وارد بر تجهیزات پایین دست که اغلب با شیرهای کنترل فشار کنترل می‌شود می‌توان از پمپ به عنوان توربین^۱ در تولید برق استفاده نمود (محمدیان و همکاران، ۱۳۹۴). مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شیرهای کاهش فشار معمولی، منجر به ازدست‌رفتن انرژی می‌شود و از طرفی شیرهای فشارشکن^۲ می‌توانند محل‌هایی برای بازیابی انرژی در نظر گرفته شوند (سامورا و همکاران^۳، ۲۰۱۶). بر همین اساس مبحث استفاده از پمپ به عنوان توربین به منظور استفاده از انرژی مازاد در شبکه‌های تأمین آب مورد توجه محققین قرار گرفته است (کاراوتا و همکاران^۴، ۲۰۱۷). استفاده از سیستم پمپ معکوس روش بهینه‌ای است که در کشورهای پیشرفته در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. در یک برآورد تخمینی، هزینه راه‌اندازی و بهره‌برداری این سیستم در مقایسه با روش‌های استفاده از برخی توربین‌ها تا یک‌دهم تخمین زده شده است (زمانی و همکاران، ۱۴۰۰). از مزیت‌های اصلی چنین نیروگاه‌هایی می‌توان به تولید انرژی با هزینه کم (هزینه تولید هر کیلووات انرژی) و قابلیت انعطاف‌پذیری بالا در تنظیم سرعت و قدرت اشاره کرد. از نظر اقتصادی، استفاده از پمپ‌ها به عنوان توربین در محدوده ۵۰۰-۱ کیلووات دارای دوره بازگشت سرمایه در دو سال یا کمتر است که به‌طور قابل‌توجهی کوتاه‌تر از توربین معمولی است. استفاده از پمپ در حالت معکوس به عنوان توربین می‌تواند به شدت باعث کاهش هزینه‌ها شود. علاوه بر این تکنولوژی پمپ معکوس یا پمپ به جای توربین در زمینه‌های کاربردی مختلفی از جمله برای بازیافت انرژی در مقیاس کوچک و یا نیروگاه انرژی قابل استفاده است (رسی و همکاران^۵، ۲۰۱۶).

سیستم پمپاژ با گرفتن انرژی از پمپ و انتقال آن به سیال غیرقابل تراکم، انرژی سیال را افزایش داده و آن را از ارتفاع پایین به یک سطح بالاتر منتقل می‌کند، این در حالی است که سیستم پمپ معکوس برعکس پمپ عمل می‌کند (کوزینت و همکاران^۶، ۲۰۱۳).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در تحقیقات دانشگاهی به موضوع فناوری پمپ معکوس، در مقایسه با سایر فناوری‌های انرژی پاک، به طور چشمگیر پرداخته نشده است، بر همین اساس تحقیقات بیشتر در مورد استفاده از پمپ معکوس می‌تواند به درک و پذیرش بهتر آن در جامعه کمک کند (بیناما و همکاران^۷، ۲۰۱۷). در سیستم‌های تحت فشار، پمپی که در حالت معکوس استفاده می‌شود در مقایسه با دستگاه‌های تولید انرژی سنتی راه‌حلی بسیار مقرون‌به‌صرفه و قابل اعتماد است (کاراوتا و همکاران، ۲۰۲۲). به‌منظور ایجاد راه‌حل‌های کارآمدتر برای تولید انرژی، محققان در حال بررسی امکان فنی و اقتصادی جایگزینی میدل‌های برق‌آبی کم‌هزینه، مانند پمپ به‌عنوان توربین با شیرهای کاهش فشار در سامانه‌های آبرسانی هستند (میتروویچ و همکاران^۸، ۲۰۲۲). لیدان و همکاران پمپ معکوس را به عنوان یک دستگاه برای بازیابی انرژی در شبکه توزیع آب مورد استفاده و بررسی قرار دادند (لیدون و همکاران^۹، ۲۰۱۷). نوربخش و درخشان (۱۳۸۴) به تحلیل رفتار پمپ و ارائه بهترین نقطه کارکرد آن در حالت چرخش

¹ Pump as Turbine (PAT)

² Pressuer Reducing Valve

³ Samora et al

⁴ Carravetta et al

⁵ Rossi et al

⁶ Couzinet et al

⁷ Binama et al

⁸ Mitrovic et al

⁹ Lydon et al

پرداختند و مناسب‌ترین نقطه کارکرد توربین‌وار پمپ را ارائه دادند. محمدی پور و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی چرخ بر عملکرد یک پمپ گریز از مرکز در کارکرد معکوس پرداختند و بهینه‌ترین هندسه برای شرایط کاری را ارائه دادند. نوربخش و درخشان (۱۳۸۴) اظهار نمودند کارکرد پمپ به عنوان توربین در سه حالت باید مورد تحلیل و بررسی قرار داده شود. یکی در حالت گذرا، دیگری زمانی که به هر دلیلی جریان معکوس گردد و حالت سوم زمانی که پمپ معکوس در حالت پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعه‌ای از یک تحلیل تئوریک جهت تعیین بهترین نقطه بهره‌وری از یک پمپ سانتریفیوژ صنعتی در حال کار به عنوان توربین استفاده گردید (درخشان و نوربخش^۱، ۲۰۰۸). در این روش سعی بر آن بود تا با استفاده از حالت مستقیم (پمپ)، اجزای هیدرولیکی حالت معکوس (توربین) تخمین زده شود. به دلیل همبستگی بین پمپ و پمپ معکوس استفاده از روش‌های دقیق برای پیش‌بینی عملکرد پمپ معکوس به هنگام انتخاب و طراحی آن ضروری است. در مقاله‌ای ابتدا تجزیه و تحلیل نظری رابطه بین عملکرد پمپ و پمپ معکوس انجام شد و یک روش نظری برای پیش‌بینی عملکرد پمپ معکوس با استفاده از تحلیل نظری و همبستگی تجربی تهیه شد (یانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۲). در مرحله بعد، دینامیک سیالات محاسباتی در پیش‌بینی عملکرد حالت‌های مستقیم و معکوس یک پمپ گریز از مرکز تک‌مرحله‌ای بررسی شد.

