



صفحه	نویسندگان	عنوان
۱	ثمر مرتضوی، فاطمه محمدیاری و مریم ابراهیمیان	ارزیابی آلودگی فلزات سنگین و پهنه بندی کیفی رسوبات رودخانه قره سو با استفاده از شاخص های ارزیابی ریسک اکولوژیک و ژئوشیمیایی مولر
۱۵	بهاره مهرموسوی، رسول قبادیان و میترا جوان	شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد بر مبنای حل عددی معادله های آب های کم عمق در مختصات منحنی الخط
۳۱	مینو کیانی نژاد، محمد ذونعمت کرمانی و سودابه گلستانی کرمانی	بررسی آزمایشگاهی تاثیر فاصله جت های هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب بر کارایی روش جت چهارگانه - مکش آبی
۴۷	محمدکاظم شعبانی، جهانگیر عابدی کوپایی، سید سعید اسلامیان و سید علیرضا گوهری	تأثیر تغییر الگوی کشت و بهبود راندمان سیستم های آبیاری بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت کوار)
۶۵	افشین محجوبی و سید محمود کاشفی پور	بررسی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست
۷۷	شیدا کاکاوند، حامد مازندرانی زاده و هادی اعتدالی رضانی	باز تخصیص بهینه ی آب در میان مصرف کنندگان بخش کشاورزی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ژنتیک - فازی با هدف افزایش درآمد و عدالت در توزیع (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین)
۹۵	ویدا آتشی، مهدی قمشی و مایکل برنیتساس	تأثیر فاصله بر توان مهار شده حاصل از نوسانات دو سیلندر با آرایش پشت سرهم
۱۱۱	مجتبی احمدی زاده و صفر معروفی	تخمین عدم قطعیت در واسنجی فرآیند بارش - رواناب روزانه با استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته در مدل HBV

مدیر مسؤول: سعید برومندنسب

سردبیر: سید محمود کاشفی پور

مدیر داخلی: مهدی دریایی

تایپ و صفحه آرایی: ندا یزدانی

ویراستار: ندا یزدانی

هیأت تحریریه:

استاد	آخوندعلی، علی محمد	استاد	هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
استاد	حیدرپور، منوچهر	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
استاد	زندپارسا، شاهرخ	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
استاد	قمشی، مهدی	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
استاد	کاشفی پور، سید محمود	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
استاد	لیاقت، عبدالمجید	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران
استاد	حسین زاده دلیر، علی	استاد	گروه مهندسی آب- دانشکده کشاورزی- دانشگاه تبریز.
استاد	ناصری، عبد علی	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
استاد	استفانو پالیارا	استاد	گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیزا، ایتالیا
دانشیار	لای سای هین	دانشیار	گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مالایا، مالزی.
استاد	رضا احمدیان	استاد	گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاردیف، انگلستان
دانشیار	هنک ریتزما	دانشیار	گروه مدیریت منابع آب، گروه علوم محیط زیست، دانشگاه واگنینگن و پژوهش، هلند

صاحب امتیاز: دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

کلیه مکاتبات از طریق سردبیر مجله به نشانی اهواز - دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دفتر مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری تلفن ۰۹۰۴۶۳۰۵۶۴۸ و دورنگار ۳۳۶۵۶۷۰۳ (۰۶۱) صورت گیرد.

این مجله در سایت <http://jise.scu.ac.ir> نمایه می شود.

نشانی پست الکترونیکی: JISE.Water@scu.ac.ir و JISE.Water@yahoo.com

مجوز انتشار از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی ۱۲۴/۱۰۳۶۲ به تاریخ ۷۷/۱۰/۸ و مجوز دفتر بررسی نشریات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ۳/۱۱/۱۲۶۴ به تاریخ

۸۸/۷/ ۲۹ برای مجله علوم و مهندسی آبیاری

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اسامی بررسی کنندگان مقالات این شماره

مهدی	زینی وند	سید امین	اصغری پری
میثم	سالاری جزی	محمد	بهرامی یاراحمدی
محمد رضا	شریفی	عباس	پارسایی
مجید	شریفی پور	محسن	پوررضا بیلندی
علی	شهیدی	میترا	چراغی
جهانگیر	عابدی کوپایی	محمد	خرمیان
حمید	عبدل آبادی	مهدی	دریای
علی	عصاره	لاله	دیوبند
عبدالعلی	گیلانی	مهدی	ذاکری نیا
بابک	لشکرآرا	فریدون	رادمنش
محمد امین	مداح	عباس	رضایی استخرویه
		محمد رضا	زایری

پیشگفتار

سپاس و ستایش پروردگار متعال که بر ما منت گذاشت تا با همت و پشتکار اعضای هیأت تحریریه، کارکنان مجله، همکاری داوران و ویراستاران، جلد ۴۶، شماره ۱ مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری با خرسندی فراوان به علاقه‌مندان علوم مهندسی آب تقدیم گردد.

مجله علوم و مهندسی آبیاری یک سابقه حدود ۴۳ ساله دارد و وزارت علوم و تحقیقات و فناوری مجوز این مجله علمی- پژوهشی در شکل حاضر در سال ۱۳۸۸ صادر کرد. این مجله در سایت های بین المللی ISC و Doaj نیز نمایه شده است. امتیاز این مجله متعلق به دانشگاه شهید چمران اهواز است.

هیأت تحریریه مجله علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری امیدوار است که همکاران محترم در کلیه مراکز علمی و پژوهشی با ارسال مقالات ارزنده علمی و کاربردی خود در تخصص‌های مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، منابع آب، سازه های آبی، هیدرولیک رسوب، محیط زیست آبی، آبخیزداری، آب- هواشناسی (هیدرومتئورولوژی)، هیدرولوژی، آب های زیرزمینی، اقتصاد آب و علوم وابسته به آنها، با این مجله همکاری نموده و در فراهم ساختن زمینه‌ی استمرار و پیوستگی چاپ و انتشار مجله و ارائه خدمات بیشتر و ارزنده تر در نشر علوم مهندسی آب و آبیاری ما را همراهی نمایند. از کلیه بررسی کنندگان مقالات و صاحب نظران که در فرصت های گوناگون با ارائه نظرات اصلاحی خود در بهبود کیفیت مجله نقشی به عهده گرفته اند، صمیمانه سپاسگزاری می نماید.

از همکاران گرامی که نتیجه مطالعات و تحقیقات خود را جهت چاپ و انتشار به این مجله ارسال می نمایند تقاضا می شود که ضوابط تعیین شده (راهنمای تهیه مقاله) را دقیقاً رعایت فرمایند. توجه به ضوابط مجله و رعایت آن از جانب صاحبان مقاله، ضمن جلوگیری از دوباره کارهای زیاد و وقت گیر، موجب تسریع و بهبود کیفیت چاپ مقالات نیز خواهد گردید.

سردبیر

صفحه	عنوان
۱	ارزیابی آلودگی فلزات سنگین و بهنه بندی کیفی رسوبات رودخانه قره سو با استفاده از شاخص های ارزیابی ریسک اکولوژیک و ژئوشیمیایی مولر ثمر مرتضوی، فاطمه محمدباری و مریم ابراهیمیان
۱۵	شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد بر مبنای حل عددی معادله های آب های کم عمق در مختصات منحنی الخط بهاره مهرموسوی، رسول قبادیان و میترا جوان
۳۱	بررسی آزمایشگاهی تاثیر فاصله جت های هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب بر کارایی روش جت چهارگانه - مکش آبی می نو کیانی نژاد، محمد ذونعمت کرمانی و سودابه گلستانی کرمانی
۴۷	تأثیر تغییر الگوی کشت و بهبود راندمان سیستم های آبیاری بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت کوار) محمد کاظم شعبانی، جهانگیر عابدی کوپایی، سید سعید اسلامیان و سید علیرضا گوهری
۶۵	بررسی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست افشین محجوبی و سید محمود کاشفی پور
۷۷	باز تخصیص بهینه ی آب در میان مصرف کنندگان بخش کشاورزی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ژنتیک - فازی با هدف افزایش درآمد و عدالت در توزیع (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین) شیدا کاکاوند، حامد مازندرانی زاده و هادی اعتدالی رضانی
۹۵	تأثیر فاصله بر توان مهار شده حاصل از نوسانات دو سیلندر با آرایش پشت سرهم ویدا آتشی، مهدی قمشی و مایکل برنیتساس
۱۱۱	تخمین عدم قطعیت در واسنجی فرآیند بارش - رواناب روزانه با استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته در مدل HBV مجتبی احمدی زاده و صفر معروفی

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of heavy metals pollution and qualitative zonation Sediment of Qarasu River using the indicators of ecological and geochemical risk assessment of Muller

S. Mortazavi^{1*}, F. Mohammadyari² and M. Ebrahimian³

1-Corresponding Author, Assistant professor department of environment, faculty of Natural resources and environment, Malayer University (s.mortazavi@malayeru.ac.ir).*

2- Phd Student of Evaluation and land use planning, faculty of Natural resources and environment, Malayer University.

3- Phd Student of Evaluation and land use planning, faculty of Natural resources and environment, Malayer University.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 November 2020

Revised: 13 September 2021

Accepted: 15 September 2021

Keywords:

Heavy metals, Sediment Quality, Interpolation, Ghareh Su River.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mortazavi, S., Mohammadyari, F., Ebrahimian, M. (2023). 'Evaluation of heavy metals pollution and qualitative zonation Sediment of Qarasu River using the indicators of ecological and geochemical risk assessment of Muller', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 1-13. doi: 10.22055/jise.2018.23072.1640.

Introduction

In recent years, the accumulation of heavy metals in the environment mostly due to its adverse impact on human health and wildlife has become a main concern (Al-Yemni et al., 2011). Meanwhile, sediments are the main storing heavy metals accumulations and serve as tools for assessing the status of river pollution (Taghnia Hejabi et al., 2010). At the same time, to using geographic information systems and Geostatistic methods is desirable. Many studies have been conducted by researchers such as Mortazavi and Saberi nasab (2017) in Meiqan, and Islam et al. (2015) in the water and sediments of the Korotoa River in Bangladesh. The purpose of this study was to investigate the concentration of lead, zinc, copper and chrome metals in surface sediments of GharehSo River and zoning of sediments of the region with Potential Ecological Risk Index and Muller's Geo-accumulation Index.

Methodology

The Ghareh So river is located in the Kermanshah city in geographical coordinates 2° 47' to 7° 47' E and 4° 18' to 34° 25'. In the spring 2017, according to land use of the surrounding area of GharehSo River, it was divided into 6 sections and from each part 4 samples were collected in a three plots. After drying, the sediment samples were digested with a ratio of 1: 3 for three hours with a combination of 65% nitric acid (Merck, Germany) and 70% perchloric acid (Merck, Germany) (Madrid et al., 2008). The contents of each tube were filtered from Wattman No. 1 paper, and then distilled with 25 ml of deionized water. Concentration of metals in the samples was determined by the Analytic Jena atomic absorption spectrometer ContrAA 700.

Kriging method: The Kriging method, which is called the best unbiased linear estimator (Journel and Huijbregts, 1987), is an advanced interpolation method suitable for data that has a localized trend.

Cokriging method: When a variable is not sufficiently sampled and based on which the estimate cannot be made with a desired accuracy, the Cokriging method is used (Hasani Pak, 2005). Two

methods of kriging and Cokriging are compared with the relations (1 and 2) (Webster and Oliver, 2000).

$$ME = \frac{1}{N} \sum_i^N = 1[Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2} \quad (2)$$

Potential Ecological Risk Index: Potential Ecological Risk Index of aqueous sediments is expressed as follows (Hakanson, 1980).

$$RI = \sum_{i=1}^m Er \quad (3)$$

ER: Represents ecological risk potential of each of the elements and the RI represents the ecological risk potential of the total metals

Muller's Geo-accumulation Index: The sediment contamination rate is calculated using Muller's Geo-accumulation Index molar (Igeo) according to equation (4) and table (2):

$$I_{geo} = \log_2[(C_n / (1.5 \times B_n))] \quad (4)$$

C_n: pollutant concentration in sediments with a diameter of less than 63 microns per milligram per kilogram

B_n: pollutant concentration in the shale rock or the initial concentration of the elements when no contamination was present in milligrams per kilogram

Findings

The results of heavy metal measurements in surface sediments samples of *GharehSo River* bed is presented in Table (1).

Table 1- Average, maximum and minimum values of heavy metals measured in Qarasu river

Metals	Average (µg/g)	Maximum (µg/g)	Minimum (µg/g)	Standard deviation (µg/g)	Global average of precipitation (µg/g)
Cu	41.2	122	17.1	24.7	33
Zn	21.6	67.3	1.4	19.5	95
Cr	12.4	24.1	1	6.3	72
Pb	20.3	40.7	13.2	7.5	19

According to the data, it can be said that copper and lead metals have higher average values than global mean sediments and probability of contamination of Qarasu River sediments with these metals. In the concentration distribution of heavy metals concentration, the results of the Cokriging method with Kriging with the help of RMSE and MAE criteria that indicate degree of accuracy revealed that the Kriging method was superior to the Cokriging method.

According to the zoning results, it can be said that the eastern part of the Qarasu River has more amounts of copper, zinc, chromium and lead metals. Based on existing land uses, this part of the river is affected more than other parts of urban and agricultural wastewater. Also, parts of the southeast of the river showed large amounts of copper. In addition, concentration of chromium metal in most parts of river has high values.

The results of computing geochemical index for classification of sediments in terms of the severity of contamination with elements, was showed in table (2).

Table 2- Calculated values of Muller index and classification of the sediments of the Qarasu River in terms of the intensity of pollution with the evaluated heavy elements

Igeo	Area Mean	Degree of pollution	Average severity of pollution in all stations
Cu	0.1	1	Non-polluted – moderate polluted
Zn	-2.38	0	Non-polluted
Cr	-3.6	0	Non-polluted
Pb	-0.76	0	Non-polluted

The severity of the contamination with heavy elements is evaluated. Figure (1) shows the qualitative zoning of Qarasu river sediments using the ecological risk and the geochemical index.

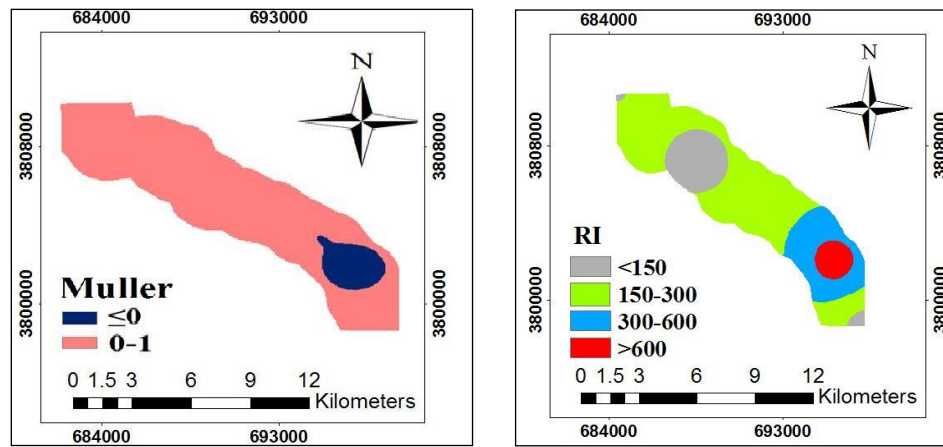


Fig. 1- Qualitative zoning of Qarasu river sediments using Muller ecological and geochemical risk indicators

Conclusion

In the present study, the distribution pattern of toxic metals was modeled using geo-statistics methods. Ultimately, simple kriging was selected as the best estimate with the least error. Taheri et al. (2014) also selected Kriging as their best model for drawing the pattern of toxic metals dispersion.

The results of calculating the contamination severity of Qarasu river sediments using the Muller index indicated that the sediments had a moderate severity of contamination of lead, chromium and zinc elements in non-polluted floor, which is consistent with results of Mortazavi and Saberinasab (2017). However, average severity of copper element contamination in this study was categorized in non-contaminated to average contaminated soils. Also, the results of ecological risk index showed that value of this index varied from 5.92 to 198.2. In total, the value of this index was 317.4, which is considered to be at the ecological risk level. Also, the ecological risk index zoning map showed that the eastern parts of the river have more contamination than other parts of the river. In addition to zoning and Hot Spots analysis, each of the elements studied also showed eastern part as the most polluted part. This also confirms the growing presence of human pollution sources and agricultural drainage in this Sector.

Acknowledgements

This manuscript was supported by Corresponding Author, in Malayer University (Grant No. 84/5-330).

References

- 1- Al-Yemni, M.N., Sher, H., El-Sheikh, M.A. and Eid, E.M., 2011. Bioaccumulation of nutrient and heavy metals by *Calotropis procera* and *Citrullus colocynthis* and their potential use as contamination indicators.

Scientific Research and Essays, 6(4), pp.966-976.

- 2- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8), pp.975-1001.
- 3- Islam, M.S., Ahmed, M.K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M. and Islam, M.K., 2015. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, pp.282-291.
- 4- Journel, A.G. and Huijbregts, C.J., 1978. *Mining geostatistics*. Academic press.
- 5- Madrid, F., Biasioli, M. and Ajmone-Marsan, F., 2008. Availability and bioaccessibility of metals in fine particles of some urban soils. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 55(1), pp.21-32.
- 6- Mortazavi, S., and Saberinasab, F., 2017. Zoning concentration and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Mighan wetland. *Ecopersia Journal*. 4(2),pp.533-545.
- 7- Taghinia, H.A., Basavarajappa, H.T. and Qaid, S.A., 2010. Heavy metal pollution in Kabini River sediments. *Enternational Journal of Reasearch*, 4, pp.629-636.
- 8- Taheri, M., Riyahibakhtyari, A., Naimi, B., and Gholamalifard, M., 2015. Determination of concentration and distribution of spatial changes of mercury, lead and cadmium in surface sediments of Mangrove forests using GIS. *Environmental Science*. 40(2), pp. 297-31.
- 9- Webster, R. and Oliver, M.A., 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین و پهنه‌بندی کیفی رسوبات رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ریسک اکولوژیک و ژئوشیمیایی مولر

ثمر مرتضوی^{۱*}، فاطمه محمدیاری^۲ و مریم ابراهیمیان^۳

۱- نویسنده مسئول، استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست دانشگاه ملایر s.mortazavi@malayeru.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری آمایش محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست دانشگاه ملایر.

۳- دانشجوی دکتری آمایش محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست دانشگاه ملایر.

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸

چکیده

در اکوسیستم‌های آبی، رسوبات بهتر از ستون آب نشان‌گر وضعیت محیط و منبع اصلی برای ذخیره‌ی آلاینده‌ها می‌باشد. در مطالعه حاضر برای بررسی آلودگی فلزات سنگین رودخانه قره‌سو، از رسوبات آن نمونه‌برداری و پس از هضم اسیدی نمونه‌ها، میزان عناصر با دستگاه جذب اتمی مورد سنجش قرار گرفت و با استفاده از شاخص ارزیابی ریسک اکولوژیک، شاخص ژئوشیمیایی مولر، پهنه‌بندی و تحلیل‌های آماری وضعیت آلودگی فلزات سنگین در رودخانه قره‌سو ارزیابی گردید. نتایج شاخص مولر نشان داد رسوبات رودخانه از نظر آلودگی به عنصرهای روی، سرب و کروم در طبقه غیر آلوده و از نظر آلودگی به فلز مس با درجه آلودگی یک، در طبقه از غیر آلوده تا آلودگی متوسط قرار می‌گیرد. همچنین رودخانه از نظر آلودگی فلزات سنگین در طبقه ریسک اکولوژیکی در خور ملاحظه قرار و احتمال آلودگی به مس و سرب در منطقه وجود دارد. در نهایت با توجه به نتایج آزمون دانکن و طبق نقشه پهنه‌بندی با درون‌یابی لایه‌ها با دو روش کوکریجینگ و کریجینگ و تحلیل نقاط داغ هر کدام از عناصر مورد بررسی، بخش شرقی با عمده‌ترین کاربری‌های صنعتی، کشاورزی و شهری به‌عنوان آلوده‌ترین قسمت مشخص گردید که به‌منظور کنترل و جلوگیری از آلودگی بیشتر به تمهیدات کارآمدی نیاز دارد.

کلید واژه‌ها: فلزات سنگین - کیفیت رسوب - درون‌یابی - رودخانه قره‌سو.

مقدمه

به مراتب بالاتر می‌باشد. این موضوع باعث شده تا رسوبات بستر به‌عنوان ابزاری برای تخمین وضعیت آلودگی رودخانه‌ها به‌کار گرفته شوند (Taghinia et al., 2010). از آنجایی که برای ارزیابی وضعیت آلودگی، نمونه‌برداری امری ضروری است که به‌دلیل وسعت مکانی و مشکلات محدودیت‌های بسیاری را در بر دارد، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (Geographic System Information) و روش‌های زمین آمار (Geostatistic) مطلوب است. در این زمینه مطالعه‌های مختلفی توسط محققان انجام شده است. Jamshidi Zanjani و Saeedi (2013) رسوبات سطحی تالاب انزلی را با شاخص‌های سنجش آلودگی فلزات سنگین پهنه‌بندی کردند. نتایج شاخص‌های ریسک اکولوژیک و درجه‌ی آلودگی اصلاح شده بیانگر وضعیت آلودگی متوسط و ریسک اکولوژیکی بالا در مناطق شرقی و جنوب شرقی تالاب انزلی بود. Fataee و Ghasem Pour (2014) به‌منظور بررسی میزان فلزات سنگین در آب و رسوب ماهیان رودخانه قره‌سو، از چهار ایستگاه نمونه‌برداری انجام دادند. نتایج نشان داد که این فلزات در تمام ماتریس‌ها وجود دارد و فلزات مس، روی و آهن به‌صورت تجمع زیستی در بافت ماهیان وجود دارد. در این بررسی میزان روی و آهن از مقدار بسیار بالایی برخوردار بودند که

افزایش بیش از حد جمعیت و صنعتی شدن جوامع به‌ویژه از نیمه دوم قرن بیستم باعث پیدایش مشکلات و مسائل جدیدی در آلودگی محیط‌زیست شده است (Vukovic et al., 2011). فلزات سنگین به‌دلیل سمیت، پایداری و عدم تجزیه‌پذیری یکی از گروه‌های اصلی و خطرناک در بین آلاینده‌ها می‌باشند. تجمع فلزات سنگین در محیط زیست به‌دلیل تأثیری که بر سلامتی انسان و حیات وحش دارد در سال‌های اخیر تبدیل به یک مسأله نگران‌کننده شده است (Al-Yemni et al., 2011). منابع عمده‌ی ورود آلودگی فلزات احتراق سوخت‌های فسیلی، معدن‌کاری، زایدات شهری و صنعتی، فاضلاب، کودها و آفت‌کش‌ها به‌شمار می‌روند. میزان آلودگی محیط‌های آبی به آلاینده‌ها می‌تواند توسط تحلیل آب، رسوبات و موجودات دریایی تعیین شود (Veerasingam et al., 2010). در این میان رسوبات منبع اصلی برای ذخیره‌ی فلزات سنگین می‌باشند و توسط آبزیان به زنجیره غذایی راه می‌یابند (Akpan and Thompson, 2013). کیفیت مطالعه رودخانه‌ها از نظر فلزات سنگین به‌علت غلظت بسیار کم و در نتیجه دقت پایین اندازه‌گیری آن‌ها در آب مشکل است، در حالی که غلظت عناصر در رسوبات

تا ۳۴ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی در شهر کرمانشاه قرار دارد، شکل (۱). سرچشمه اصلی این رودخانه سراب روانسر واقع در ۵۰ کیلومتری شمال غرب کرمانشاه می‌باشد. این رودخانه با جهت شمال غربی به جنوب شرقی جریان پیدا می‌کند و در ۱۵ کیلومتری کرمانشاه رودخانه رازآور و شاخه‌های فرعی آن به قره‌سو می‌پیوندد و با مسیر پر پیچ و خم، در سطح دشت جریان یافته است. این رودخانه با یک شیب آرام از داخل شهر کرمانشاه عبور کرده و در نزدیکی فرامان به رودخانه گاماسیاب می‌پیوندد. این مطالعه از نوع کاربردی می‌باشد. در بهار سال ۱۳۹۶، با توجه به کاربری‌های اطراف رودخانه قره‌سو آن را به شش بخش تقسیم و از هر قسمت چهار نمونه در یک پلات سه درسه جمع‌آوری شد. نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی و در کلمن یخ به آزمایشگاه منتقل گردید.

برای آماده‌سازی نمونه‌های رسوب در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت در آون گذاشته و پس از خشک شدن، در هاون کوبیده و نمونه‌های رسوب از الک عبور داده شد. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها یک گرم از نمونه خشک شده رسوب توسط ۱۲ میلی‌لیتر با ترکیبی از اسید نیتریک ۶۵ درصد (Merck، آلمان) و اسید پرکلریک ۷۰ درصد (Merck، آلمان) با نسبت ۱:۳ روی دستگاه هضم‌کننده (Heating block) در لوله‌های مربوطه (Poly (fluoroe ethylene tetra) به مدت سه ساعت هضم گردید (Madrid et al., 2008). محتوای هر لوله از کاغذ صافی واتمن شماره یک عبور داده شد و با آب دیونیزه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. برای اطمینان از دقت روش هضم و رفع خطای ناشی از آماده‌سازی نمونه و عدم تأثیر مواد مصرفی بر غلظت فلزات، در هر نوبت از عملیات هضم، یک نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد. غلظت فلزات در نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی (Analytik jena) مدل ContrAA 700 تعیین گردید. در این مرحله غلظت فلزات مورد نظر در نمونه‌های شاهد نیز اندازه‌گیری و از مقادیر به‌دست آمده برای نمونه‌ها کسر گردید؛ میزان دقت نتایج نیز بین ۹۰ تا ۹۷ درصد به‌دست آمد. فلزات سنگین مورد مطالعه در این تحقیق شامل: مس (Cu)، روی (Zn)، سرب (Pb) و کروم (Cr) می‌باشند.

این بیانگر آلودگی رودخانه به این فلزات می‌باشد. Khalilzadeh. Poshtgel et al. (2016) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، غلظت فلزات سنگین رودخانه دوهزار را پهنه‌بندی کردند. نتایج نشان داد که در فصل زمستان و بعضاً اوایل فصل بهار به‌دلیل طغیان رودخانه‌ها و حمل رسوبات آلودگی رسوبات بیشتر می‌باشد. هم‌چنین Mortazavi و Saberinasab (2017) غلظت عناصر سرب، نیکل، روی و مس را در رسوبات تالاب میقان را با استفاده از شاخص‌های کیفیت رسوب و روش کرنل ارزیابی کردند. Venkatramanan et al. (2014) نیز نمونه‌های رسوب مصب رودخانه‌ی (Tirumalairajan) و مناطق ساحلی اطراف را برای بررسی غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از تجمع این فلزات نشان داد که در اثر عواملی چون رواناب، فاضلاب‌های کارخانجات صنعتی و زباله‌های شهری می‌توانند عاملی برای افزایش این فلزات در نزدیکی سواحل باشند. Islam et al. (2015) غلظت شش فلز سنگین (Pb و Cr, Ni, Cu, As, Cd) را در آب و رسوبات رودخانه‌ی شهری Korotoa در بنگلادش مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی رسوبات این رودخانه نشان داد که این رود وضع نامناسبی برای محیط گیاهی و جانوری و ساکنان اطراف این رودخانه دارد. در کل با توجه به اینکه رسوبات جزء تفکیک‌ناپذیر بوم‌سازگان‌های آبی محسوب و اغلب به منزله مخزن نهایی برای تجمع فلزات سمی در محیط‌زیست‌های ساحلی در نظر گرفته می‌شوند، هدف پژوهش حاضر بررسی میزان غلظت فلزات سرب، روی، مس و کروم در رسوبات سطحی رودخانه قره‌سو و پهنه‌بندی رسوبات منطقه با شاخص‌های ارزیابی ریسک (Potential Ecological Risk Index) و ژئوشیمیایی مولر (Geo-accumulation Index) می‌باشد. برای دستیابی به این هدف از سیستم اطلاعات جغرافیایی و اصول زمین‌آمار نیز استفاده شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

رودخانه قره‌سو در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۸ دقیقه

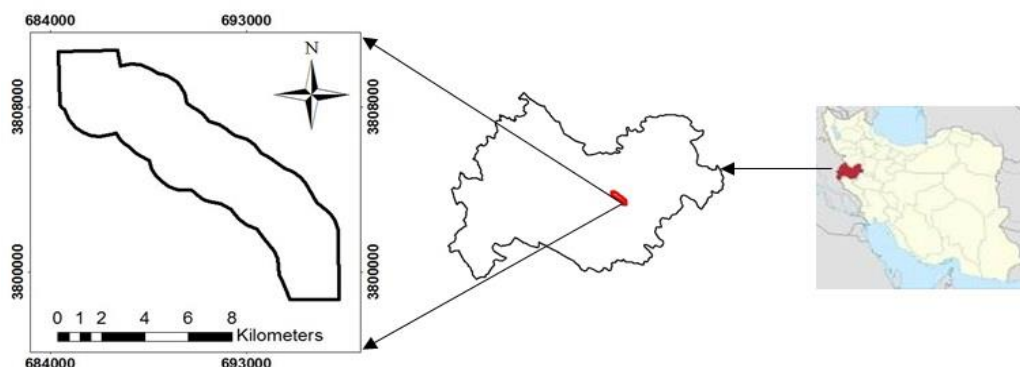


Fig. 1- Location of the study area

شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

که در چه موقعیتی عوارض با ارزش خوشه‌بندی مکانی بالا یا پایین وجود دارند. یک عارضه با ارزش بالا جالب توجه است اما ممکن است از نظر آماری معنادار نباشد، به این دلیل که یک نقطه داغ معنادار آماری باید علاوه بر داشتن ارزش بالا، توسط دیگر عوارض با ارزش بالا احاطه شده باشد، این امر توسط p -value و z -score بیان می‌شود، این دو به ترتیب میزان احتمال تصادفی بودن و انحراف معیار را نشان می‌دهند میزان بالا و یا پایین z -score نشان‌دهنده وجود الگو در ورودی‌ها است (Pourkhabaz et al., 2017) آمار عمومی G از رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه x_j ارزش عارضه j می‌باشد، w_{ij} وزن مکانی بین عارضه i و j است و n تعداد کل عوارض است، میزان Z -score برابر با میزان G_i^* می‌باشد (Aghdar et al., 2016).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (5)$$

شاخص ارزیابی ریسک اکولوژیک

ارزیابی ریسک اکولوژیک رسوبات محیط‌های آبی به صورت زیر بیان می‌شود (Hakanson, 1980).

$$RI = \sum_{i=1}^m Er \quad (6)$$

$$Er = Tr * Cf \quad (7)$$

$$Cf = Cs / Cn \quad (8)$$

C_n و C_s به ترتیب غلظت فلز سنگین در نمونه و مقدار زمینه است. Er پتانسیل ریسک اکولوژیک هر یک از عناصر و RI بیانگر پتانسیل ریسک اکولوژیک کل فلزات (تجمعی) است. بر اساس نظر Hakanson (1980)، Tr به صورت ضریب سمیت تعریف شده که مقادیر آن برای فلزات Cu ، Pb ، Zn و Cr به ترتیب پنج، پنج، دو و یک بیان شده است. طبقه‌بندی نتایج محاسبه شده این شاخص در جدول (۱) نشان داده شده است.

شاخص ژئوشیمیایی مولر

شدت آلودگی رسوبات با استفاده از شاخص ژئوشیمیایی مولر با توجه به رابطه (۹) و جدول (۲) محاسبه می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2[(cn / (1.5 \times Bn))] \quad (9)$$

روش کریجینگ (Kriging)

روش کریجینگ که بهترین تخمین گر خطی ناریب (BLUE) نام گرفته Journal و Huijbregts (1987) روش درون‌یابی پیشرفته‌ای است که برای داده‌هایی که دارای روند موضعی تعریف شده‌ای باشند، مناسب است. این روش با کمترین واریانس تخمین، درون‌یابی می‌کند و میزان خطای آن تابع مشخصات تغییرنا می‌باشد (Mohammadyari et al., 2017). اگر مطالعه‌های مربوط به تشخیص مدل تغییرنا با دقت کافی انجام شود، درون‌یابی با روش کریجینگ از دقت بالایی برخوردار خواهد بود (Mohammadyari et al., 2016; Mirsanjari and Mohammadyari, 2018).

روش کوکریجینگ (Cokriging)

هنگامی که از یک متغیر به اندازه کافی نمونه‌برداری نشده باشد و براساس آن‌ها نتوان تخمین را با دقت مورد نظر انجام داد از روش کوکریجینگ استفاده می‌شود. در چنین مواردی می‌توان به کمک متغیرهای ثانویه و با استفاده از هم‌بستگی متقابل بین متغیرهای اصلی و ثانویه، تخمین را اصلاح کرد. برای برآورد با این روش و برای محاسبه اوزان مربوطه، نیاز به محاسبه واریوگرام متقابل بین متغیرهای Y و Z و به عبارتی متغیر مشاهده شده و متغیر کمکی می‌باشد (Hasani Pak, 2006). در نهایت برای ارزیابی روش‌های فوق، با محاسبه دو آماره میانگین مطلق اشتباهات (Mean Absolute Error) و میانگین مجذور مربعات خطا (Root Mean Square Error) ارزیابی صحت دو روش کریجینگ و کوکریجینگ با کمک رابطه‌های (۱) و (۲) با هم مورد مقایسه قرار گرفت (Webster and Oliver, 2007):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - \hat{z}(x_i)] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2} \quad (2)$$

در این رابطه‌ها N تعداد کل داده‌ها، $Z(x_i)$ مقدار دقیق در نقطه x و $Z(X_j)$ مقدار برآورد در نقطه x می‌باشد.

تحلیل نقاط داغ (Hot spot)

این تحلیل نشان می‌دهد که در چه مناطقی خوشه‌بندی مکانی رخ داده و به عبارتی ابزاری برای بصری‌سازی وسعت و مدل خوشه‌بندی‌ها است. در مطالعه‌های محیطی هنگامی که به دنبال دلایل اصلی تشکیل خوشه‌بندی هستیم توجه به مکان آن‌ها بسیار مهم است. با استفاده از آمار عمومی G که در رابطه (۳) آمده است می‌توان نقاط داغ و نقاط سرد (Cold spot) منطقه مطالعه را تفکیک کرد، نقاط داغ و سرد به تمرکزهای مکانی معروف هستند (Mohammadyari et al., 2017). این تحلیل بیان می‌کند

که در آن؛ میانگین رسوبات جهانی اند. لذا می‌توان بیان داشت با توجه به مقادیر میانگین غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده احتمال آلودگی رسوبات رودخانه قره‌سو به فلزات ذکر شده وجود دارد. برای پهنه‌بندی توزیع غلظت فلزات سنگین از روش‌های درون‌یابی کریجینگ و کوکریجینگ استفاده گردید. اولین گام در استفاده از روش‌های زمین آماری بررسی وجود ساختار مکانی بین داده‌ها به وسیله تحلیل واریوگرام است. شرط استفاده از تحلیل واریوگرام نرمال بودن داده‌ها می‌باشد (Hasani Pak, 2006)، نرمال بودن داده‌ها با آزمون آماری کولموگروف اسمیرنوف بررسی شد. سپس به منظور بررسی پیوستگی متغیرها از تابع به‌صورت جداگانه برای روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ ترسیم گردید. پس از رسم واریوگرام برازش مدل مناسب، عملیات درون‌یابی به کمک نرم‌افزار Arc GIS 10.2 برای روش کوکریجینگ و کریجینگ صورت گرفت. نتایج حاصل از روش کوکریجینگ با کریجینگ به کمک معیارهای RMSE و MAE که میزان دقت را نشان می‌دهند، مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به مقادیر کمتر این دو شاخص مبنی بر دقت بالا و خطای پایین حاصل، روش کریجینگ نسبت به روش کوکریجینگ برتری داشت، جدول (۴) که در نهایت لایه‌ها با این روش درون‌یابی گردید. همچنین برای بررسی رابطه‌ی بین فلزات سنگین اندازه‌گیری شده از تجزیه‌ی همبستگی پیرسون استفاده شد. طبق نتایج جدول (۵) مؤلفه‌های مورد بررسی در سطح خطای پنج درصد با یکدیگر دارای رابطه‌ی معناداری می‌باشند ($p < 0.05$). شکل (۲) پهنه‌بندی توزیع غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در رودخانه قره‌سو را نشان می‌دهد.

Igeo = شاخص تجمع ژئوشیمیایی (شاخص شدت آلودگی در رسوبات)
 Cn = غلظت ماده آلاینده در رسوبات با قطر کمتر از ۶۳ میکرون بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم
 Bn = غلظت ماده آلاینده در سنگ شیل یا غلظت اولیه عناصر در زمانی که آلودگی وجود نداشته است بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم
 ضریب ۱/۵ نیز به منظور تصحیح غلظت اولیه رسوبات به دلیل تأثیر عوامل زمینی اعمال شده است (Muller, 1969).
 میانگین شیل برای عناصر مورد ارزیابی مس، روی، سرب و کرم به ترتیب ۲۵، ۲۳، ۱۰۰ و (بر حسب میکروگرم بر گرم) می‌باشد (Woitke et al., 2003).

تحلیل‌های آماری

با استفاده از SPSS17، نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف اسمیرنوف بررسی شد. سپس برای مقایسه میانگین غلظت تجمع یافته عناصر مورد ارزیابی بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری از آزمون آماری تحلیل واریانس بین آزمودنی یک طرفه (آزمون چند دامنه‌ای دانکن) استفاده شد.