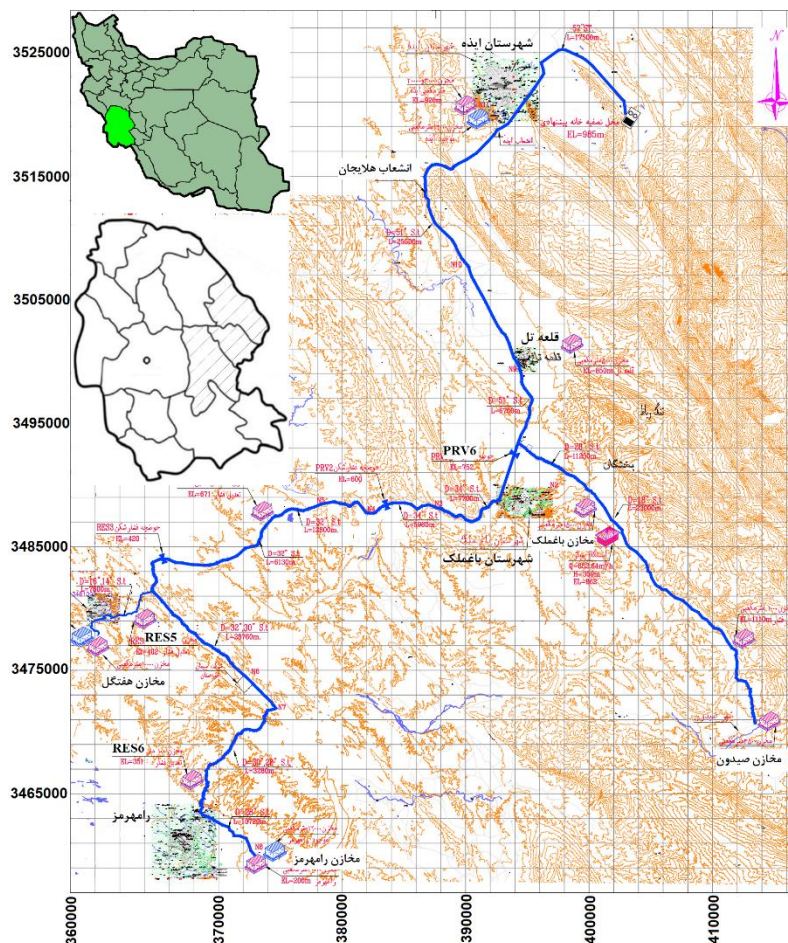
مسئله مورد بررسی در تحقیق حاضر، استفاده از پمپ‌های صنعتی به صورت معکوس در حالت توربینی در خطوط انتقال آب شرب و استحصال و تولید نیروی برق از انرژی مازاد یا به عبارتی تلف شده در خطوط انتقال آب است. مهم‌ترین مسئله در احداث نیروگاه‌های برق‌آبی، تخمین توانمندی یک محل در تولید انرژی یا ظرفیت نصب نیروگاه است. به منظور استفاده از پمپ در حالت معکوس در قالب یک توربین لازم است تا هد و دبی شرایط موجود پمپ به هد و دبی پمپ در حالت معکوس تغییر یابد. پس از تعیین نقاط دارای پتانسیل تولید انرژی، محاسبات لازم جهت انتخاب پمپ معکوس صورت گرفت و پس از آن موارد اقتصادی و زیست‌محیطی چنین نیروگاه‌های مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است باتوجه به کیفیت بالای آب به علت تصفیه شدن در تصفیه‌خانه در نتیجه عدم وجود هرگونه آلودگی در سیال خللی در کارکرد پمپ در حالت معکوس ایجاد نمی‌گردد.

روش پژوهش

محدوده مطالعاتی در تحقیق حاضر شامل طرح آبرسانی به شهرها و روستاهای شمال شرق خوزستان می‌باشد که از مجموعه خطوط انتقال، شیرهای فشارشکن، مخازن تعادلی و مخازن ذخیره آب تشکیل شده است. محدوده مورد مطالعه در استان خوزستان، شهرستان‌های باغملک، ایذه، صیدون و رامهرمز را شامل می‌شود. مخازن صیدون در شرق، مخازن هفتگل در غرب، مخازن رامهرمز در جنوب و مخازن ایذه در شمال محدوده مطالعاتی قرار گرفته‌اند. بیشترین دبی مربوط به شیر فشارشکن PRV6 با مقدار ۱۱۵۱/۶۴ لیتر بر ثانیه و بیشترین هد مربوط به مخزن تعادلی RES5 با مقدار ۱۷۱ متر می‌باشد. ساختار لوله‌های استفاده شده در خط انتقال مطابق استاندارد ST-44 در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) مسیر خطوط انتقال در منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است.

¹ Derakhshan & Nourbakhsh

² Yang et al



شکل ۱. موقعیت قرارگیری منطقه مورد مطالعه شامل خط انتقال، مخازن ذخیره، شیرهای کنترل فشار و مخازن آب (مهندسی مشاور پارس جویاب، ۱۳۹۵)

محل‌های دارای پتانسیل تولید انرژی

با توجه به پروفیل خط آبرسانی مورد مطالعه در نقاط زیر انرژی مازاد می‌تواند وجود داشته باشد:

شیرهای فشارشکن: شیر فشارشکن، فشار سیال عبوری را کم می‌کند و همچنین برای ثابت نگه‌داشتن فشار در خروجی استفاده می‌شود و در نتیجه فشار خروجی سیال از فشار ورودی آن کمتر است. بنابراین به جای کاهش فشار با شیرهای فشارشکن می‌توان توسط سیستم پمپ معکوس از این انرژی اضافی استفاده کرد.

ورودی به مخازن آب: این مخازن قابلیت نگهداری آب منتقل شده از بالادست و کاهش فشار را دارند. در صورتی که فشار ورودی به این مخازن قابل توجه بوده و توجه اقتصادی داشته باشد می‌توان از این فشار اضافه استفاده کرد.

مخازن تعادلی: این مخازن برای کنترل فشار خط مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه اغلب فشار هیدرولیکی ورودی به این مخازن می‌تواند بالا باشد معمولاً مکان مناسبی برای استفاده از این انرژی مازاد است.

در جدول (۱) ویژگی‌های هیدرولیکی از قبیل دبی (Q)، ارتفاع نقاط (ELV)، هد (H) و قطر لوله‌های (D) نقاط دارای پتانسیل تولید انرژی در محدوده مطالعاتی ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی نقاط دارای پتانسیل تولید انرژی

شرح	Q (l/s)	ELV(m)	H (m)	D (in)
انشعاب هلاچجان	۴۲/۶۶	۸۲۰	۱۰۲	۵۱
مخازن صیدون	۱۲۶/۷۱	۱۰۵۰	۵۷/۴۶	۲۲
شیر فشارشکن PRV6	۱۱۵۱/۶۴	۷۵۲	۸۵	۵۱
مخزن تعادلی RES5	۱۰۸/۲۷	۴۰۲	۱۷۱	۱۴
مخزن تعادلی RES6	۸۲۵/۸	۳۵۱	۱۲۵	۳۰
مخازن هفتگل	۱۰۸/۲۷	۳۷۳	۲۴/۵۴	۳۲
مخازن رامهرمز	۸۲۵/۸	۲۳۸	۳۶	۲۸
مخازن باغملک	۲۶۶/۰۵	۸۲۵	۴۰	-

رفتار هیدرولیکی پمپ معکوس

رفتار هیدرولیکی پمپ معکوس متاثر ولی متفاوت از پمپ است. برای پیش‌بینی بهترین بازده پمپ‌ها به عنوان توربین روش‌های مختلفی ارائه شده است که نتایج آن‌ها مطابق داده‌های تجربی برای همه پمپ‌ها یکسان نیست (درخشان و نوربخش، ۲۰۰۸). پمپ معکوس با استانداردهای فنی مطلوب در خروجی‌های کم‌توانی رقابت با توربین از لحاظ ماکزیمم کارایی را دارد. سازندگان پمپ‌ها معمولاً منحنی رفتارهای پمپ را در عملکرد معکوس ارائه نمی‌دهند (کاراوتا و همکاران، ۲۰۱۸) که این امر باعث ایجاد مشکل در استفاده از پمپ به عنوان توربین می‌شود. استفاده از پمپ به عنوان توربین به راحتی صورت نمی‌گیرد و پمپ رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد و این امر باعث می‌شود پیش‌بینی منحنی مشخصه سخت شود. به همین منظور نیاز است تا منحنی مشخصه پمپ انتخابی را به منحنی مشخصه پمپ معکوس تبدیل کرد. در این زمینه روش‌های متعددی از قبیل چیلدز^۱ (۱۹۶۶)، هنکوک^۲ (۱۹۶۳)، استپانوف^۳ (۱۹۵۷)، آلتور^۴ (۱۹۹۰) و شارما^۵ (۱۹۸۵) ارائه شده است. تحقیقات متعددی در زمینه مقایسه روش‌های فوق صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به ویلیامز^۶ (۱۹۹۴) و یانگ و همکاران (۲۰۱۲) اشاره نمود که بر اساس بررسی کارایی روابط فوق، روش شارما نسبت به دیگر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار بوده است. بر همین اساس در این مطالعه از روش شارما برای انتخاب پمپ به عنوان توربین استفاده شده است. این روش کمک می‌کند تا با توجه به اطلاعات خط موجود پمپی را با قابلیت کارکرد معکوس انتخاب کرد تا بتوان به کمک ژنراتور از آن به عنوان توربین برای استحصال انرژی استفاده کرد. با توجه به تمامی شیوه‌های موجود برای انتخاب