نتایج و بحث

میانگین نتایج اندازه‌گیری فلزات سنگین در نمونه‌های رسوبات سطحی بستر رودخانه قره‌سو در جدول (۳) ارائه شده است. مقادیر میانگین جهانی رسوبات از مقاله Jamshidi Zanjani و Saeedi (2013) گرفته شده است. با توجه به جدول (۳) می‌توان گفت که فلزات مس و سرب دارای مقادیر میانگین بیشتر از

جدول ۱- طبقه‌بندی ریسک اکولوژیک بر مبنای محاسبه RI (Hakanson, 1980)

Table 1- Ecological risk classification based on RI calculation (Hakanson, 1980)

Ecological risk status	RI value
Low	RI<150
Medium	150<RI<300
High	300<RI<600
Very high	RI>600

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت رسوبات بر اساس شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر (Muller, 1969)

Table 2- Sediment quality classification based on Muller (1969) geochemical accumulation index

Pollution status	Pollution degree	Igeo value
Unpolluted	0	≤0
Unpolluted- Moderate pollution	1	0-1
Moderate pollution	2	1-2
Moderate pollution- high pollution	3	2-3
High pollution	4	3-4
High pollution- heavily polluted	5	4-5
Heavily polluted	6	>5

جدول ۳ - مقادیر میانگین، بیشینه و کمینه فلزات سنگین اندازه گیری شده رودخانه قره‌سو

Table 3- Average, maximum and minimum values of heavy metals measured in Qarasu river

Metals	Average ($\mu\text{g/g}$)	Maximum ($\mu\text{g/g}$)	Minimum ($\mu\text{g/g}$)	Standard deviation ($\mu\text{g/g}$)	Global average of precipitation ($\mu\text{g/g}$)
Cu	41.2	122	17.1	24.7	33
Zn	21.6	67.3	1.4	19.5	95
Cr	12.4	24.1	1	6.3	72
Pb	20.3	40.7	13.2	7.5	19

جدول ۴- نتایج ارزیابی دقت روش‌های درونیابی

Table 4- The results of evaluating the accuracy of interpolation methods

Metals	RMSE		MAE	
	Kriging	Co-kriging	Kriging	Co-kriging
Cu	1.1	1.15	0.98	2.43
Zn	1.33	1.67	2.02	4.85
Cr	0.87	1.47	0.68	3.4
Pb	1.36	1.44	1.93	5.73

جدول ۵- ضرایب همبستگی پیرسون

Table 5- Pearson correlation coefficients

Metals	Cu	Zn	Cr	Pb
Cu	1			
Zn	0.632**	1		
Cr	0.615**	0.205*	1	
Pb	0.532**	0.497*	0.214*	1

** Correlation at the 0.01 level

* Correlation at the 0.05 level

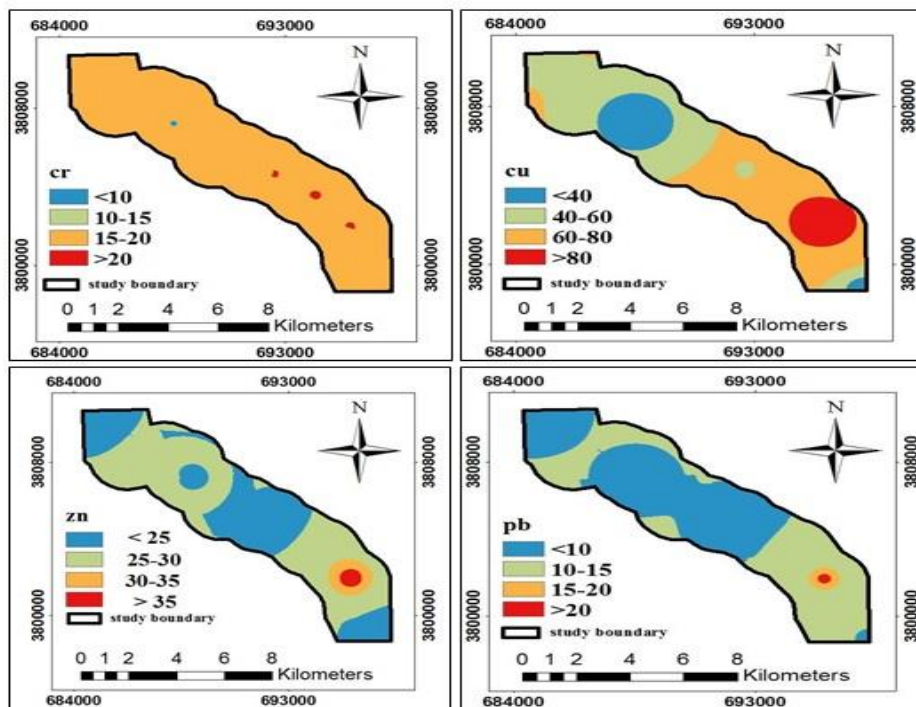


Fig. 2- Zoning distribution of heavy metals in Qarasu river sediments (concentration in mg/kg)

شکل ۲- پهنه‌بندی توزیع فلزات سنگین در رسوبات رودخانه قره‌سو (غلظت بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

نهایت صحت نتایج پهنه‌بندی، شکل (۳) تایید می‌شود. همچنین نتایج تجزیه واریانس یک طرفه نیز نشان داد که تمام ایستگاه‌های مورد بررسی از نظر غلظت عناصر مورد نظر با یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند ($p < 0.01$)، جدول (۶). نتایج محاسبه شاخص ژئوشیمیایی مولر به منظور طبقه‌بندی رسوبات از نظر شدت آلودگی به عناصر مورد ارزیابی، بیانگر آن بود که رسوبات رودخانه قره‌سو از نظر آلودگی به عنصرهای روی، سرب و کروم با درجه آلودگی صفر، در طبقه غیر آلوده قرار دارند. همچنین رسوبات رودخانه از نظر آلودگی به فلز مس با درجه آلودگی یک، در طبقه از غیر آلوده تا آلودگی متوسط قرار می‌گیرد، جدول (۷). لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر به دلیل عدم وجود سوابق مطالعاتی در منطقه، در محاسبه شاخص مولر از مقادیر مرجع ارایه شده توسط (Sobhan Ardakani, et al 2014) استفاده شده است. پهنه‌بندی کیفی رسوبات رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص ریسک اکولوژیک و شاخص ژئوشیمیایی مولر در شکل (۴) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج پهنه‌بندی در شکل (۲) می‌توان گفت بخش شرقی رودخانه قره‌سو دارای مقادیر بیشتری از فلزات مس، روی، کروم و سرب می‌باشند. بر اساس مشاهدات محلی و کاربری‌های موجود این قسمت از رودخانه، بیش از سایر بخش‌ها از انواع پساب‌های شهری و کشاورزی تأثیر می‌پذیرد. همچنین قسمت‌هایی از جنوب شرقی رودخانه نیز مقادیر زیادی از فلز مس را نشان می‌دهد. علاوه بر این غلظت فلز کروم در بیشتر قسمت‌های رودخانه دارای مقادیر بالایی است که در این قسمت‌ها کاربری‌های شهری و کشاورزی متمرکز شده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که فلز مس و کروم با احتمال بیشتری از منابع موجود انسان ساخت سرچشمه می‌گیرند و احتمالاً فلزات سرب و روی از این منابع محدودتری و بیشتر از منابع طبیعی در محدوده مورد مطالعه سرچشمه گرفته‌اند. در این راستا جهت دقیق‌تر شدن این یافته تحلیل نقاط داغ روی لایه‌ها اجرا شد (شکل ۳). تحلیل نقاط داغ که برای بهتر نشان دادن مناطق با غلظت بالای عناصر استفاده شد، شکل (۳) نشان داد نقاط با غلظت‌های زیاد و در آستانه هشدار در بخش شرقی رسوبات رودخانه قرار گرفته است که در

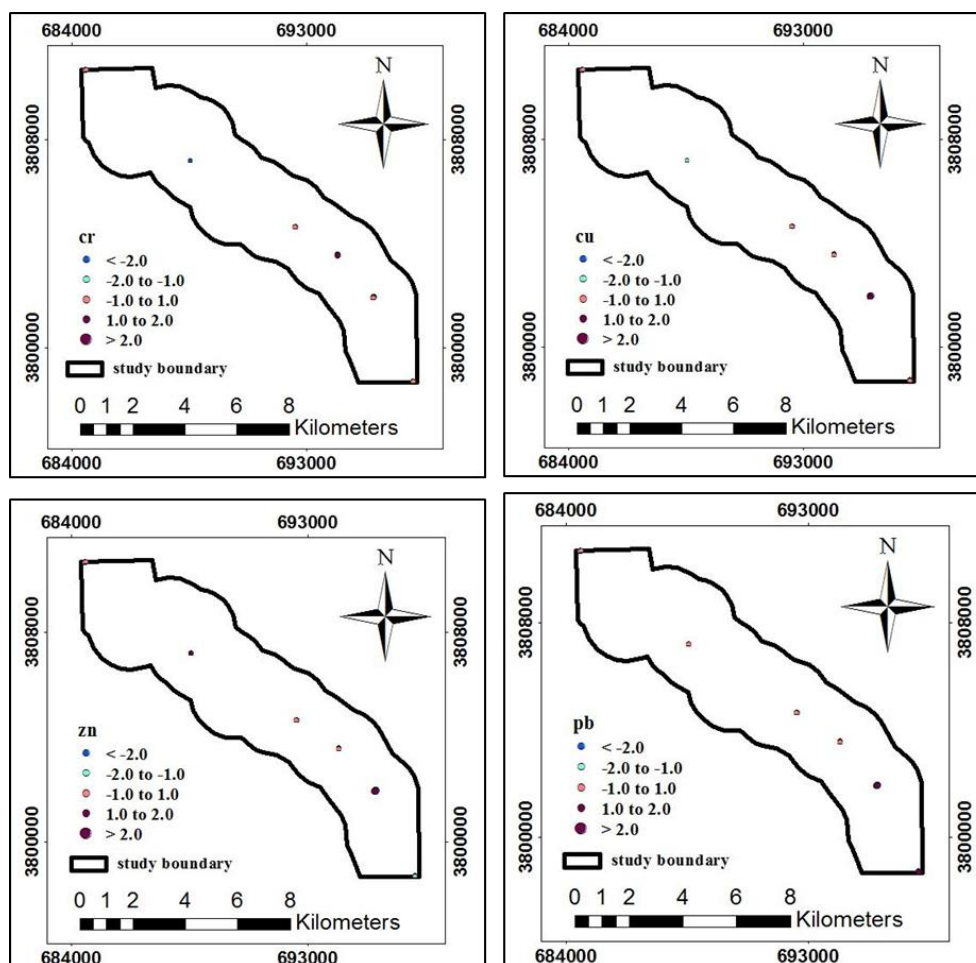


Fig. 3- Hot spot analysis results

شکل ۳- نتایج تحلیل نقاط داغ

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس یک طرفه

Table 6- Results one-way ANOVA analysis

Metals	Number	Average difference from standard	P-value
Cu	24	2311**	0
Zn	24	1149**	0.001
Cr	24	150.3**	0
Pb	24	147.3**	0.006

** Significance at the 0.01 level

جدول ۷- مقادیر محاسبه شده شاخص مولر و طبقه‌بندی رسوبات رودخانه قره‌سو از نظر شدت آلودگی به عناصر سنگین مورد ارزیابی

Table 7- Calculated values of Muller index and classification of the sediments of the Qarasu River in terms of the intensity of pollution with the evaluated heavy elements

Igeo	Area Mean	Degree of pollution	Average severity of pollution in all stations
Cu	0.1	1	Non-polluted – moderate polluted
Zn	-2.38	0	Non-polluted
Cr	-3.6	0	Non-polluted
Pb	-0.76	0	Non-polluted

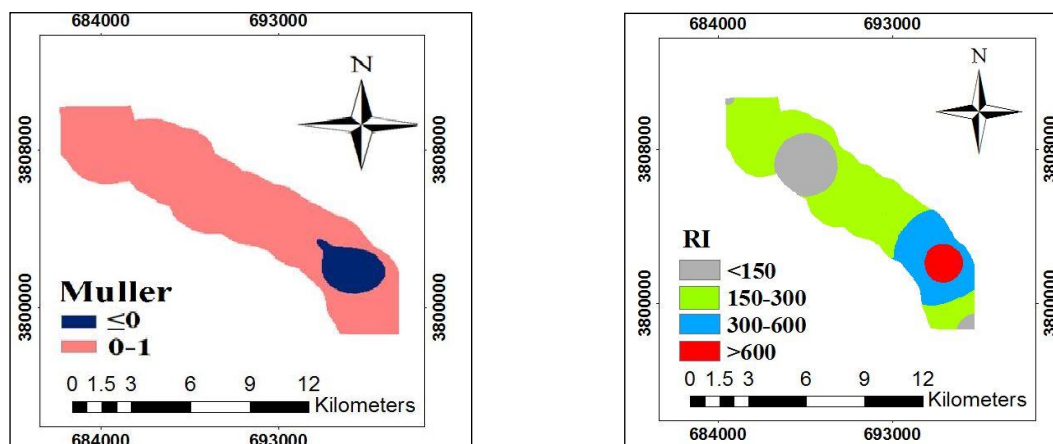


Fig. 4- Qualitative zoning of Qarasu river sediments using Muller ecological and geochemical risk indicators

شکل ۴- پهنه‌بندی کیفی رسوبات رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص‌های ریسک اکولوژیک و ژئوشیمیایی مولر

جدول (۱) رودخانه قره‌سو از نظر غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در طبقه ریسک اکولوژیکی قابل ملاحظه قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

نقشه پهنه‌بندی شاخص ریسک اکولوژیک در منطقه مورد مطالعه نشان داد که بخش‌های شرقی رودخانه آلودگی بیشتری نسبت به سایر بخش‌های رودخانه دارد. در قسمت شرقی رودخانه ایستگاه سوم نمونه‌برداری قرار دارد که با توجه به نتایج آزمون دانکن و طبق نقشه پهنه‌بندی آلوده‌ترین قسمت رودخانه است و نتایج این مطالعه، بیان‌گر وجود اختلاف معنی‌دار میانگین غلظت تجمع یافته عناصر روی، سرب، کروم و مس بین ایستگاه سوم با سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. در محل ایستگاه سوم کاربری‌های صنعتی (شرکت نفت)، کشاورزی و شهری قرار دارد که پساب مربوطه آن‌ها به این ایستگاه وارد و باعث شدت آلودگی این بخش

در این مطالعه الگوی پراکنش فلزات سمی با روش‌های زمین آمار مدل‌سازی شد که در نهایت کریجینگ ساده به‌عنوان بهترین تخمین‌گر با کمترین خطا انتخاب گردید. Taheri et al. (2014) نیز در مطالعه خود کریجینگ را به‌عنوان بهترین مدل برای رسم الگوی پراکنش فلزات سمی انتخاب کردند. نتایج محاسبه شدت آلودگی رسوبات رودخانه قره‌سو با استفاده از شاخص مولر بیان‌گر آن بود که رسوبات از نظر متوسط شدت آلودگی به عناصر سرب، کروم و روی در طبقه غیرآلوده قرار گرفته‌اند که این نتیجه با نتایج Karbasi و Valovi (2010)، Bagheri et al. (2012)، Bayati et al. (2012) و Mortazavi و Saberinasab (2017) همسو است. اما متوسط شدت آلودگی به عنصر مس در این پژوهش در طبقه از غیر آلوده تا آلودگی متوسط قرار گرفت. همچنین نتایج شاخص ریسک اکولوژیک نشان داد که مقدار این شاخص از ۵/۹۲ تا ۱۹۸/۲ متغیر بوده که در مجموع مقدار این شاخص ۳۱۷/۴ به‌دست آمد و طبق

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی نویسنده مسئول در دانشگاه ملایر انجام شده است (کد پژوهانه: ۳۳۰-۸۴/۵).

شده است. علاوه بر این نقشه پهنه‌بندی و تحلیل نقاط داغ هر کدام از عناصر مورد بررسی نیز بخش شرقی را به عنوان آلوده-ترین قسمت نشان می‌دهند. این امر نیز تاییدکننده حضور بیشتری از منابع آلودگی انسان ساخت و زهاب‌های کشاورزی در بخش شرقی است.

References

- 1- Aghdar, H., Mohammadyari, F. and Basiri, R., 2016. Evaluation Groundwater quality parameters using GIS and Geostatistics (Case Study: Mehran Plain and Dehloran Ilam). *Natural Environment*, 69 (3), pp.597-616. (In Persian)
- 2- Ahmadali, K., Nickmehr, S. and Liaghat, A., 2008. Evaluation of kriging and cokriging methods for the estimation of deep soil acidity and salinity (case study: plains of Bokan). *Iranian Journal of Water Research*, 2, pp.55-64.
- 3- Akpan, I.O. and Thompson, E.A., 2013. Assessment of heavy metal contamination of sediments along the cross river channel in Cross River state, Nigeria. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 2(5), pp.20-28.
- 4- Al-Yemni, M.N., Sher, H., El-Sheikh, M.A. and Eid, E.M., 2011. Bioaccumulation of nutrient and heavy metals by *Calotropis procera* and *Citrullus colocynthis* and their potential use as contamination indicators. *Scientific Research and Essays*, 6(4), pp.966-976.
- 5- Bagheri, H., Darvish Bastami, K., Sharami, T. and Bagheri, Z., 2012. Evaluation of the distribution of heavy metals in Gorgan Gulf. *Oceanography*, 3 (11), pp.65-72. (In Persian)
- 6- Bayati, F., Modiri, S., Lak, R. and Saeedi, M., 2012. Environmental assessment of potentially toxic metals in sediments of the northwest of the Persian Gulf (Bushehr province). *Thirty-first Earth Science Conference*. Geological Survey of Iran. (In Persian)
- 7- Ghasem Pour, H. and Fataee, A., 2014. Investigation on the concentration of heavy metals (zinc, copper, iron, chromium and lead) in sediments and fishes of the species *Squalies Cephalus* and *Copeata copeata* of the Ghare Sou river. *The First National Conference on Environmental Pollution with a Pure Land Area*, Ardabil, the Society for the Purification of Life. (In Persian)
- 8- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), pp.975-1001.
- 9- Hasani Pak, A., 2006. *Geostatistics*, Third edition, Institute of Publications and Printing of Tehran University, 330 p. (In Persian)
- 10- Islam, M.S., Ahmed, M.K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M. and Islam, M.K., 2015. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, pp.282-291.
- 11- Jamshidi Zanjani, A. and Saeedi, M., 2013. Pollution and zoning of surface sediments of Anzali wetland based on the results of heavy metal pollution indexes. *Ecology*, 39 (4), pp.157-170. (In Persian)
- 12- Journel, A.G. and Huijbregts, C.J., 1987. *Mining geostatistics*. Academic press.
- 13- Karbasi, A. and Valovi, S. H., 2010. Determination of Heavy Metal Contamination in Bamdagh Wetland Sediments Using the Geochemical Index of Muller. *Ecology*, 36 (54), pp.1-10. (In Persian)
- 14- Khalilzadeh Poshtgel, M., Nikous, S., Mirbagheri, A. and Nori, M., 2016. Investigation of Pollution of Heavy Metals and Suspended Sediments in the River, *Eighth National Conference and Specialized Exhibition of Environmental Engineering*, Tehran, Iranian Environmental Engineering Society. (In Persian).

- 15- Madrid, F., Biasioli, M. and Ajmone-Marsan, F., 2008. Availability and bioaccessibility of metals in fine particles of some urban soils. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 55(1), pp.21-32.
- 16- Mohammadyari, F., Tavakoli, M. and Aghdar, H. 2016. Assessment and zoning of groundwater quality in agricultural areas of Mehran and Dehloran with geostatistical methods. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 39(4), pp.71-83. (In Persian)
- 17- Mirsanjari, M.M. and Mohammadyari, F., 2018, March. Application of Time-series Model to Predict Groundwater Quality Parameters for Agriculture:(Plain Mehran Case Study). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 127 (1), pp. 012012). IOP Publishing.
- 18- Mohammadyari, F., Aghdar, H. and Basiri, R., 2017. Zoning groundwater quality for drinking using geo-statistical methods Case Study: Arid Regions in Mehran and Dehloran. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 26(101), pp.199-208. (In Persian)
- 19- Mortazavi, S., and Saberinasab, F., 2017. Zoning concentration and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Mighan wetland. *Ecopersia Journal*. 4(2) ,pp.533-545. (In Persian)
- 20- Muller, G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River.
- 21- Pourkhabaz, H.R., Aghdar, H. and Mohammadyari, F., 2017. Zoning groundwater quality for agriculture by classification Wilcox index (Case study: Qazvin plain). *Geographical Space*, 17(58), pp.111-129. (In Persian)
- 22- Sobhan Ardakani, S., Jamshidi, K. and Niyazi, A., 2014. Evaluation of iron, lead, cadmium and copper concentrations in sediment using the molar geochemical index (Case study: Meyghan Wetland), *Wetland Ecology*. 6(202), pp.67-78. (In Persian)
- 23- Taghinia, H.A., Basavarajappa, H.T. and Qaid, S.A., 2010. Heavy metal pollution in Kabini River sediments. *Enternational Journal of Reasearch*, 4, pp.629-636.
- 24- Taheri, M., Riahi Bakhtiari, A., Naemi, B. and Gholamali Fard, M., 2014. Determination of concentration and distribution of spatial variations of mercury, lead and cadmium in surface sediments of Mangrove forests using geospatial statistics in GIS environment. *Ecology*, 40 (2), pp.297-310. (In Persian)
- 25- Veerasingam, S., Raja, P., Venkatachalapathy, R., Mohan, R. and Sutharsan, P., 2010. Distribution of petroleum hydrocarbon concentrations in coastal sediments along Tamilnadu coast, India. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 5(2), pp.5-8.
- 26- Venkatramanan, S., Ramkumar, T., Anithamary, I. and Vasudevan, S., 2014. Heavy metal distribution in surface sediments of the Tirumalairajan river estuary and the surrounding coastal area, east coast of India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), pp.123-130.
- 27- Vukovic, Z., Radenkovic, M., Stankovic, S.J. and Vukovic, D., 2011. Distribution and accumulation of heavy metals in the water and sediments of the River Sava. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 76(5), pp.795-803.
- 28- Webster, R. and Oliver, M.A., 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons.
- 29- Woitke, P., Wellnitz, J., Helm, D., Kube, P., Lepom, P. and Litheraty, P., 2003. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube. *Chemosphere*, 51(8), pp.633-642.

EXTENDED ABSTRACT

Simulation of dam break flow based on numerical solving of shallow water equations in curvilinear coordinate

B. Mehrmoosavi¹, R. Ghobadian^{2*} and M. Javn³

1- Ph. D student of hydraulic structures, Water Engineering department, Razi University.

2* - Corresponding Author, Associate Professor of Water Engineering department, Razi University. (rsghobadian@gmail.com)

3- Associate Professor of Civil Engineering department, Razi University.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 October 2020

Revised: 6 June 2021

Accepted: 9 June 2021

Keywords:

Unsteady Flow, Ideal and Partial Dam Break, Leap-Frog and Lax Algorithms, Staggered Mesh.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mehrmooavi, B., Ghobadian, R., Javan, M. (2023). 'Simulation of dam break flow based on numerical solving of shallow water equations on curvilinear grid', Irrigation Sciences and Engineering, 46(1), pp. -. doi: 10.22055/jise.2018.23929.1700.

Introduction

Prediction of dam-break hydraulic components, including water depth and flow velocity, has always been important for hydraulic engineers due to its impact on the severity of the failure disaster. Due to sensitivity of the subject, many previous studies have been conducted on the dam break phenomenon. For example, the modeling of the dam break flow was done by Wood and Wang (2015) using the ADI implicit finite difference method in the curvilinear coordinates on a dry bed in the convergent and divergent channels and in a 45 degree bend. Their results suggest that the provided model has the ability to record the moves of shock waves and provided a good agreement in comparison with the experimental data.

Most of the existing models for simulating dam break flow have been developed in cartesian coordinates. Given the fact that most physical spaces are non-rectangular, the application of the rectangular computing domain (Cartesian coordinates) to such space and the interpolation to apply boundary conditions causes errors with the most sensitivity. To overcome this problem, the transfer of physical space to the computing space is used by the curvilinear coordinate system. In this research, a comprehensive computer model has been developed in which using the explicit finite difference method and simultaneous use of Leap-Frog and Lax algorithms on the staggered mesh, shallow water equations are solved to simulation dam break problem. This will increase the number of involved points in the computation and sharpen hydraulic gradients become smooth and the probability of oscillation and divergence will decrease without the use of artificial viscosity. The application of the model was investigated in various hydraulic problems in addition to the dam break.

Methodology

In hydraulic engineering, shallow water flow equations are used as the governing equations for studying many physical phenomena including dam break. In this research the governing equations in curvilinear coordinate system (ξ, η) were solved. The governing equations in the curvilinear coordinates were discretised on staggered mesh with the intervals of $\Delta\xi$ and $\Delta\eta$. The discretisation method is an explicit Leap – Frog method that uses the Lax algorithm. The momentum equation

along ξ direction is discretized in $(i+1/2, j, n+1/2)$, the momentum equation along η direction is discretized in $(i, j+1/2, n+1/2)$ and the continuity equation is discretised in $(i, j, n+1)$, and the symbols of i and j are used for space and n is used for time.

Results and discussion

The purpose of verifying the current model is to compare its results with laboratory, analytical, or with other numerical models presented by previous researchers, including hydraulic jump simulation, full dam break over wet bed, Asymmetric partial dam break on wet bed, partial dam break in a convergent-diverging channel. Here are some of the results:

Asymmetric partial dam break on wet bed

The studied area is the same as the area considered by Chaudhry (2008). This area consists of a channel with 200 m in length and width. The dam break opening is asymmetrical that has a width of 75 m. The results are provided for coarse mesh (301×301) and fine mesh (401×401) along ξ and η . The comparison of lateral water surface profile in the upstream of the break location ($x=75$ m), inside of the break location ($x=95$ m) and downstream of the break location ($x=115$ m) are presented in figure (1). According to the model results for fine mesh, lateral water surface in upstream and downstream area of the dam location are more consistent with the results of the Chaudhry model, but for coarse mesh, the water surface at break location is more consistent with the Chaudhry model.

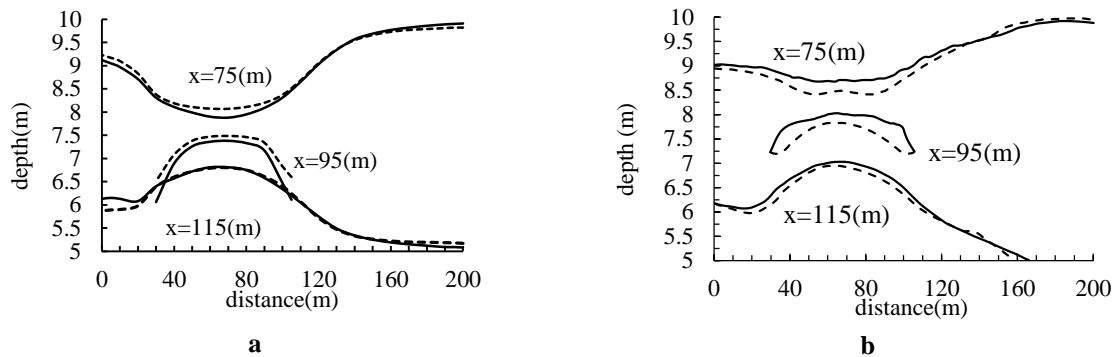


Fig. 1-Comparison of lateral water surface profile: a) result of current model (Dash-line coarse mesh, continues-line fine mesh) b)Result of Chauhdry model(Dash line Gabuti algorithm, continues line(Mac-Cormack) c)2 -D view d) 3-D view of water surface 7.5 sec after dam break

Dam break in convergent – divergent channel with and without bed slope

For this purpose a channel with the length of 21 m, width of 1.4 m, without bed and walls friction and with a bed slope of 0 and 0.01 was considered. As it is shown in figure (2), a gate has been installed on the contraction area at $x=8.5$ m from the beginning of the channel. The flow depth in the upstream of the gate is considered 0.3 m and the downstream is considered as dry bed. The computational domain include 421 nodes along ξ and 57 nodes along η .

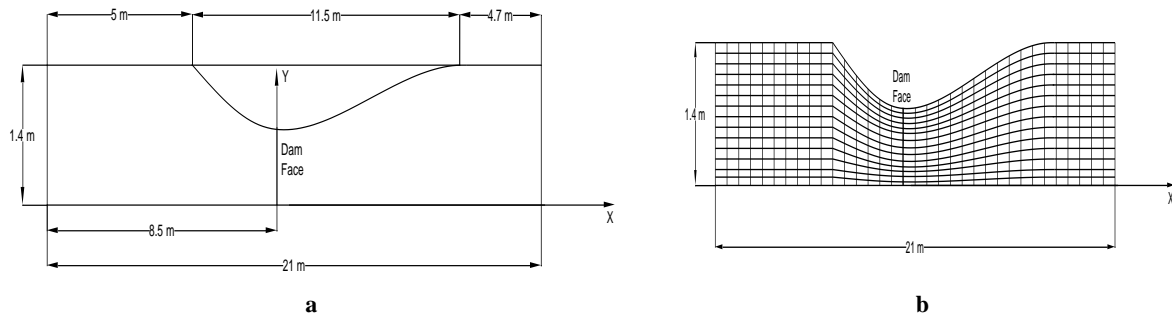


Fig. 2- a) Study area, converging-diverging experimental flume (Bellos Saulis and Sakas, 1992) b) sample of generated mesh for the study area

The calculated and measured water level profiles at different times after the dam break are shown in Figure 3. The comparison of presented diagrams in figure (3) shows that the results of present model are consistent with the results of experimental models with and without bed slope. The numerical model error for calculating the water level profiles on the channel bed without slope is about 4.02%. While this error value is equal to 1.56% for the bed with a slope of 0.01.

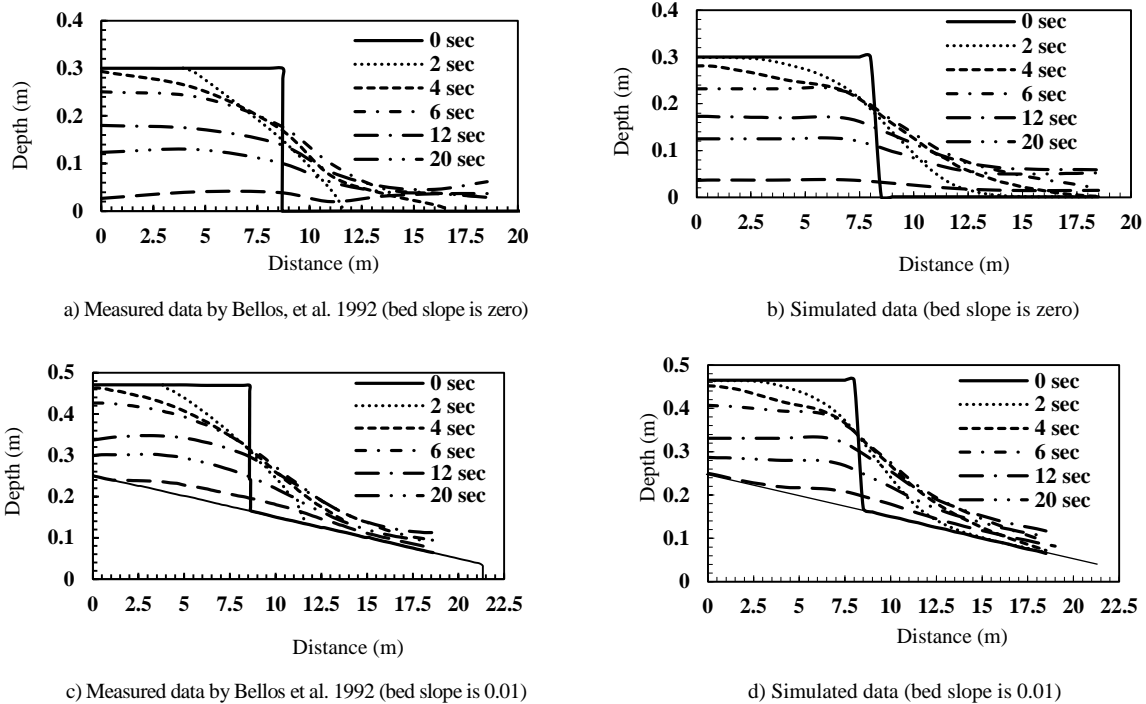


Fig. 3- comparison current model result and experimental data of Bellos et al (1992)

Conclusions

In this research the computer model was developed in the curvilinear coordinate in which the governing equations on the shallow water flow are solved by the explicit finite difference method and the simultaneous use of the Leap-Frog and Lax on the staggered mesh. The application of the model in various hydraulic problems showed:

- 1- In the simulation of the partial asymmetric dam break with tail-water depth, the results of numerical model are consistent with the results of the Chaudhry model (2007). However the results of none of the three algorithms Gabutti, Mac Cormack (in Chaudhry model) and Leap-Frog and Lax (in the present study) are not completely match, but all of these three algorithms follow a same trend.
- 2- To achieve the main goal of this research, the results of dam break phenomenon simulation in convergent – divergent channel with and without bed slope were compared with the results of the measurements in the Bellos et al (1992) study. It has been determined that a numerical model with an average error of less than 5% estimates the depth of flow at dam break location.

Acknowledgments

This research was done with the financial support of Razi University's Research Vice-Chancellor, which is hereby acknowledged and thanked.

References

- 1- Bellos, C.V., Soulis, V. and Sakkas, J.G., 1992. Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows. *Journal of Hydraulic Research*, 30(1), pp.47-63.
- 2- Chaudhry, M.H., 2007. *Open-channel flow*. Springer Science & Business Media.
- 3- Wood, A. and Wang, K.H., 2015. Modeling dam-break flows in channels with 90 degree bend using an alternating-direction implicit based curvilinear hydrodynamic solver. *Computers & Fluids*, 114, pp.254-264.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد بر مبنای حل عددی معادله‌های آب‌های کم‌عمق در مختصات منحنی‌الخط

بهاره مهرموسوی^۱، رسول قبادیان^{۲*} و میترا جوان^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه. (rsghobadian@gmail.com)

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه.

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

چکیده

شبیه‌سازی شکست سد و جریان‌های سیلابی ناشی از آن همواره یکی از مسائل مهم و مورد علاقه محققین است. این موضوع تحقیق‌های بسیار زیاد آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی را به خود اختصاص داده است. بیشتر مطالعه‌های عددی که بر مبنای حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق استوار است به دنبال ارایه روش‌های بهتر برای افزایش دقت و همگرایی مسئله می‌باشند. در این تحقیق نیز به منظور شبیه‌سازی پدیده شکست سد مدل کامپیوتری بر مبنای حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق در مختصات منحنی‌الخط توسعه داده شد. به منظور افزایش تعداد نقاط درگیر در محاسبات برای هموار نمودن گردان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی و کاهش احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی، در مدل مذکور هم‌زمان از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس روی شبکه جابجا شده استفاده شد. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، تحلیلی و نتایج عددی سایر محققین، توانایی مدل در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی، شکست ایده‌آل روی بستر تر، شکست جزئی سد و نهایتاً شکست سد در یک مسیر همگرا و اگر بررسی شده است. در تمام موارد مدل با ارائه نتایج قابل قبول، مشخصه‌های جریان را شبیه‌سازی نمود.

کلید واژه‌ها: جریان غیرماندگار، شکست ایده آل و جزئی، روش عددی پرش قورباغه و لکس، شبکه جابجا شده.

مقدمه

Wang et al. (2000) برای بررسی جریان ناشی از مسئله شکست سد دوبعدی بر مبنای حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق به کار گرفته شده است. در گسسته‌سازی معادله‌ها از روش مرتبه اول (UP-Wind) و مرتبه دوم لکس-وندورف (Lax-Wendroff) همراه با یک یا دو قید محدودکننده، استفاده شده است. مدل شبیه‌ساز برای حالت دوبعدی ارتقا داده شده و نتایج آن در مدل‌سازی شکست سد جزئی رضایت بخش بوده است.

XU و Yu-chuan (2007) به شبیه‌سازی عددی دوبعدی جریان شکست سد در کانال‌های منحنی شکل با استفاده از روش تفاضل محدود گودنوف (Godunov) در سیستم مختصات منحنی‌الخط پرداختند. از موفقیت‌های به دست آمده در نتایج این تحقیق توانایی آن در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی جریان ناشی از شکست می‌باشد.

تحقیق دیگری با هدف ارائه مدل عددی دوبعدی شکست سد میانگین‌گیری شده در عمق در سیستم مختصات منحنی‌الخط (به منظور شبیه‌سازی مرزهای نامنظم) توسط Liu و Liu (2012) انجام گرفته است. در روش حجم محدود به کار گرفته شده، روش سیمپل (Simplec) برای انتقال معادله‌های حاکم به دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده است. مزیت این روش عددی آن است که

شکست سد پدیده‌ای غیرخطی و وابسته به زمان و مکان است که در گروه جریان‌های غیرماندگار متغیر سریع قرار می‌گیرد. پیش‌بینی مؤلفه‌های هیدرولیکی آن، شامل عمق و سرعت به دلیل تأثیرگذار بودن در شدت فاجعه شکست، برای مهندسین هیدرولیک همواره حائز اهمیت بوده است. معادله‌های حاکم در علم هیدرولیک برای بررسی این پدیده، معادله‌های آب‌های کم‌عمق (shallow water) می‌باشند (با فرض فشار هیدرواستاتیک در اکثر جریان‌های آزاد و تقریب بوسینسک (Bossinesq)، که این معادله‌ها می‌تواند از معادله‌های ناویراستوکس (Navier-Stokes) به دست آیند (Chauhdry, 2007). با توجه به حساسیت موضوع، تحقیق‌های بسیاری در گذشته روی مسئله شکست سد انجام گرفته که در ادامه به مواردی چند اشاره می‌شود. اولین حل صریح شکست سد، به نقل از Ritter (1892) توسط Haoyao et al. (2012) در سال ۱۸۹۲ (Ritter) ارائه شد که معادله‌های سنت‌وانت (Saint Venant equations) را با صرف نظر از مقاومت هیدرولیکی ناشی از اصطکاک در یک کانال مستطیلی افقی نامحدود (بزرگ) حل کرد (Haoyao et al., 2012).

روش تفاضل محدود TVD مرتبه دوم در پژوهشی توسط

معادله‌های آب‌های کم‌عمق به روش اجسام محدود و به شکل ضمنی شبه لاگرانژی (Semi-Lagrangian) ارائه دادند. نتایج نشان داد مجموع خطاهای هنجار شده مدل در حدود $0/3$ می‌باشد که با داده‌های اندازه‌گیری مطابقت خوبی دارد.

Vosoughifar et al., (2014) مدل عددی دوبعدی برای پدیده شکست سد به روش حجم محدود ارائه دادند که در آن معادله آب‌های کم‌عمق به شیوه مرتبه دوم لوکال لکس فردریش (Local-Lax-Friedrich) برای تسخیر شوک یا ناپیوستگی در شرایط اولیه و ارضای خاصیت ابقایی در چهارچوب روش اجسام محدود و شبکه‌بندی ورونوی (Voroni) ارائه شده است. مدل ارائه شده قادر به مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده با در نظر گرفتن اثر شیب و تسخیر موج شوک است.

مدل‌سازی دوبعدی شکست سد در مختصات کارتزین توسط Ghobadian (2015) به روش تفاضل محدود صریح و استفاده توأم از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس (Leap-frog and Lax) از جمله دیگر بررسی‌های در این زمینه است. نتایج تحقیق اذعان می‌دارد که مدل با دقت مناسبی جریان ناشی از شکست سد را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حل تحلیلی شبیه‌سازی می‌کند.

همان‌گونه که اشاره شد، برای حل معادله‌های حاکم بر پدیده شکست سد، مدل‌های مختلف عددی ارائه شده است که بیشترین این مدل‌ها در مختصات کارتزین به پیش‌بینی شکست سد می‌پردازند. اگرچه ساده‌ترین فرم معادله‌های حاکم در مختصات کارتزین به دست می‌آید اما در برخورد با محدوده‌های پیچیده لازم است در نزدیکی مرز، میدان جریان به صورت پلکانی در نظر گرفته شود. علاوه بر این، برای افزایش دقت محاسبه‌ها بایستی ابعاد شبکه در محل مرز محدوده کوچک باشد تا خطا به حداقل مقدار خود کاهش پیدا کند. همچنین در تمام پله‌های ایجاد شده بایستی شرایط مرزی اعمال گردد که خود از مشکل‌های اصلی این روش است، چراکه مدل عددی باید بتواند در تمامی این مرزها شرط مرزی مناسب را اعمال کند (Hadian and Zarati, 2008). با در نظر گرفتن این مطلب که بیشتر محدوده‌های فیزیکی غیر مستطیلی هستند، اعمال قلمرو محاسباتی مستطیلی (مختصات کارتزین) بر چنین محدوده‌هایی و میان‌یابی برای اعمال شرایط مرزی خطاهایی با بیشترین حساسیت‌ها را موجب می‌شود. برای غلبه بر این مشکل از انتقال فضای فیزیکی به فضای محاسباتی توسط دستگاه مختصات منحنی‌الخط (Curvilinear) استفاده می‌شود (Hoffmann and Chiang, 2000). منصف‌سازی معادله‌های حاکم در سیستم مختصات منحنی‌الخط روی شبکه جابه‌جا شده هر چند که در مقایسه با سایر سیستم‌های مختصات از پیچیدگی خاصی برخوردار است و معادله‌های منصف شده ساختار پیچیده و حجیم‌تری به خود

شبکه‌بندی منحنی‌الخط توانسته است مرزهای پیچیده دامنه محاسباتی در حل جریان‌های آشفته پیچیده را به راحتی شبیه‌سازی کند.