¹ Childs

² Hancock

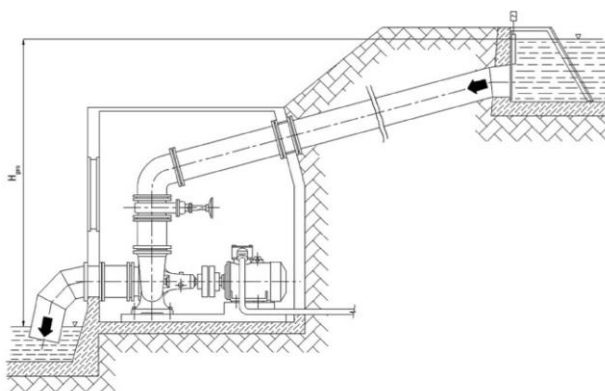
³ Stepanoff

⁴ Alatorre

⁵ Sharma

⁶ Williams

پمپ این روش نزدیکترین نتایج به واقعیت را در اختیار کاربر قرار می‌دهد و در کنار کاربردی بودن استفاده از آن از معادلات تجربی موجود در این روش استفاده می‌شود. در این روش نیاز است با توجه به مطالعات پمپ معکوس موجود، پمپی را حدس زده و با استفاده از روابط حاکم بر مسئله، پمپ معکوس مناسب را پیدا کرده و در ادامه اطلاعات پمپ معکوس انتخابی را با اطلاعات پمپ معکوس مقایسه نموده و در صورتی که اطلاعات دو پمپ معکوس مطابق یکدیگر باشد به این معناست که این نوع پمپ مناسب برای استفاده است (ویلیامز^۱، ۲۰۰۳). ساختار شماتیک از یک پمپ معکوس در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲. ساختار شماتیک یک ایستگاه برق آبی پمپ معکوس (کاراوتا و همکاران، ۲۰۱۸)

پتانسیل تولید انرژی

مهم‌ترین مسئله در احداث نیروگاه‌های برق آبی، تخمین توانمندی یک محل در تولید انرژی یا ظرفیت نصب نیروگاه است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \rho \times g \times Q \times H \times \eta / 1000 \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی مخصوص آب (kg/m^3)، g شتاب ثقل زمین (m/s^2)، Q آبدهی رودخانه یا دبی خط انتقال برحسب m^3/s و H فشار خط برحسب متر و P توان تولیدی برحسب (kW) می‌باشد. η راندمان کل ژنراتور و توربین بوده که از حاصل ضرب راندمان (η_t) توربین و راندمان ژنراتور (η_g) به دست می‌آید.

انتخاب پمپ به عنوان پمپ معکوس در نقاط مورد مطالعه

جهت تعیین پمپ مورد نظر به عنوان پمپ معکوس با استفاده از روابط ۲ و ۳ نسبت هد و دبی پمپ و پمپ معکوس به صورت تابعی از راندمان پمپ در شرایط بهینه در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{Q_{\text{opt_PAT}}}{Q_{\text{opt_P}}} = \frac{1}{\eta_{\text{opt_P}}^{0.8}} \quad (2)$$

¹ Williams

$$\frac{H_{opt_PAT}}{H_{opt_P}} = \frac{1}{\eta_{opt_P}^{1.2}} \quad (۳)$$

$$\eta_{opt_PAT} = \eta_{opt_P} \pm 0.02 \quad (۴)$$

در این روابط H_{opt_P} هد پمپ در شرایط بهینه، H_{opt_PAT} هد پمپ معکوس در شرایط بهینه با حدس اولیه، Q_{opt_P} دبی عبوری پمپ در شرایط بهینه، Q_{opt_PAT} دبی عبوری پمپ معکوس در شرایط بهینه با حدس اولیه، η_{opt_P} راندمان پمپ در شرایط بهینه، η_{opt_PAT} راندمان پمپ معکوس در شرایط بهینه (شارما، ۱۹۸۵). راندمان پمپ معکوس و پمپ را می‌توان تقریباً برابر در نظر گرفت. در این روابط دور پمپ و توربین در حالت بهینه یکسان است ولی در واقعیت دور پمپ و توربین یکسان نیست، در نتیجه نیاز به اصلاحیه وجود دارد. با استفاده از جدول (۱) می‌توان دور ژنراتور معادل دور موتور را به دست آورد و در روابط موجود برای به دست آوردن هد و دبی بهینه توربین در دور موردنظر قرار داده و پارامترها را محاسبه نمود.

جدول ۲. دور ژنراتور معادل دور موتور

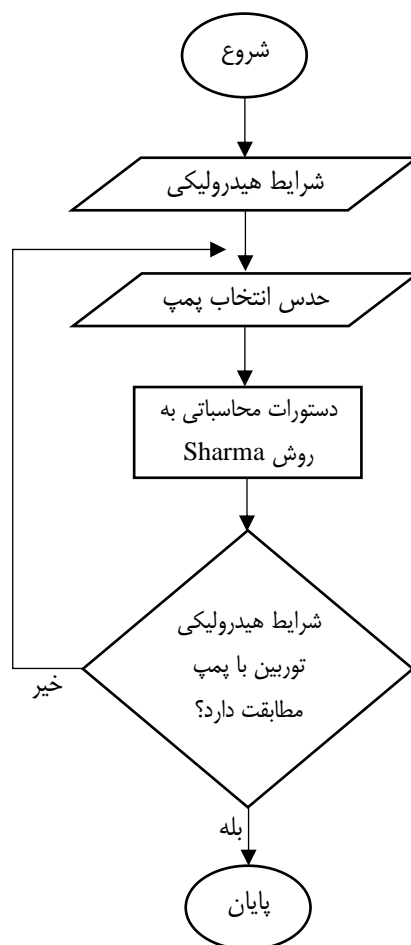
تعداد قطب‌ها	دور سنکرون	دور موتور القایی (rpm)	دور ژنراتور (rpm)
۲	۳۰۰۰	۲۹۰۰	۳۱۰۰
۴	۱۵۰۰	۱۴۵۰	۱۵۵۰
۶	۱۰۰۰	۹۵۰	۱۰۵۰

معادلات تشابه یک پمپ برای به دست آوردن هد و دبی بهینه پمپ معکوس در دور موردنظر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$H_{opt_PAT_NPAT} = \left(\frac{N_{PAT}}{N_P}\right)^2 \times H_{opt_P_NP} \quad (۶)$$

$$Q_{opt_PAT_NPAT} = \left(\frac{N_{PAT}}{N_P}\right) \times Q_{opt_P_NP} \quad (۷)$$

در این روابط $Q_{opt_P_NP}$ دبی بهینه پمپ در دور موتور موجود، $H_{opt_P_NP}$ هد بهینه پمپ در دور موجود، $Q_{opt_PAT_NPAT}$ دبی بهینه پمپ معکوس در دور ژنراتور موردنظر، N_P دور موتور موجود پمپ، $H_{opt_PAT_NPAT}$ هد بهینه پمپ معکوس در دور ژنراتور موردنظر و N_{PAT} دور ژنراتور دلخواه PAT هستند. با این روابط می‌توان مشخصه یک پمپ را با سرعت دورانی دلخواه با در دست داشتن مشخصه مربوط به یک سرعت دورانی دیگر ترسیم کرد. در شکل (۳) مراحل انتخاب PAT در قالب یک فلوجارت آورده شده است.



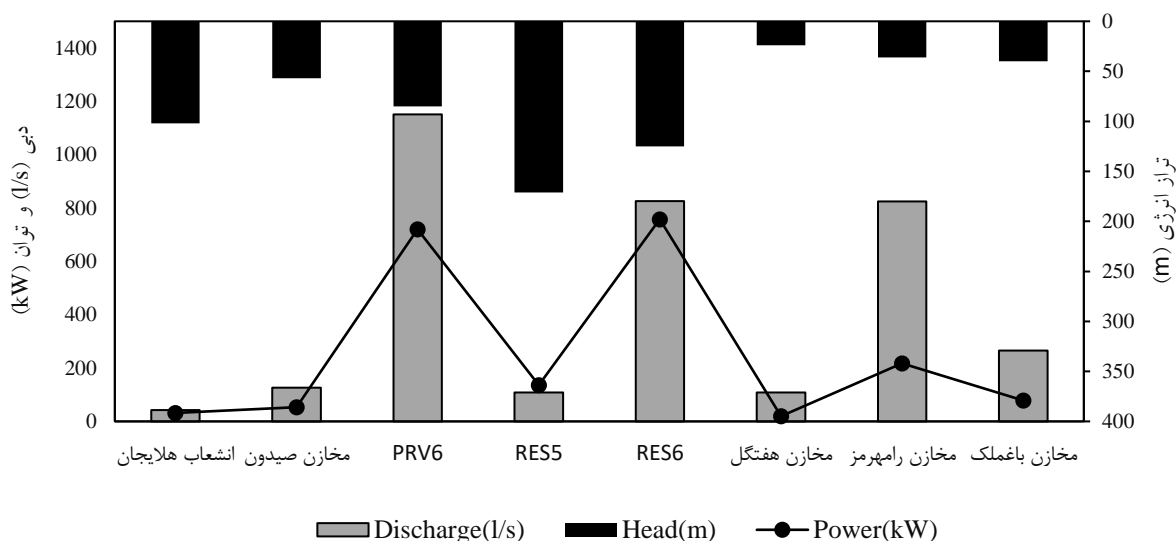
شکل ۳. فلوچارت انتخاب پمپ مناسب جهت پمپ معکوس

یافته ها

بر اساس روش ارائه شده در این تحقیق، نوع پمپ معکوس و میزان توان تولیدی برای هر کدام از نقاط دارای پتانسیل تولید انرژی محاسبه گردید که در جدول (۳) ارائه شده است. قابل ذکر است که جهت انتخاب پمپ‌های موردنیاز از کاتالوگ‌های دو شرکت پمپیران و نوید سهند استفاده شده است. راندمان کلیه پمپ‌ها برابر با ۷۵٪ در نظر گرفته شد. حداکثر توان تولیدی مربوط به مخزن تعادلی RES6 و شیر فشارشکن PRV6 به ترتیب با ۷۵۸/۷ و ۷۱۹/۵ کیلووات می‌باشد. مخزن تعادلی RES6 دارای حداکثر هد و شیر فشارشکن PRV6 دارای بیشترین مقدار دبی در میان کلیه نقاط مورد مطالعه بوده‌اند. کمترین توان تولیدی نیز مربوط به انشعاب هالایجان با ۳۲ کیلووات می‌باشد که میان تمامی نقاط مورد مطالعه داری کمترین مقدار دبی بوده است. جهت نشان دادن تاثیر هم‌زمان دبی و میزان هد بر توان تولیدی، مشخصات هیدرولیکی کلیه نقاط مورد مطالعه به همراه میزان توان تولید شده در شکل (۴) ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج محاسبات صورت گرفته در نقاط دارای پتانسیل تولید انرژی

نقطه مورد نظر	توان تولیدی (kW)	نوع پمپ	تعداد پمپ مورد نیاز
انشعاب هلاچجان	۳۲	WKL100/3	۱
مخازن صیدون	۵۳/۵	WKL150	۱
PRV6	۷۱۹/۵	DSP250-480A	۳
RES5	۱۳۶/۱	WKL150/3	۱
RES6	۷۵۸/۷	DSP250-480A	۲
مخازن هفتگل	۱۹/۵	DSP80-210A	۲
مخازن رامهرمز	۲۱۸/۵	DSP300-300A	۲
مخازن باغملک	۷۸/۲	DSP200-320A	۱