مدل تفاضل محدود توسط روش الگوریتم پرش قورباغه (Leap-Frog) با دقت مرتبه دوم در سیستم شبکه جابه‌جا شده بر مبنای معادله‌های آب‌های کم‌عمق برای شبیه‌سازی مسئله شکست سد توسط Lin و Zhang (2015) توسعه داده شده است. مدل مذکور در مقایسه با حل تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی قدرتمند بوده و در به دام انداختن ناپیوستگی امواج شکست سد دقت کافی را دارد.

در تحقیقی توسط Wood و Wang (2015) بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان شکست سد در کانال با خم 90° درجه، با تمرکز بر توسعه حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق در مختصات منحنی‌الخط، با استفاده از روش عددی دوبعدی تفاضل محدود ضمنی ADI انجام شده است. مدل ارائه شده برای موارد مختلف از جمله شکست سد در کانال همگرا-واگرا بررسی شده است که تطابق مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی نسبت به روش تی‌وی‌دی مک‌کورمک (Mac-Cormack TVD) بهتر نشان داده شده است و یا در بررسی شکست سد در کانال با زاویه 45° درجه، نتایج حاصل از مدل عددی ADI به‌طور منطقی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. در حالت کلی نتایج مدل برای بالادست و در انحنای کانال رضایت‌بخش است. طرح ADI ارائه شده موج اولیه در کانال و برگشت موج از ناحیه خم 90° درجه را به دام می‌اندازد.

مدل‌سازی دوبعدی شکست سد توسط Golavi (2002) بر مبنای معادله‌های آب‌های کم‌عمق با روش تفاضل محدود ضمنی بیم وارمینگ (Beam-Warming) صورت گرفت، روش مورد استفاده در این تحقیق دارای دقت مرتبه دو در زمان و دقت مرتبه یک در مکان بوده که نتایج آن نشان داد به دلیل کم بودن مرتبه دقت در مکان، در تسخیر شوک ضعیف عمل کرده است.

Kiyanian و Bani-Hashemi (2007) شبیه‌سازی مسئله شکست سد را با ارائه مدل دوبعدی به روش‌های صریح مک‌کورمک و فرد (Mac-Cormack and Fread) مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان دهنده دقت مدل در شبیه‌سازی جریان فوق‌بحرانی و پرش هیدرولیکی می‌باشد. مدل شبیه‌سازی دوبعدی سیلاب واریزه‌ای در مخازن سدهای تاخیری شکافدار، توسط Bani-Habib و Nazariye (2012) انجام پذیرفت، در این مدل‌سازی از الگوی تفاضل محدود مک‌کورمک (Mac-Cormack) برای حالت دوبعدی استفاده شده است، مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی نشان از تطابق خوب آبنمود خروجی از سد شکافدار در مدل عددی و آزمایشگاهی دارد.

Sarveram و Shamsaee (2012) مدل عددی دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد را با استفاده از تقریب

که در این معادله‌ها:

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (۴)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\lambda}{8} \rho_w \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{(\eta - d)^2} \frac{1}{\lambda} = \frac{C^2}{8g}, C = \frac{(h-d)^{1/6}}{n} \quad (۵)$$

$$\bar{\varepsilon} = 0.7 \times u^*(h-d)u^* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}} \quad (۶)$$

$$\tau_{sx} = C_f \rho_a W_x W_s \quad (۷)$$

$$\beta = \left(1 + \frac{g}{C^2 \kappa^2}\right) \quad (۸)$$

$$\tau_{by} = \frac{\lambda}{8} \rho_w \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{(h-d)^2} \quad (۹)$$

$$\begin{aligned} \tau_{sy} &= C_f \rho_a W_y W_s \\ C_f &= 1.25 \times 10^{-3} W_s^{-0.2} \text{ for } W_s \leq 1 \text{ m/s} \\ C_f &= 0.5 \times 10^{-3} W_s^{0.5} \text{ for } 1 < W_s < 15 \text{ m/s} \\ C_f &= 2.6 \times 10^{-3} \text{ for } W_s \geq 15 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در روابط فوق: U دبی در واحد عرض در جهت x ، V دبی در واحد عرض در جهت y ، $h = h(x, y, t)$ رقوم سطح آب، $d = d(x, y, t)$ رقوم بستر، $\tau_s = \tau_s(x, y, t)$ تنش برشی ناشی از باد، $\tau_b = \tau_b(x, y, t)$ تنش برشی ناشی از زبری بستر، $P_s = P_s(x, y, t)$ فشار اتمسفر، f پارامتر کوریولیس، g شتاب ثقل، ρ_w جرم حجمی آب، ρ_a جرم حجمی هوا، β ضریب اندازه حرکت، W_s تندی باد، W_x و W_y مولفه‌های سرعت باد در جهات x و y ، ω سرعت زاویه‌ای چرخش زمین، ϕ عرض جغرافیایی، κ ثابت ون-کارمن، u^* سرعت برشی، λ ضریب دارسی ویزباخ، C ضریب شزی، n ضریب زبری مانینگ، $\bar{\varepsilon}$ لزجت گردابی میانگین در عمق.

ب- انتقال معادله‌های حاکم به سیستم مختصات منحنی الخط

با توجه به عدم توانایی سیستم مختصات کارتزین در انعکاس مرزهای نامنظم دامنه فیزیکی، در تحقیق حاضر روش سیستم مختصات منحنی‌الخط به کار برده شده است. این سیستم اولین بار توسط تامسون با محورهای قراردادی ξ و η تعریف شد (Wood and Wang, 2015). با توجه به مطالب ذکر شده، معادله‌های حاکم در دستگاه مختصات منحنی‌الخط به صورت روابط (۱۱) الی (۱۳) خواهند بود (Hoffmann and Chiang, 2000):

$$h_t + \frac{1}{J} (y_\eta U_\xi - y_\xi U_\eta) + \frac{1}{J} (x_\xi V_\eta - x_\eta V_\xi) = 0 \quad (۱۱)$$

می‌گیرند با این وجود در شبیه‌سازی جریان (همانند پدیده شکست سد) در میدان‌های محاسباتی پیچیده مورد نظر این تحقیق از قابلیت بالاتری برخوردار هستند. بدین منظور در این تحقیق مدل کامپیوتری جامع در مختصات مذکور توسعه داده شده است که با استفاده از روش تفاضل محدود صریح و به‌کارگیری هم‌زمان الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس روی شبکه جابه‌جا شده به‌عنوان یک نوآوری معادله‌های حاکم بر آب‌های کم‌عمق در مسئله شکست سد حل گردیدند. این عمل با افزایش تعداد نقاط درگیر در محاسبات و ایجاد ارتباط بیشتر بین آن‌ها بدون استفاده از مستهلک‌کننده‌های مصنوعی باعث می‌شود گرادیان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی هموار شده و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی کمتر شود. در ادامه کاربرد مدل در مسائلی مختلف هیدرولیکی علاوه بر شکست سد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد روش‌ها

الف- معادله‌های حاکم

همان‌طور که در قبل بیان شد، در مهندسی هیدرولیک معادله‌های آب‌های کم‌عمق به‌عنوان معادله‌های حاکم، برای مطالعه بسیاری از پدیده‌های فیزیکی از جمله شکست سد کاربرد دارند. این معادله‌ها به شکل دوبعدی با فرض اولیه توزیع فشار هیدرواستاتیک و هم‌چنین سیال غیرقابل تراکم از متوسط‌گیری معادله‌های سه بعدی ناویر-استوکس در عمق حاصل می‌شوند (Alamatian and jafarzadeh, 2009). معادله‌های دو بعدی آب کم‌عمق برای سیال تراکم‌ناپذیر در دستگاه مختصات کارتزین (Cartesian) در راستای محورهای x و y به صورت روابط (۱) الی (۳) ارائه می‌شوند:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{h-d} \right) + \beta \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{h-d} \right) - fV = \\ -g(\eta-d) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{(h-d)}{\rho_w} \frac{\partial P_s}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \\ \varepsilon(h-d) \left[\frac{\partial^2 (U/(h-d))}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (U/(h-d))}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{h-d} \right) + \beta \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{h-d} \right) + fU = \\ -g(h-d) \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{(h-d)}{\rho_w} \frac{\partial P_s}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + \\ \varepsilon(h-d) \left[\frac{\partial^2 (V/(h-d))}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (V/(h-d))}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \varepsilon(\eta - d) \times \left\{ \frac{1}{j^2} \left[C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\xi} - 2C_2 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\eta} + C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta\eta} \right] + \frac{1}{j^3} \left[\left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi} [x_{\eta}(A_1 + B_1) - y_{\eta}(A_2 + B_2)] + \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta} [y_{\xi}(A_2 + B_2) - x_{\xi}(A_1 + B_1)] \right] \right\} + U_t + \beta \frac{1}{j} \left[y_{\eta} \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{\xi} - y_{\xi} \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{\eta} + x_{\xi} \left(\frac{UV}{h-d} \right)_{\eta} - x_{\eta} \left(\frac{UV}{h-d} \right)_{\xi} \right] - fV = \frac{-(h-d)}{j} \left[g(y_{\eta}h_{\xi} - y_{\xi}h_{\eta}) + \frac{(y_{\eta}P_{\xi} - y_{\xi}P_{\eta})}{\rho_w} \right] + \dots \tag{12}$$

$$V_t + \beta \frac{1}{j} \left[y_{\eta} \left(\frac{UV}{h-d} \right)_{\xi} - y_{\xi} \left(\frac{UV}{h-d} \right)_{\eta} + x_{\xi} \left(\frac{V^2}{h-d} \right)_{\eta} - x_{\eta} \left(\frac{V^2}{h-d} \right)_{\xi} \right] + fU = \frac{-(h-d)}{j} \left[g(x_{\xi}h_{\eta} - x_{\eta}h_{\xi}) + \frac{(x_{\xi}P_{\eta} - x_{\eta}P_{\xi})}{\rho_w} \right] + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \varepsilon(\eta - d) \times \left\{ \frac{1}{j^2} \left[C_1 \times \left(\frac{V}{h-d} \right)_{\xi\xi} - 2C_2 \times \left(\frac{V}{h-d} \right)_{\xi\eta} + C_1 \times \left(\frac{V}{h-d} \right)_{\eta\eta} \right] + \frac{1}{j^3} \left[\left(\frac{V}{h-d} \right)_{\xi} [x_{\eta}(A_1 + B_1) - y_{\eta}(A_2 + B_2)] + \left(\frac{V}{h-d} \right)_{\eta} [y_{\xi}(A_2 + B_2) - x_{\xi}(A_1 + B_1)] \right] \right\} \tag{13}$$

$$A_1 = (y_{\eta}^2 y_{\xi\xi} - 2y_{\xi} y_{\eta} y_{\xi\eta} + y_{\xi}^2 y_{\eta\eta}), A_2 = (y_{\eta}^2 x_{\xi\xi} - 2y_{\xi} y_{\eta} x_{\xi\eta} + y_{\xi}^2 x_{\eta\eta}), B_1 = (x_{\eta}^2 y_{\xi\xi} - 2x_{\xi} x_{\eta} y_{\xi\eta} + x_{\xi}^2 y_{\eta\eta}), B_2 = (x_{\eta}^2 x_{\xi\xi} - 2x_{\xi} x_{\eta} x_{\xi\eta} + x_{\xi}^2 x_{\eta\eta}), C_1 = (x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2), C_2 = (y_{\xi} y_{\eta} + x_{\xi} x_{\eta}) \tag{14}$$

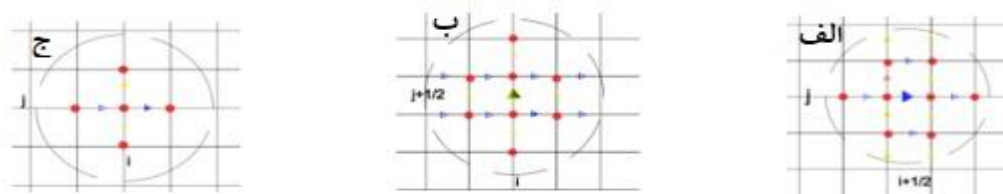


Fig. 1-a) The node that U momentum equation discretized on it b) The node that V momentum discretized on it c) The node that continuity equation discretized on it
 شکل ۱- الف) گره‌ایی که رابطه U مومنتم بر آن منفصل می‌شود ب) گره‌ایی که رابطه V مومنتم بر آن منفصل می‌شود ج) گره‌ایی که رابطه پیوستگی بر آن منفصل می‌شود.

شده است تا مختصات نقاط در قلمرو فیزیکی به‌دست آید و سپس توسط یک برنامه کامپیوتری دیگر با تبدیل مختصات در دستگاه کارترین (x,y) به مختصات منحنی‌الخط (ξ,η)، شبکه‌بندی میدان محاسباتی انجام شده و در آن مقادیر متریک‌ها و ژاکوبین‌ها در محل گره‌ها محاسبه می‌شوند.

ضرایب موجود در روابط (۱۲) و (۱۳) به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شوند:
 که در معادله‌های بالا J ژاکوبین (J = x_ξy_η - y_ξx_η) و x_ξ، y_ξ، x_η، y_η مشتق‌های تبدیل، متریک‌های انتقال و یا به‌صورت ساده‌تر متریک نامیده می‌شوند.

د- منفصل‌سازی معادله‌های حاکم به روش تفاضل محدود (پرش قورباغه و لکس) بر روی مش جابه‌جا شده
 در این تحقیق معادله‌های حاکم بر روی یک شبکه از نقاط در مختصات منحنی‌الخط که با فواصل Δξ و Δη از یکدیگر قرار دارند به روش جابه‌جا شده منفصل شده‌اند. روش منفصل‌سازی، روش صریح پرش قورباغه‌ای (Leap-Frog) است که از الگوریتم لکس (Lax) نیز بهره می‌جوید. معادله مومنتم در جهت ξ در گره (i+1/2, j, n+1/2)، معادله مومنتم در جهت η در گره (i, j+1/2, n+1/2) و معادله پیوستگی در گره (i, j, n+1)؛ منفصل می‌شوند که نمادهای i, j برای مکان و n برای زمان به‌کار می‌رود (شکل ۱). برای نمونه نحوه منفصل‌سازی هر یک از ترم‌های معادله مومنتم در

ج- شبکه‌سازی قلمرو محاسباتی معادله‌های حاکم
 حل معادله‌های جبری حاکم، نیازمند ایجاد شبکه در قلمرو مورد نظر خواهد بود. بنابراین در داخل قلمرو و روی مرزهای آن مجموعه‌ای از نقاط شبکه باید مشخص شود. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، بیشتر قلمروها غیرمستطیلی هستند و ایجاد شبکه برای آن در مختصات کارترین ایجاد مشکل خواهد کرد و لذا انتقال فضای فیزیکی به فضای محاسباتی با دستگاه مختصات کلی صورت گرفته و شبکه غیرمستطیلی موجود در فضای فیزیکی را به شبکه یکنواخت مستطیلی در فضای محاسباتی تصویر می‌کند (Hafman and Chiang, 2000). در این مقاله ابتدا با یک برنامه کامپیوتری شبکه میدان محاسباتی در مختصات کارترین ایجاد

جهت η به روش مشابه انجام شده که به دلیل کاهش حجم مقاله از ارایه آن صرف نظر شده است.

جهت ξ رابطه (۱۲) در گره $(i+1/2, j)$ شکل (۱-الف) در ادامه آورده شده است. منفصل‌سازی رابطه پیوستگی و معادله مومنتم در

$$U_t = \frac{U_{i+1/2,j}^{n+1/2} - \bar{U}_{i+1/2,j}^{n-1/2}}{\Delta t} \quad (15)$$

$$\beta \frac{1}{J} \left[y_\eta \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_\xi - y_\xi \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_\eta \right] = \beta \frac{y_\eta}{J} \left[\frac{\left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+\frac{3}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} - \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}}}{\xi_{i,j+1} - \xi_{i,j-1}} \right] - \beta \frac{y_\xi}{J} \left[\frac{\left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+\frac{1}{2},j+1}^{n-1/2} - \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+\frac{1}{2},j-1}^{n-1/2}}{\eta_{i+1,j} - \eta_{i,j}} \right] \quad (16)$$

$$\beta \frac{1}{J} \left[x_\xi \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\eta - x_\eta \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\xi \right] = \frac{x_\xi}{J} \left[\frac{\left(\frac{U^{n-\frac{1}{2}} \bar{V}^{n-\frac{1}{2}}}{i+\frac{3}{2},j+1 \quad i+\frac{1}{2},j+1} \right)}{\frac{1}{2}(h-d)_{i,j+1} + \frac{1}{2}(h-d)_{i-1,j+1}} + \frac{\left(\frac{U^{n-\frac{1}{2}} \bar{V}^{n-\frac{1}{2}}}{i+\frac{1}{2},j-1 \quad i+\frac{1}{2},j-1} \right)}{\frac{1}{2}(h-d)_{i,j-1} + \frac{1}{2}(h-d)_{i-1,j-1}} \right] - \frac{x_\eta}{J} \left[\frac{\left(\frac{U^{n-\frac{1}{2}} \bar{V}^{n-\frac{1}{2}}}{i+\frac{3}{2},j \quad i+\frac{3}{2},j} \right)}{\frac{1}{2}(h-d)_{i+1,j} + \frac{1}{2}(h-d)_{i+2,j}} + \frac{\left(\frac{U^{n-\frac{1}{2}} \bar{V}^{n-\frac{1}{2}}}{i-\frac{3}{2},j \quad i-\frac{3}{2},j} \right)}{\frac{1}{2}(h-d)_{i-1,j} + \frac{1}{2}(h-d)_{i-2,j}} \right] \quad (17)$$

$$fV = f \times \frac{1}{4} \left[V_{i,j}^{n-1/2} + V_{i,j-1}^{n-1/2} + V_{i-1,j}^{n-1/2} + V_{i-1,j-1}^{n-1/2} \right] \quad (18)$$

$$\frac{-g(h-d)}{J} (y_\eta h_\xi - y_\xi h_\eta) = \left[\frac{-g(h-d)_{i,j} + g(h-d)_{i-1,j}}{2} \right] \times \left[\frac{\frac{y_\eta}{J} (h_{i,j} - h_{i-1,j})^n - \frac{y_\xi}{J}}{\left(\frac{h_{i,j+1} + h_{i-1,j+1}}{2} \right)^n - \left(\frac{h_{i,j-1} + h_{i-1,j-1}}{2} \right)^n} \right] \quad (19)$$

$$\frac{\frac{-(h-d)}{J} \left[\frac{(x_\xi P_\eta - x_\eta P_\xi)}{\rho_w} \right]}{\left[\frac{-g(h-d)_{i,j} + g(h-d)_{i-1,j}}{2} \right]} = \left[\begin{aligned} & x_\xi \left(\frac{\left(\frac{P_{i,j+1} + P_{i-1,j+1}}{2} \right)^n - \left(\frac{P_{i,j-1} - P_{i-1,j-1}}{2} \right)^n}{\eta_{i,j+1} - \eta_{i,j-1}} \right) \\ & \times \left[\frac{\left(\frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\xi_{i,j} - \xi_{i-1,j}} \right)^n}{J} - \frac{x_\eta \left(\frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\xi_{i,j} - \xi_{i-1,j}} \right)^n}{J} \right] \end{aligned} \right] \quad (20)$$

$$\frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) = \frac{\tau_{sx}^n}{\rho_w} - \frac{\lambda U_{i,j}^{n-1/2} \times \sqrt{(U_{i,j}^{n-1/2})^2 + (\bar{V}_{i,j}^{n-1/2})^2}}{8 \left[\frac{1}{2}(h-d)_{i+1,j} + \frac{1}{2}(h-d)_{i,j} \right]} \quad (21)$$

$$\bar{\varepsilon}(h-d) \times \left\{ \frac{1}{J^2} \left\{ C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\xi} - 2C_2 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\eta} + C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta\eta} \right\} \right. \\ \left. + \frac{1}{J^3} \left\{ \left(\frac{U}{h-d} \right)_\xi \left[x_\eta(A_1 + B_1) \right] + \left(\frac{U}{h-d} \right)_\eta \left[y_\xi(A_2 + B_2) \right] \right\} \right\} = \bar{\varepsilon} \left[\frac{1}{2}(h-d)_{i+1,j} + \frac{1}{2}(h-d)_{i,j} \right] \quad (22)$$

$$\bar{U}_{i+\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} = 0.25 \times U_{i-\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} + 0.5 \times U_{i+\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} + 0.25 \times U_{i+\frac{3}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$\bar{V}_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} = \frac{1}{4} \left[V_{i,j+1/2}^{n-1/2} + V_{i,j+3/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j+1/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j+3/2}^{n-1/2} \right], \bar{V}_{i+1/2,j-1}^{n-1/2} \\ = \frac{1}{4} \left[V_{i,j-1/2}^{n-1/2} + V_{i,j-3/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j-1/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j-3/2}^{n-1/2} \right] \quad (24)$$

بردار سرعت در نقطه مجازی خارج از مرز با بردار سرعت در نقطه داخل مرز موازی دیوار باشد به عبارتی:

$$v = V \sin(2\theta - \alpha), \quad u = V \cos(2\theta - \alpha) \quad (25)$$

که در آن θ زاویه دیوار دامنه محاسباتی نسبت به محور افق، α زاویه بردار سرعت داخل مرز نسبت به افق، V برآیند سرعت در نقاط داخلی، v مؤلفه عمودی سرعت در نقطه مجازی و u مؤلفه مماسی سرعت در نقطه مجازی. از آنجائی که مدل تهیه شده در این تحقیق بر مبنای روش صریح است بنابراین شرط پایداری آن عدد کورانت کمتر از یک می باشد (رابطه ۲۶).

$$C_r = \sqrt{g(h-d)} \frac{\Delta t}{\min(\Delta\xi, \Delta\eta)} \quad (26)$$

نتایج و بحث

به منظور صحت‌سنجی مدل حاضر نتایج آن با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و یا با نتایج سایر مدل‌های عددی ارایه شده توسط محققان قبلی مقایسه شد. در ادامه صحت سنجی مدل برای چندین مورد ارایه شده است.

۵- شرایط مرزی و پایداری

در مرزهای باز ورودی، در شرایط جریان زیربحرانی دبی جریان مشخص و در حالت فوق بحرانی، دبی و عمق جریان مشخص به-عنوان شرط مرزی ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای مرز باز خروجی، عمق جریان مشخص و گرادیان صفر برای سرعت‌های عمود بر مرز به عنوان شرط مرزی خروجی برای مدل تعریف شده است. در مرز خروجی و ورودی سرعت مماس بر صفحه برابر صفر در نظر گرفته شده است. در نقاط فرضی خارج از مرز تقارن عمق جریان و مؤلفه سرعت موازی با مرز، برابر عمق و سرعت نقاط همسایه داخلی مرز و مؤلفه سرعت عمود بر مرز تقارن صفر در نظر گرفته شد. در نقاط فرضی خارج از دیوار صلب سرعت عمودی و عمق با تغییر علامت نقاط همسایه داخلی جایگزین شده‌اند که انعکاس غیرمتقارن حاصل می‌شود (شرط گرادیان صفر) در حالی که سرعت مماس در نقطه فرضی برابر و هم علامت نقطه همسایه داخلی در نظر گرفته شده است. در مرزهای صلب که دیوار دامنه محاسباتی نسبت به محور افق موازی یا عمود نیست بلکه زاویه θ می‌سازد، مرزهای انعکاسی در مدل به این ترتیب گنجانده شده است که برآیند

در تحقیق حاضر و درگیر کردن تعداد نقاط بیشتر در منفصل‌سازی این نوسانات گرفته شده و نتایج به مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر نزدیک شده و خطای کمتری دارد.

شکست ایده ال در کانال با عمق پایاب

در این مرحله کانالی افقی به طول ۱۰۰ متر بدون اصطکاک با وجود عمق جریان در پایین دست محل سد شبیه‌سازی شده است (سد در وسط کانال قرار دارد). در ابتدای محاسبه عمق جریان در مخزن سد یک متر و در پایین دست دو سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) منحنی‌های عمق جریان (h) و دبی در واحد عرض (q) ۱۰ ثانیه پس از شکست سد نشان داده شده است. نتایج مدل حاضر با جواب حل تحلیلی Stoker (1957) مقایسه شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.

به‌منظور مقایسه، مقادیر عمق و دبی جریان محاسبه شده در محل شکست برای مدل عددی حاضر و روش تحلیلی در جدول (۱) آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مدل عددی نتایج را برای جریان در محل شکست با تقریب خوب و نزدیک به حل تحلیلی ارائه داده است.

شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی

مقایسه شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی مدل با نتایج مدل Chauhdry (2007) و اندازه‌گیری آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده است. در این بررسی کانالی به طول ۱۳ متر در نظر گرفته شده است. در ابتدای محاسبات عمق جریان در بالادست ۶/۴ سانتی-متر و در پایین دست ۱۷ سانتی‌متر لحاظ شده است. گام مکانی در مدل حاضر هفت سانتی‌متر در جهت طول و یک سانتی‌متر در جهت عرض در نظر گرفته شده است. این شبیه‌سازی برای عدد فرود ۲/۳ به‌منظور مقایسه با نتایج مدل چادری (Chauhdry) انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی مدل عددی چادری (Chauhdry) برای گام مکانی متغیر (۰/۱۵ تا ۰/۶ متر) و توسط روش مرتبه دوم مک کورمک (Mac-Cormack) ارائه شده است.

مقایسه نمودارها در شکل (۲) نشان می‌دهد که در هر دو مدل وقوع پرش در فاصله نزدیک به ۱/۵ متر از ابتدای کانال رخ داده و در فاصله ۲/۵ متر از ابتدای کانال به اتمام رسیده است. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود در مدل عددی مک کورمک (Mac-Cormack) پروفیل سطح آب در انتهای پرش و در فاصله ۲/۵ متری از ابتدای کانال دارای نوسان می‌باشد که با الگوریتم به کار برده شده

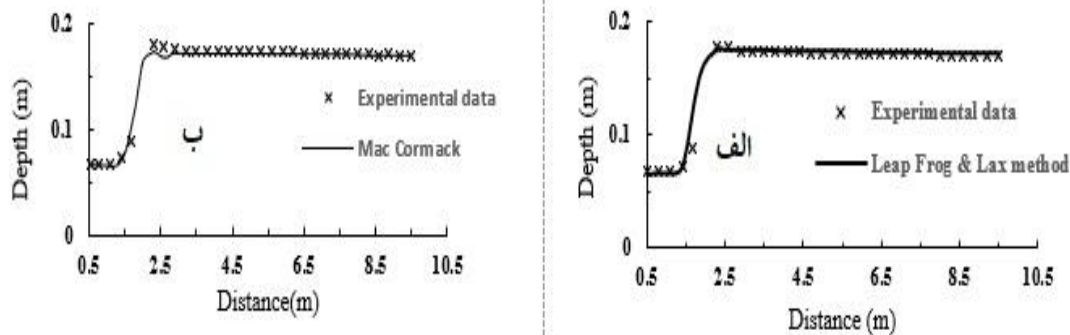


Fig. 2- Comparison of calculated hydraulic jump profile by a) The current numerical model b) The Chauhdry model with experimental data

شکل ۲- مقایسه پروفیل پرش هیدرولیکی در الف) مدل عددی حاضر، ب) مدل چادری با اندازه‌گیری آزمایشگاهی (Chauhdry, 2007).

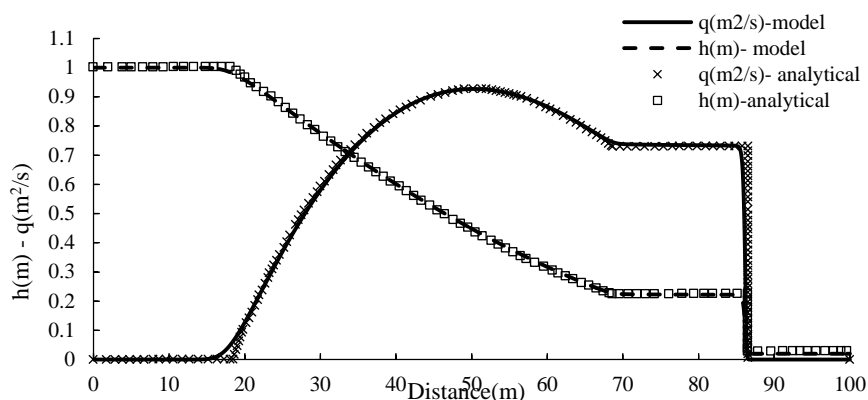


Fig. 3- Comparison the results of the ideal dam break over the wet bed of the current numerical model with the analytical solution in the simulation of flow depth (h) and discharge per unit width (q) 10 seconds after the dam break (Stoker, 1957).

شکل ۳- مقایسه نتایج شکست ایده‌آل در کانال با عمق پایاب برای مدل عددی حاضر و حل تحلیلی در شبیه‌سازی عمق (h) جریان و دبی در واحد عرض (q) ۱۰ ثانیه پس از شکست سد (Stoker, 1957).

جدول ۱- مقایسه عمق و دبی جریان در محل شکست سد در روش عددی و تحلیلی

Table 1- Comparison of calculated flow depth and discharge at dam break location by numerical and analytical solutions

Method	Flow discharge($m^3/s/m$)	Depth(m)
Analytical	0.927	0.45
Current- numerical model	0.927	0.449

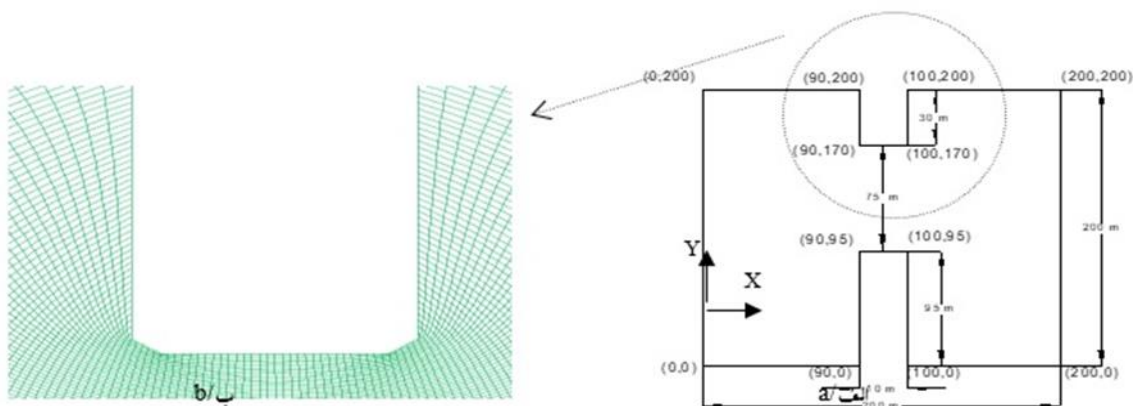


Fig 4. a) Schematic view and b) part of domain mesh for partial dam break (adopted from study of Chauhdry, 2007)

شکل ۴- الف) نمای شماتیک و ب) مش بندی قسمتی از دامنه محاسباتی برای شکست جزئی سد (الهام گرفته از مطالعه Chauhdry, 2007)

دریچه دارای عرض ۷۵ متر می‌باشد. همچنین دیوار سد دارای ضخامت ۱۰ متر در جهت جریان می‌باشد. تصویر شماتیک این محدوده و قسمتی از شبکه محاسباتی آن در شکل (۴) ارائه شده است. نتایج برای دو نوع مش (۳۰۱×۳۰۱) و (۴۰۱×۴۰۱) در

شکست جزئی نا متقارن سد در بستر تر

محدوده مورد مطالعه، محدوده در نظر گرفته شده توسط Chauhdry (2007) می‌باشد. این محدوده متشکل از یک کانال با طول و عرض ۲۰۰ متر است. شکاف غیرمتقارن و بازشدگی

سد در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج بدست آمده به ازای مش ریز با نتایج مدل Chauhdry (2007) در این شکل مقایسه شده است که سازگاری نتایج مشهود است.

از جمله دلایل اختلاف مدل حاضر با مدل‌های ارائه شده توسط Chauhdry (2007) می‌تواند ناشی از نحوه منقلص‌سازی معادله‌های حاکم و همچنین مش‌بندی محدوده مورد مطالعه باشد. مدل حاضر بر خلاف مدل Chauhdry (2007) در مختصات منحنی‌الخط توسعه داده شده و همان‌گونه که در شکل (۲-ب) نشان داده شده است در محل شکست لازم است که برای خطوط عمود برهم پخش‌زدگی در نظر گرفته شود، که مقدار پخش‌زدگی در این تحقیق یک متر می‌باشد. با این کار مقداری انقباض جریان در محل شکست کمتر می‌شود که می‌تواند روی نتایج تأثیر گذار باشد.

جهت ξ و η ارایه شده است.

شکل‌های (۵) و (۶) پروفیل سطح آب مدل عددی حاضر را برای شکست جزئی سد در مقایسه با نتایج بدست آمده از Chauhdry (2007) نمایش می‌دهند. مقایسه پروفیل‌های عرضی سطح آب در نقاط بالادست (در فاصله طولی ۷۵ متر)، داخل (در فاصله طولی ۹۵ متر) و پایین دست (در فاصله طولی ۱۱۵ متر) محل شکست در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل چنانچه مش‌بندی محدوده مورد مطالعه ریزتر انتخاب شود نتایج در محدوده بالادست و پایین دست محل شکست با نتایج مدل چادری تطابق بیشتری دارد و بر عکس با انتخاب مش درشت‌تر نتایج برای محدوده داخل محل شکست با نتایج مدل Chauhdry (2007) سازگارتر خواهد بود. نمودار تغییرات عمق جریان در مقابل زمان پس از شکست سد در دو مکان، پایین دست و در محل شکست

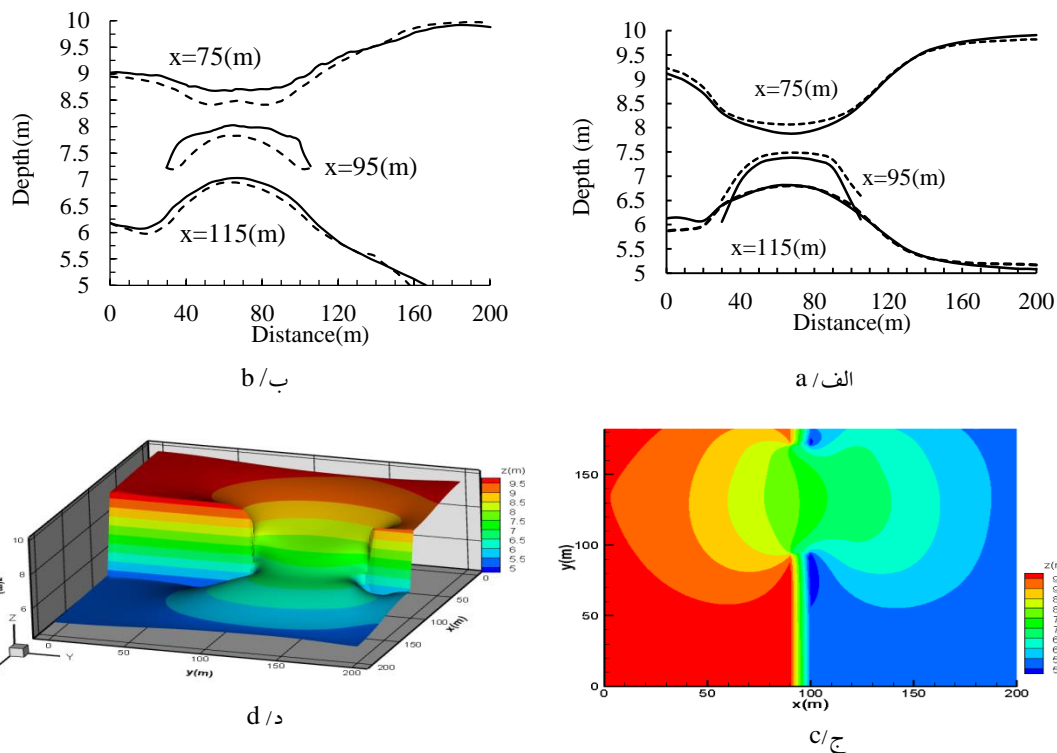


Fig 5.- Comparison of lateral water surface profile: a) result of current model (Dash-line coarse mesh, continues-line fine mesh) b)Result of Chauhdry model(Dash line Gabuti algorithm, continues line(Mac-Cormack) c)2 -D view d) 3-D view of water surface 7.5 sec after dam break

شکل ۵- مقایسه پروفیل عرضی سطح آب: الف) نتایج مدل عددی حاضر (خط چین الگوریتم مش درشت، خط ممتد مش ریز) ب) نتایج مدل چادری (خط چین الگوریتم گابوتی (Gabuti)، خط ممتد الگوریتم مک-کورمک (Mac-Cormack)) (Chauhdry, 2007) ج) نمای دو بعدی و

د) نمای سه بعدی سطح آب ۷/۵ ثانیه پس از شکست سد

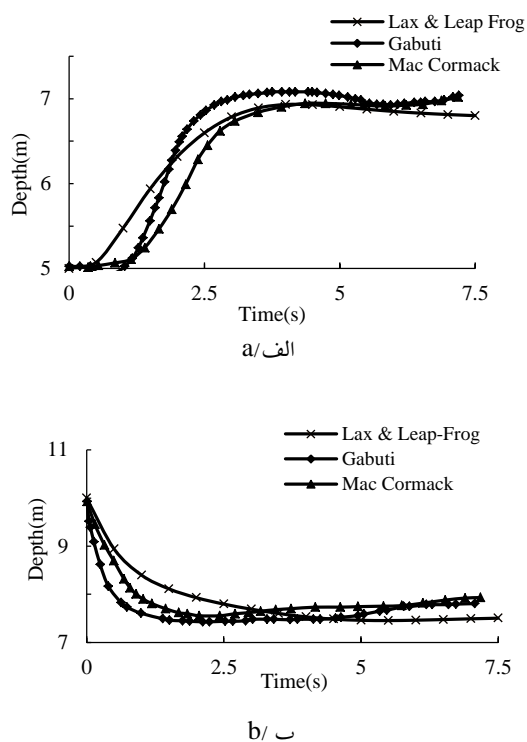


Fig. 6- Comparison of variation of water surface level versus time in partial dam break a) downstream of dam break location(distance of 115m) b) at dam break location (distance of 95 m)

شکل ۶- مقایسه تغییرات رقوم سطح آب در مقابل زمان در شکست جزئی: الف) در پایین دست محل شکست (در فاصله طولی ۱۱۵ متر) ب) در محل شکست (در فاصله طولی ۹۵ متر)

شیب صفر و شیب یک‌صدم صورت گرفته است، که نتایج به تفکیک در شکل (۸) ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، موج منفی در داخل مخزن سد و موج مثبت پایین رونده در کانال پایین‌دست قابل مشاهده است. پروفیل سطح آب مدل آزمایشگاهی برای زمان‌های مختلف (۲، ۴، ۶، ۱۲، ۲۰، ۶۰) ثانیه ارائه شده است که از مقاله Bellos et al (1992) اقتباس شده است. با مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل (۸) ملاحظه می‌شود که نتایج مدل حاضر با نتایج مدل آزمایشگاهی برای حالت بدون شیب و شیب‌دار سازگار است. برای مقایسه مقادیر محاسبه شده عمق جریان در محل سد (در فاصله طولی ۸/۵ متر از ابتدای کانال) و مقادیر اندازه‌گیری Bellos et al (1992) به همراه مقدار خطا در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به مقادیر ذکر شده در جدول میانگین خطا در نتایج مدل عددی حاضر نسبت به نتایج اندازه‌گیری Bellos et al (1992) برای کانال بدون شیب کف، ۴/۰۲ درصد و برای کانال با شیب کف یک‌صدم، ۱/۶۵ درصد است.

شکست سد در کانال همگرا- واگرا بدون شیب و شیب‌دار

به‌منظور بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی امواج ناشی از شکست سد در محدوده‌هایی که فیزیک آن‌ها بیشتر با مختصات منحنی‌الخط مطابقت دارد نتایج آن با نتایج مدل آزمایشگاهی، Bellos et al (1992) مقایسه شده است. بدین منظور کانالی به طول ۲۱ متر به پهنای ۱/۴ متر بدون اصطکاک کف و دیواره‌ها، با شیب کف صفر و یک‌صدم در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل (۷-الف) نشان داده شده است یک دریاچه در محل انقباض و در فاصله طولی ۸/۵ متر از ابتدای کانال نصب شده است. عمق جریان در بالادست دریاچه ۰/۳ متر و در پایین‌دست به‌صورت بستر خشک در نظر گرفته شده است. مش‌بندی دامنه محاسباتی با ایجاد شبکه دارای ۴۲۱ گره در جهت ξ و ۵۷ گره در جهت η صورت گرفته است. یک نمونه از مش‌بندی محدوده البته به منظور وضوح بیشتر با شبکه درشت در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. مقایسه مدل عددی حاضر با مدل آزمایشگاهی Bellos et al (1992) برای دو حالت کانال با

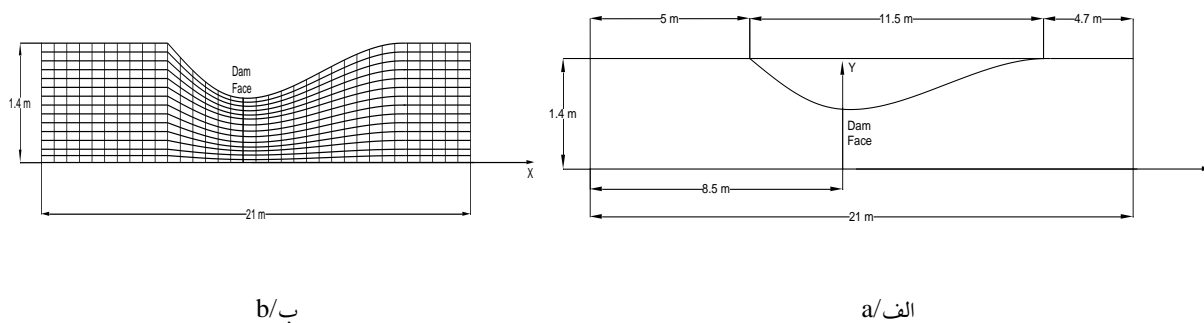


Fig. 7- Study area, converging-diverging experimental flume (Bellos, Saulis and Sakas, 1992) b) sampel of generated mesh for the study area
 شکل ۷- الف) محدوده مورد مطالعه، فلوم آزمایشگاهی همگرا-واگرا (Bellos, Saulis and Sakas, 1992) ب) نمونه مش بندی محدوده مورد نظر

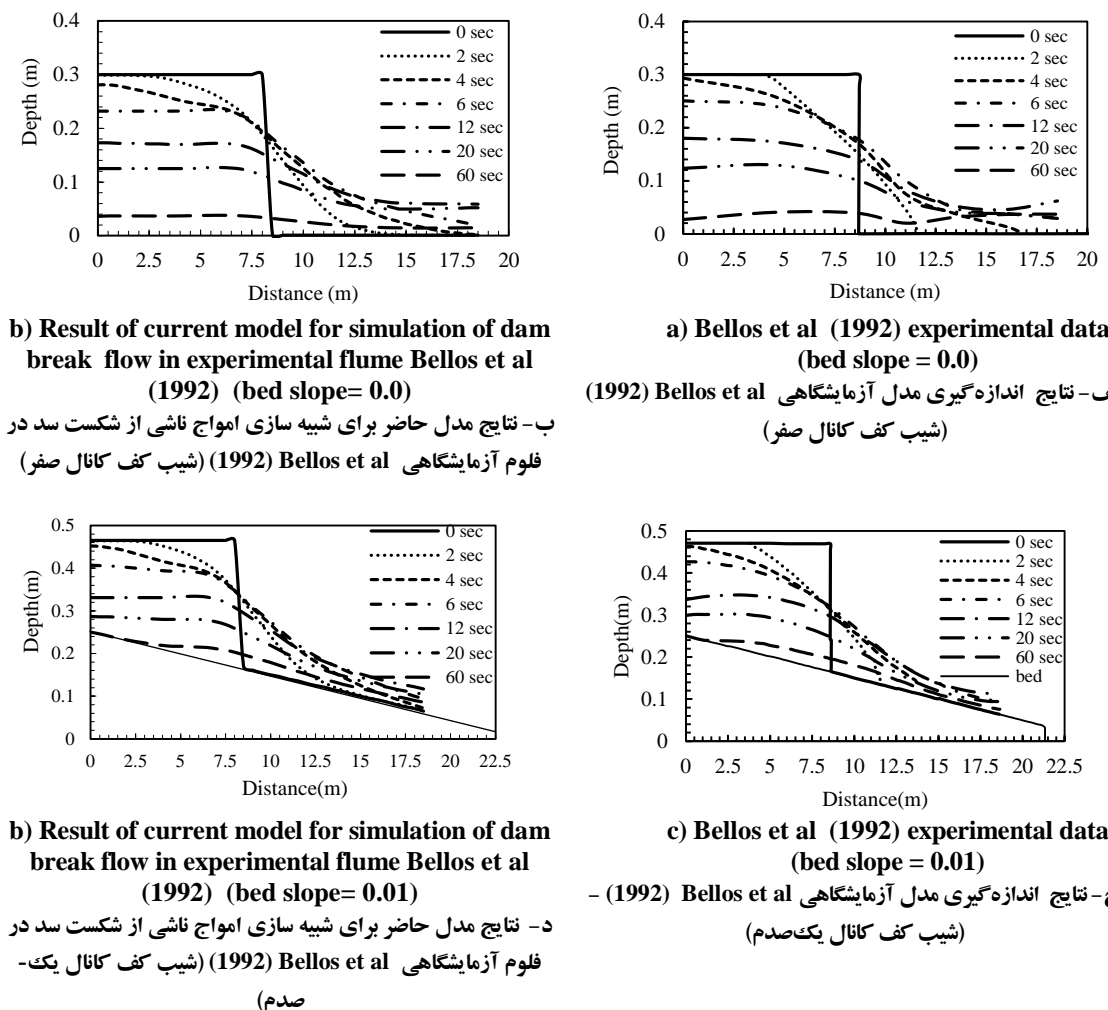


Fig. 8- Comparison current model result and experimental data of Bellos et al (1992)

شکل ۸- مقایسه نتایج مدل حاضر با داده های اندازه گیری سطح آب Bellos و همکاران (۱۹۹۲)

در شبیه سازی عمق آب در شکست سد برای زمان های مختلف.

جدول ۲- رقوم سطح آب (متر) محاسبه شده توسط مدل عددی حاضر و نتایج اندازه‌گیری Bellos et al (1992) در محل شکست
Table 2- Calculated water level (m) with current model and Bellos et al. (1992) measured data at dam break location

	2sec	4sec	6sec	12sec	20sec	60sec
Used method for determining water level						
Experimental method (channel without bed slop)	0.156	0.174	0.181	0.141	0.102	0.0392
Numerical method (channel without bed slop)	0.165	0.175	0.181	0.143	0.106	0.0341
Relative Error % (channel without bed slop)	5.76	0.57	0.0	1.42	3.92	12.8
Experimental method (bed slope =0.01)	0.314	0.316	0.32	0.296	0.248	0.195
Numerical method (bed slope =0.01)	0.322	0.326	0.328	0.295	0.249	0.197
Relative Error% (bed slope=0.01)	2.54	3.16	2.5	0.33	0.4	1.02

ایجاد ارتباط بیشتر بین آنها گرا دیان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی را هموار می‌نماید و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی کمتر می‌شود. کاربرد مدل در مسایل مختلف هیدرولیکی نشان داد:

۱- در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی مدل حاضر، محل شروع و خاتمه پرش و همچنین نیم‌رخ سطح آب اندازه‌گیری شده در طول پرش هیدرولیکی را به‌درستی پیش‌بینی می‌نماید.

۲- در شبیه‌سازی شکست ایده‌آل بر روی بستر با عمق پایاب مدل عددی حاضر توانایی تقریب جواب حل تحلیلی Stoker (1957) را با دقت بالایی دارد.

۳- در شبیه‌سازی شکست جزئی نامتقارن بر روی بستر با عمق پایاب نتایج مدل عددی حاضر با نتایج بدست آمده از مدل‌های Chauhdry (2007) هم‌خوانی دارد. هر چند نتایج هیچ‌کدام از سه الگوریتم گابوتی (Gabuti) و مک-کورمک (Mac-Cormack) (در مدل چادری) و الگوریتم پرش قورباغه-لکس (در تحقیق حاضر) بر هم منطبق نیست ولی هر سه الگوریتم از روند کاملاً یکسانی پیروی می‌کنند.

۴- برای رسیدن به هدف اصلی این تحقیق، نتایج مدل در شبیه‌سازی پدیده شکست سد در کانال همگرا-واگرا بدون شیب و شبیدار با نتایج اندازه‌گیری مقاله Bellos et al (1992) مقایسه شد. مشخص گردید مدل عددی با میانگین خطای کمتر از پنج درصد عمق جریان در محل شکست را تخمین می‌زند.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه رازی انجام شده است که بدینوسبیل تقدیر و تشکر می‌گردد.

نتیجه‌گیری

مدل‌های دوبعدی آب‌های کم‌عمق به لحاظ سادگی نسبی و دقت خوبی که در حد نیازهای مهندسی دارند، در طراحی‌ها و مطالعه‌ها مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند. در نرم‌افزارهایی که شکست سد به‌صورت سه بعدی شبیه‌سازی می‌شود مانند Flow 3D و یا Fluent، نوسان‌های سرعت در زمان در نظر گرفته می‌شود و لازم است معادله‌ها در گام‌های زمانی بسیار کوتاه حل شوند، بنابراین محاسبه‌ها به زمان بسیار زیاد نیاز دارد که در شرایط پیچیده جواب‌های بهتری می‌دهد اما برای کارهای مهندسی کاهش زمان محاسبه‌ها از اولویت‌ها خواهد بود. لذا می‌توان اذعان داشت از مزیت‌های روش مورد استفاده در این مقاله استفاده از فرمول‌بندی ساده با هزینه محاسباتی کم در مقایسه با مدل‌های سه‌بعدی می‌باشد. از سوی دیگر هنگام استفاده از مدل‌های عددی آب‌های کم‌عمق در مختصات کارتیزین، در برخورد با هندسه پیچیده لازم است در نزدیکی مرز، میدان جریان به‌صورت پلکانی در نظر گرفته شود و در تمام پله‌های ایجاد شده بایستی شرایط مرزی اعمال گردد که خود از مشکل‌های اصلی این روش است چرا که مدل عددی باید بتواند در تمامی این مرزها شرط مرزی مناسب را اعمال کند. برای غلبه بر این مشکل در این تحقیق فضای فیزیکی به فضای محاسباتی منتقل شده، که این انتقال توسط دستگاه مختصات منحنی‌الخط انجام می‌گیرد. بدین منظور در این تحقیق مدل کامپیوتری در مختصات منحنی‌الخط توسعه داده شد. از روش تفاسیل محدود صریح و استفاده هم‌زمان از الگوریتم پرش قورباغه (Leap-Frog) و لکس (Lax) بر روی مش جابه‌جاشده معادله‌های حاکم بر آب‌های کم‌عمق حل شدند. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شد این عمل تعداد نقاط درگیر در محاسبه‌ها را افزایش می‌دهد و با

References

- 1- Alamatian, A. and Jafarzade, M., 2009. Evaluation of turbulence models in simulation of oblique standing shock waves in super-critical channel flow. *Civil Engineering of Sharif University*, pp. 17-27. (In Persian).

- 2- Bani-Habib, A. and Nazariye, F., 2012. Two-dimensional simulation of debris flow in the reservoir of silt detention dam. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 11(39), pp. 77-87. (In Persian).
- 3- Bani-Hashemi, M. A. and Kiyanian, M., 2007. Two-dimensional model of gradual dam break with fread and mac-cormack method. In *4th Civil Engineering Conference, University of Tehran, Tehran, Iran*.
- 4- Bellos, C.V., Soulis, V. and Sakkas, J.G., 1992. Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows. *Journal of Hydraulic Research*, 30(1), pp. 47-63.
- 5- Chaudhry, M.H., 2007. *Open-channel flow*. New York: Springer Science & Business Media.
- 6- Ghobadian, R., 2015. Two dimensional dam break modeling by explicit finite difference method. In *14th Hydraulic Conference, Zahedan University, Zahedan, Iran*. (In Persian).
- 7- Golavi, M., 2002. Two-dimensional dam-break modeling by Beam-Warming method. *M.Sc thesis. University of Tehran Iran*. (In Persian).
- 8- Hadian, M. and Zarati, A., 2008. *Numerical models for shallow waters flows and their applications in river and coastal engineering*. Tehran: Amir Kabir University of Technology Press. (In Persian).
- 9- Haoyao, Z., Jinbao, S., Shichen, Z. and Weiwei, S., 2012. Principal component analysis method applying to earthquake-damaged reservoir's comprehensive evaluation. *Procedia Engineering*, 28, pp.548-554
- 10- Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T., 2000. *Computational Fluid Dynamics Volume I*. Wichita, Kan, USA: Engineering Education System.
- 11- Liu, M.Q. and Liu, Y.L., 2012. A 2D Numerical Model for Simulation of Two-Dimensional Circular Dam-Break. *Applied Mechanics and Materials*, 130, pp. 2993-2996.
- 12- Ritter, A. (1892). *The propagation of water waves*. Ver Deutsch ingenieur zeitschr, 36(33 part 3), 947-954.
- 13- Sarveram, H. and Shamsaee, A., 2012. Two-dimensional modeling of dam break flow with implicit semi-Lagrangian method. *Iran Water Research*, 7(13), pp. 21-30. (In Persian).
- 14- Stoker, J. J., 1957. *Water waves: The mathematical theory with applications*. John Wiley & Sons.
- 15- Vosoughifar, H., Parmas, B. and Razmkhah, A., 2014. Presenting a numerical model using solving shallow-water equation to investigate the dam breaking phenomenon. *15th Civil Students Conference Nationwide, Urmia University, Urmia, Iran*. (In Persian).
- 16- Wang, J.S., Ni, H.G. and He, Y.S., 2000. Finite-difference TVD scheme for computation of dam-break problems. *Hydraulic Engineering*, 126(4), pp.253-262.
- 17- Wood, A. and Wang, K.H., 2015. Modeling dam-break flows in channels with 90 degree bend using an alternating-direction implicit based curvilinear hydrodynamic solver. *Computers & Fluids*, 114, pp.254-264.
- 18- Yu-chuan, B. and XU, D., 2007. Numerical Simulation of two-dimensional dam-break flows in curved channel. *Journal of Hydrodynamics*, 19 (6), pp.726-735.
- 19- Zhang, Y. and Lin, P., 2015. August. An improved SWE model for simulation of dam-break flows. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 169(6), pp. 260-2

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study on the Effect of Quadrate Hydraulic Jet Distance relative to Sediment Surface on the Efficiency of Hydrosuction Systems

M. Kiani Nejad¹, M. Zounemat-Kermani*² and S. Golestani Kermani³

1-M.Sc. Graduated, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman.

2-Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman.
zounemat@uk.ac.ir*

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 23 April 2019

Revised: 22 November 2019

Accepted: 24 November 2019

Keywords:

Multiple jets, Hydraulic Jet Arrangement, Hydrosuction System.

TO CITE THIS ARTICLE:

Kiani Nejad, M., Zounemat-Kermani, M., Golestani Kermani, S. (2023). 'Experimental Study on the Effect of Quadrate Hydraulic Jet Distance relative to Sediment Surface on the Efficiency of Hydrosuction Systems', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 33-45. doi: 10.22055/jise.2019.29167.1839.

Introduction

The entry of sediments into the lakes of dams over many years and the sedimentation within the reservoirs are inevitable phenomena, and it is expected that with the reduction of reservoir volume of dams, planning for the exploitation of dams and water allocation for various issues such as agriculture, industry, and drinking will become difficult (Ashrafi Vaghefi et al., 2008). Reducing the volume of the reservoir will shorten the useful life of the dams, and any neglect of this issue, especially in arid and semi-arid countries around the world, can be a serious threat (Emamgholi Zadeh 2008). One of the most effective methods for sediment removal from reservoirs of dams is the hydro suction method. In this method, the difference between the water level in the reservoir and downstream is used as suction force for sediment transfer. In this method, using the minimum volume of water, the maximum amount of sediment is discharged, saving costs (Chin et al., 2010). Also, other advantages of this method can be environmental compatibility due to the controllable amount of outlet sediments, low mud, the ability to concentrate dredging in one area, the ability to transfer siphon dredging, the low cost of constructing and installing it, the ability to perform even in low water seasons, the waste of less water, and non-interrupted operation. It seems that combining hydrosuction and water jet methods, in addition to having the advantages mentioned, increases sediment removal efficiency, which has received less attention from researchers. Therefore, in this research, the effect of jet arrangement and hydraulic jet distance relative to the sediment surface on improving sediment removal in the jet hydrosuction method has been studied.

Methodology

In order to investigate the effect of arrangement and hydraulic jet distance relative to the sediment surface on the efficiency of the jet-hydrosuction method, a physical model was used, whose schematic design is presented in figure (1).

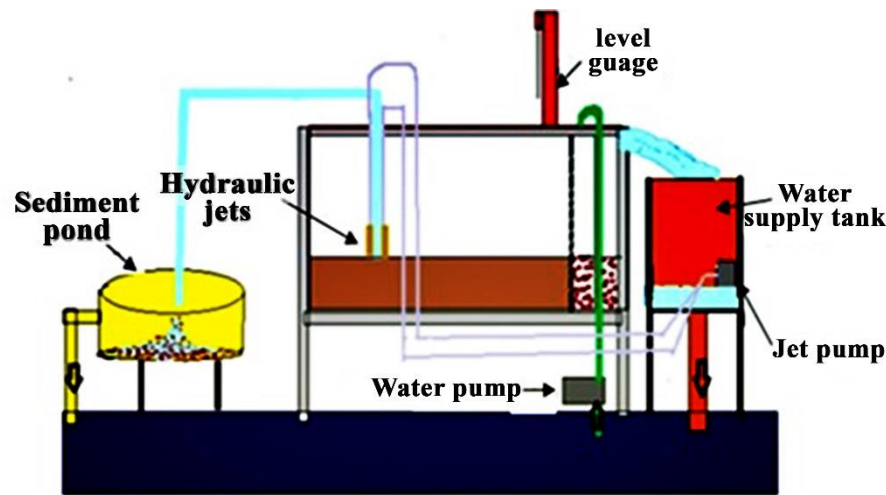


Fig. 1- Schematic design of the model

A non-cohesive, poorly granulated sediment (SP) with a density of 2.5 gr/cm³ was poured inside the reservoir at a height of 15cm. The inlet suction tube was then set up vertically on the surface of the sediment. After the jet pump started to work, sediments were separated and suspended by the water jet. Then the vortex flow was created by opening the pipe outlet, and the suction tube acted as a vacuum cleaner and drained all the sediments into it. In the present study, all experiments were carried out at an inflow discharge of 1.85 L/S in both jet and jet-free modes (control). The control test was performed in three effective heads (0.75, 0.7, and 0.65m). Also, jet experiments in a square arrangement were performed with a jet flow rate of 1.03 m/s, three different distances of hydraulic jet relative to the sediment surface (0.02 m above the surface of sediments, tangent to the surface of sediments, and 0.02m below the surface of sediments), and three effective heads (0.75, 0.7, and 0.65m). Then, the sediment discharge efficiency and scour hole volume were calculated in this treatment and compared with control and single jet samples, Which were previously done in the same conditions (Moghbeli Mehni, 2017).

Results and Discussion

The results of this study showed that sediment discharge efficiency in the quadratic jet-hydro suction method was increased in the jet square arrangement compared to the single-jet and control samples, except in one case (effective head of 0.75m and jet distance of 2cm above the sediment surface). The jet square arrangement makes the water jet dig up a wide range of sediment from the bed and diffuse it into the space around the inlet of the suction tube. Also, for fixed effective heads and hydraulic jet arrangements, reducing the hydraulic jet distance relative to the sediment surface increased the sediment discharge and scour hole volume. The maximum efficiency (0.67%) was observed at a 0.75 m effective head and a jet distance of 0.02 m below the sedimentation level. Also, the ratio of scour hole volume increased in the quadratic jet tests. Scour hole volume in this arrangement to control scour hole volume and the scour hole volume of a single jet sample were calculated at 14.53 and 1.54, respectively.

Conclusion

In this study, the effect of arrangement and hydraulic jet distance relative to the sediment surface on the efficiency of the jet-hydro suction method was studied. The results showed that with a fixed effective head and hydraulic jet distance in a square arrangement of jets, the sediment discharge efficiency and scour hole volume were 17.18 and 14.53 times higher than the observed values in the control sample and 1.52 and 1.51 times higher than the observed values in a single jet, respectively.

In general, the best efficiency for discharge sediment was observed in the square arrangement of jets with an effective head of 75cm and a jet distance of 0.02 below the sedimentation level.

Acknowledgment

Author are thankful to H. Moghbeli Mehni and the Hydraulic laboratory of water engineering department of Shahid Bahonar University of Kerman for their valuable contributions.

References

- 1-Ashrafi Vaghefi, S.S., Bani Hashemi, S.M. and Rahmanian, M., 2008. The Effect of Desalination Operations on the Rehabilitation of Dams Reserves (case study:Sefidrood dam). *In 2th National Conference on Dam and Hydropower, Tehran, Iran* (In persian).
- 2-Chin, C.H.E.N., Shun-Chang, W.A.N.G. and Chun-Hung, W.U., 2010. Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. *International Journal of Sediment Research*, 25(2), PP. 149-160.
- 3-Emamgholi Zadeh, S. and Jahani, H., 2008. Hydraulic investigation of flow in pressure-dewatering sediment using laboratory results, *In 4th National Congress on Civil Engineering, Tehran, Iran* (In persian).
- 4- Moghbeli Mehni, H., 2017. Laboratory study of removal sediment from dam reservoir with jet-hydrosuction method, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman, Iran* (In Persian).



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی آزمایشگاهی تاثیر فاصله جت‌های هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب بر کارایی روش جت چهارگانه- مکش آبی

مینو کیانی نژاد^۱، محمد ذونعمت کرمانی^۲ و سودابه گلستانی کرمانی^۳

۱- دانش اموزخانه مقطع کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان. zounemat@uk.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۱

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳

چکیده

با توجه به افزایش پدیده رسوب‌گذاری در مخازن سدهای ایران و گرفتگی دهانه آبیگرها، ارایه روشی که با کمترین هزینه به‌طور موضعی رسوبات را تخلیه نماید، ضروری است. روش مکش آبی با توجه به قابلیت کنترل رسوبات خروجی و سازگاری با محیط‌زیست، روش مقرون به صرفه‌ای است و به نظر می‌رسد که می‌توان در روش‌هایی مانند جت- مکش آبی با چیدمان مناسب جت‌ها و همچنین تنظیم فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب، عملکرد سیستم در تخلیه رسوبات را بهبود بخشید که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است. بدین منظور تأثیر چیدمان چهارگانه جت‌ها (آرایش مربعی) در سه فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب (+۲ سانتی‌متر، +، -۲ سانتی‌متر) و سه هد مؤثر (۶۵ سانتی‌متر، ۷۰ سانتی‌متر، ۷۵ سانتی‌متر) بر کارایی روش مکش آبی بررسی گردید و مقادیر ثبت شده با مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده در حالت بدون جت (نمونه شاهد) و تک جت مقایسه شد. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان داد که حداکثر راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی در هد مؤثر ۷۵ سانتی‌متر و فاصله -۲ سانتی‌متری جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب رخ داده و شاخص‌های مذکور در چیدمان مربعی جت‌ها نسبت به نمونه بدون جت به ترتیب ۱۷/۱۸ و ۱۴/۵۳ برابر و نسبت به نمونه تک جت ۱/۵۲ و ۱/۵۱ برابر شده است.

کلید واژه‌ها: جت چندگانه، چیدمان جت هیدرولیکی، سیستم مکش آبی.

مقدمه

رسوب‌گذاری در مخازن سدها امری اجتناب‌ناپذیر است. این پدیده آثار نامطلوب زیادی در مخازن سدها مانند کاهش پایداری سد، عملکرد نامناسب دریچه‌های بهره‌برداری، مسدود کردن دریچه‌ها و مدخل آبیگری، فقدان مزایای کنترل سیلاب در پایین‌دست، افزایش سیل در بالادست به دلیل رسوب‌گذاری بار کف در نواحی دلتایی و ورود رسوب به تأسیسات برق‌آبی را به دنبال دارد. علاوه بر این رسوب‌گذاری بر تولید انرژی، عملکرد توربین‌ها، تولید و تأمین آب و ایمنی سدها تأثیرگذار است (Valizadegan et al., 2011). تاکنون روش‌های گوناگونی برای رسوب‌زدایی مخازن سدها ارایه شده است که بیشتر آن‌ها به‌علت هزینه زیاد و مصرف بالای آب و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی در پایین‌دست نامناسب بوده‌اند. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به دلیل صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی مورد توجه قرار گرفته است، رسوب‌زدایی مخزن سد با استفاده از روش سیفون است. در این روش از اختلاف تراز آب داخل مخزن

و پایین‌دست به‌عنوان نیروی مکش برای انتقال رسوبات استفاده می‌شود و به انرژی خارجی نیاز ندارد (Chin et al., 2010). از مزایای دیگر این روش نسبت به سایر روش‌های لایروبی می‌توان به سازگاری با محیط‌زیست به دلیل قابل کنترل بودن میزان رسوبات خروجی، گل‌آلودگی کم و توانایی متمرکز کردن لایروبی به یک منطقه (تخلیه موضعی) و همچنین قابلیت انتقال سیفون لایروبی اشاره کرد (Atkinson, 1996; Asiaban et al., 2017). به‌علاوه در این روش به دلیل پیوستگی در رهاسازی رسوبات، تخلیه ناگهانی و ضربه‌های وارده به دریچه و بدنه سد که مختص روش آبشویی سریع می‌باشد، وجود ندارد (Hotchkiss and Huang, 1995). با توجه به مزایای مطرح شده و لزوم تخلیه رسوبات از مخازن جهت حفظ حجم مفید و کارایی مخزن، روش مکش آبی مورد توجه محققین قرار گرفته و تحقیقات متعددی در زمینه بررسی عملکرد آن انجام شده است. Sakurai و Hakoishi (2012) با استفاده از اختلاف تراز آب بین ناحیه بالادست و پایین‌دست، مدل تخلیه رسوبات به روش دفن‌شونده را

روش ترکیبی جت-مکش آبی و بررسی تأثیرگذاری عوامل مختلف بر عملکرد آن مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد روش مکش آبی و جت‌های هیدرولیکی (با چیدمان مربعی) بر بهبود راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی پرداخته شده است. همچنین تأثیر فاصله جت‌ها نسبت به سطح رسوبات، در آرایش چهارگانه (چیدمان مربعی) و در سه هد مؤثر بر راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آن با نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه تک جت (اطلاعات گردآوری شده از Moghbeli Mehni, 2017) مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

برای بررسی کارایی روش جت-مکش آبی و مطالعه تأثیر فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب بر بازده این روش، از مدل فیزیکی موجود در آزمایشگاه هیدرولیک بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. مدل مذکور شامل یک مخزن شیشه‌ای به طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر مجهز به ناحیه آرام‌کننده، سرریز مستطیلی و حوضچه رسوب‌گیر بود که نمای مدل مورد استفاده در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. در مرحله اول درون مخزن مدل ۱۵ سانتی‌متر رسوب غیرچسبنده از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (Sand Poorly Graded) با چگالی ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ($D_{30}=0.35\text{mm}$, $D_{10}=0.19\text{mm}$, $D_{60}=0.63\text{mm}$) ریخته شد. به منظور افزایش دقت در روش مکش آبی، ابتدا لوله مکش هواگیری شد. سپس دهانه ورودی لوله مکش به صورت قائم روی سطح رسوبات و دهانه خروجی لوله مکش در تراز تخلیه مورد نظر تنظیم شد.

ارایه کردند و نشان دادند که غلظت رسوبات نسبت به زمان افزایش می‌یابد. Yan et al. (2012) مشخصه هیدرولیکی و پایداری لوله سیفون را در دو حالت آب زلال و آب گل‌آلود مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که پایداری لوله با افزایش قطر لوله کاهش می‌یابد. Shrestha (2012) از یک جت هیدرولیکی برای افزایش غلظت جریان خروجی و جلوگیری از انسداد لوله استفاده کرد. Miyakawa et al. (2014) خصوصیات هیدرولیکی و قابلیت کاربرد لوله مکش را به صورت آزمایشگاهی و میدانی مورد بررسی قرار دادند و کارایی این روش را برای حذف مواد رسوبی غیرچسبنده از مخازن کوچک تأیید کردند. Cheraghali (2015)، Pishgar (2015) و Maghsoodlo Nejad et al. (2015) به بررسی کارایی لوله مدفون شده مکش رسوبات در شرایط مختلف پرداختند. نتایج تحقیقات Moghbeli (2015) نشان داد که افزایش پارامترهایی مانند قطر لوله مکش، هد مؤثر و زاویه دهانه مکش موجب افزایش راندمان روش مکش آبی می‌گردد. ke et al. (2016) در یک بررسی آزمایشگاهی، تأثیر پارامتر درجه تحکیم رسوبات ریزدانه (سیلت و رس) بر عملکرد روش مکش آبی را بررسی کردند. همچنین نتایج تحقیقات Forutan Eghlidi (2017) نشان داد که افزایش چسبندگی ذرات رسوب موجب کاهش راندمان تخلیه و کاهش فاصله دهانه مکش از سطح رسوب موجب افزایش راندمان می‌شود. Moghbeli Mehni (2017) از جت هیدرولیکی برای افزایش کارایی روش مکش آبی استفاده کرد و نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش سرعت جت موجب افزایش راندمان تخلیه رسوبات می‌گردد. Asiaban et al. (2017) از یک دستگاه توربین خاص جهت برهم زدن رسوبات و افزایش کارایی روش هیدروساکشن استفاده کردند. بررسی پیشینه مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که کاربرد



Physical model Fig.1-

شکل ۱- مدل فیزیکی

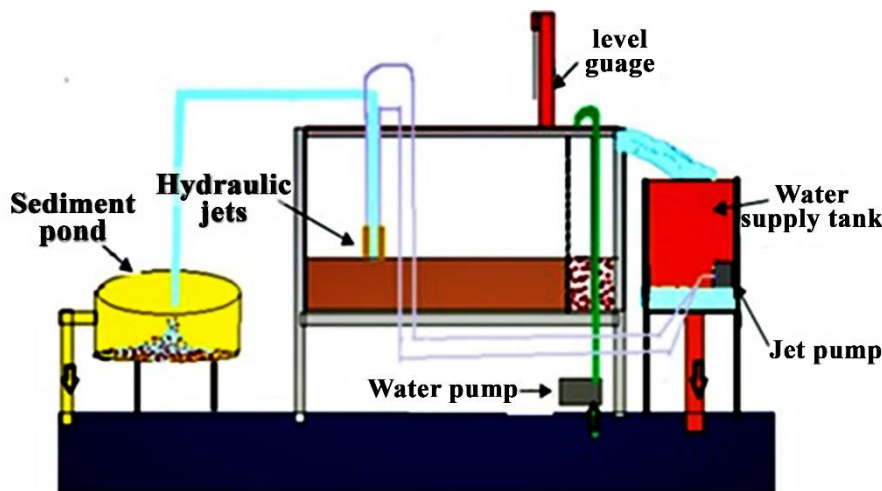


Fig. 2- Schematic design of the model

شکل ۲- طرح شماتیک مدل

آزمایش‌های همراه با جت در چیدمان چهارگانه (آرایش مربعی) در سرعت جریان خروجی از جت $1/0.3$ متر بر ثانیه و ارتفاع آب 0.5 متر، فواصل مختلف جت هیدرولیکی 0.2 متر بالاتر از سطح رسوبات، مماس بر سطح رسوبات و 0.2 متر زیر سطح رسوبات و در سه هد مؤثر 0.65 ، 0.7 و 0.75 متر انجام گردید. در مجموع ۱۲ آزمایش هر یک با سه تکرار (۲۷ آزمایش با چیدمان مربعی و نه آزمایش بدون جت) برای بررسی تأثیر فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات (H_j) بر راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی در دو حالت انجام شد.

آنالیز ابعادی

با توجه به تحقیقات انجام‌شده پارامترهای متعددی بر عملکرد روش مکش آبی تأثیر دارند که عبارتند از: سرعت جریان در لوله مکش آبی (V)، سرعت خروجی جت (V_j)، چگالی آب (ρ_w)، فاصله لوله مکش نسبت به سطح رسوب (y)، فاصله قرارگیری جت از لوله مکش (x)، قطر لوله مکش (D)، قطر نازل جت (D_n)، قطر رسوبات تجمع‌یافته (D_{50})، هد مؤثر (h)، ارتفاع آب روی سطح رسوبات (h_w)، فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب (H_j)، طول لوله مکش (L)، طول لوله جت (L_j)، دبی جریان در لوله مکش (Q)، لزجت دینامیکی (μ)، زاویه لوله مکش نسبت به محور افق (α)، زاویه نازل با محور افق (β)، شتاب گرانش (g)، زمان از شروع فرایند (t)، تعداد جت (N). این پارامترها با تابع F رابطه (۲) نشان داده می‌شوند.

$$F = f(V, V_j, \rho_w, y, x, D, D_n, D_{50}, h, h_w, H_j, L, L_j, Q, \mu, \alpha, \beta, g, t, N) \quad (2)$$

پس از شروع به کار پمپ، جریان آب ابتدا وارد ناحیه آرام کننده و سپس وارد مخزن اصلی گردید و بعد از آن وارد مخزن تأمین‌کننده آب جت‌ها شد. پس از شروع به کار پمپ جت، رسوبات توسط جت آب ناشی از نازل‌ها از سطح جدا شده و به صورت معلق درآمدند. سپس با بازکردن دهانه خروجی لوله، جریان گردابه‌ای ایجاد شد و لوله مکش مانند یک جارو برقی عمل کرده و تمامی رسوبات را به درون خود کشید. جریان خروجی از لوله مکش در ظروف مدرج در فواصل زمانی ده ثانیه و به مدت 120 ثانیه جمع‌آوری گردید. سپس با استفاده از رابطه (۱) راندمان تخلیه رسوب محاسبه گردید.

$$\eta = \frac{V_s}{V_w} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، η راندمان تخلیه رسوبات از روش هیدروساکشن، V_s حجم رسوبات تخلیه‌شده و V_w حجم آب خروجی برحسب مترمکعب می‌باشد. میانگین راندمان تخلیه رسوب محاسبه شد و مقادیر به‌دست آمده با مقادیر حاصل از نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه تک جت (Moghbeli Mehni, 2017) که در همین مخزن و در شرایط کاملاً مشابه انجام شده بود، مقایسه گردید. شکل (۳) طرح شماتیک مربوط به چیدمان جت‌ها در سیستم جت-مکش آبی را نشان می‌دهد. پس از زمان تعادل (پنج ساعت) آب مخزن به‌طور کامل تخلیه شد. سپس ابعاد حفره آب‌شستگی توسط سطح‌سنج اندازه‌گیری شد و با نرم‌افزار Surfer ترسیم گردید و سپس نسبت حجم حفره آب‌شستگی به حجم حفره نمونه شاهد و نمونه تک جت محاسبه شد. در تحقیق حاضر، کلیه آزمایش‌ها در دبی ورودی $1/85$ لیتر بر ثانیه در دو حالت بدون جت (شاهد) و همراه با جت انجام شد. آزمایش‌های شاهد در سه هد مؤثر 0.65 ، 0.7 و 0.75 متر انجام گردید.

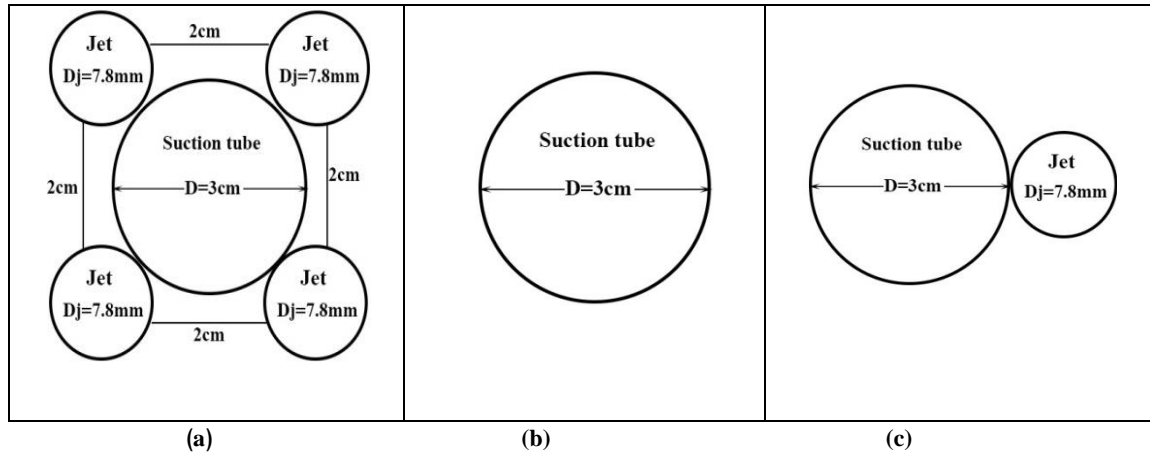


Fig. 3- Schematic plan of jet arrangement in jet-hydro suction system a) square arrangement b) control treatment c) single jet

شکل ۳ - طرح شماتیک مربوط به چیدمان جت‌ها در سیستم جت- مکش آبی الف) چیدمان مربعی ب) نمونه شاهد جت تک جت

جدول ۱- مقادیر ثابت پارامترهای بدون بعد

Table 1- Values of dimensionless parameters

Dimensionless Ratio	$\frac{y}{D}$	$\frac{x}{D}$	β	α	$\frac{h_w}{D}$	$\frac{D_n}{D}$	$\frac{D_{50}}{D}$	$\frac{L_j}{D}$	$\frac{L}{D}$
Value	0.00	0.00	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	18.33	0.26	0.017	66.67	83.33

سپس با استفاده از روش باکینگهام پارامترهای بی‌بعد به-

صورت رابطه (۳) تعیین گردید.

$$t^* = \frac{tv}{D} \quad (۵)$$

نتایج و بحث

در تحقیق آزمایشگاهی حاضر به بررسی راندمان تخلیه

رسوب و حجم حفره آب‌شستگی در روش جت چندگانه- مکش آبی در شرایط استفاده از چهار جت هیدرولیکی پرداخته شده است و نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه‌تک جت مورد مقایسه قرار گرفت.

الف) آزمایش‌های شاهد (بدون جت)

در هنگام آزمایش بلافاصله پس از باز شدن دهانه خروجی لوله مکش، مقدار زیادی رسوبات نزدیک دهانه مکش همراه با جریان خروجی تخلیه شدند. یعنی حداکثر غلظت جریان خروجی در ده ثانیه اول مشاهده شد.