شکل ۴. مقادیر توان تولیدی در هر نقطه با توجه به میزان دبی و هد موجود در آن نقطه

هزینه‌های انرژی جایگزین

در این قسمت جایگزینی نیروگاه‌های برق-آبی کوچک پیشنهادی بر روی خط انتقال با مولدهای دیزل-ژنراتور دارای توان تولیدی مشابه، از لحاظ اقتصادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. از آنجایی که در بیشتر موارد استفاده از نیروگاه‌های کوچک محدود به مناطق روستایی دورافتاده‌ای است که از شبکه سراسری برق به دلایل اقتصادی و غیره تغذیه نمی‌شوند، لذا تولید انرژی الکتریکی با استفاده از مولدهای دیزل-ژنراتور به‌عنوان جایگزین مورد توجه قرار گرفته است. اطلاعات ارائه شده در جدول (۴) به‌عنوان اطلاعات پایه جهت ارزیابی اقتصادی مولدهای دیزل-ژنراتور مورد

استفاده قرار گرفته است. در این محاسبات بازده نیروگاه ۷۵٪ در نظر گرفته شده است. مجموع توان تولیدی توسط نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک با پمپ معکوس برابر با ۲۷۱۷/۲۹ کیلووات بوده که با در نظر گرفتن ۸۰۰۰ ساعت در سال برای یک دوره ۲۵ ساله برابر با ۳۰۲۴۰۰ مگاوات ساعت خواهد بود. با توجه به اینکه به ازای هر لیتر گازوئیل ۱۰/۹۶ کیلووات ساعت تولید می‌شود (وربانیچ و همکاران^۱، ۲۰۲۲)، میزان کل سوخت مورد نیاز برای دوره ۲۵ ساله برابر با ۲۷۶۰۰۰۰۰ لیتر خواهد بود. با در نظر گرفتن قیمت جهانی گازوئیل که حدود ۵/۰ \$ به ازای هر لیتر می‌باشد، هزینه سوخت مورد نیاز برای تولید انرژی معادل حدود ۱۳ میلیون و ۸۰۰ هزار دلار خواهد بود.

جدول ۴. اطلاعات پایه جهت ارزیابی اقتصادی مولدهای دیزل-ژنراتور

توضیحات	مقدار واحد	مقدار کل
پتانسیل تولیدی (کیلووات)		۲۷۱۷/۲۹
توان تولیدی (۷۵٪ پتانسیل)		۲,۰۳۸
زمان کارکرد سالانه (ساعت)		۸,۰۰۰
عمر مفید نیروگاه (سال)		۲۵
زمان کل کارکرد (ساعت)		۲۰۰,۰۰۰
توان تولیدی (کیلووات ساعت)		۳۰۲,۴۰۰,۰۰۰
مصرف سوخت (I)	۱,۱۰۳,۶۵۰ در سال	۲۷,۵۹۱,۲۴۱
قیمت گازوئیل (\$)	۰/۵	۱۳,۷۹۵,۶۲۰

ارزیابی اثرات محیط‌زیست

در این قسمت با جایگزینی نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک پیشنهادی بر روی خط آبرسانی شمال شرق خوزستان با مولدهای دیزل-ژنراتور دارای توان تولیدی مشابه، از لحاظ محیط زیستی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که در بیشتر موارد استفاده از نیروگاه‌های کوچک محدود به مناطق روستایی دورافتاده‌ای است که از شبکه سراسری برق به دلایل اقتصادی و غیره تغذیه نمی‌شوند، لذا تولید انرژی الکتریکی با استفاده از مولدهای دیزل-ژنراتور به‌عنوان جایگزین مورد توجه قرار گرفته است. اطلاعات ارائه شده جدول (۵) به‌عنوان اطلاعات پایه جهت ارزیابی محیط زیستی مولدهای دیزل ژنراتور مورد استفاده قرار گرفته است.

¹ Vrbanić

جدول ۵. اطلاعات پایه جهت ارزیابی زیست‌محیطی مولدهای دیزل-ژنراتور

شرح	توان تولیدی (kW)	انرژی جایگزین (گازوئیل) در طول ۲۵ سال	
		میزان سوخت (liter)	گاز کربنیک تولیدی (ton)
انشعاب هلاچجان	۳۲	۴۳۷۹۵۶	۱۱۷۷۱۳۴
مخازن صیدون	۵۳/۵	۷۳۲۲۰۸	۱۹۶۸۰۲۱
PRV6	۷۱۹/۵	۹۸۴۷۱۷۱	۲۶۴۶۷۱۲۹
RES5	۱۳۶/۱	۱۸۶۲۶۸۲	۵۰۰۶۴۹۹
RES6	۷۵۸/۷	۱۰۳۸۳۶۶۷	۲۷۹۰۹۱۱۹
مخازن هفتگل	۱۹/۵	۲۶۶۸۷۹	۷۱۷۳۱۶
مخازن رامهرمز	۲۱۸/۵	۲۹۹۰۴۱۹	۸۰۳۷۶۲۰
مخازن باغملک	۷۸/۲	۱۰۷۰۲۵۵	۲۸۷۶۶۲۲