با خارج شدن این توده رسوب به دلیل وجود تعدادی گردابه، حفره آب‌شستگی (حفره مخروطی) در نزدیکی دهانه ورودی لوله مکش تشکیل شد. پس از تشکیل مخروط، غلظت جریان خروجی به شدت کاهش یافت تا به تعادل رسید. تجزیه و تحلیل نتایج به-دست آمده نشان داد در آزمایش شاهد با افزایش ۱۵/۳۶ درصدی هد مؤثر، راندمان تخلیه رسوب ۴۴/۴۴ درصد، حجم حفره آب-شستگی ۴۳/۶۱ درصد و عدد فرود چگال ۳/۷۹ درصد افزایش یافت.

$$F=f\left(\frac{V_j}{V}, \frac{y}{D}, \frac{x}{D}, \frac{D_n}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{h}{D}, \frac{h_w}{D}, \frac{H_j}{D}, \frac{L_j}{D}, \frac{L}{D}, \frac{Q}{VD^2}, \frac{\rho_w VD}{\mu}, \alpha, \beta, \frac{V^2}{gD}, \frac{tv}{D}, N\right) \quad (۳)$$

در این تحقیق، کلیه نسبت‌های بی‌بعد ذکر شده در رابطه (۳) به دلیل ثابت بودن پارامترهایی نظیر فاصله دهانه مکش تا سطح رسوب، قطر نازل جت، قطر ذرات رسوب، قطر لوله جت، ارتفاع آب روی سطح رسوبات، طول لوله مکش، طول لوله جت و زاویه لوله مکش و زاویه نازل نسبت به سطح رسوبات ثابت می‌باشند. عدد رینولدز نیز برای تمام آزمایش‌ها در محدوده جریان آشفته (۲۶۸۶۵/۶۷-۲۹۸۵۰/۷۵) قرار دارد که می‌توان تأثیر آن را بر نتایج آزمایش‌ها نادیده گرفت. جدول (۱) مقادیر ثابت پارامترهای بی‌بعد را نشان می‌دهد. بنابراین شکل کلی رابطه بدون بعد که بیانگر عملکرد سیستم جت چندگانه-مکش آبی در این تحقیق است، به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$F = f\left(\frac{h}{D}, \frac{H_j}{D}, \frac{tv}{D}, Fr, N\right) \quad (۴)$$

هم‌چنین به منظور بررسی تغییرات زمانی راندمان تخلیه رسوب در روش جت چندگانه-مکش آبی قبل از زمان تعادل از رابطه (۵) استفاده شد که پارامترهای آن در قسمت بالا شرح داده شده است.

در فضای پیرامون دهانه ورودی لوله مکش منتشر کند. در واقع در این حالت شعاع تأثیر بیشتر شد. بنابراین نسبت حجم رسوبات خروجی به حجم آب (راندمان) افزایش یافت. این روند تا زمانی که تنش برشی ناشی از جریان ورودی نازلها بیشتر از آستانه حرکت ذرات رسوبی باشد، ادامه یافت. تنها در آزمایش شماره (A7) راندمان تخلیه رسوب در چیدمان مربعی نسبت به تک جت تغییر نکرد که می‌تواند ناشی از گرفتگی جزئی جت‌ها باشد. در مجموع بررسی نتایج به‌دست آمده نشان داد که چیدمان جت‌ها به‌صورت مربعی و مماس بر لوله مکش در فاصله 0.02 متر زیر سطح رسوبات، به بهترین نحو رسوبات نهشته‌شده را زیر و رو کرده و باعث افزایش غلظت رسوبات خروجی می‌گردد. همچنین بررسی نمودارهای رسم‌شده در شکل (۴) نشان می‌دهد که چیدمان مربعی موجب افزایش نسبت حجم حفره آب‌شستگی به حجم حفره در نمونه شاهد و تک جت (Moghbeli Mehni, 2017) شده است. اما این افزایش از روند منظمی پیروی نکرده است و به‌طور میانگین نسبت حجم حفره آب‌شستگی در آزمایش‌های جت چهارگانه به مقادیر نمونه شاهد $14/53$ و به مقادیر نمونه تک جت $1/54$ محاسبه شد. همچنین حداکثر نسبت حجم حفره آب‌شستگی در آزمایش‌های تک جت به نمونه شاهد $12/83$ به‌دست آمد که این نسبت در چیدمان مربعی برابر با $18/82$ محاسبه شد. در چیدمان چهارگانه جت‌ها، به‌دلیل شعاع تأثیر بیشتر پیرامون لوله مکش و همچنین نیروی برشی حاصل از جریان خروجی چهار نازل، دیواره حفره شروع به ریزش کرده و ابعاد حفره آب‌شستگی افزایش یافت.

ب) آزمایش‌های جت چهارگانه-مکش آبی ب-۱) بررسی تأثیر چیدمان چهارگانه جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوبات در مقایسه با نمونه شاهد و تک جت

به‌منظور بررسی تأثیر چیدمان جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوبات، تغییر میانگین راندمان تخلیه رسوبات در چیدمان مربعی جت هیدرولیکی با سه هد مؤثر 0.07 ، $0.07/65$ و $0.07/75$ متر و فواصل مختلف جت هیدرولیکی 0.02 متر بالاتر از سطح رسوبات، مماس بر سطح رسوبات و 0.02 متر زیر سطح رسوبات در مقایسه با نمونه شاهد و نمونه تک جت مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی نتایج ارائه شده نشان داد که راندمان تخلیه رسوب در روش جت چهارگانه-مکش آبی، در چیدمان مربعی جت‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. همچنین راندمان تخلیه رسوب در آرایش مربعی جت‌ها نسبت به حالت تک جت به جز در یک مورد (هد مؤثر $0.07/75$ متر با نسبت بدون بعد ۲۵) و فاصله جت دو سانتی‌متر بالای سطح رسوب (نسبت بی‌بعد 0.066) افزایش یافت. زیرا در چیدمان مربعی و در دبی یکسان، برای این که سرعت آب خروجی هر یک از نازلها مساوی با سرعت تک جت باشد، سطح مقطع خروجی نازلها کاهش یافت. در نتیجه با وجود چهار نازل با سرعت خروجی $1/03$ متر بر ثانیه قدرت تخریب و تنش برشی ناشی از فشار آب افزایش داشت.

همچنین چیدمان چهارگانه جت‌ها باعث می‌شود جت آب خروجی از نازلها محدوده وسیع‌تری رسوب را از بستر جدا کرده و

جدول ۲- تأثیر چیدمان جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوب

Table 2- Effect of hydraulic jet arrangement on sediment discharge efficiency

Treatment	Effective head (m)	Dimensionless ratio of effective head	Jet number	Jet distance to sediment surface (m)	Dimensionless ratio of jet distance to sediment surface	Efficiency	Sediment discharge efficiency increased relative to control (%)	Sediment discharge efficiency increased relative to single jet (%)
A1	0.65	21.67	4	0.02	0.66	0.31	1058.43	18.96
A2	0.65	21.67	4	0.00	0.00	0.46	1622.85	64.29
A3	0.65	21.67	4	-0.02	-0.66	0.53	1882.40	23.33
A4	0.7	23.33	4	0.02	0.66	0.34	896.40	34.96
A5	0.7	23.33	4	0.00	0.00	0.5	1373.62	38.89
A6	0.7	23.33	4	-0.02	-0.66	0.55	1520.98	30.95
A7	0.75	25	4	0.02	0.66	0.36	843.34	0.00
A8	0.75	25	4	0.00	0.00	0.53	1275.55	43.24
A9	0.75	25	4	-0.02	-0.66	0.67	1638.90	52.27

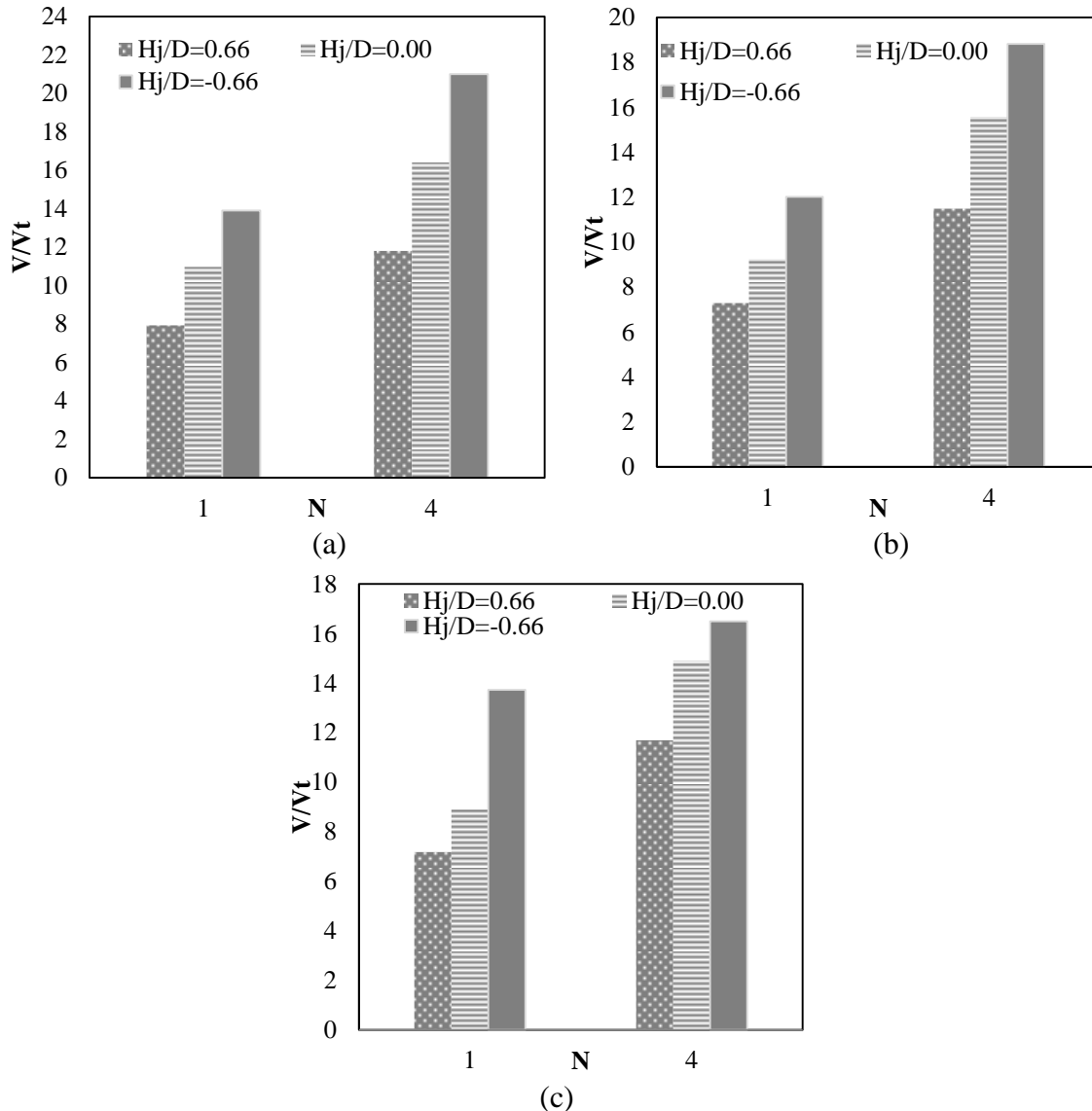


Fig. 4- Effect of hydraulic jet arrangement on scour hole volume in effective head a) 0.65m b) 0.7m c) 0.75m

شکل ۴- تأثیر چیدمان جت هیدرولیکی بر حجم حفزه آب شستگی در هد مؤثر الف) ۰/۶۵ متر ب) ۰/۷ متر ج) ۰/۷۵ متر
ب-۲) بررسی تأثیر فاصله جت هیدرولیکی در چیدمان چهارگانه بر راندمان تخلیه رسوبات
در مقایسه با نمونه شاهد و تک جت

کم شده و راندمان افزایش می‌یابد. در این حالت تعداد گردابه‌های تشکیل شده بیشتر می‌شود. این جریان‌های گردابی رسوب را از کف مخروط رسوب‌شویی به داخل خود کشانده و توسط دهانه ورودی لوله مکش خارج می‌کنند. بنابراین برای داشتن حداکثر راندمان تخلیه رسوب لازم است تا جایی که شرایط بهره‌برداری از سیستم اجازه می‌دهد، فاصله جت هیدرولیکی را نسبت به سطح رسوبات کاهش داد. در شکل (۵) نمودارهای راندمان تخلیه رسوبات نسبت به زمان تحت تأثیر فواصل متفاوت جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات در سه هد مؤثر ۰/۶۵، ۰/۷ و ۰/۷۵ متر و در چیدمان‌های مربعی جت هیدرولیکی نشان داده شده است. بررسی نمودارهای ارائه شده نشان داد که بیشترین راندمان تخلیه رسوب در ده ثانیه

بررسی نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان داد به ازای هد مؤثر (h) و چیدمان جت هیدرولیکی ثابت (N)، کاهش فاصله جت هیدرولیکی از سطح رسوبات موجب افزایش راندمان تخلیه رسوب شد. به طوری که حداکثر راندمان تخلیه (۰/۶۷) در هد مؤثر ۰/۷۵ متر و نسبت بی‌بعد فاصله جت هیدرولیکی ۰/۶۶- (۰/۰۲) متر زیر سطح رسوب) مشاهده شد. در واقع با افزایش فاصله جت هیدرولیکی از سطح رسوبات به دلیل افزایش مقاومت مولکول‌های آب، تنش برشی ناشی از برخورد جریان خروجی از نازل‌ها با سطح رسوبات کاهش می‌یابد. در نتیجه نسبت حجم رسوبات خارجی نسبت به حجم آب (راندمان) کاهش می‌یابد. در حالتی که جت هیدرولیکی زیر سطح رسوبات قرار گیرد، مقاومت مولکول‌های آب

مکش آبی و تک جت ارایه شده است. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ازای هد مؤثر (h) و چیدمان جت هیدرولیکی ثابت با کاهش فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات (H_j) حجم حفره آب‌شستگی افزایش یافت. به طور کلی حداکثر حجم حفره آب‌شستگی با تغییر مکان جت از بالای رسوب به حالت مماس بر رسوب و زیر رسوب به ترتیب $1/28$ و $1/78$ برابر شده است. شکل (۷) نیز پروفیل حفره آب‌شستگی در فاصله دو سانتی‌متر بالای رسوب، مماس بر سطح رسوب و دو سانتی‌متر زیر سطح رسوب را نشان می‌دهد.

اول اتفاق افتاد که به دلیل تماس مستقیم دهانه لوله مکش با رسوبات می‌باشد. با ادامه مکش به علت زیاد شدن فاصله نازل‌ها از سطح رسوبات، توانایی جریان جت‌ها برای معلق کردن رسوبات کاهش یافت و تقریباً به صفر رسید و راندمان تخلیه رسوب به شدت کاسته شد.

همچنین در شکل (۶) نمودار تاثیر فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات در سه حالت 0.2 متر بالاتر از سطح رسوبات، مماس بر سطح رسوبات و 0.2 متر زیر سطح رسوبات در سه هد مؤثر 0.65 ، 0.7 و 0.75 متر با چیدمان مختلف جت هیدرولیکی بر حجم حفره آب‌شستگی در روش جت چهارگانه

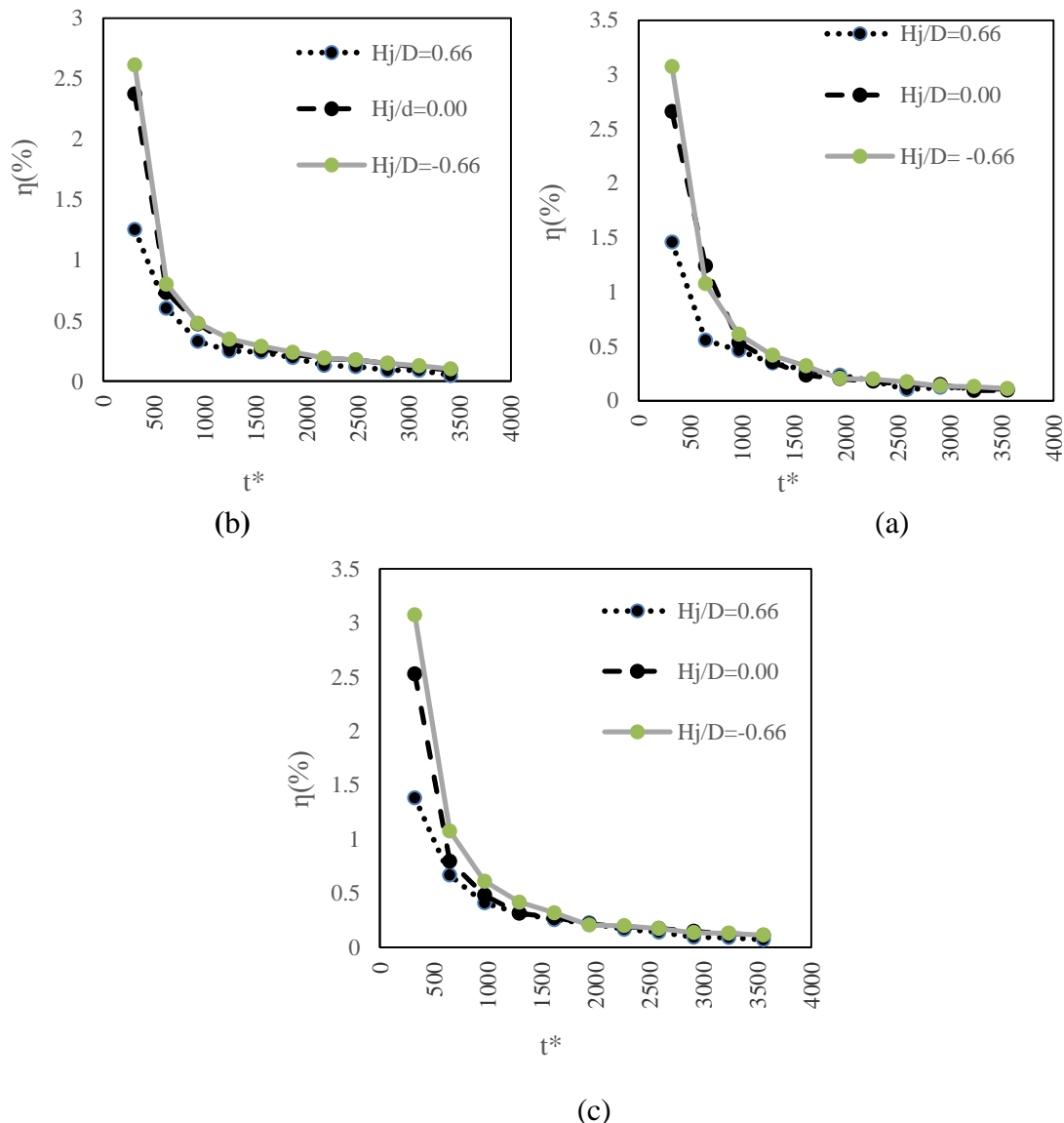


Fig. 5- Effect of hydraulic jet arrangement on the efficiency of sediment discharge relative to time in effective head a) 0.65m b) 0.7m c) 0.75m

شکل ۵- تأثیر چیدمان جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوب نسبت به زمان در هد مؤثر الف) 0.65 متر ب) 0.7 متر ج) 0.75 متر

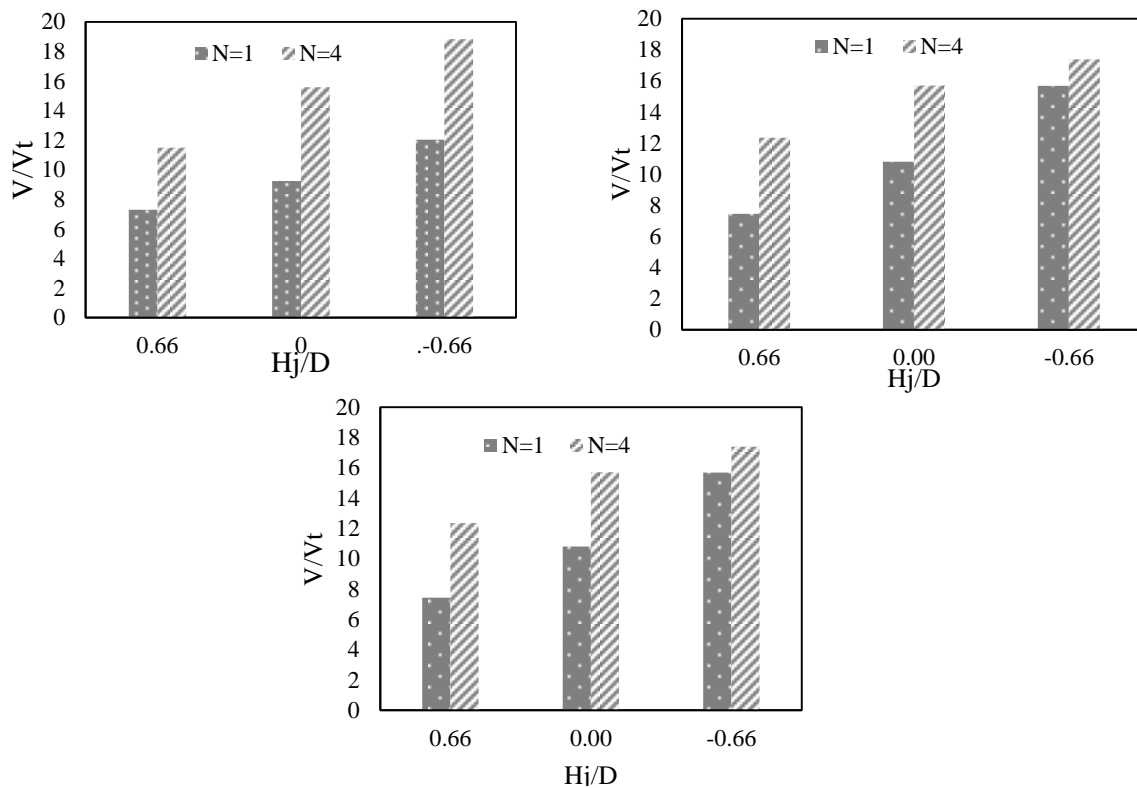


Fig. 6- Effect of hydraulic jet distance relative to sediment surface on scour hole volume in effective head a) 0.65m b) 0.7m c) 0.75m

شکل ۶- تأثیر فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب بر حجم حفره آب شستگی در هد مؤثر الف) ۰/۶۵ متر ب) ۰/۷ متر ج) ۰/۷۵ متر

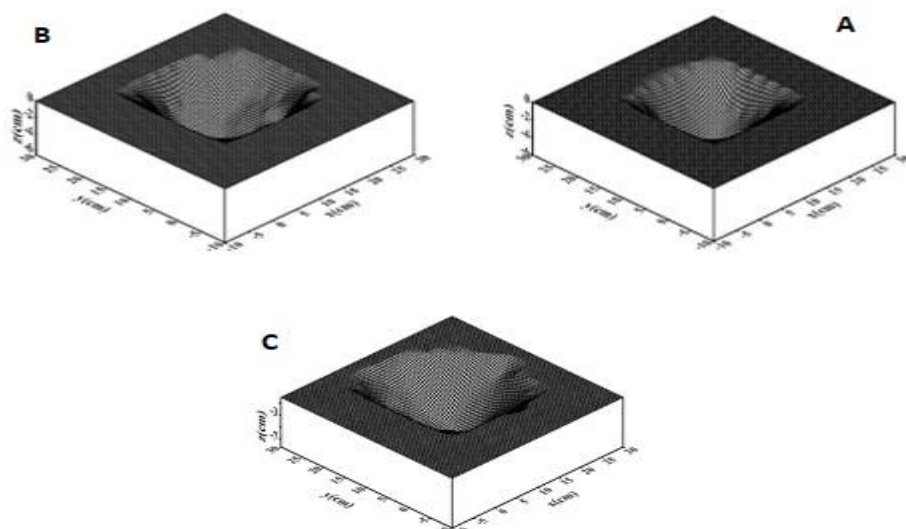


Fig. 7- Scour hole profile a) 2 cm above sediment b) tangent on sediment c) 2 cm below sediment

شکل ۷- پروفیل حفره آب شستگی الف) در فاصله ۲ سانتی متر بالای رسوب، ب) مماس بر سطح رسوب ج) ۲ سانتی متر زیر سطح رسوب

نتیجه گیری

روش هیدروساکشن، به دلیل هزینه کم و سازگاری با محیط زیست، به عنوان یک روش کارا برای رسوب زدایی مخازن مورد توجه قرار گرفته است. اما ارایه یک راه کار مناسب برای افزایش شعاع تاثیر گامی مؤثر برای تخلیه موضعی رسوبات خصوصاً رسوبات جلوی آبگیرها در روش مکش آبی می باشد و در نهایت می تواند باعث بهبود راندمان تخلیه رسوبات در این روش گردد. در این تحقیق از چهار جت با چیدمان مربعی به منظور افزایش راندمان روش مکش آبی استفاده شده است و نتایج آن با راندمان تخلیه رسوب در نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه تک جت مقایسه شده است. هم چنین تاثیر فاصله جت های هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات نیز مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد در آزمایش شاهد، با افزایش $15/36$ درصدی هد مؤثر، راندمان تخلیه رسوب $44/44$ درصد و حجم حفره آب شستگی $43/61$ درصد و عدد فرود چگال $3/79$ درصد افزایش یافت. هم چنین نتایج نشان داد که در هد مؤثر و فاصله جت هیدرولیکی ثابت در چیدمان مربعی جت ها به ترتیب راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب شستگی نسبت به نمونه شاهد $17/18$ و $14/53$ برابر و نسبت به نمونه تک جت $1/52$ و $1/51$ برابر شده است. به طور کلی بهترین راندمان برای تخلیه رسوب در چیدمان چهارگانه جت ها (آرایش مربعی) و نسبت بی بعد هد مؤثر 25 (75 سانتی متر) و نسبت بی بعد فاصله جت هیدرولیکی (دو سانتی متر زیر سطح رسوب) مشاهده شد. لازم به یادآوری است از آن جا که ماهیت عمده رسوبات نهشته شده در مخازن سد از نوع رسوبات چسبنده می باشد، لذا تعمیم نتایج حاصل از این تحقیق به آن دسته از رسوبات، به صورت کامل امکان پذیر نبوده و برای درک مناسب تر کاربرد جت در تخلیه رسوبات چسبنده، انجام تحقیقات آتی غیر قابل اجتناب به نظر می رسد. با این وجود، یافته های حاصل از این تحقیق در به کارگیری موفقیت آمیز جت در افزایش راندمان لایروبی، لزوم امکان سنجی به کارگیری این شیوه را برای صرف هزینه و آماده سازی تمهیدات

برای انجام مطالعه های فیزیکی تخلیه رسوبات چسبنده در سیستم های دوگانه جت-مکش آبی مهیا می سازد. در همین راستا، با مطالعه دست آوردهای تحقیقات پیشین و نتایج به دست آمده از تحقیق پیش رو، موارد زیر در رابطه با نحوه عملکرد سیستم های سیفون-لایروبی در تخلیه رسوبات چسبنده، تلویحاً قابل بیان است.

با عنایت به نتایج تحقیقات (Forutan Eghlidi 2017) در ارتباط با مقایسه عملکرد سیستم مکش آبی در لایروبی رسوبات غیر چسبنده و چسبنده، مشخص شد که این سیستم در تخلیه رسوبات در هر دو حالت موفق عمل کرده است. با این حال روند شکل گیری حفره لایروبی در حالت رسوبات غیر چسبنده متمایز از حالت چسبنده می باشد، به طوری که شکل حفره متقارن نبوده و روند زمانی غلظت تخلیه رسوبات منظم نیست.

با توجه به این که تخلیه رسوبات چسبنده به صورت اجزای دانه های رسوب انجام نمی شود و معمولاً به صورت جدا شدن بخشی لخته مانند از بدنه رسوبات صورت می گیرد، امکان گرفتن و مسدود شدن لوله در صورت عدم گزینش مناسب قطر لوله مکش وجود دارد. اهمیت این مسئله در هنگام استفاده از جت در جداسازی رسوبات دوچندان می گردد.

نتایج حاصل از این تحقیق مبین آنست که نزدیک تر نمودن جت هیدرولیکی به سطح رسوبات موجب بهبود عملکرد سیستم جت مکش آبی می شود. روا بودن این مهم در رابطه با رسوبات چسبنده جهت حصول به یک فاصله آستانه بهینه نیازمند بررسی های بیشتر در آینده می باشد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می گردد. همچنین از همکاری ارزشمند خانم مهندس هانیه مقبلی مهنی تشکر می گردد.

References

- 1- Asiaban, P., Kouchakzadeh, S. and Asiaban, S., 2017. Enhanced hydrosuction performance for cohesive sediment removal in low-head reservoirs. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(4), pp. 491-497.
- 2- Atkinson, E., 1996. The feasibility of flushing sediment from the reservoirs. *Report OD137, HR Wallingford*.
- 3- Cheraghali, M., 2015. Laboratory study the effect of water reservoir level and optimum suction tube drainage level on sediment discharge efficiency in siphon hydrosuction method, M.Sc Thesis, *Shahrood University of Technology, Iran*. 150p. (In Persian).
- 4- Chin, C.H.E.N., Shun-Chang, W.A.N.G. and Chun-Hung, W.U., 2010. Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. *International Journal of Sediment Research*, 25(2), pp. 149-160.
- 5- Forutan Eghlidi, M., 2017. Laboratory study the performance of hydrosuction method for sticky and non-sticky sediment, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman, Iran*. 170 P. (In Persian).

- 6- Hotchkiss, R.H. and Huang, X., 1995. Hydrosuction sediment-removal systems (HSRS): principles and field test. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(6), pp. 479-489.
- 7- Ke, W.T., Chen, Y.W., Hsu, H.C., Toigo, K., Weng, W.C. and Capart, H., 2016. Influence of sediment consolidation on hydrosuction performance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(10), pp.1-13.
- 8- Maghsoodlo Nejad, A., Ahmadi, A., Sanei, M. and Emamgholi Zadeh, S., 2015. Effect of speed in suction tube on the efficiency of hydrosuction method. In *National Conference on Architectural and Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. (In Persian)*.
- 9- Miyakawa, M., Hakoishi, N. and Sakurai, T., 2014. Development of the sediment removal suction pipe by laboratory and field experiments. In *International Symposium on Dams In A Global Enviromental Challenges, Canada*.
- 10-Moghbeli, A., 2015. Laboratory and numerical study of evacuation of removal sediment in dam reservoir, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman, Iran*. 180p. (In Persian).
- 11-Moghbeli Mehni, H., 2017. Laboratory study of removal sediment from dam reservoir with jet-hydrosuction method, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman, Iran*. 173p. (In Persian).
- 12-Pishgar, R., 2015. Experimental investigation of the suction pipe geometrical and mechanical characteristics effect on the sediment removing efficiency of hydrosuction method. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(2), pp.67-80. (In Persian).
- 13-Sakurai, T. and Hakoishi, N., 2012. Hydraulic characteristics of the burrowing type sediment removal suction pipe. In *International Symposium on Dams For a Changing World-Need for Knowledge Transfer across the Generations and the World, Japan*.
- 14-Shrestha, H.S., 2012. Application of hydrosuction sediment removal system (HSRS) on peaking ponds. *Journal of Water, Energy and Environment*, 11, pp. 43-48.
- 15-Valizadegan, A., Shafaei Bajestan, M. and Mohammad Vali Samani, H., 2011. Minimization of sedimentation in dams reservoirs with optimal operation of lower drainage systems. *Journal of Water and Soil Science*, 15(55), pp.57-66. (In Persian).
- 16- Yan, T., Chen, L., Xu, M. and Zhou, M. A., 2012. Siphon pipeline resistance characteristic research, In *International Conference on Modern Hydraulic Engineering, China*.

EXTENDED ABSTRACT

The effect of changing the cultivation pattern and improving the efficiency of irrigation systems on reducing the withdrawal of groundwater resources under climate change scenarios (Case study: Kavar Plain)

M. K. Shaabani¹, J. Abedi-Koupai^{2*}, S. S. Eslamian³, and S. A. R. Gohari⁴

1- Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2* - Corresponding Author, Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (koupai@cc.iut.ac.ir).

3- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

4-Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 July 2021

Revised: 5 January 2022

Accepted: 8 January 2022

Keywords:

Irrigation Requirement, Prediction, Temperature, Rainfall, Irrigation scenarios.

TO CITE THIS ARTICLE:

Shaabani, M. K., Abedi Koupai, J., Eslamian, S. S., Gohari, A. (2023). 'The effect of changing the cultivation pattern and improving the efficiency of irrigation systems on reducing the withdrawal of groundwater resources under climate change scenarios (Case study: Kavar Plain)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 47-63. doi: 10.22055/jise.2022.38791.1994.

Introduction

The Severe shortage of surface and groundwater resources is the most important constraint on sustainable agricultural development in arid and semi-arid regions. Frequent droughts in recent decades have also led to a significant drop in groundwater levels due to uncontrolled abstraction. In the present study, different irrigation scenarios are provided to reduce the withdrawal of water from the aquifer of Kavar plain in Fars province. The results of various studies show that due to climate change, water resources are reduced and irrigation requirements of plants will be increased during the growing season (Goodarzi et al., 2015; Zeinoddini et al., 2019). In this study, to simulate future climate parameters, the outputs of AOGCMs models and emission scenarios RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 of the Fifth Climate Change Report were used (IPCC,2014). Then irrigation requirements of the study area were calculated by Cropwat software considering the cultivation pattern for the future period. Finally, by defining irrigation scenarios, the simultaneous effects of climate change and cultivation pattern change in the development of irrigation systems (surface and pressurized) on groundwater resources were evaluated.

Methodology

Due to the occurrence of recent droughts in Fars province, the water level of the Kavar plain aquifer has decreased by about 30 meters compared to 1995. In the present study, the effects of the developing irrigation systems and changing cultivation patterns on irrigation requirements and withdrawal of water from the aquifer have been investigated.

Water requirement of the cultivation pattern

Cropwat software was used to calculate the water requirement of the cultivation pattern. This software uses the FAO Penman-Monteith method to calculate water requirements. The results of using this method in comparison with the measurement data in neighboring areas have been satisfactory (Zand-Parsa *et al.*, 2015).

Climate Prediction

Historical data on rainfall and maximum and minimum temperature were collected during the period of 57 years (1961-2018). In order to predict the climatic parameters in the future period, the CanESM2 model, which is a series of GCMs models, was used under the emission scenarios of RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 (Arora *et al.*, 2011). The SDSM model was also used to downscaling data. The results of various researches indicated the proper performance of the SDSM model compared to other downscaling statistical models (Gutierrez *et al.*, 2013). Statistical indices R^2 , RMSE, NRMSE, and NSE were used to evaluate the results of the climate change model and downscaling data.

Development of irrigation scenarios

In the present study, six irrigation scenarios were defined based on the type of irrigation systems, changes in cultivation pattern levels, and future climate change, then the impact of each on the withdrawal of groundwater resources was evaluated. To determine the percentages of cultivation patterns in each scenario, linear programming (LP) was used in Excel software in which the maximum volume of available water resources and the gross irrigation requirements of plants are considered.

Results and discussion

Climate change results

Meteorological parameters of rainfall, maximum and minimum temperature were simulated by the SDSM model for the future period (2020-2070). The results of temperature prediction by the model showed that the temperature increase in the future period will be different in months of the year. The highest maximum temperature increase under the scenarios of RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 in July is predicted at 1.38, 1.44, and 1.72 ° C, respectively. Also, the minimum temperature increase will occur in June under the RCP8.5 scenario by 1.51 ° C and under the RCP2.6 and RCP4.5 scenarios in June by 1.26 and 1.43 ° C, respectively. Simulation of rainfall in the future period showed that the annual average will be decreased. rainfall decreases under the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios are predicted at 16, 35, and 50 mm per year, respectively.

The impact of climate change on water demand

The modeling results showed that the net water requirement of plants under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios will be increased in the future period. The rate of increase in net water requirement over the future period for RCP2.6 scenarios between 3.9 and 4.5; For RCP4.5 scenarios between 6 to 7 and for RCP8.5 scenarios between 8.5 to 10 percent are calculated.

Analysis of irrigation scenarios

Comparison of the climate change scenario with the reference scenario showed that the gross irrigation requirements for plain in the future period will be increased from 188 to 210 MCM. Therefore, to meet the irrigation requirements, Withdrawal from the aquifer should be increased by 18 percent. To reduce it, scenarios of changing the cultivation pattern towards low-consumption crops, increasing the allocation of surface water, improving the efficiency of surface and pressurized irrigation were proposed. The results showed that by applying these scenarios, the irrigation

requirements of the plain can be decreased to 164 MCM. It also reduced groundwater abstraction by 56 MCM (about 40 percent).

Conclusion

The simulation results of climatic parameters showed that in all three scenarios of emission, the temperature will be increased and precipitation will be decreased. increase in gross irrigation requirements for different plants under RCP2.6 scenario between 4 to 8; Under RCP4.5 scenario between 6 to 13 and under RCP8.5 scenario between 8 and 18 percent were predicted. Also, the results of irrigation scenarios on the amount of irrigation consumption in the region showed that by designing and adjusting the cultivation pattern and improving the efficiency of surface and pressurized irrigation, the amount of groundwater abstraction in dry and normal conditions can be reduced by 21 to 40 percent.

Acknowledgment

The authors sincerely appreciate the experts of the Regional Water Company and the Agricultural organization of Fars to provide all the required information.

References

- 1- Arora, V. K., Scinocca, J. F., Boer, G. J., Christian, J. R., Denman, K. L., Flato, G. M., Kharin, V. V., Lee, W. G., and Merry field, W. J., 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(5), pp. 1-6.
- 2- Goodarzi, M., Abedi-Koupai, J., Heidarpour, M. and Safavi, H.R., 2015. Evaluation of the effects of climate change on groundwater recharge using a hybrid method. *Water Resour Manage*, 30(1), pp.133-148.
- 3- Gutierrez, J.M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanas, R. and Herrera, S., 2013. Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. *Journal of Climate*, 26(1), pp.171–188.
- 4- IPCC, 2014. Climate change 2014 synthesis report. Summary for policymakers. Contribution of Working Group I, II and III to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), In: R. Pachauri and L. Meyer (eds). Geneva, *Switzerland*. 151p.
- 5- Zand-Parsa, S.h., Mahmoudian Shooshtari, M. and Majnooni-Heris, A., 2015. Measurements of standard maize evapotranspiration using water balance method and Variable Root Depth in an Arid and Semi-Arid Region. *Water and Soil Science*, 25(1), pp.169-181.(In Persian).
- 6- Zeinoddini, S., Anvari, S. and Zahmatkesh, Z., 2019. Application of simulation-optimization approaches to assess the effect of climate and management scenarios on a water resource system. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), pp.295-310. (In Persian).



تأثیر تغییر الگوی کشت و بهبود راندمان سیستم‌های آبیاری بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت کوار)

محمد کاظم شعبانی^۱، جهانگیر عابدی کوپایی^{۲*}، سید سعید اسلامیان^۳ و سید علیرضا گوهری^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، koupai@cc.iut.ac.ir.

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

چکیده

کمبود شدید منابع آب سطحی و زیرزمینی مهم‌ترین محدودیت توسعه پایدار کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. در مطالعه حاضر به بررسی شناخت تأثیرات توسعه سیستم‌های آبیاری و تغییر الگوی کشت روی نیاز آبیاری در شرایط تغییر اقلیم پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در آینده و میزان تأثیر آن‌ها روی نیاز آبیاری از سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 گزارش پنجم تغییر اقلیم استفاده گردید. همچنین برای بررسی هم‌زمان اثر بهبود راندمان آبیاری، تغییر اقلیم و تغییر الگوی کشت روی نیاز ناخالص آبیاری؛ ابتدا تغییرات الگوی کشت و سیستم‌های آبیاری دشت کوار در طی یک دهه مورد ارزیابی قرار گرفت، سپس سناریوهای مدیریتی مختلفی برای کاهش برداشت از آبخوان تعریف گردید. نتایج پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بیانگر آن است که در هر سه سناریوی انتشار، دما افزایش و بارندگی کاهش می‌یابد. بر همین اساس میزان افزایش نیاز ناخالص آبیاری برای گیاهان مختلف تحت سناریو RCP2.6 بین چهار تا هشت درصد؛ تحت سناریو RCP4.5 بین شش تا ۱۳ و تحت سناریو RCP8.5 بین هشت تا ۱۸ درصد پیش‌بینی گردید. همچنین بررسی سطوح الگوی کشت دشت کوار در دهه اخیر نشان داد که افزایش راندمان آبیاری در منطقه موجب افزایش ۱۰ درصدی سطح زیرکشت شده و عدم کاهش برداشت آب از آبخوان را به دنبال داشته است. نتایج اعمال سناریوهای آبیاری مختلف نشان داد با طراحی و تنظیم الگوی کشت و بهبود راندمان‌های آبیاری سطحی و تحت فشار می‌توان در شرایط خشک و نرمال بین ۲۱ تا ۴۰ درصد، برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت را کاهش داد.

کلید واژه‌ها: نیاز آبیاری، پیش‌بینی، دما، بارندگی، سناریوهای آبیاری.

مقدمه

حدود دو سوم آب رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آبخوان‌های زیرزمینی جهان در بخش کشاورزی به مصرف می‌رسد. در ایران نیز مانند سایر کشورها بخش قابل توجهی (در حدود ۷۱ درصد) از منابع آب تجدیدپذیر در این بخش استفاده می‌شود (Nasseri et al., 2017). بنابراین انتخاب روش‌های مناسب برای استفاده بهینه از منابع آب به ازای مصرف هر چه کمتر آب ضروری به نظر می‌رسد. یکی از پدیده‌هایی که شرایط آب و هوایی مناطق مختلف جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد تغییرات اقلیمی می‌باشد. تغییر اقلیم یعنی هر تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب و هوایی، که در طولانی مدت در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی، رخ دهد (Kumar, 2012). با وجود این که تغییر اقلیم در برخی مناطق جهان به ویژه نواحی

عرض‌های شمالی و بالاتر از ۵۵ درجه اثرات مثبتی بر تولیدات کشاورزی به همراه خواهد داشت، ولی اثرات منفی این تغییرات در مناطق گرم و خشک بسیار شدید خواهد بود به علاوه فراوانی و شدت وقوع پدیده‌های نادر اقلیمی (خشکسالی، گرما، و سیل) نیز تشدید خواهد شد (Sivakumar et al., 2005; Ewert et al., 2005). Alizadeh et al. (2010) تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش تحت سناریو A2 برای سه دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ را با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری و خروجی‌های مدل گردش عمومی HadCM3 در حوضه کشف رود مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در صورت افزایش دما به میزان یک، دو و چهار درجه سانتی‌گراد، نیاز آبی الگوی کشت گیاهان در کشف رود به ترتیب شش، ۱۰ و ۱۶ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. (Gohari et al. (2013) تأثیر تغییرات

(Goodarzi et al., 2015; Khayat et al., 2020;)
(Zeinoddini et al., 2019). بنابراین محدودیت و کاهش شدید منابع آب سطحی و زیرزمینی به لحاظ استفاده بیشتر قابل پیش‌بینی است. در این زمینه پیدا کردن روش‌های مختلف طراحی و تنظیم الگوی کشت با توجه به نوع سیستم‌های آبیاری برای کاهش نیاز آبیاری و کاهش برداشت آب زیرزمینی ضروری است. در این مطالعه هدف ارائه سناریوهای مختلف آبیاری به منظور کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی در دشت کوار استان فارس می‌باشد. در این راستا بررسی هم‌زمان تأثیر تغییر اقلیم و تغییر الگوی کشت در شرایط توسعه سیستم‌های آبیاری (سطحی و تحت فشار) بر نیاز آبیاری دشت از جمله نوآوری‌های این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت کوار به وسعت ۴۸۰ کیلومتر مربع در شهرستان کوار و ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز در استان فارس قرار دارد. ارتفاع متوسط دشت ۱۴۸۴ متر، متوسط بارندگی سالانه بلند مدت ۳۲۰ میلی‌متر و اقلیم آن معتدل و مرطوب می‌باشد. الگوی کشت منطقه مورد مطالعه شامل گندم، جو، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای، پیاز، حبوبات، گوجه فرنگی، کلزا، چغندرقد، یونجه، انگور، پسته و باغات میوه (سیب، به، هلو، آلو) می‌باشد. نیاز کشاورزی از طریق منابع آب سطحی رودخانه قره‌آغاج و منابع آب زیرزمینی از جمله چاه‌های حفر شده در دشت تأمین می‌گردد. در دهه‌های اخیر به دلیل خشک‌سالی و محدودیت شدید منابع آب سطحی، برداشت از منابع آب زیرزمینی به‌طور چشم‌گیری در این دشت افزایش یافته است. به طوری که سطح ایستابی آبخوان دشت در حدود ۳۰ متر نسبت به سال ۱۳۷۴ کاهش یافته است (www.frrw.ir). بررسی‌های صورت گرفته توسط مرکز زمین شناسی و اکتشافات معدنی منطقه جنوب (شیراز) در زمینه پایش فرونشست با تصاویر ماهواره‌ای راداری بیانگر این است که در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، نرخ فرونشست دشت کوار از چهار تا هشت سانتی‌متر در سال برآورد می‌گردد (www.gsi.ir/shiraz). بنابراین لزوم برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب آن لازم و ضروری به نظر می‌رسد. موقعیت محدوده دشت کوار در استان فارس در شکل (۱) نشان داده شده است.

اقلیمی در تولید محصولات کشاورزی و بهره‌وری آب را برای چهار محصول (گندم، جو، برنج و ذرت) در حوضه زاینده‌رود ایران را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد در اثر تغییر اقلیم میانگین درجه حرارت ماهانه از ۱/۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد ولی بارندگی سالانه ۱۱ تا ۳۱ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین در اثر تغییر اقلیم نیاز آبی گیاهان (برنج ۳۰/۲ و ذرت ۲۴/۹ درصد) طی دوره‌های آبی افزایش خواهد یافت. Mehta et al. (2013) عرضه و تقاضای آب آبیاری را در اثر سناریوهای تغییر اقلیم و کاربری اراضی در منطقه یولوی کالیفرنیا مدل‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد تقاضای آب تحت سناریوی پایه A2 و B1 در اواخر قرن ۲۱ به ترتیب ۲۶ و ۳۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین صرفه‌جویی در مصرف آب در سناریوی ترکیب الگوهای کشت متنوع‌تر و با کارایی مصرف بیشتر با بهبود در فناوری آبیاری اتفاق می‌افتد، که این میزان، تقاضا را حدود ۱۲ درصد کاهش می‌دهد. Malmir et al. (2016) در تحقیقی تأثیر تغییرات اقلیم بر تخصیص آب کشاورزی در سطح حوضه قره سو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد در دوره آبی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) دما ۱/۶ درجه سانتی-گراد افزایش، بارندگی ۱/۷۷ درصد کاهش و در نتیجه دبی رودخانه ۳۲/۶۲ درصد کاهش آبدی خواهد داشت که این موضوع بیانگر افزایش عدم تأمین نیاز آبی بخش کشاورزی در منطقه مورد مطالعه در دوره آبی می‌باشد. (Abbasi et al. 2020) تأثیر تغییر اقلیم بر پایداری منابع آب در حوضه آبریز طشک-بخنگان استان فارس برای دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۶ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد در اثر تغییر اقلیم بارندگی کاهش و تبخیر و تعرق واقعی افزایش می‌یابد. همچنین خروجی متوسط سالانه از رودخانه‌های حوضه از ۰/۸۶ به ۰/۶۸ میلیارد مترمکعب کاهش خواهد یافت. Mohebi (2019) در تحقیقی با استفاده از مدل SDSM و خروجی مدل جوی CanEsm2 اثر تغییر اقلیم بر نیاز آبی نخیلات در منطقه اهواز را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق نشان داد در دوره آبی درجه حرارت افزایش و میزان بارندگی کاهش می‌یابد براین اساس نیاز آبی نخیلات در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ به میزان تا هشت درصد، در سال‌های ۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰ به میزان ۱۵ تا ۱۹ درصد و در سال‌های ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۹ به میزان ۲۵ تا ۲۸ درصد افزایش می‌یابد. بررسی تحقیقات دیگر نیز نشان می‌دهد در اثر تغییرات آب و هوایی و گرمایش جهانی منابع آبی کاهش و نیاز آبیاری گیاهان در طول دوره رشد افزایش می‌یابد

$$IWR = \frac{CWR - P_e}{E} \quad (۳)$$

$$V = \sum_{s=1}^m \sum_{i=1}^n IWR_{s,i} \times A_{s,i} \quad (۴)$$

$$\sum_{s=1}^m \sum_{i=1}^n A_{s,i} \leq A_T \quad (۵)$$

که در این رابطه IWR نیاز ناخالص سالانه آبیاری گیاه (mm)، P_e بارندگی موثر (mm)، E راندمان کل سیستم آبیاری، A سطح زیرکشت، i شاخص نوع گیاه موجود در الگوی کشت، s شاخص نوع سیستم آبیاری، A_T سطح کل قابل کشت و V حجم ناخالص سالانه آب آبیاری الگوی کشت می‌باشد. برای محاسبه IWR ابتدا بایستی راندمان کل آبیاری با توجه نوع سیستم‌های آبیاری مشخص گردد. Abbasi et al. (2017) در تحقیق وضعیت راندمان سیستم‌های آبیاری را به تفکیک در استان‌های ایران مورد تحلیل قرار دادند. براساس نتایج آن‌ها، میانگین راندمان کاربرد در سیستم‌های آبیاری سطحی شامل کرتی، نواری و جویچه‌ای به ترتیب ۵۵/۳، ۵۲/۹ و ۵۲/۵ درصد و برای سیستم‌های تحت فشار بارانی و قطره‌ای به ترتیب ۶۲/۱ و ۷۱/۱ درصد برآورد شده است. هم‌چنین راندمان انتقال و توزیع نیز از ۶۷ تا ۷۴/۲ درصد محاسبه شده است. نکته قابل توجه اختلاف راندمان‌های ارائه شده در تحقیق آن‌ها با پتانسیل این سیستم‌ها در هنگام طراحی می‌باشد. در مطالعه حاضر نیز از نتایج همین تحقیق که در استان فارس تحلیل شده برای محاسبه نیاز ناخالص آبیاری استفاده گردیده است.

پیش‌بینی‌های پارامترهای اقلیمی و معیارهای ارزیابی

برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل نیاز به داده‌های اقلیمی شامل حداکثر و حداقل دما، بارندگی، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی می‌باشد که این داده‌ها در طول دوره ۵۷ ساله (از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۸) از ایستگاه باران‌سنجی کوار و سینوپتیک شیراز جمع‌آوری گردید. با جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، تبخیر و

تعیین نیاز آبی و نیاز آبیاری گیاه

مقدار نیاز آبی به روش‌های مختلفی قابل محاسبه می‌باشد. در این بین سازمان خواربار جهانی FAO نرم‌افزار Cropwat را تحت شرایط مختلف اقلیمی پیشنهاد نموده است و به‌طور گسترده‌ای توسط محققین برای تعیین نیاز آبی (CWR) گیاهان در مناطق مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است (Stancalie et al., 2010; Surendran et al., 2015). نرم‌افزار Cropwat از روش فائو پنمن مانیتث برای محاسبه تبخیر و تعرق استفاده می‌کند. نتایج استفاده از این روش در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری بیلان آب و خاک در مناطق هم‌جوار با آب و هوای مشابه رضایت بخش بوده است (Sepaskhah and Fooladmand, 2004; Rafiee et al. 2015; Zand-Parsa et al. 2015). در این روش مقدار تبخیر و تعرق به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.3u_2)} \quad (۱)$$

که در این رابطه ET_0 تبخیر و تعرق گیاه پتانسیل (mm/day)، R_n تابش خالص روی سطح گیاه (MJ/m²/day)، T متوسط دمای روزانه (°C)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار (kPa/°C)، G چگالی شار حرارتی (MJ/m²/day) ثابت فیزیومتری (kPa/°C) می‌باشد. پس از تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل، مقدار نیاز آبی گیاه از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$CWR = K_c \times ET_0 \quad (۲)$$

که در این رابطه CWR نیاز آبی گیاه (mm/day)، K_c ضریب گیاهی می‌باشد. در این تحقیق به‌منظور محاسبه نیاز ناخالص آبیاری (IWR) و حجم ناخالص آبیاری از روابط زیر استفاده شده است.

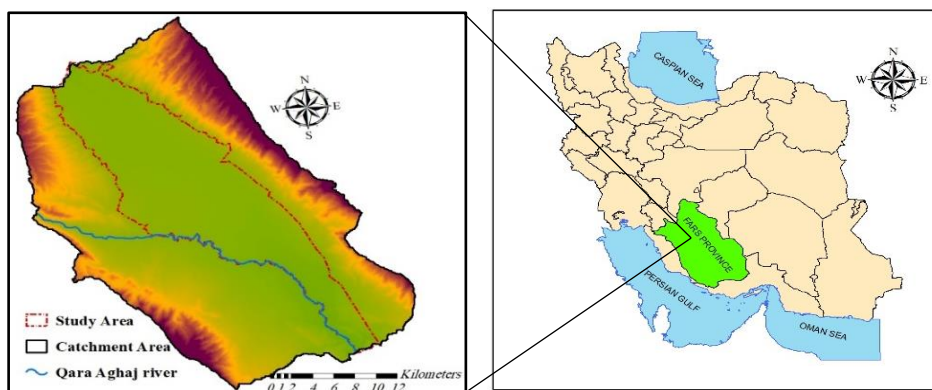


Fig. 1- Kavar plain area in Fars province

شکل ۱- محدوده دشت کوار در استان فارس

بود. نتایج تحلیل‌های آماری انجام شده در تحقیقاتی که از مدل‌های CanEsm2 و SDSM استفاده شده بیانگر این است که این مدل‌ها از کارایی مناسبی برای بررسی اثر تغییر اقلیم برخوردار می‌باشند (Shaltout and Tobol, 2018; Etemadi and Delshab, 2020; Mojerloo et al. 2019; Goodarzi and Faraji, 2017; Fahiminezhad et al. 2019; Mesbah Zadeh et al. 2019). شاخص‌های آماری به شرح روابط (۵)، (۶)، (۷) و (۸) مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2\right)} \quad (۶)$$

$$NRMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2\right)} / O_{ave} \quad (۷)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (۸)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})(P_i - P_{ave})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})^2} \quad (۹)$$

در روابط فوق O_i داده‌ها مشاهداتی، P_i داده‌های شبیه‌سازی شده مدل، O_{ave} میانگین داده‌های مشاهداتی، P_{ave} میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده مدل و n تعداد داده‌های مشاهداتی می‌باشد. برای سازگار شدن با تغییرات اقلیمی، پارامترهای درجه حرارت و میزان بارش در دوره آبی شبیه‌سازی و برای برآورد نیاز آبی الگوی کشت منطقه مورد مطالعه قرار گرفت.

تدوین سناریوهای آبیاری

در مطالعه حاضر سناریوهای مدیریتی مختلفی براساس سیستم‌های آبیاری، سطوح الگوی کشت، تغییر اقلیم و راه‌کارهای مدیریتی تعریف گردید. برای این منظور ابتدا سیستم‌های آبیاری در منطقه منطقه شناسایی گردید. این کار با بازدیدهای میدانی و اخذ اطلاعات از کارشناسان مربوطه صورت گرفت. در حال حاضر منابع آب سطحی به وسیله بند انحرافی بهمین و انهار سنتی در کل دشت توزیع می‌گردد. براساس آمار اندازه‌گیری شده شرکت آب منطقه‌ای فارس به طور متوسط سالانه در حدود ۴۵ میلیون مترمکعب آب به‌وسیله این انهار در سطح دشت توزیع می‌گردد. آن شرکت قصد دارد با احداث سد روی رودخانه قره‌آغاج (سد کواری) میزان تخصیص دشت کواری را برای کمک به تعادل بخشی به آب‌برزمینی در سال‌های مرطوب و نرمال به ۸۰ میلیون مترمکعب برساند. از جمله اقدام‌های دیگر شرکت آب منطقه‌ای، افزایش راندمان آبیاری سطحی از طریق پوشش دار کردن انهار سنتی

تعرق برای شرایط کنونی محاسبه شد. برای شرایط آینده از مدل CanESM2 محیط‌زیست کانادا برای پیش‌بینی و مدلسازی آب و هوا در منطقه مورد مطالعه استفاده شد که شامل ۲۶ مدل پیش‌بینی کننده (NCEP/NCAR) می‌باشد (Arora et al., 2011). براساس گزارش پنجم (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) خروجی‌های مدل تغییر اقلیم برای سه سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این گزارش سناریو RCP2.6 برای شرایط خوش بینانه که در آن واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ وات بر مترمربع رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. سناریو RCP4.5 برای شرایط متوسط تولید گازهای گلخانه‌ای که در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند. سناریو RCP8.5 برای شرایط حاد تولید گازهای گلخانه‌ای می‌باشد که در آن افزایش واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد (IPCC, 2014).

روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از مدل‌های چرخه عمومی جو (GCM) وجود دارد که از آن جمله می‌توان روش‌های ریزمقیاس را نام برد. در مطالعه حاضر برای ریزمقیاس‌نمایی از مدل SDSM برای مدل‌های گردش عمومی به مقیاس ایستگاه (زمینی) استفاده گردید. این مدل ترکیبی از مولد تصادفی آب و هوا و روش‌های رگرسیونی می‌باشد (Wilby and Dawson, 2007). تولید داده در مدل SDSM طی مراحل کنترل کیفیت داده‌ها، انتخاب پیش‌بینی کننده‌های غالب، واسنجی، صحت‌سنجی و تولید سناریوهای اقلیمی آینده انجام می‌شود. نتایج تحقیقات مختلف بیانگر کارایی و عملکرد مناسب مدل به نسبت سایر مدل‌های آماری برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره آبی می‌باشد (King et al. 2012; Chen et al. 2013; Gutierrez et al. 2013). بنابراین خروجی‌های مدل تغییر اقلیم به‌وسیله مدل SDSM برای دوره آبی ۵۰ سال آینده (۲۰۲۰-۲۰۷۰) ریزمقیاس‌نمایی گردید. پس از کنترل داده‌های مشاهداتی هواشناسی، از ۵۷ سال داده‌های مشاهداتی هواشناسی ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۳۰ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی ابتدا بهترین مدل‌های پیش‌بینی کننده NCEP با قوی‌ترین ارتباط با پیش‌بینی شونده‌ها انتخاب شدند. سپس در مرحله غربالگری بهترین پیش‌بینی کننده‌ها براساس آنالیز آماری مشخص شده، برای هر پارامتر هواشناسی تعیین شد.

برای ارزیابی نتایج مدل تغییر اقلیم و ریزمقیاس‌نمایی از معیارهای آماری ضریب تبیین R^2 ، خطای ریشه میانگین مربعات خطا RMSE، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE و ضریب نش-ساتکلیف NSE استفاده گردید. بر پایه این معیارها هرچه میزان خطا کم، ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تبیین به یک نزدیک تر باشد مدل از کارایی قابل قبولی برخوردار خواهد

سناریو براساس درصدهای الگوی کشت و سطوح آبیاری سطحی و تحت فشار برای سال ۲۰۰۸ تنظیم شده است.

سناریو S2 (مرجع): سناریو مرجع ادامه وضع موجود بدون تغییری در مدیریت آبیاری می‌باشد. همچنین این سناریو براساس درصدهای الگوی کشت و سطوح سیستم‌های آبیاری سال ۲۰۱۸ تعریف شده است. بررسی تغییرات نیاز ناخالص آبیاری طی یک دهه گذشته و همچنین تغییرات تقاضای آب در آینده تحت شرایط مختلف مدیریتی با این سناریو مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

سناریو S3: این سناریو به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم روی نیاز ناخالص آبیاری در دوره آتی تعریف شده است. در این سناریو درصد الگوی کشت و سطوح سامانه‌های آبیاری حال حاضر، در دوره آتی ثابت فرض شده و برابر داده‌های سال ۲۰۱۸ در نظر گرفته شده است.

سناریو S4: این سناریو ترکیبی از سناریوی S3، افزایش راندمان سامانه آبیاری سطحی و تخصیص آب سطحی برای سال‌های نرمال (یا مرطوب) به میزان ۸۰ میلیون متر مکعب (۳۵ میلیون متر مکعب افزایش) می‌باشد. اعمال بهبود راندمان انتقال و توزیع با فرض پوشش انهار و مدرن کردن شبکه تقوی در نظر گرفته شده است. هدف از طرح این سناریو ارزیابی تأثیر همزمان تغییر اقلیم، بهبود راندمان آبیاری سطحی و افزایش تخصیص روی کاهش منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

سناریو S5: سناریو S5 ترکیبی از سناریوی S4 و تغییر الگوی کشت به سمت محصولات کم مصرف منطقه می‌باشد. هدف این سناریو ارزیابی همزمان تغییر اقلیم، بهبود راندمان آبیاری (سطحی

پایین دست سد کوار (میززای شیرازی) در آینده می‌باشد. برداشت از آبخوان آب زیرزمینی نیز براساس آماربرداری‌هایی که توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای صورت گرفته سالانه در حدود ۱۴۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که به‌وسیله پمپاژ در انهار سنتی یا سیستم‌های تحت فشار در مزارع توزیع می‌گردد. بنابراین در حدود ۱۸۵ میلیون مترمکعب در سال، آب به مصارف کشاورزی در دشت کوار اختصاص یافته است (Anonymous, www.ftrw.ir; 2015). با در نظر گرفتن این موارد برای بررسی دقیق نیاز ناخالص آبیاری در آینده و اعمال آن در سناریوهای مدیریتی، باید سه نوع سیستم آبیاری منطقه شامل شبکه آبیاری انهار سنتی (Traditional Irrigation Canals Network, TICN)، شبکه آبیاری کانال‌های مدرن (Modern Irrigation Canals Network, MICN) و سیستم آبیاری تحت فشار (Pressurized Irrigation Systems, PIS) مورد بررسی قرار گیرد. براساس داده‌های تحقیق Abbasi et al (2017) در محدوده مورد مطالعه راندمان کل برای آبیاری سطحی با انهار سنتی (TICN) ۴۷ درصد، آبیاری سطحی با شبکه مدرن (MICN) ۵۴ درصد و شبکه تحت فشار (قطره‌ای و بارانی، PIS) ۶۷ درصد برآورد گردید. شبکه آبیاری تحت فشار غالب در منطقه قطره‌ای و نواری (Tape) می‌باشد. پارامترهای تغییر اقلیم در سناریوهای مدیریتی برای حالت بدبینانه و شرایط حاد تولید گازهای گلخانه‌ای (RCP8.5) در نظر گرفته شده است. در واقع فرض شده جامعه تلاشی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای انجام ندهد. بر این اساس سناریوهای منتخب آبیاری به شرح زیر تعریف شده‌اند.

سناریو S1: این سناریو به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات الگوی کشت و سیستم‌های آبیاری بر روی نیاز ناخالص آبیاری که در یک دهه گذشته در منطقه رخ داده، تعریف گردیده است. داده‌های این

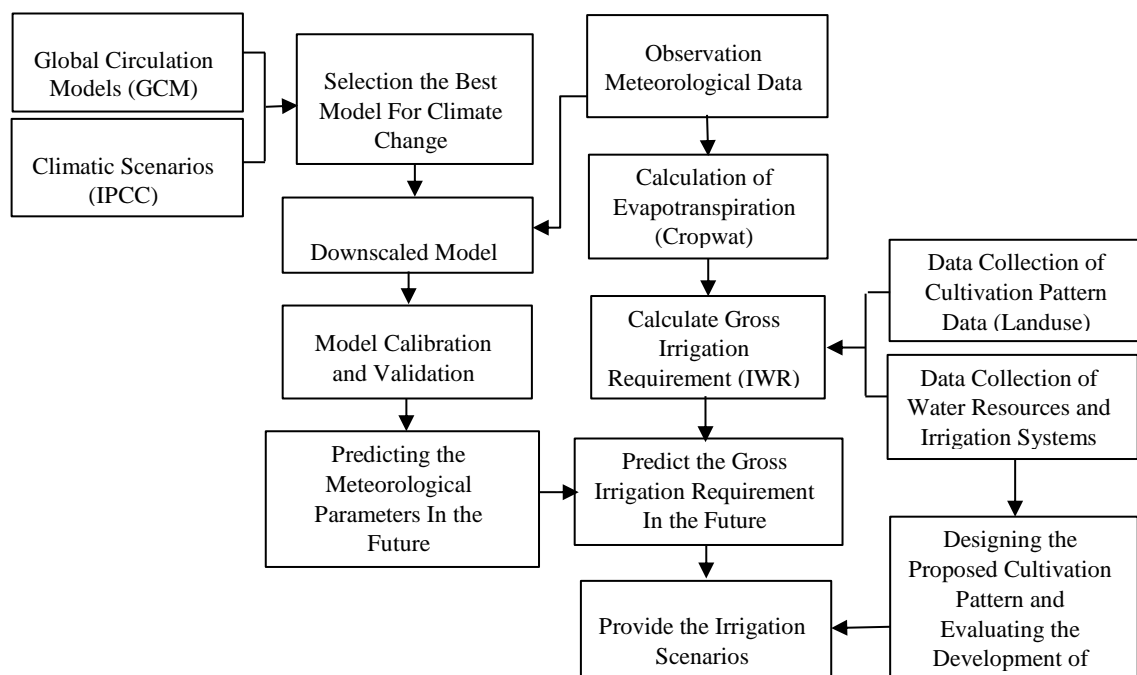


Fig. 2- The flowchart of the study procedure

مطابق شکل (۳) در ابتدا و انتهای دهه اخیر (۲۰۱۸-۲۰۰۸) برآورد شده است. نقشه کاربری براساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای در GIS، بازدیدهای میدانی و اطلاعات آمارنامه‌های کشاورزی تهیه شده که نتایج آن به شرح جدول (۱) خلاصه شده است (Anonymouse, 2018; www.fajo.ir). مطابق جدول (۱) مشاهده می‌شود که در منطقه پژوهش از سطح زیر کشت محصولات زراعی کم و به سطح زیر کشت محصولات باغی اضافه شده است. بنابراین تغییرالگوی کشت به سمت محصولات باغی به دلیل سودآوری بیشتر رخ داده است. همچنین سطح خالص کلی زیر کشت از حدود ۱۲۵۰۰ به ۱۳۷۰۰ هکتار رسیده که در حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. سطح اراضی با آبیاری ثقلی و تحت فشار در دهه اخیر براساس آمارنامه کشاورزی و اطلاعات کارشناسان جهاد کشاورزی استان در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که سطح زیر کشت اراضی تحت فشار سالانه در حال افزایش است و این افزایش در سال ۲۰۱۸ در مقایسه با سال ۲۰۰۸ به حدود ۴۱ درصد رسیده است. این موضوع بیان‌گر افزایش راندمان آبیاری در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش سطح زیرکشت به دلیل افزایش راندمان آبیاری و توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار در منطقه رخ داده است.

و تحت فشار) و تغییر الگوی کشت روی تقاضای آبیاری می‌باشد.

سناریو S6: سناریو S6 همان شرایط سناریو S5 را دارا می‌باشد. فقط در آن فرض شده شرایط خشکسالی باشد و هیچ‌گونه افزایش تخصیصی در آب سطحی صورت نگیرد و صرفاً با تغییر الگوی کشت و توسعه سیستم‌های آبیاری (سطحی و تحت فشار)، میزان تقاضای آبیاری را در شرایط خشکسالی کاهش داد.

برای تعیین سطوح زیرکشت گیاهان مختلف در هر سیستم آبیاری و نیاز ناخالص آبیاری از روابط (۴) و (۵) و برنامه برنامه-ریزی خطی (LP) در نرم‌افزار Excel استفاده گردید که در آن براساس حداکثر احجام منابع آب در دسترس و نیاز ناخالص آبیاری گیاهان، سطوح الگوی کشت طراحی و تنظیم شده است. در شکل (۲) روند اجرای تحقیق ارائه شده است.

نتایج و بحث

تغییرات الگوی کشت و سیستم‌های آبیاری منطقه

منطقه مطالعاتی دشت کوار دارای کاربری زراعی و باغی می‌باشد. موضوع مهم در منطقه تغییر در الگوی کشت به سمت محصولات باغی و توسعه سیستم‌های نوین آبیاری می‌باشد. نتایج این تغییرات در این تحقیق باتوجه به تهیه نقشه کاربری اراضی

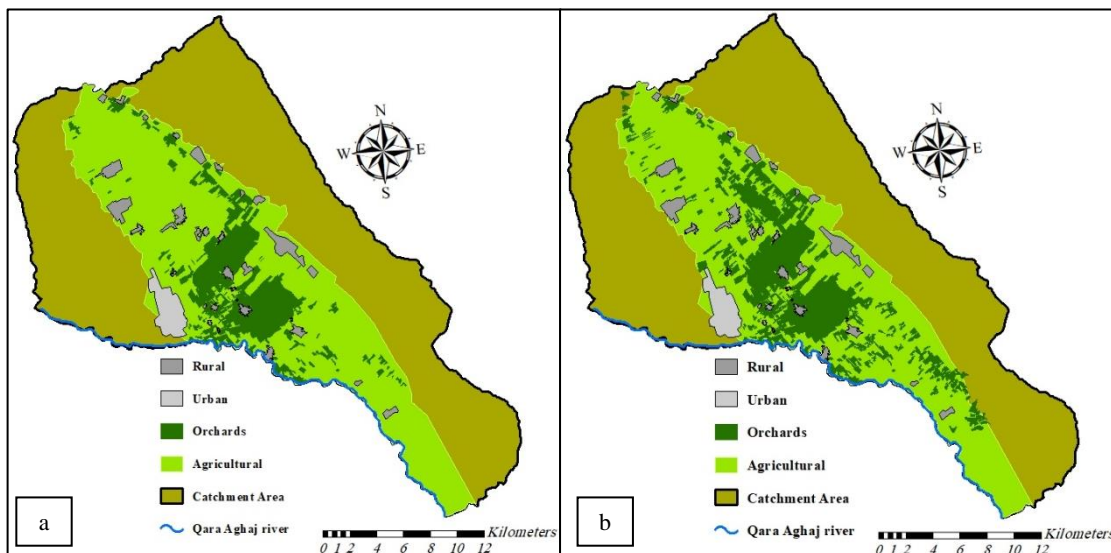


Fig. 3- Land use of Kavar plain catchment in the last decade (a:2008 b:2018)

شکل ۳- نقشه کاربری حوزه آبریز دشت کوار در دهه اخیر (a): ۲۰۰۸ (b): ۲۰۱۸)

جدول ۱- درصد محصولات مختلف الگوی کشت در دهه اخیر دشت کوار

Table 1- Percentage of crops in the cultivation pattern during the last decade in Kavar plain

rops	Percent (2008-2009)	Area (ha)	Percent (2017-2018)	Area (ha)
Canola	4		4	
Wheat	35		30	
Barely	5		3	
Sugarbeet	9		7	
Maize (Grain)	10	9500	7	8500
Onion	3		2	
Beans	1		1	
Alfafla	4		4	
Maize	3		3	
Tomato	2		1	
Grape	16		25	
Pistachio	0	3000	1	5200
Orchards	8		12	
SUM	100	12500	100	13700

جدول ۲- سطح اراضی ثقلی و تحت فشار دشت کوار در دهه اخیر

Table 2- Area of pressurized and Non-Pressurized lands of Kavar plain in the last decade

Irrigation System	2008-2009	2017-2018
Non-Pressurized (Gravity)	10650	8100
Pressurized	1850	5600
SUM	12500	13700

جدول ۳- ارزیابی عملکرد مدل SDSM در طول دوره‌های واسنجی و صحت سنجی

Table 3- Evaluating the performance of the SDSM model during calibration and validation periods

Parameter	Calibration				Validation			
	RMSE	NRMSE	NSE	R ²	RMSE	NRMSE	NSE	R ²
Maximum Temperature	0.61	2.39	0.99	0.68	0.67	2.57	0.99	0.71
Minimum temperature	0.33	3.61	0.99	0.61	0.41	3.62	0.99	0.64
Percipitation	2.59	7.96	0.99	0.64	3.96	8.03	0.98	0.59

سناریوهای مختلف انتشار در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. نتایج درجه حرارت حداکثر نشان می‌دهد که دما در دوره آبی افزایش خواهد یافت و این افزایش در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. مدل بیشترین افزایش دمای حداکثر را تحت سناریو RCP8.5 در ماه جولای به میزان ۱/۷۲ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریوهای دیگر RCP2.6 و RCP4.5 در ماه جولای به ترتیب ۱/۳۸ و ۱/۴۴ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی کرده است. نتایج درجه حرارت حداقل نیز نشان می‌دهد که افزایش دما در دوره آبی در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. بیشترین افزایش دمای حداقل تحت سناریو RCP8.5 در ماه در ماه جون به میزان ۱/۵۱ درجه سانتی‌گراد و همچنین میزان افزایش دما تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 در ماه ژوئن به ترتیب ۱/۲۶ و ۱/۴۳ درجه سانتی‌گراد رخ خواهد داد. نتایج شبیه‌سازی بارندگی بیانگر کاهش متوسط سالانه آن در دوره آبی است و این کاهش تحت

تغییر اقلیم و نیاز آبی

پارامترهای هواشناسی دمای حداکثر، دمای حداقل و بارندگی به وسیله مدل SDSM برای دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۷۰) شبیه‌سازی گردید. نتایج آماری ارزیابی پارامترهای هواشناسی شبیه‌سازی شده حاصل از واسنجی و صحت سنجی مدل در جدول (۳) ارائه شده است.

بررسی کارایی مدل توسط شاخص NSE بیان‌گر این است که برازش کاملی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل وجود دارد. مقادیر شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE و R² نیز نشان می‌دهد مدل توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس نمایی پارامترهای هواشناسی در دوره آبی دارد. برای مقایسه بهتر نمودار انطباق‌پذیری مقادیر صحت‌سنجی شده مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی طی دوره آبی تحت

محاسبه شده است. بیشترین افزایش مربوط به گیاه گندم، جو و پیاز می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که اثر تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبی (CWR) حداکثر ۱۰ درصد می‌باشد. در مورد نیاز ناخالص آبیاری (IWR) میزان افزایش طی ۵۰ سال آینده بیشتر می‌باشد. برای سناریو RCP2.5 بین چهار تا هشت درصد؛ برای سناریو RCP4.5 بین شش تا ۱۳ درصد و برای سناریو RCP8.5 بین هشت تا ۱۸ درصد پیش‌بینی می‌گردد که بیشترین افزایش مربوط به گیاه گندم، جو، کلزا، پیاز و حبوبات می‌باشد. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشد که محصولات پاییزه بیشترین حساسیت و محصولات تابستانه کمترین حساسیت را به تغییر اقلیم خواهند داشت که با تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد (Goodarzi et al. 2015; Gohari et al. 2013).

سناریوهای مختلف متفاوت است. بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریو RCP8.5 و به میزان ۵۰ میلی‌متر در سال (۱۶ درصد کاهش) می‌باشد. همچنین مدل کاهش متوسط بارندگی سالانه تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب ۱۶ و ۳۵ میلی-متر در سال (پنج و ۱۱ درصد کاهش) پیش‌بینی کرده است. خلاصه نتایج تغییر اقلیم روی نیاز خالص آبی سالانه گیاهان مختلف (CWR) تحت سناریوهای مختلف انتشار در شکل (۷) ارائه شده است. بیشترین نیاز خالص آبی مربوط به یونجه، باغات میوه، چغندر قند و پیاز می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که نیاز آبی همه گیاهان تحت سناریوهای انتشار در آینده (۲۰۲۰-۲۰۷۰) افزایش می‌یابد. برای سناریو RCP2.6 میزان افزایش بین ۳/۹ تا ۴/۵؛ برای سناریو RCP4.5 میزان افزایش بین شش تا هفت و برای سناریو RCP8.5 میزان افزایش بین ۸/۵ تا ۱۰ درصد

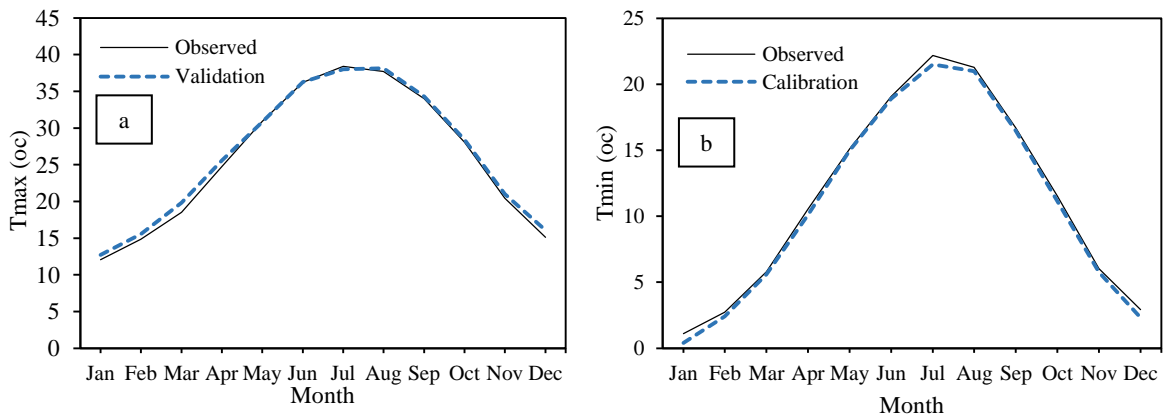


Fig. 4- Comparison of the maximum (a) and minimum (b) observed and simulated temperatures in the validation period

شکل ۴- مقایسه دمای حداکثر (a) و حداقل (b) مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره صحت سنجی

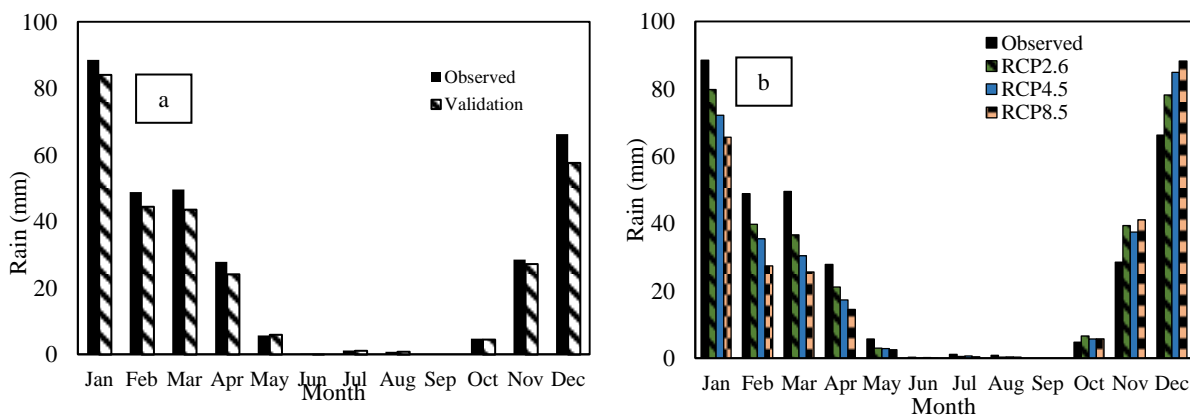


Fig. 5- (a) Comparison of the observed and simulated rainfall in the validation period, (b) Predicting the rainfall during the next period under climatic scenarios

شکل ۵- (a): مقایسه بارندگی مشاهداتی و شبیه سازی شده در دوره صحت سنجی. (b): پیش‌بینی بارندگی طی دوره آبی تحت سناریوهای اقلیمی

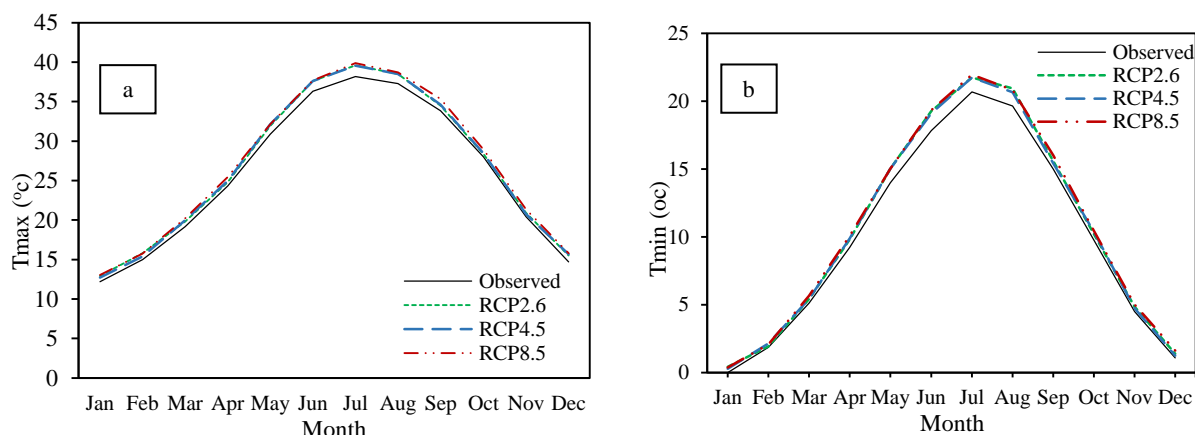


Fig. 6- Predicting the maximum (a) and minimum (b) temperature during the next period under climatic scenarios

شکل ۶- پیش‌بینی دمای حداکثر (a) و حداقل (b) طی دوره آبی تحت سناریوهای اقلیمی

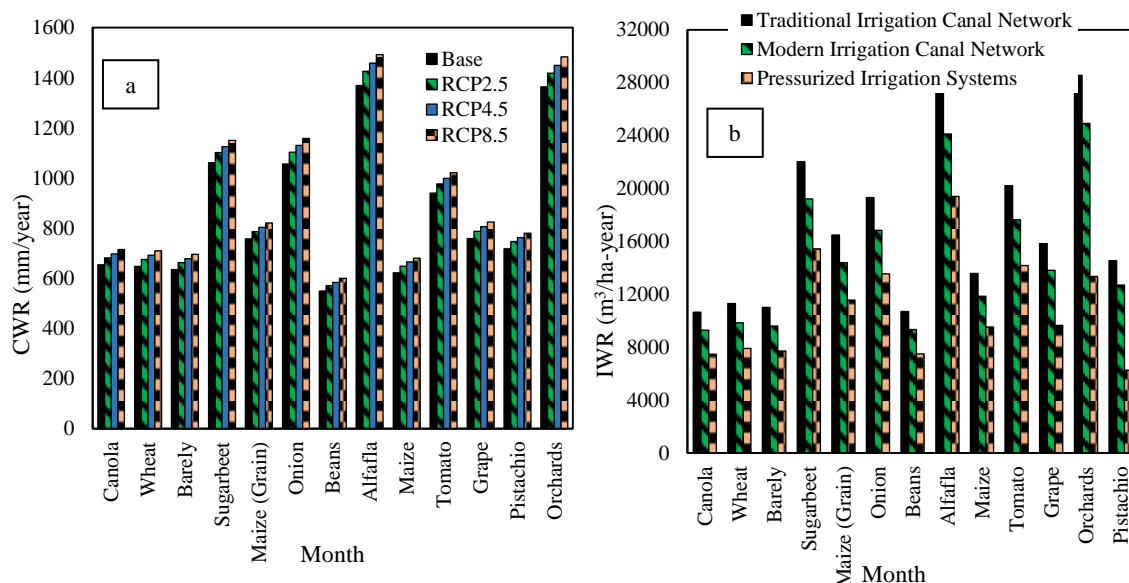


Fig. 7- (a) Evapotranspiration of annual plant for the next period under climatic scenarios, (b) Gross irrigation requirements for different irrigation systems

شکل ۷- (a): تبخیر ترق سالانه گیاهی برای دوره آبی تحت سناریوهای اقلیمی. (b): نیاز ناخالص آبیاری برای

سیستم‌های مختلف آبیاری

هم‌چنین بررسی اثر تطبیقی آن‌ها بر یکدیگر، سناریوهای مختلفی تعریف شده است که نتایج آن‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. در این مطالعه به‌منظور بررسی رفتار برنامه‌ریزی خطی (LP) تحت پارامترهای ورودی و اطمینان از نتایج به‌دست آمده تحلیل حساسیت صورت گرفت. نتایج نشان داد به ترتیب حجم تخلیه آب زیرزمینی، حجم آب سطحی و نیاز ناخالص آبیاری بیشترین تأثیر را بر روی نتایج دارند.