در این محاسبات بازده نیروگاه‌ها ۷۵٪ در نظر گرفته شده است با در نظر گرفتن عمر مفید ۲۵ سال و زمان کارکرد سالانه ۸۰۰۰ ساعت، میزان سوخت جایگزین برای هر کدام از نقاط پیشنهادی در جدول (۵) محاسبه شده است. علاوه بر این با در نظر گرفتن تولید ۲/۶۸ کیلوگرم آلایندگی CO₂ برای هر لیتر سوخت دیزل (هوپ و همکاران^۱، ۲۰۱۶)، میزان کل گاز CO₂ تولیدی برای سوخت جایگزین نیروگاه‌ها در طول دوران بهره‌برداری در این جدول ارائه شده است. بر اساس جدول (۵)، نیروگاه‌های پیشنهادی قادر به تامین ۱۵۱۲ کیلو وات توان تولیدی می‌باشد. برای تولید این میزان انرژی در طول ۲۵ سال بیش از ۲۷ میلیون لیتر سوخت استفاده خواهد شد، که علاوه بر هزینه‌ی تهیه سوخت، آلودگی شدید زیست‌محیطی نیز ایجاد خواهد کرد. با توجه به آنکه هر لیتر سوخت دیزل ۲/۶۸ گرم بر لیتر آلایندگی CO₂ تولید می‌کند (CO₂ سمی نبوده و فقط در افزایش دمای زمین مؤثر است که البته سوخت دیزل گازهای آلایندگی سمی مانند ترکیبات NOx و SOx را نیز تولید می‌کند) در نهایت مقدار CO₂ تولیدی حدود ۷۴ هزار تن خواهد بود.

بحث

در این تحقیق سعی گردید تا در ابتدا نقاط دارای پتانسیل تولید انرژی در طرح آبرسانی به شهرها و روستاهای شمال شرق خوزستان تعیین گردد که بر اساس بررسی‌های صورت گرفته هشت نقطه شامل انشعاب هلاچجان، مخازن صیدون، شیر فشارشکن PRV6، مخزن تعادلی RES5، مخزن تعادلی RES6، مخازن هفتگل، مخازن رامهرمز و مخازن باغملک به عنوان نقاط دارای پتانسیل استفاده از پمپ معکوس انتخاب شدند. در مرحله بعد از روش شارما جهت تعیین نوع پمپ مورد نیاز جهت طراحی نیروگاه برق‌آبی پمپ معکوس استفاده شد.

نتیجه‌گیری

محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد که توان تولیدی توسط هشت نقطه انتخابی برابر با برابر با ۲/۷ مگاوات بوده که با در نظر گرفتن یک دوره ۲۵ ساله توانی برابر با ۳۰۲۴۰۰ مگاوات ساعت ارائه خواهد داد. برای تولید چنین توانی نیاز است تا ۲۷،۵۹۱،۲۴۱ لیتر گازوئیل سوخته شود که علاوه بر هزینه بالای آن، اثرات زیست‌محیطی مخربی به دنبال دارد. با در نظر گرفتن قیمت جهانی گازوئیل که حدود ۵/۰\$ به ازای هر لیتر

¹ Hoppe et al

می‌باشد، هزینه سوخت مورد نیاز برای تولید انرژی فوق معادل حدود ۱۳ میلیون و ۸۰۰ هزار دلار خواهد بود. از اثرات زیست محیطی استفاده از دیزل می‌توان به تولید بالای گاز CO₂ اشاره کرد که محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد سوخت مقدار گازوئیل اشاره شده، حدود ۷۴ هزار تن گاز CO₂ تولید خواهد کرد که می‌تواند اثرات مخربی بر محیط زیست داشته باشد. استفاده از پمپ معکوس در کشورهای توسعه یافته بسیار گسترش پیدا کرده است. اغلب نیروگاه‌ها بر روی سیستم‌های توزیع آب احداث شده‌اند که از لحاظ اقتصادی در مقایسه با دیگر روش‌های استحصال انرژی مقرون به‌صرفه‌تر بوده‌اند. یکی از تجربه‌های موفق استفاده از پمپ معکوس، شهر دارتمور در انگلستان می‌باشد. نیروگاه‌ها بر روی دو رودخانه یلم^۱ و ارم^۲ قرار گرفته و توانی معادل ۳۵ کیلو وات تولید می‌کنند. در کشور آلمان ۸ نیروگاه کوچک پمپ معکوس به صورت موازی ساخته شده و قادر به تولید توانی معادل با ۳۰۰ کیلو وات می‌باشند (اسپدالتی و همکاران^۳، ۲۰۲۱). از دیگر کشورهایی که تجربه موفق در زمینه استفاده از پمپ معکوس داشته‌اند می‌توان به کشورهای اتریش، سوئیس و اسپانیا اشاره نمود. در کشور اسپانیا سیستم پمپ معکوس ساخته شده در شهر مورسیا قادر به تولید توان ۱۰۰ کیلو وات می‌باشد (پرزگارسیا و همکاران^۴، ۲۰۱۰).

منابع

زمانی، مهدی، زمانی، هادی، و مرتضوی، داوود. (۱۴۰۰). امکان‌سنجی اجرای نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بر روی خطوط انتقال آب. سازمان آب و برق خوزستان.

محمدیان، عبدالرضا، خالصی دوست، عبدالله، و مرادی، علی رضا. (۱۳۹۴). آنالیز اقتصادی نیروگاه برق‌آبی کوچک خط انتقال چشمه روزیه سمنان و مقایسه با نیروگاه گازی مشابه. کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی، تهران. <https://civilica.com/doc/460595>.