سناریوی S1، براساس درصدهای الگوی کشت و سطوح آبیاری سطحی و تحت فشار که در جداول (۱) و (۲) برای سال ۲۰۰۸ ارائه شده، تنظیم شده است. مطابق نتایج جدول (۴) ملاحظه می‌گردد میزان نیاز ناخالص آبیاری دشت در سال ۲۰۰۸ به میزان ۱۸۴ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. بدین صورت

برای اعمال نیاز ناخالص آبیاری در سناریوهای مدیریتی باید نوع سیستم‌های آبیاری مد نظر قرار گیرد. در شکل (۷) نیاز ناخالص آبیاری (IWR) برای سیستم‌های مختلف آبیاری در منطقه مورد مطالعه برآورد شده است. نتایج بیانگر کاهش نیاز ناخالص آبیاری در سیستم‌های تحت فشار می‌باشد. بدین صورت که نیاز ناخالص آبیاری (IWR) برای سامانه‌های آبیاری تحت فشار (PIS) و سطحی مدرن (MICN) نسبت به سیستم آبیاری سنتی (TICN) بطور متوسط به ترتیب ۳۵ و ۱۳ درصد کمتر می‌باشد.

تحلیل سناریوهای آبیاری

برای بررسی هم‌زمان اثر راندمان آبیاری، تغییر اقلیم و تغییر ترکیب الگوی کشت بر روی نیاز ناخالص آبیاری در دوره آبی و

اقلیم باعث می‌گردد که برداشت از سفره آب زیرزمینی در حدود ۱۸ درصد نسبت به حال حاضر افزایش یابد. بنابراین می‌توان گفت که کشت محصولات پرمصرف، افزایش سطح زیر کشت و تغییرات اقلیمی مهمترین عواملی می‌باشند که سبب می‌شوند سفره آب زیرزمینی منطقه با عبور از بحران بتدریج با ورشکستگی آب مواجه گردد.

در سناریو S4 علاوه بر شرایط سناریو S3، افزایش تخصیص (تخصیص آب سطحی به میزان ۸۰ میلیون مترمکعب درسال) و بهبود راندمان آبیاری سطحی نیز در آن اعمال شده است. نتایج سناریو S4 در جدول (۴) نشان می‌دهد که نیاز ناخالص آبیاری دشت به ۱۹۶ مترمکعب در سال می‌رسد که در حدود هفت درصد کمتر از سناریو S3 و در حدود چهار درصد بیشتر از سناریو مرجع خواهد بود. این در حالی است که برداشت از آبخوان به ۱۱۶ میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته که در حدود ۳۰ درصد کمتر از سناریو S3 (۱۶۵ میلیون مترمکعب) خواهد بود. با توجه به اینکه اختلاف بین نیاز ناخالص آبیاری کل دشت در سناریو S4 و S3 کم می‌باشد، بنابراین افزایش راندمان آبیاری سطحی به تنهایی راهبرد تطبیقی کافی برای کاهش مصرف آبیاری منطقه نخواهد بود و صرفاً تخصیص آب سطحی به بهبود سفره آب زیرزمینی کمک کرده است. بنابراین رویکرد تغییر در الگوی کشت به سمت محصولاتی با نیاز آبی کمتر و توسعه سیستم‌های تحت فشار (به شرط حفظ سطح زیرکشت) برای کاهش مصرف حوضه کاملاً ضروری است.

در سناریو S5 سعی شده از سطح زیرکشت محصولات پرمصرف کم و به سطح زیر کشت محصولات کم مصرف زیاد شود. بدین صورت که سطح زیر کشت گندم، ذرت‌دانه‌ای، یونجه، انگور، باغات میوه (سیاه‌درختان) کم شده و متناسب با دوره کشت به سطح زیر کشت محصولات کم مصرف‌تر منطقه شامل کلزا، حبوبات و باغ پسته اضافه گردیده است. الگوی کشت پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده که حداقل سطوح گیاهان علوفه‌ای (برای نیاز دام) و سطح چغندر قند (با توجه به وجود کارخانه قند) در منطقه حفظ گردد. در این سناریو ۸۰ میلیون مترمکعب از طریق آب سطحی (MICN) و مابقی نیاز از طریق آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. مطابق نتایج جدول (۴) مشاهده می‌گردد که نیاز ناخالص آبیاری به مقدار ۱۶۴ میلیون متر مکعب می‌رسد که ۲۲ درصد کمتر از سناریو S3 می‌باشد. در این سناریو میزان برداشت از آب زیرزمینی با توجه به افزایش تخصیص آب سطحی و توسعه سیستم‌های تحت فشار به ۸۴ میلیون متر مکعب کاهش می‌یابد. بدین صورت می‌توان ۴۰ درصد (نسبت به ۱۴۰ میلیون مترمکعب برداشت حال حاضر) برداشت آب از آبخوان را در سال‌های نرمال (یا مرطوب) با ترکیب الگوی پیشنهادی کاهش داد. این موضوع در حالی است که اثرات تطبیقی تغییرات اقلیمی آینده نیز در نظر گرفته شده و مصرف حوضه نیز کاهش پیدا کرده است.

که ۴۵ میلیون از طریق آب سطحی (انهار سنتی؛ TICN) و مابقی آن از طریق منابع زیرزمینی به مقدار ۱۳۹ میلیون مترمکعب تأمین شده که از این مقدار ۲۲ میلیون مترمکعب در قالب سیستم‌های تحت فشار (PIS) و ۱۱۷ میلیون مترمکعب به صورت پمپاژ در انهار سنتی (TICN) بوده است. نتایج محاسبات سطوح الگوی کشت و نیاز ناخالص آبیاری سناریو S1 نشان می‌دهد که آب مصرفی منطقه در سال ۲۰۰۸ با داده‌های اندازه‌گیری شرکت آب منطقه‌ای فارس تطابق دارد.

سناریو S2 (مرجع) براساس درصدهای الگوی کشت و سطوح آبیاری جدول (۱) و (۲) که برای سال ۲۰۱۸ ارائه شده، تعریف شده است. نتایج جدول (۴) برای این سناریو نشان می‌دهد که میزان نیاز ناخالص آبیاری دشت ۱۸۸ میلیون متر مکعب برآورد شده است. بدین صورت که استفاده از منابع آب سطحی به مقدار ۴۵ میلیون (انهار سنتی؛ TICN)؛ منابع آب زیرزمینی به میزان ۱۴۳ میلیون مترمکعب که به دو طریق سیستم‌های تحت فشار (PIS) به مقدار ۶۳ میلیون مترمکعب و پمپاژ در انهار سنتی (TICN) به میزان ۸۰ میلیون مترمکعب بوده است. در این سناریو نیز مقادیر نیاز ناخالص آبیاری محاسبه شده تطابق قابل قبولی با مصارف منطقه دارد. همچنین ملاحظه می‌گردد علی‌رغم این که سطح زیر کشت سیستم‌های تحت فشار تقریباً سه برابر شده (از ۱۹۰۰ به ۵۶۰۰ هکتار) ولی مصارف کشاورزی منطقه کاهش نیافته است. علت امر افزایش سطح زیرکشت و توسعه باغات پرمصرف به دلیل سود آوری بیشتر به نسبت محصولات زراعی بوده است. در واقع می‌توان گفت افزایش راندمان آبیاری در قالب افزایش سطح زیرکشت و گسترش باغات در منطقه رخ داده است. این همان پارادوکسی است که درباره توسعه سیستم‌های آبیاری و بهبود راندمان آبیاری وجود دارد (Grafton et al, 2018). در نگاه اول افزایش راندمان موجب صرفه‌جویی در مصرف آب حوضه می‌گردد اما در واقع ذخیره و تخصیص مجدد به سایر اراضی قابل کشت را به دنبال دارد. در این شرایط می‌توان چنین گفت که دولت با اعطای یارانه و وام‌های بدون بهره‌ای که در زمینه توسعه سیستم‌های تحت فشار به کشاورزان می‌دهد به اهداف خود برای حفظ منابع آب زیرزمینی نرسیده است و به تخریب و بحران در سفره‌های زیرزمینی کمک کرده است.

سناریو S3 از نظر درصدهای الگوی کشت و سطوح تحت فشار شبیه سناریو S2 می‌باشد و در آن فرض شده با ثابت ماندن همان مشخصات، مقدار نیاز ناخالص آبیاری دشت در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۷۰) برای شرایط حاد تولید گازهای گلخانه‌ای (RCP8.5) چقدر تغییر می‌یابد. مطابق جدول (۴) ملاحظه می‌گردد که نیاز ناخالص در دوره آتی به ۲۱۰ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد که در حدود ۱۲ درصد بیشتر از نیاز ناخالص آبیاری در سناریو مرجع است. همچنین حداکثر ۴۵ میلیون مترمکعب از طریق آب سطحی (TICN) و مابقی به مقدار ۱۶۵ میلیون مترمکعب باید از طریق پمپاژ از آبخوان تأمین گردد. بنابراین تغییر

دیگر نیز نشان می‌دهد در صورت به‌کارگیری تدابیر لازم در راستای ممانعت از افزایش سطح زیرکشت و توسعه سیستم‌های نوین آبیاری می‌توان علاوه بر حفظ منابع آب در آبخوان‌های حوضه‌ها به کاهش تنش آبی نیز کمک کرد (Molavi et al. 2017; Multsch et al. 2017). البته در این تحقیق‌ها کمتر به‌صورت هم‌زمان کلیه سیاست‌های تغییر الگوی کشت، تغییر اقلیم، بهبود راندمان آبیاری سطحی و تحت فشار در نظر گرفته شده است. بنابراین با در نظر گرفتن جمیع موارد عنوان شده به‌منظور کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی دشت کوهر، سیاست‌های پیشنهادی سناریوهای S5 و S6 این تحقیق می‌تواند به کاهش برداشت و تعادل بخشی آب زیرزمینی در آینده کمک شایانی کند و همچنین مد نظر مدیران اجرایی قرار گیرد.

سناریو S6 با همان رویکرد سناریو S5 و برای شرایط خشکسالی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در سال‌های خشک محدودیت شدید منابع آب سطحی وجود دارد بنابراین در این سناریو تخصیص آب سطحی همان ۴۵ میلیون متر مکعب اعمال شده و مابقی نیاز از طریق آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. مطابق جدول (۴) ملاحظه می‌گردد که نیاز ناخالص آبیاری به مقدار ۱۵۶ میلیون متر مکعب می‌رسد که ۲۶ درصد از سناریو S3 (به دلیل توسعه بیشتر سیستم‌های تحت فشار نسبت به سناریو S5) کمتر می‌باشد. میزان برداشت از آبخوان زیرزمینی ۱۱۱ میلیون متر مکعب محاسبه شده است که ۲۱ درصد کمتر از برداشت حال حاضر می‌باشد. بنابراین با توسعه صحیح سیستم آبیاری تحت فشار می‌توان حتی در سال‌های خشک و در شرایط تغییر اقلیم نیز برداشت از آبخوان را کاهش داد. نتایج تحقیقات

جدول ۴- سناریوهای مختلف آبیاری

Table 4- The different irrigation scenarios

Crop Pattern	Irrigation Systems	Scenarios (ha)					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Canola	TICN*	500	548	548	137	0	0
	MICN**	0	0	0	411	548	137
	PIS***	0	0	0	0	822	1233
Wheat	TICN	4375	3425	3425	411	0	0
	MICN	0	0	0	3014	2740	1644
	PIS	0	685	685	685	685	1781
Barely	TICN	625	411	411	274	0	0
	MICN	0	0	0	137	411	411
Sugarbeet	TICN	975	360	360	89	0	0
	MICN	0	0	0	270	274	137
	PIS	150	600	600	600	685	822
Maize (Grain)	TICN	1250	548	548	205	0	0
	MICN	0	0	0	343	274	0
	PIS	0	411	411	411	274	548
Onion	PIS	375	274	274	274	137	137
Beans	TICN	125	137	137	137	0	0
	PIS	0	0	0	0	822	822
Alfafla	TICN	500	274	274	69	0	0
	MICN	0	0	0	206	137	0
	PIS	0	274	274	274	137	274
Maize	TICN	375	411	411	137	0	0
	MICN	0	0	0	274	411	411
Tomato	TICN	250	68	68	68	68	0
	PIS	0	68	68	68	69	137
Grape	TICN	1000	959	959	411	0	0
	MICN	0	0	0	548	548	274
	PIS	1000	2466	2466	2466	1644	1918
Orchards	TICN	625	959	959	548	0	0
	MICN	0	0	0	411	411	274
	PIS	375	685	685	685	685	822
Pistachio	PIS	0	137	137	137	1918	1918
Total Crop Pattern		12500	13700	13700	13700	13700	13700
Allocated Surface Water (MCM)	TICN	45	45	45	0	0	0
	MICN	0	0	0	80	80	45
Allocated Groundwater (MCM)	TICN	117	80	95	46	0	0
	PIS	22	63	70	70	84	111
Total allocated water (MCM)		184	188	210	196	164	156

* Traditional Irrigation Canals Network **Modern Irrigation Canals Network *** Pressurized Irrigation Systems

نتیجه گیری

در این تحقیق نیاز آبیاری الگوی کشت دشت کوار در شرایط تغییرات اقلیمی و توسعه سیستم‌های آبیاری مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی تغییرات آب و هوایی روی نیاز آبی، پارامترهای هواشناسی برای دوره آتی تحت سناریوهای انتشار گزارش پنجم IPCC پیش‌بینی گردید. شبیه سازی پارامترهای دما در دوره آتی نشان داد که افزایش دما در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. افزایش درجه حرارت حداکثر تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۳۸، ۱/۴۴، ۱/۷۲ درجه سانتی‌گراد و همچنین افزایش درجه حرارت حداقل ۱/۲۶، ۱/۴۳ و ۱/۵۱ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. نتایج شبیه‌سازی بارندگی بیان‌گر کاهش متوسط سالانه آن در دوره آتی است و این کاهش تحت سناریوهای مختلف متفاوت است. بیشترین کاهش بارندگی تحت سناریو RCP8.5 به میزان ۱۶ درصد برآورد گردیده است. همچنین کاهش بارندگی تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب پنج و ۱۱ درصد پیش‌بینی شده است. با اعمال پارامترهای اقلیمی شبیه‌سازی شده، نیاز آبی و آبیاری همه گیاهان تحت سناریوهای انتشار در آینده (۲۰۲۰-۲۰۷۰) افزایش می‌یابد. میزان افزایش نیاز آبیاری برای گیاهان مختلف تحت سناریو RCP2.6 بین چهار تا هشت درصد؛ تحت سناریو RCP4.5 بین شش تا ۱۳ و تحت سناریو RCP8.5 بین هشت تا ۱۸ درصد پیش‌بینی می‌گردد. در این میان محصولات پاییزه بیشترین حساسیت و محصولات تابستانه کمترین حساسیت را به تغییر اقلیم خواهند داشت. بررسی‌های صورت گرفته روی تغییرات الگوی کشت و توسعه سیستم‌های نوین آبیاری در دهه اخیر نشان می‌دهد افزایش راندمان آبیاری و توسعه سیستم‌های تحت فشار موجب شده سطح خالص زیر کشت

منطقه در حدود ۱۰ درصد در دهه اخیر (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸) افزایش یابد و الگوی کشت نیز به سمت محصولات باغی پرمصرف، به دلیل سودآوری بیشتر تغییر یافته است. اعمال این تغییرات با تعریف سناریوهای آبیاری در شرایط وضع موجود و گذشته نشان داد که علی‌رغم افزایش راندمان آبیاری، مصرف آب در منطقه تغییری نیافته است. در واقع افزایش راندمان، ذخیره و تخصیص مجدد آب به سایر اراضی قابل کشت را به دنبال داشته است. ادامه این شرایط همراه با افزایش نیاز آبی در دوره آتی باعث می‌گردد که سفره‌های آب زیرزمینی بتدریج با ورشکستگی آب مواجه گردند. برای جلوگیری از این مشکل، دو سناریو آبیاری S5 و S6 برای شرایط خشکسالی و نرمال با رویکرد طراحی و تنظیم الگوی کشت و توسعه سیستم‌های آبیاری سطحی و تحت فشار به شرط حفظ سطح زیرکشت پیشنهاد گردید که نتایج آن‌ها با در نظر گرفتن اثرات تطبیقی تغییرات اقلیمی آینده موجب کاهش برداشت آب زیرزمینی در حدود ۲۱ تا ۴۰ درصد می‌گردد. بدیهی است با به‌کارگیری این پیشنهادها، کمک شایانی به تعادل بخشی آب زیرزمینی منطقه در آینده می‌شود. با توجه به اهمیت فراوان بحران آب، این تحقیق صرفاً روی مصارف آبیاری متمرکز گردید. بنابراین برای مطالعه‌های آتی پیشنهاد می‌گردد بررسی‌های اقتصادی نیز مد نظر قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

از همکاری صمیمانه کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی استان فارس برای در اختیار قراردادن کلیه اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- 1- Abbasi, F., Sohrab, F. and Abbasi, N., 2017. Evaluation of Irrigation Efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), pp.113-128. (In Persian).
- 2- Abbasi, H., Delavar, M. and Bigdeli Naalbanda, R., 2020. Evaluation of the effects of climate change on water resource sustainability in basins using water footprint scarcity indicators. *Iran-Water Resources Research*, 15(4), pp.252-279. (In Persian).
- 3- Alizadeh, A., Sayari, N., Hesami Kermani, M.R., Bannayan Aval, M. and Farid Hossaini, A., 2010. Assessment of Climate Change Potential Impacts on Agricultural Water Use and Water Resources of Kashaf rood basin. *Journal of Water and Soil*, 24(4), pp. 815-835. (In Persian).
- 4- Anonymous, 2015. Studies of the second phase of the irrigation and drainage network Mirza Shirazi dam (Kavar plain). Parab Consulting Engineers. Regional water company of Fars. *Technical Report*. 295p. (In Persian).
- 5- Anonymous, 2018. Statistics and performance Agriculture section Fars province. Agricultural organization of Fars. *Technical Rep.* 224p. (In Persian).

- 6- Arora, V. K., Scinocca, J. F., Boer, G. J., Christian, J. R., Denman, K. L., Flato, G. M., Kharin, V. V., Lee, W. G. and Merry field, W. J., 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(5), pp. 1-6.
- 7- Chen, H., Chong-Yu, X. and Shenglian, G., 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434(435), pp.36-45.
- 8- Etemadi, H. and Delshab, H., 2020. Potential expected climate change impact on Persian Gulf Coastal Mangrove ecosystems based on temperature and precipitation variables. *Journal of Environmental Science and Technology (JEST)*, 22(2), pp. 1-13. (In Persian).
- 9- Ewert, F., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Metzger, M.G. and Leemans, R., 2005. Future scenarios of european agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 107(2), pp.101-116.
- 10- Fahiminezhad, E., Baaghde, M.O., Babaeian, I. and Entezari, A., 2019. Simulation of the effect of global warming on the mean and extreme events of some hydrochemical variables in Shandiz catchment basin Case study: The Case of the general circulation model CanESM2. *Journal of Spatial Analysis Environmental*, 6(3), pp.27-48. (In Persian).
- 11- Gohari, A.R., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A.R., Wang, D. and Madani, K., 2013 Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, 442 (1), pp.405-419.
- 12- Goodarzi, M., Abedi-Koupai, J., Heidarpour, M. and Safavi, H.R., 2016. Evaluation of the effects of climate change on groundwater recharge using a hybrid method. *Water Resources Management*, 30, pp.133-148.
- 13- Goodarzi, M.R. and Faraji, A.R., 2017. Evaluation of different exponential downscaling methods for indicators minimal flow under the effects of climate change. *Journal of Climate Research*, 31(1), pp.57-72. (In Persian).
- 14- Grafton, R.Q., Williams, J., Perry, C.J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall. B., Wheeler, S.A., Wang, Y., Garrick, D. and Allen, R.G, 2018. The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 361(6404), pp.748-750.
- 15- Gutierrez, J.M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanas, R. and Herrera, S., 2013. Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. *Journal of Climate*, 26(1), pp.171-188.
- 16- IPCC, 2014. Climate change 2014 synthesis report. Summary for policymakers. Contribution of Working Group I, II and III to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), In: R. Pachauri and L. Meyer (eds). Geneva, Switzerland. 151p.
- 17- King, L., Iriwin, M.S., Sarwar, R., McLeod, A.I., Slobodan, P. and Simonovic, P., 2012. The Effects of climate change on extreme precipitation events in the upper thames river basin: a comparison of downscaling approaches. *Canadian Water Resources Journal*, 37(3),pp.252-274.
- 18- Khayat, A., Amirabadizadeh, M., Pourreza-Bilondi, M. and Khozaymeh Nezhad, H., 2020. Study temperature and precipitation parameters under the effect of climate change (case study: Birjand plain). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(1), pp. 200-210. (In Persian).
- 19- Kumar, C.P., 2012. Climate change and its impact on groundwater resources. *International Journal of Engineering and Science*, 1(5), pp.43-60.
- 20- Malmir, M., Mohammadrezapour, O. and Sharif Azari, S., 2016. Evaluation of climate change impacts on agricultural water allocation in Qara Su watershed, using WEAP. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 23(1), pp.143-155. (In Persian).

- 21- Mehta, V.K., Haden, V.R., Joyce, B.A., Purkey, D.R. and Jackson, L.E., 2013. Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agricultural Water Management*, 117(1), pp. 70-82.
- 22- Mesbah Zadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H. and Mortezaie Farizhendi, G.H., 2019. Study of current and future meteorological drought conditions using the CMIP5 model under RCP scenarios. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 13(46), pp.11-22. (In Persian).
- 23- Mohebi, A.H., 2019. Study of climate change on water requirement for date palm in Ahwaz region. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), pp.135-153. (In Persian).
- 24- Molavi, H., Liaghat, A.M. and Nazari, B., 2017, Assessment of development and improvement policies of pressurized and surface irrigation systems using system Dynamics; case study Aras basin. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 7(27), pp.75-92. (In Persian).
- 25- Mojerloo, F., Fazloulou, R. and Emadi, A.R., 2019. Application of the IHACRES model to assess the effects of climate change on the discharge of Tajan watershed. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(1), pp. 129-141. (In Persian).
- 26- Multsch, s., Elshamy, M.E., Batarseh, s., Seid, A.H., Frede, H.G. and Breuer, L., 2017. Improving irrigation efficiency will be insufficient to meet future water demand in the Nile Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12(1), pp.315-330.
- 27- Nasseri, A., Abbasi, F. and Akbari, M., 2017. Estimating Agricultural Water Consumption by Analyzing Water Balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), pp.17-32.
- 28- Rafiee, M.R., Moazed, H., Ghaemi, A.A. and Boroomandnasab, S., 2015. FAO-56 Method for Estimating Evapotranspiration and Crop Coefficients of Eggplant in Greenhouse and Outdoor Conditions. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 39(2), pp.59-77. (In Persian).
- 29- Sepaskhah, A.R., Fooladmand, H.R. 2004. A computer model for desing of microcatchment water harvesting system for rain-fed vineyard. *Agricultural Water Management*, 64(3), pp.213-232.
- 30- Shaltout, M.E.S. and Tobol, K.M., 2018. Global climate models: the case of Egypt. *Alexandria Research Center for Adaptation to Climate Change (ARCA)*, 6(1), pp.1-27.
- 31- Sivakumar, M.V.K., Das, H.P. and Brunini, O., 2005. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Climatic Change*, 70(1), pp.31-72.
- 32- Stancalie, G., Marica, A. and Toullos, L., 2010. Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(2), pp.25-30.
- 33- Surendran, U., Sushanth, C.M., Mammen, G. and Joseph, E.J., 2015. Modelling the crop water requirement using FAO-CROPWAT and assessment of water resources for sustainable water resource management: A case study in Palakkad district of humid tropical Kerala, India. *Aquatic Procedia*, 4(1), pp.1211- 1219.
- 34- Wilby, R.L. and Dawson, C.W., 2007. SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *SDSM manual version 4.2, Environment Agency of England and Wales*, 94p.
- 35- Zand-Parsa, S.h., Mahmoudian Shooshtari, M. and Majnooni-Heris, A., 2015. Measurements of standard maize evapotranspiration using water balance method and Variable Root Depth in an Arid and Semi-Arid Region. *Water and Soil Science*, 25(1), pp.169-181.(In Persian).
- 36- Zeinoddini, S., Anvari, S. and Zahmatkesh, Z., 2019. Application of simulation-optimization approaches to assess the effect of climate and management scenarios on a water resource system. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), pp.295-310. (In Persian).

EXTENDED ABSTRACT

Investigation the Energy Dissipation on Gabion Stepped Weirs and Downstream Hydraulic Jump Characteristics

F. Mahjoubi¹ and S. M. Kashefipour^{2*}

1- M.Sc. in Hydraulic Structures of Water Structures, Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2*- Corresponding Author, Professor of Department of Water Structures Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (kashefipour@scu.ac.ir).

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 June 2021

Revised: 15 May 2022

Accepted: 20 May 2022

TO CITE THIS ARTICLE :

Mahjoubi, A., Kashefipour, S. M. (2023). 'Investigation the Energy Dissipation on Gabion Stepped Weirs and Downstream Hydraulic Jump Characteristics', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 65-76. doi: 10.22055/jise.2019.14393.

Keywords:

Energy dissipation, number of steps, the mixture of through and over flow.

Introduction

Net-Stone water structures, in particular gabion stepped weirs, have become more prevalent due to their significant impact on reducing energy dissipation, proper stability, cost-effectiveness, ease of construction, and increasing the level of oxygen in the mixed water. Furthermore, due to air entrainment, the flow rate passing through the structure can prevent a considerable amount of cavitation, which is one of the problems in the design of hydraulic structures such as weirs (Shamsayi and Paknahal, 2005). One of the important characteristics of this structure is the internal flow through the permeable body of the weir, which creates complexities in the flow behavior. The energy dissipation of gabion stepped weirs is a function of the upstream and downstream slope of the weir, the number of steps, porosity, and the Froude number. Changing the porosity leads to a change in the ratio of the internal flow to the overtopping flow, and consequently, the amount of energy dissipation changes.

Wüthrich and Chanson (2014) and Pallavi and Harshith (2018) conducted experiments to investigate the flow characteristics of the overtopping and internal flow of gabion weirs and compared the hydraulic characteristics of this type of weir with a solid weir. The results showed that the energy dissipation in the gabion weir is higher than the solid weir due to the division of the overtopping and internal flow.

The aim of this study is to investigate the effect of the number of steps in gabion stepped weirs with a fixed slope on the energy dissipation of the structure. It should be noted that in the case of a small number of steps, the flow conditions on the steps are often in a cascading form, which leads to more energy loss. Certainly, increasing the energy loss of the structure is affected by the downstream hydraulic jump conditions and the length of the calm pool.

Research Methodology

The experiments were carried out in the Hydraulic Laboratory of Faculty of Water and Environmental Engineering at Shahid Chamran University of Ahvaz. The flume has a rectangular cross-section and is made of Plexiglas. Its length is 750 cm, its width is 56 cm, and its height is 60 cm. A lower gate is installed at the end of the flume to control the downstream depth and the location of the hydraulic jump.

In this study, two models of stepped weir and gabion stepped weir were constructed to investigate the relative energy loss and their hydraulic characteristics. In addition, a smooth glass model with a fixed slope of 1:2 (horizontal : vertical) was used as a control model. The width of the physical models of the stepped weir with gabion was 56 cm, and they had four, six, and eight steps with heights of 15, 10, and 7.5 cm, respectively, and a slope of 1:2 (horizontal : vertical). The porosity of the gabion baskets was also 40%.

The upstream energy of the weir was calculated as follows:

$$E_0 = (H + y) + \frac{q^2}{2g(H+y)^2} \quad (1)$$

Considering that the second term in Equation (1) can be neglected due to the low flow velocity in the reservoir, the equation can be written as follows:

$$E_0 = H + y = H + \frac{3}{2}y_c \quad (2)$$

In the above equation, H is the total height of the weir, y is the depth of water relative to the crest of the weir at the upstream of the weir, and y_c is the critical depth of the flow. For each series of experiments, after installing the model and establishing steady conditions, different flow rates were passed over each model, and various parameters such as upstream and downstream depths of the weir and hydraulic jump characteristics were measured. The downstream flow was controlled using a lower gate to ensure a hydraulic jump at the weir's base. The dual upstream depth of the hydraulic jump y_1 could not be directly measured due to the high turbulence in the weir crest and the highly turbulent and air-entraining flow conditions. Therefore, y_1 was calculated using the Blanger equation (3) and the downstream depth (y_2) (Chow, 1959).

$$y_1 = \frac{y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right) \quad (3)$$

Relative energy dissipation is defined as follows:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (4)$$

Table 1- The range of parameter variations in this study

Range of variation	Q (L/s)	$\frac{y_2}{y_1}$	$\frac{L_j}{y_2}$	$\frac{L_r}{y_2}$	N
min	30	2.68	3.73	1.22	4
max	50	5.26	5.85	.90	8

Results

In this study, experiments were conducted on models for five flow rates of 30, 35, 40, 45, and 50 liters per second. The energy loss of the weirs was calculated by measuring the upstream depth of the weir, the downstream depth of the hydraulic jump at the downstream of the weir, and the calculation of the weir floor depth using Equation (3). The relative energy loss was calculated using Equation (4). According to Table (2), it can be observed that the amount of energy loss in gabion stepped weir is higher than that of the stepped weir, due to the presence of gabion baskets.

Table 2- The results of the calculations of the relative energy dissipation ($\Delta E/E_0$) for different models in terms of percentage

Number of steps	Models of weir	Q(L/s)				
		30	35	40	45	50
4	stepped	70	65.6	62.6	59.5	54.8
	gabion stepped	80.6	77.4	75.1	71.1	67.4
6	stepped	67	63.8	60.3	56.8	53.6
	gabion stepped	80	75	69.8	66.3	61.1
8	stepped	67	63.8	60.3	57.3	54.2
	gabion stepped	76.7	73.1	70.9	68.7	65.4
Chute		11.6	15.5	19.5	21.7	27.3

Conclusion

In the three steps with four, six, and eight steps, the energy dissipation of gabion stepped weirs is higher than that of the regular stepped weirs and much higher than the chute model. With an increase in flow rate, the relative amount of energy dissipation decreases. A decrease in the number of steps results in an increase in energy loss, provided that a cascading flow is formed. Generally, the maximum energy loss occurs in the four-step weir, and the minimum energy loss occurs in the eight-step weir at high flow rates. As the flow rate increases, the effect of the underlayer on the velocity profile decreases, resulting in less energy loss, and the amount of energy loss approaches each other in the six and eight-step weirs. For a particular model, as the flow rate increases, the relative percentage decrease in the hydraulic jump length decreases. The relative percentage decrease in the hydraulic jump length and the length of the roller is highest in the four-step weir.

Acknowledgement

This article has been prepared from the results of the MSc. thesis of the first author and with the support of the university's research unit through the second author's Grant (95/3/02/31400) by which the authors thank and appreciate the university's vice chancellor for research. We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support. In addition, the spiritual support of the scientific center "Improvement and maintenance of irrigation and drainage networks" is thanked and appreciated.

Reference

- 1- Chow VT, 1959. Open Channel Hydraulics. Mc Grow Hill Book Co, New York, NY.
- 2- Pallavi, M., Harshith, L., 2018. Open channel flow characteristics using gabion weir. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 12 | Dec 2018: 928-933.
- 3- Shamsaei, A., & Paknahad, F. (2005). Hydraulic jumps and stepped spillways (1st ed.). Tehran, Iran: Sharif University of Technology Press. (Original work published in Persian, 452 pages).
- 4- Wuthrich, D. and Chanson, H., 2014. Hydraulics, Air entrainment, and energy dissipation on a gabion stepped , Journal of Hydraulic Engineering, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000919, 04014046.



بررسی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست

افشین محجوبی^۱ و سید محمود کاشفی پور^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- نویسنده مسئول، استاد دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز@Kashefipour@scu.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۲۵

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰

چکیده

در سال‌های اخیر سازه‌های توری سنگی به دلیل سهولت اجرا، دسترسی آسان، دوام و اقتصادی بودن به صورت گسترده برای استهلاک انرژی اضافی سیستم به خصوص در آبراهه‌های فرسایش‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سرریزهای پلکانی توری-سنگی (گابیونی)، بیشتر در مسیر رودخانه‌ها به منظور حفاظت از بستر رودخانه‌ها و آبراهه‌های فرسایش‌پذیر به کار گرفته شده‌اند. این سرریزها به لحاظ کارایی مناسب در استهلاک انرژی جریان، با عبور دو جریان روگذر و درونگذر بیشتر مورد توجه طراحان قرار گرفته‌اند. بررسی اثر تعداد پلکان سرریزهای پلکانی گابیونی در تغییر شرایط جریان و در نتیجه بر استهلاک انرژی و بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در نتیجه این سرریزها از اهداف این پژوهش می‌باشد. برای این منظور شش مدل فیزیکی با سه تعداد پلکان چهار، شش و هشت و شیب ثابت ۱:۲ (افقی: عمودی) ساخته شد. نتایج نشان می‌دهد که سرریز پلکانی همراه با سبدهای گابیون استهلاک انرژی بیشتری نسبت به نوع بدون گابیون آن دارد که این افزایش تا ۱۳ درصد نسبت به سرریز پلکانی و تا ۷۲/۱ درصد نسبت به شوت ساده می‌باشد. همچنین با کاهش تعداد پلکان مشروط به تشکیل جریان ریزشی افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد و به طور کلی سرریز چهار پله حداکثر میزان افت انرژی و حداکثر درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی (۵۵ درصد) را در محدوده آزمایش‌های این تحقیق داراست.

کلید واژه‌ها: افت انرژی، تعداد پلکان، جریان روگذر و درون گذر.

مقدمه

کنترل انرژی در جریان‌های با سرعت بالا یکی از چالش‌های طراحی سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد از این جهت کاهش انرژی جنبشی روی سرریزها قبل از آن که جریان به پایین دست منتقل شود، یکی از راه‌هایی است که با استفاده آن می‌توان از وارد آمدن خسارات به پایین دست جلوگیری کرد. یکی از راه‌های استهلاک انرژی، استفاده از سرریزهای پلکانی بوده که با استهلاک مناسب انرژی جریان باعث کوچک شدن ابعاد حوضچه آرامش واقع در پایین دست سرریز می‌گردد (Chanson, 2004 و Heydari و Orojlo et al, 2010).

سازه‌های توری سنگی و مهم‌ترین آن‌ها سرریزهای پلکانی گابیونی به دلیل تأثیر قابل ملاحظه پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، پایداری مناسب، اقتصادی بودن، سهولت اجرا و بالا بردن سطح اکسیژن مخلوط در آب رواج بیشتری یافته و توجه روزافزونی به آن می‌شود. همچنین به علت هوادهی، جریان عبوری می‌تواند به مقدار زیادی از پدیده خلاء زایی که یکی از مشکلات طراحی سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزهاست، جلوگیری کند (Chanson, 2004). علاوه بر کاربرد در سرریزها و سد‌ها می‌توان از سازه‌های گابیونی در عملیات آبخیزداری برای کنترل فرسایش در آبراهه‌ها و یا ساحل‌سازی کناره‌های رودخانه در

نزدیکی آبیگر یا قوس‌ها استفاده نمود. این نوع سرریزها از انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به نوع صلب آن برخوردار بوده و در مقابل بارهای ناشی از فشار آب مقاوم و پایدار هستند (Salmasi et al., 2011).