مهندسين مشاور پارس جویاب. (۱۳۹۵). بازنگری مطالعات طرح آبرسانی به شهرها و روستاهای شمال شرق خوزستان. خوزستان.

نوربخش سید احمد، و درخشان، شهرام. (۱۳۸۴). تحلیل رفتار پمپ و ارائه بهترین نقطه کارکرد آن در حالت چرخش به‌عنوان توربین. نشریه دانشکده فنی، ۳۹ (۶)، ۷۶۵-۷۷۱. <https://www.sid.ir/paper/14060/fa>.

References

- Binama, M., Su, W. T., Li, X. B., Li, F. C., Wei, X. Z., & An, S. (2017). Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 148-179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.071>
- Carravetta, A., Antipodi, L., Golia, U., & Fecarotta, O. (2017). Energy saving in a water supply network by coupling a pump and a pump as turbine (PAT) in a turbopump. *Water*, 9(1), 62. <https://doi.org/10.3390/w9010062>
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., Morani, M. C., & Ramos, H. M. (2022). A new low-cost technology based on pump as turbines for energy recovery in peripheral water networks branches. *Water*, 14(10), 1526. <https://doi.org/10.3390/w14101526>
- Carravetta, A., Derakhshan, S., & Ramos, H. (2018). *Pumps as turbines: Fundamentals and applications*. Springer International Publishing. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-67507-7>
- Couzinat, A., Gros, L., & Pierrat, D. (2013). Characteristics of centrifugal pumps working in direct or reverse mode: focus on the unsteady radial thrust. *International Journal of Rotating Machinery*. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/279049>

¹ Yealm

² Erme

³ Spedaletti et al

⁴ Pérez García et al

- Derakhshan, S., & Nourbakhsh, A. (2008). Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation. *Experimental thermal and fluid science*, 32(8), 1620-1627. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.05.004>
- Hoppe, W., Bringezu, S., & Thonemann, N. (2016). Comparison of global warming potential between conventionally produced and CO₂-based natural gas used in transport versus chemical production. *Journal of Cleaner Production*, 121, 231-237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.042>
- Lydon, T., Coughlan, P., & McNabola, A. (2017). Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and selection methodologies using three pump-as-turbine case studies. *Renewable Energy*, 114, 1038-1050. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.120>
- Mitrovic, D., Novara, D., García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J. A., & Mc Nabola, A. (2022). Prediction of global efficiency and economic viability of replacing PRVs with hydraulically regulated pump-as-turbines at instrumented sites within water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(1), 04021089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001483](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001483)
- Mohammadian, A.R., Khalsi Dost, A., & Moradi, A.R. (2014). Economic analysis of the small hydroelectric power plant of Cheshme Rozieh Semnan transmission line and comparison with a similar gas power plant. *International Conference on Technology and Energy Management*, Tehran. <https://civilica.com/doc/460595> [In Persian]
- Nourbakhsh S.A., & Derakhshan, S. (2005). Analyzing the behavior of the pump and presenting its best operating point in the rotation mode as a turbine. *Journal of the College of Engineering Technical Faculty*, 39 (6), 765-771. <https://www.sid.ir/paper/14060/fa> [In Persian]
- Pars Joyab Consulting Engineers. (2015). Revision of water supply plan studies to the cities and villages of northeastern Khuzestan. Khuzestan. [In Persian]
- Pérez García, J., Cortés Marco, A., & Nevado Santos, S. (2010). Use of centrifugal pumps operating as turbines for energy recovery in water distribution networks. Two case study. *Advanced Materials Research*, 107, 87-92. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.107.87>
- Rossi, M., Righetti, M., & Renzi, M. (2016). Pump-as-Turbine for energy recovery applications: the case study of an aqueduct. *Energy Procedia*, 101, 1207-1214. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.163>
- Samora, I., Manso, P., Franca, M. J., Schleiss, A. J., & Ramos, H. M. (2016). Energy recovery using micro-hydropower technology in water supply systems: The case study of the city of Fribourg. *Water*, 8(8), 344. <https://doi.org/10.3390/w8080344>
- Spedaletti, S., Rossi, M., Comodi, G., Salvi, D., & Renzi, M. (2021). Energy recovery in gravity adduction pipelines of a water supply system (WSS) for urban areas using Pumps-as-Turbines (PaTs). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101040>
- Stepanoff, A. J. (1957). *Centrifugal and axial flow pumps: Theory, Design, and Application*, 2nd edition. Krieger publishing company.
- Vrbanić, F., Miletić, M., Tišljarić, L., & Ivanjko, E. (2022). Influence of variable speed limit control on fuel and electric energy consumption, and exhaust gas emissions in mixed traffic flows. *Sustainability*, 14(2), 932. <https://doi.org/10.3390/su14020932>
- Williams, A. (2003). *Pumps as turbines: a user's guide*. ITDG Publishing. <https://practicalactionpublishing.com/pdf/book/1745/9781780441320.pdf>
- Williams, A. A. (1994). The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 208(1), 59-66. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1994_208_009_02
- Yang, S. S., Derakhshan, S., & Kong, F. Y. (2012). Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. *Renewable Energy*, 48, 507-513. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.002>

- Yang, S. S., Kong, F. Y., Jiang, W. M., & Qu, X. Y. (2012). Effects of impeller trimming influencing pump as turbine. *Computers & Fluids*, 67, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.07.009>
- Zamani, M., Zamani, H., & Mortazavi, D. (2021). Feasibility of implementing small hydropower plants on water transmission lines. Khuzestan Water and Power Authority. [In Persian]