از خصوصیات مهم این سازه، جریان درون گذر از داخل جسم متخلخل سرریز است که پیچیدگی‌هایی را در رفتار جریان ایجاد می‌کند. با کاربرد مدل‌های فیزیکی می‌توان برآورد مناسبی از افت انرژی و رفتار سازه در مقابل تغییر پارامترهای مؤثر بر آن داشت. افت انرژی سرریزهای پلکانی گابیونی تابعی از شیب بالادست و پایین دست سرریز، تعداد پله‌ها، تخلخل و عدد آشبار است. تغییر تخلخل باعث تغییر نسبت جریان درون گذر به روگذر شده و به تبع آن میزان افت انرژی تغییر می‌یابد.

اکثر تحقیقات انجام یافته تاکنون مربوط به سرریزهای پلکانی سدهای بزرگ بتنی و صلب بوده است و در مقایسه با آن، مطالعه‌ها روی سرریزهای پلکانی گابیونی کمتر بوده است. (Chamani, 1992; Peyras et al., 1994; Chanson, 1994; Gonzalez et al., 2008; and Rajartnam, 1999).

Christodoulou (1993) نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی خود و همچنین Sorensen (1985) در رابطه با سرریزهای پلکانی را به این صورت ارائه نمود که تأثیر تعداد پلکان‌ها روی

غیرریزشی یا رویه‌ای اتفاق می‌افتد، استهلاك انرژی در سرریز گابیونی بیشتر است. همچنین استهلاك انرژی در سرریز دارای پله‌های نفوذناپذیر در دی‌های کم، بیشتر از سایرین است. افزایش تخلخل از ۳۸ تا ۴۲ درصد و نیز کاهش شیب از ۱:۱ به ۱:۲ موجب افزایش استهلاك انرژی می‌گردد.

Wüthrich و Chanson (2014) خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای پلکانی را با مقایسه دو سرریز پلکانی نفوذناپذیر و سرریز پلکانی همراه با گابیون بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که فعل و انفعالات میان جریان درونگذر (Seepage flow) و روگذر (Over flow) تابعی از دی، شکل گابیون و رژیم جریان می‌باشد و نیز درصد افت انرژی در سرریز پلکانی گابیونی در جریان رویه‌ای در مقایسه با سرریز پلکانی نفوذناپذیر کمتر است.

با توجه به مطالب فوق هدف تحقیق حاضر بررسی تعداد پلکان سرریزهای پلکانی گابیونی در شیب ثابت بر میزان استهلاك انرژی سازه می‌باشد. نکته قابل توجه این است که به نظر می‌رسد در تعداد کم پله شرایط جریان روی پله غالباً به صورت ریزشی بوده که باعث افت انرژی بیشتری می‌گردد. قطعاً افزایش افت انرژی سازه در شرایط و خصوصیات پرش هیدرولیکی پایین دست و طول حوضچه آرامش اثر گذار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در استهلاك انرژی موثر می‌باشند اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه‌ی کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای موثر در این آزمایش‌ها در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$F(\Delta E, E_0, V, H, h, l, N, y_1, y_2, y_c, L_j, L_r, \mu, \rho, g, \sigma) \quad (1)$$

در رابطه بالا ΔE افت انرژی سازه سرریز و E_0 انرژی اولیه بالادست سرریز و V سرعت در هر نقطه می‌باشد. y_c عمق بحرانی جریان، y_1 و y_2 به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی، L_j طول پرش، L_r طول غلتایی، یک طول سبدهای گابیون که ۱/۵ برابر طول پلکان بود و h ارتفاع پلکان گابیونی که دارای سه مقدار ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب برای تعداد پلکان هشت، شش و چهار می‌باشد. همچنین N تعداد پلکان و H ارتفاع کلی سرریز است. μ ویسکوزیته دینامیکی آب، ρ جرم حجمی آب، g شتاب ثقل و σ کشش سطحی می‌باشد. با آنالیز ابعادی و با استفاده از روش π باکینگهام رابطه کلی زیر به دست می‌آید:

استهلاك انرژی مشهود است و به ازای یک مقدار y_c/h (ارتفاع پله‌ها)، مقدار افت انرژی با افزایش تعداد پلکان افزایش می‌یابد و تأثیر تعداد پلکان در دی‌های بالا بیشتر می‌گردد. همچنین در آزمایش‌های آن‌ها با تبدیل جریان ریزشی (Nappe flow) به جریان غیرریزشی یا رویه‌ای (Skimming flow) افت انرژی کاهش می‌یابد.

Felder و Chanson (2011) آزمایش‌هایی روی مدل فیزیکی سرریز پله‌ای به ارتفاع یک متر و شیب ۶/۲۶ درجه انجام دادند. پنج حالت مختلف برای پله‌ها در نظر گرفته شد و میزان انرژی باقی‌مانده در پایین دست سرریز اندازه‌گیری گردید. گرچه نتایج نشان می‌داد که تعداد پله اثر زیادی در انرژی باقی‌مانده پایین دست سرریز ندارد، لیکن سرریز دارای ۱۰ پله در حالی که هر کدام از پله‌ها ۱۰ سانتی‌متر ارتفاع داشته باشد، انرژی باقی‌مانده کمتری در پایین دست سرریز دارد و همین امر نشان دهنده استهلاك انرژی بیشتری در این سرریز است.

Felder و Chanson (2011) و Chafi et al (2010) به مطالعه جریان و افت انرژی در سرریزهای پلکانی در دو جریان ریزشی و رویه‌ای پرداختند. در این پژوهش سرریزی با تعداد شش پله و با شیب ۳۲ درجه ساخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که جریان ریزشی افت انرژی بیشتری نسبت به رژیم رویه‌ای دارد و افت انرژی در این جریان به تعداد پلکان و همچنین دی جریان بستگی دارد.

Azizi et al., (2008) با انجام آزمایش‌هایی روی سرریز پلکانی گابیونی با تعداد سه پله و در چهار تخلخل مختلف نشان دادند که با کم شدن تخلخل سنگ‌دانه‌ها و به دنبال آن کاهش جریان عبوری از درون سنگ‌دانه‌ها، مقدار تلفات انرژی افزایش می‌یابد و رابطه افت انرژی با توجه به عوامل بدون بعد مؤثر بر آن را ارائه نمودند.

Chinnarasri et al., (2008) نیز خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای پلکانی گابیونی را بررسی و استهلاك انرژی آن را با سرریز پلکانی بدون گابیون مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت افت انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی در مقایسه با نوع بدون گابیون آن در تعداد پلکان ۲۰ و در شیب سرریز ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب هفت، ۱۰ و ۱۴ درصد بیشتر و در نتیجه سرعت در خروجی آن کمتر می‌باشد. همچنین در این تحقیق مشخص شده است که شکل و اندازه سنگدانه‌ها تأثیر بسیار کمی بر افت انرژی خواهند گذاشت.

Salmasi et al., (2011) به بررسی هیدرولیکی عبور جریان از روی پله‌ها و نیز محیط متخلخل درون سازه گابیونی و محاسبه افت انرژی پرداختند. در تحقیق مذکور نه مدل فیزیکی از سرریز گابیونی پله‌ای با سه تخلخل مختلف و دو شیب ۱:۱ و ۱:۲ (افقی-عمودی) ساخته شده و برای بررسی نفوذپذیری پله‌ها در افت انرژی، وجه افقی و عمودی پله‌ها توسط ورق آهنی نفوذناپذیر گردیده بود. نتایج نشان می‌داد که در دی‌های بالا که جریان

در رابطه (۴) V_{void} حجم خلل و فرج بر حسب سانتی‌متر مکعب و V_{total} حجم کل واحد گابیون می‌باشد.

اندازه دانه‌های سنگی به کمک الک بین قطرهای ۱۲/۷ تا ۱۶ میلی‌متر با $D_{50} = 14\text{mm}$ و با تخلخل ۴۰ درصد مشخص گردید. در شکل (۲) نحوه قرارگیری سبدهای گابیون بر سرریزهای پلکانی نشان داده شده است.

انرژی بالادست سرریز به صورت زیر محاسبه گردید:

$$E_0 = (H + y) + \frac{q^2}{2g(H + y)^2} \quad (5)$$

نظر به اینکه ترم دوم معادله (۵) به دلیل ناچیز بودن سرعت جریان در مخزن قابل صرف نظر کردن است لذا می‌توان این رابطه را به صورت زیر نوشت:

$$E_0 = H + y = H + \frac{3}{2}y_c \quad (6)$$

در رابطه فوق H برابر ارتفاع کل سرریز، y عمق آب نسبت به تاج سرریز در بالادست سرریز و y_c عمق بحرانی جریان می‌باشد (شکل ۳).

برای هر سری از آزمایش‌ها، پس از نصب مدل و برقراری شرایط ماندگار، دبی‌های مختلفی از روی هر مدل جاری شده و سپس پارامترهای مختلف از جمله عمق بالادست و پایین دست سرریز و مشخصات پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری می‌شد. به کمک دریچه پایین دست جریان به نحوی کنترل می‌شد که پرش هیدرولیکی در پای سرریز اتفاق بیفتد. عمق مزدوج بالادست پرش هیدرولیکی y_1 به دلیل آشفتگی زیاد در پنجه سرریز و شرایط جریان پر تلاطم و توأم با ورود هوا مستقیماً قابل اندازه‌گیری نبود، به این دلیل y_1 با استفاده از معادله بلانگر رابطه (۷) و عمق پایین دست (y_2) محاسبه شد (Chow, 1959).

$$y_1 = \frac{y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right) \quad (7)$$

مقدار استهلاک انرژی نسبی به صورت زیر تعریف شده است:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (8)$$

که پارامترهای آن قبلاً معرفی شده‌اند. در شکل (۴) چگونگی برخورد آب با پلکان و سبدهای گابیون و همچنین تشکیل پرش هیدرولیکی در پنجه سرریز در دبی یکسان نشان داده شده است.

$$F \left(\frac{\Delta E}{E_0}, Fr, Re, We, \frac{q^2}{gH^3}, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{y_2}{y_1}, N \right) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه $Re = \rho v R / \mu$ عدد رینولدز جریان و Fr عدد فرود می‌باشد. با توجه به این که عدد رینولدز در محدوده انجام این آزمایش‌ها بیشتر از ۲۰۰۰ می‌باشد بنابراین جریان در محدوده آشفته می‌باشد و می‌توان از عدد رینولدز صرف نظر کرد (Chow, 1959). قابل ذکر است که با توجه به این که در این آزمایش‌ها حداقل ارتفاع آب روی سرریز ۶/۲ سانتی‌متر می‌باشد، می‌توان از اثرات عدد وبر We نیز صرف نظر کرد. در نتیجه رابطه نهایی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{y_2}{y_1} = F \left(\frac{q^2}{gH^3}, N \right) \quad (3)$$

امکانات آزمایشگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. آزمایشگاه دارای یک مخزن اصلی آب زیرزمینی است که آب توسط پمپ از مخزن ذخیره به مخزن آرام کننده ابتدای فلوم وارد می‌گشت. در محل ورودی آب به کانال شیر فلکه برای کنترل میزان دبی ورودی قرار دارد. کانال با مقطع مستطیلی و از جنس پلکسی‌گلاس است. طول آن ۷۵۰ سانتی‌متر، عرض آن ۵۶ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۶۰ سانتی‌متر است. یک دریچه در انتهای کانال برای کنترل عمق پایین دست و محل تشکیل پرش هیدرولیکی نصب گردیده است (شکل ۱). آب جریان یافته در کانال به داخل یک مخزن در انتهای آن منتقل می‌گردد که با استفاده از سرریز مثلی نصب شده روی دیواره بتنی مخزن می‌توان دبی را اندازه گرفت. دو ریل موازی در بالای بدنه کانال برای حرکت شاخص مدرج (Point gauge) با دقت یک میلی‌متر برای اندازه‌گیری عمق آب نصب شده است. در این تحقیق دو مدل سرریز پلکانی و پلکانی گابیونی به منظور بررسی افت نسبی انرژی و بررسی مشخصات هیدرولیکی آن‌ها و همچنین شوت ساده‌ای به عنوان مدل شاهد با سطح صاف و از جنس شیشه با شیب ثابت ۱:۲ (افقی:عمودی) ساخته شده است. عرض مدل‌های فیزیکی ساخته شده از سرریز پلکانی همراه با گابیون ۵۶ سانتی‌متر، تعداد پله‌ها چهار، شش و هشت با ارتفاع‌های به ترتیب ۱۵، ۱۰ و ۷/۵ سانتی‌متر و شیب سرریز ۱:۲ (افقی:عمودی) بود. تخلخل سبدهای گابیون نیز برابر ۴۰ درصد می‌باشد. برای تعیین درصد تخلخل بدین صورت عمل شده که حجم سید گابیونی با توجه به ابعاد آن حاصل می‌شود.

میزان تخلخل از رابطه‌ی (۴) حاصل می‌شود:

$$e = \frac{V_{void}}{V_{total}} \quad (4)$$

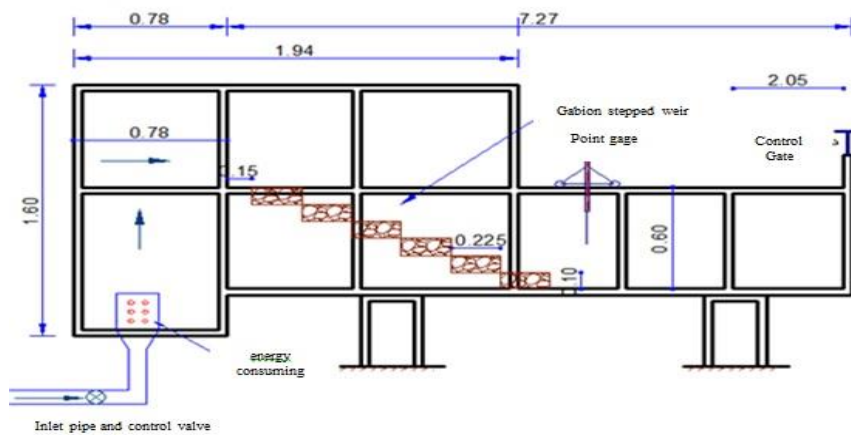


Fig. 1- The laboratory experimental section used in this study was a 56cm wide flume
 شکل ۱- مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه (عرض فلوم ۵۶ سانتی متر)



Fig. 2- The placement method of gabion baskets on the stepped spillway
 شکل ۲- نحوه قرارگیری سبدهای گابیون بر سرریز پلکانی

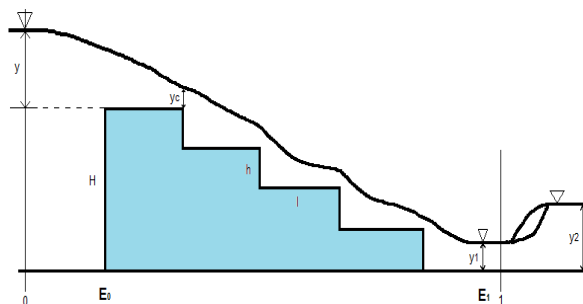


Fig. 3- The geometric and hydraulic dimensions of the physical model
 شکل ۳- ابعاد هندسی و هیدرولیکی مدل فیزیکی

جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترها در این تحقیق

Table 1- The range of parameter variations in this study

Range of changes	Q (L/s)	$\frac{y_2}{y_1}$	$\frac{L_j}{y_2}$	$\frac{L_r}{y_2}$	N
min	30	2.68	3.73	1.22	4
max	50	5.26	5.85	.90	8



(B)

(A)

Fig. 4- Comparison of stepped spillway (A) and gabion stepped spillway (B) with 4 steps and a discharge of 50 liters per second under the nappe flow condition

شکل ۴- مقایسه سرریز پلکانی (الف) و سرریز پلکانی گابیونی (ب) در تعداد پلکان ۴ و دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه در جریان ریزشی

جدول ۲- نتایج محاسبات مقدار استهلاک انرژی نسبی $(\frac{\Delta E}{E_0})$ مدل‌های مختلف بر حسب درصد

Table 2- The results of the calculations of the relative energy dissipation $(\Delta E/E_0)$ for different models in terms of percentage

Number of steps	Weir	Discharge (L/s)				
		30	35	40	45	50
4	Stepped	70	65.6	62.6	59.5	54.8
	Gabion Stepped	80.6	77.4	75.1	71.1	67.4
6	Stepped	67	63.8	60.3	56.8	53.6
	Gabion Stepped	80	75	69.8	66.3	61.1
8	Stepped	67	63.8	60.3	57.3	54.2
	Gabion Stepped	76.7	73.1	70.9	68.7	65.4
	Chute	11.6	15.5	19.5	21.7	27.3

جدول ۳- طبقه نام گذاری مدل‌های ساخته شده در این تحقیق

Table 3- The way of naming the models made in this research

Description	Models	Description	Models
Gabion stepped weir with slope 1:2 and 4 steps	$S_2N_1 - G$	Stepped weir with slope 1:2 and 4 steps	S_2N_1
Gabion stepped weir with slope 1:2 and 6 steps	$S_2N_2 - G$	Stepped weir with slope 1:2 and 6 steps	S_2N_2
Gabion stepped weir with slope 1:2 and 8 steps	$S_2N_3 - G$	Stepped weir with slope 1:2 and 8 steps	S_2N_3

پلکانی گابیونی و همچنین مدل شاهد را برای تعداد پلکان و دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که میزان این افت در سرریز پلکانی گابیونی بیشتر از سرریز پلکانی است که به دلیل قرار گرفتن سبدهای گابیون می‌باشد. همچنین به علت کم بودن تعداد پلکان در سرریز چهار پله و بنابراین ارتفاع زیاد پلکان، جریان در این سرریز غالباً ریزشی بوده که باعث می‌شود افت در این سرریز بیشتر از دو سرریز دیگر یعنی شش و هشت پله باشد. در جدول (۳) طبقه نام‌گذاری مدل‌ها در این تحقیق توضیح داده شده است.

نتایج و بحث

الف) استهلاک انرژی سرریز

در این تحقیق آزمایش‌ها برای پنج دبی ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ لیتر بر ثانیه بر روی مدل‌های ساخته شده انجام گرفت و با اندازه‌گیری عمق بالادست سرریز (از طریق نوار مدرج با فاصله مناسب از سرریز) و عمق پایین‌دست پرش در پایین‌دست سرریز و محاسبه عمق پای سرریز با استفاده از رابطه (۷)، میزان افت انرژی سرریز با کمک رابطه (۸) محاسبه گردید. جدول (۲) خلاصه نتایج افت نسبی انرژی برای دو حالت سرریز پلکانی و

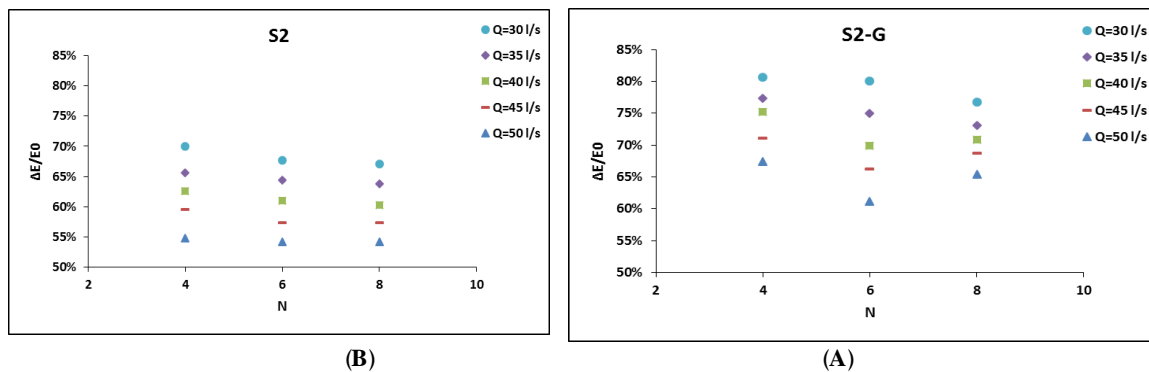


Fig. 5- The relative energy dissipation versus the number of steps in the stepped (A) and the gabion stepped spillway (B)

شکل ۵- استهلاک انرژی نسبی در مقابل تعداد پلکان در سرریز پلکانی (A) و پلکانی گابیونی (ب)

می‌شود که یک پرش ناقص و یا حتی کامل روی هر پله تشکیل شود، اما در سرریز شش و هشت پله به دلیل اینکه تعداد پلکان زیاد است و جریان در دبی های بالاتر زودتر رویه ای می شود، پله حالت خود را تا حدودی از دست می دهد.

در شکل (۷) به بررسی نمودار نسبت طول غلتابی به عمق ثانویه پرش در مقابل عدد آبشار پرداخته شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، با قرار دادن سبدهای گابیون روی سرریز و در نتیجه تأثیر موانع و جریان درونگذر بر شرایط جریان، طول غلتابی کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل، سرریزهای چهار پله به دلیل تشکیل جریان ریزشی خصوصاً در دبی‌های کمتر، طول غلتابی کمتری دارند، اما این نسبت در سرریزهای شش و هشت پله تا حدودی به هم نزدیک است.

همچنین مقادیر نسبی اعماق مزدوج در مقابل عدد آبشار برای دو سرریز پلکانی و پلکانی گابیونی در تعداد پلکان متفاوت در شکل (۸) ترسیم شده است. این شکل بیان گر آن است که عمق مزدوج نسبی در سرریزهای پلکانی و پلکانی گابیونی با افزایش دبی، افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که نسبت عمق مزدوج نسبی با کاهش تعداد پلکان سازه گابیونی و سرریز پلکانی، کاهش می یابد. از مقایسه بین سرریز پلکانی و گابیونی نیز مشخص است که عمق پایاب در پایین دست سرریز پلکانی گابیونی کمتر از سرریز پلکانی می باشد. با افزایش تعداد پلکان عمق جریان روی سرریز زیادتر شده، عمق اولیه جریان کاهش و عمق ثانویه پرش افزایش می یابد.

در شکل (۵) اثر تعداد پلکان بر افت انرژی سرریز پلکانی و پلکانی گابیونی در شیب ثابت بررسی شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد پلکان و کاهش ارتفاع پله، افت نسبی انرژی کاهش می یابد. به تعبیر دیگر افزایش دبی، سبب ایجاد جریان رویه‌ای شده که موجب کاهش اثر زبری پله‌ها در استهلاک انرژی جریان می‌شود. و یا با افزایش تعداد پله‌ها (کاهش ارتفاع پله‌ها) و تبدیل جریان ریزشی به رویه‌ای، تلاطم جریان و تأثیر پله در مقاومت در برابر جریان کمتر می شود و لذا استهلاک انرژی کاهش می یابد.

(ب) پرش هیدرولیکی

برای بررسی و مقایسه طول پرش هیدرولیکی در حالت حضور سبدهای گابیون با حالت سرریز پلکانی بدون گابیون نسبت بی بعد $\frac{L_j}{y_2}$ در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌گردد این نسبت در سرریزهای پلکانی گابیونی کمتر است، زیرا با قرار دادن سبدهای گابیون روی سرریز، جریان به دو بخش روگذر و درونگذر تبدیل شده و تلاطم جریان با برخورد آب به این سبدها افزایش می‌یابد. با افزایش تلاطم، عمق اولیه پرش افزایش یافته و بنابراین عدد فرود کاهش می‌یابد که موجب افزایش استهلاک انرژی جریان و کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌گردد. شرایط کلی نشان می‌دهد که تقریباً سرریز پلکانی و پلکانی گابیونی شش و هشت پله تفاوت چندانی در میزان $\frac{L_j}{y_2}$ ندارند اما هر دوی آن‌ها با سرریز چهار پله کاملاً متفاوت هستند. چرا که در سرریز چهار پله طول پله زیاد شده و این فرصت به جریان داده

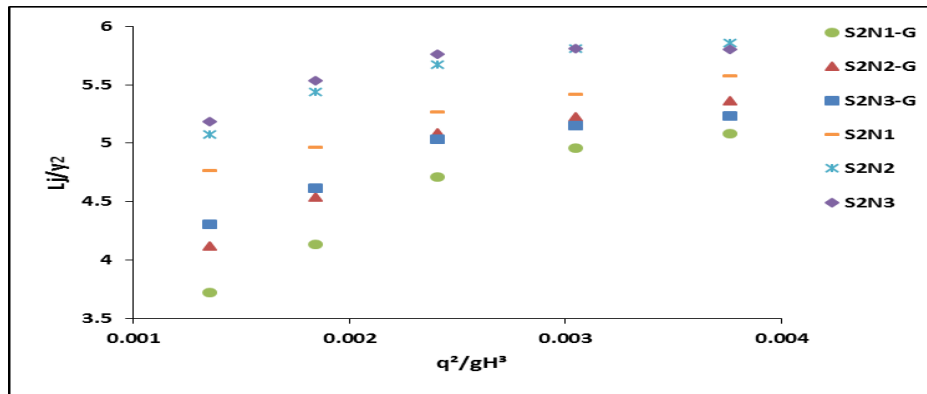


Fig. 6- The ratio of $\frac{L_j}{y_2}$ to $\frac{q^2}{gH^3}$ for different numbers of steps

شکل ۶- نسبت $\frac{L_j}{y_2}$ در برابر $\frac{q^2}{gH^3}$ برای تعداد پلکان مختلف

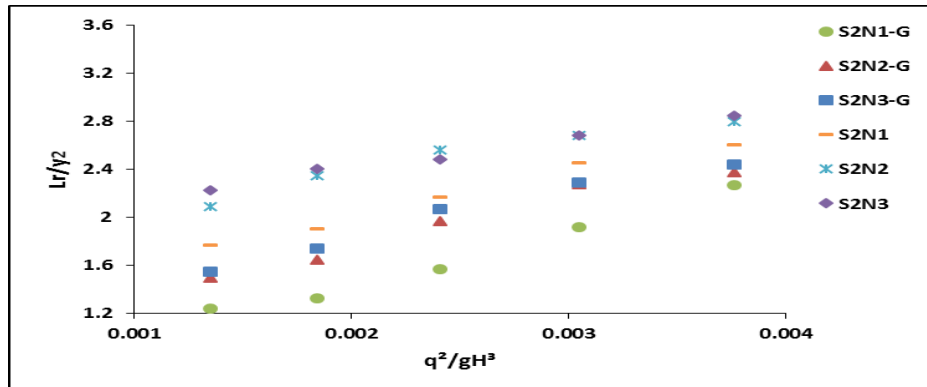


Fig. 7- The ratio of $\frac{L_r}{y_2}$ to $\frac{q^2}{gH^3}$ for different numbers of steps

شکل ۷- نسبت $\frac{L_r}{y_2}$ در برابر $\frac{q^2}{gH^3}$ برای تعداد پلکان مختلف

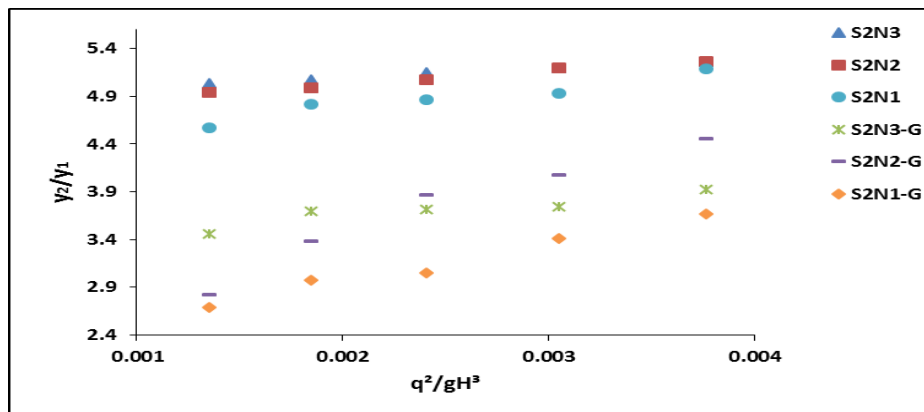


Fig. 8- The ratio of $\frac{y_2}{y_1}$ to $\frac{q^2}{gH^3}$ for different numbers of steps

شکل ۸- نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر $\frac{q^2}{gH^3}$ برای تعداد پلکان مختلف

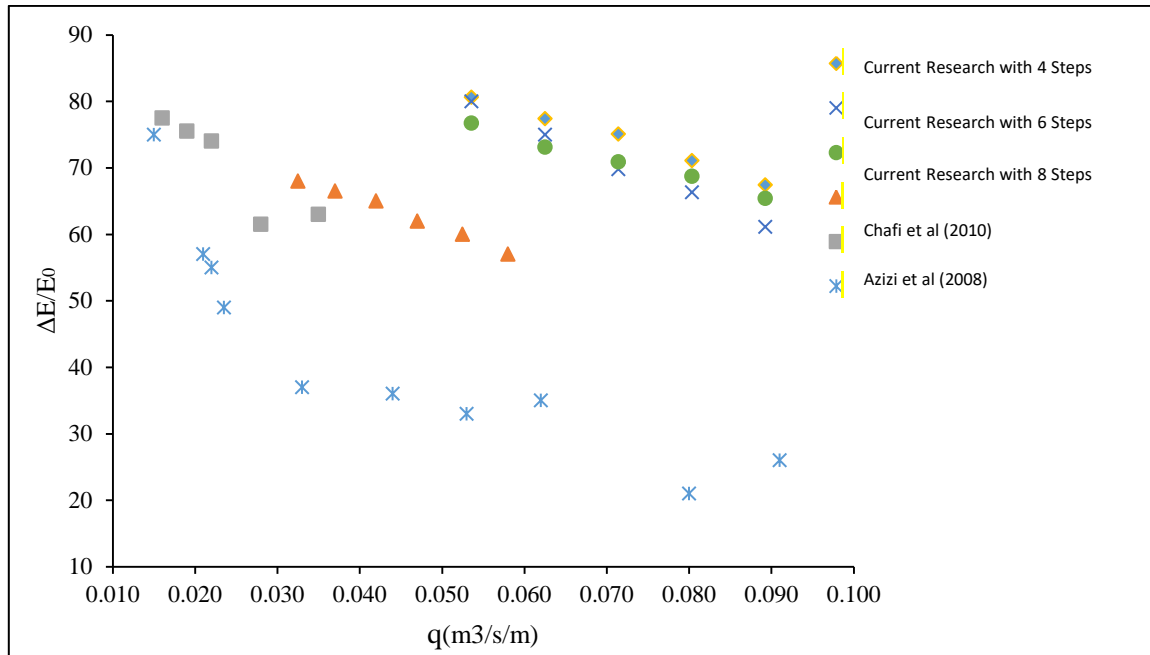


Fig. 9- Comparison of the relative energy dissipation in this study with other researchers' studies

شکل ۹- مقایسه افت انرژی نسبی این تحقیق با تحقیقات دیگران

بیشتر از مدل شاهد است و با افزایش دبی مقدار نسبی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی می‌توان گفت بیشترین میزان استهلاک انرژی سرریزهای پلکانی گابیونی در این مدل‌ها ۸۰/۶ درصد می‌باشد. همچنین در مدل‌های با بسته‌های گابیون میزان استهلاک انرژی از ۷/۵ تا ۱۳ درصد نسبت به سرریز پلکانی و از ۲۷/۵ تا ۷۲/۱ درصد نسبت به شوت ساده افزایش می‌یابد.

کاهش تعداد پلکان به شرط تشکیل جریان ریزشی باعث افزایش افت انرژی می‌گردد و این مقدار در سرریز پلکانی گابیونی چهار پله محسوس‌تر است. و به‌طور کلی مقدار افت انرژی در سرریز چهار پله بیشترین مقدار و در سرریز هشت پله و در دبی‌های بالا کمترین مقدار می‌باشد. با افزایش دبی جریان، تاثیر زیرلایه ورقه‌ای بر پروفیل سرعت کمتر شده و در نتیجه میزان افت انرژی کمتر بوده و همچنین مقدار آن در سرریزهای شش و هشت پله به هم نزدیک می‌شود.

برای یک مدل خاص با افزایش دبی درصد کاهش نسبی طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. مقدار کاهش نسبی طول پرش و نیز طول غلتایی در تعداد پلکان چهار بیشترین مقدار است. همچنین مقدار ماکزیمم درصد کاهش طول پرش در تعداد پلکان چهار و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه (دبی حداقل) تقریباً ۵۵ درصد، و مقدار مینیمم آن در تعداد پلکان شش و در دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه (دبی حداکثر) حدوداً ۳۱ درصد اتفاق می‌افتد.

مقایسه نتایج این تحقیق با دیگر روش‌های استهلاک انرژی نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌تواند روش کارآمد برای استهلاک انرژی تلقی گردد.

در شکل (۹) تغییرات استهلاک انرژی در برابر دبی در واحد عرض مربوطه به نتایج آزمایش‌های Chafi et al (2010)؛ Salmasi et al., (2011) و Azizi et al (2008) به همراه نتایج پژوهش حاضر برای سرریزهای پلکانی گابیونی با تعداد پلکان چهار، شش و هشت برای مقایسه ارائه شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌های Azizi et al (2008) در دبی‌های کمتری انجام شده‌اند در نتیجه اثر پلکان بر مقاومت جریان بیشتر بوده و افت انرژی نسبی بیشتر است. همچنین در مدل سرریز پلکانی گابیونی Salmasi et al (2011) با تشکیل جریان غیرریزشی تاثیر پلکان بر مقاومت جریان کم شده و افت انرژی کاهش یافته است. با علم به اینکه این آزمایش‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دامنه‌های مختلف پارامترها انجام شده‌اند، با توجه به روند این شکل می‌توان گفت که استفاده از سرریز پلکانی همراه با سبدهای گابیون می‌تواند روشی کارآمد برای استهلاک انرژی، در مقایسه با دیگر روش‌های متداول استهلاک انرژی به حساب آید.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که ذکر گردید هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر تعداد پلکان سرریز پلکانی گابیونی روی تغییر شرایط جریان و مشخصات هیدرولیکی می‌باشد که برای دستیابی به این هدف، دو مدل سرریز پلکانی گابیونی سرریز پلکانی و یک مدل شوت ساده به‌عنوان شاهد، برای مقایسه ساخته شد.

در سه تعداد پلکان چهار، شش و هشت میزان استهلاک انرژی سرریزهای پلکانی گابیونی بیشتر از سرریز پلکانی و بسیار

تشکر و قدردانی

معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌کند ضمناً از حمایت معنوی قطب علمی "بهبودی و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی" تشکر و قدردانی می‌گردد.

این مقاله از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول و با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده دوم به شماره ۹۵/۳/۰۲/۳۱۴۰۰ تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از

References

- 1- Aziz, A., Meftah Halaghi, M., Dehghani, A.A. and Suzuki, K., 2008. Effect of Material Porosity on Energy Dissipation in Gabion Stepped Weirs. In *ICHE 2008. Proceedings of the 8th International Conference on Hydro-Science and Engineering, September 9-12, 2008, Nagoya, Japan.*
- 2- Chafi, C., Hazzab, A. and Seddini, A., 2010. Study of flow and energy dissipation in stepped spillways. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 4(1), pp.1-11.
- 3- Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), pp.361-368.
- 4- Chanson, H., 1994. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, 32(2), pp.213-218.
- 5- Chanson, H. 2004. *Hydraulic Jumps and Noncircular Spillways*. Oxford, UK: Elsevier.
- 6- Chinnarasri, C., Donjadee, S. and Israngkura, U., 2008. Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(8), pp.1147-1152.
- 7- Chow VT, 1959. *Open Channel Hydraulics*. Mc Grow Hill Book Co, New York, NY.
- 8- Christodoulou, G.C., 1993. Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(5), pp.644-650.
- 9- Felder, S. and Chanson, H., 2011. Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), pp.1543-1548.
- 10-Gonzalez, C.A., Takahashi, M. and Chanson, H., 2008. An experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, 46(sup1), pp.24-35.
- 11-Heydari Orojlo, S., Mousavi Jahromi, S. H., Adib, A. 2010. 'Influence of the steeped spillway slope on the number of optimal steps', *Irrigation Sciences and Engineering*, 33(2), pp. 127-140. doi: 10.22055/jise.2010.13484. (in Persian).
- 12-Peyras, L.A., Royet, P. and Degoutte, G., 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), pp.707-717.
- 13-Salmasi, F., Farsadizade, D. and Mohit, H., 2011. Experimental evaluation of energy dissipation over gabion stepped spillway. *Water and Soil Science*, 21(4), pp.152-164. (in Persian).
- 14-Sorensen, R.M., 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), pp.1461-1472.
- 15-Wüthrich, D. and Chanson, H., 2014. Hydraulics, air entrainment, and energy dissipation on a Gabion stepped weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(9), p.04014046.

EXTENDED ABSTRACT

Optimal Redistribution of Water among Agricultural Sector Operators Using a Fuzzy Multi-objective Optimization Model

Sh. Kakavand¹, H. Mazandaranzadeh^{2*} and H. Etedali Ramezani³

1- M.Sc. in Water Resource Management, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2*- Corresponding Author, Associate Professor, Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran (mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir)

3- Associate Professor, Water Science and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 8 May 2021

Revised: 11 September 2021

Accepted: 14 September 2021

Keywords:

Optimal water distribution, Fairness, genetic algorithm, linguistic fuzzy variable.

TO CITE THIS ARTICLE:

Kakavand, S., Mazandarani zadeh, H., Ramezani Etedali, H. (2023). 'Optimal Redistribution of Water among Agricultural Sector Operators Using a Fuzzy Multi-objective Optimization Model', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 77-93. doi: 10.22055/jise.2021.37122.1966.

Introduction

Limited water resources in many arid and semiarid regions of the world pose a serious threat to land reclamation and sustainable development. Therefore, it is necessary to review past policies and formulate new policies in this area. In Iran, with mostly arid and semiarid climatic conditions, water scarcity has become a great concern affecting not only the agricultural sector but also the industrial sector and even the drinking water supply in some parts of the country. In recent years, due to climate change, population growth and increasing water requirements, it is expected that the method of water distribution will change and the optimal redistribution of resources will be seriously considered (Mazandarani Zadeh and Hosseini, 2021; Misaghi et. al., 2020; Hosseiniasl et al., 2018).

A review of past research shows that although many studies have been conducted on how to redistribute water optimally among retailers, each has sought to provide and optimize water resources by defining a specific objective function. Since most objective functions do not show the ability to describe mathematics accurately, it is better to use linguistic descriptions to model them.

In this research, the objective function has been defined using fuzzy capabilities to describe peripheral phenomena. The irrigation network of Qazvin plain was equal to 255 million cubic meters per year in the past, but in recent years due to various reasons such as climate change and increased harvest for drinking water supply in Tehran, the allocated amount has decreased to about 120 million cubic meters per year. The network consists of 11 subnets, each of which acts as an operator. Due to the reduction of allocated water in the irrigation network of Qazvin plain and the lack of reform of the irrigation program to this plain, in this study, an attempt has been made to reallocate water to maximize utility, including increasing the total network revenue and observing justice using fuzzy inference system.

Materials and Methods

In the present study, in order to redistribute water optimally among the operators of Qazvin plain network in order to increase revenue and observe the distribution justice, the fuzzy multi-objective nonlinear optimization method has been used.

Study area

To transfer water from the Taleghan River through the Ziaran diversion dam to the Qazvin plain, this irrigation network covering about 58,000 hectares of land in this plain has been constructed. The network has a main channel with a length of 94 km, 12-degree channels with a total length of 214 km and a third-degree channel with a length of 232 km. The project site has a semi-arid climate with relatively hot summers and cold winters. The study area, approximately 20 km long, includes an area of the Qazvin plain that is covered by a modern irrigation network.

Yield function

To estimate the amount of crop produced based on the amount of water consumed, the water-production relationship has been used.

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left[1 - Ky_i \left(1 - \frac{AET_i}{PET_i} \right) \right] \quad (1)$$

where Y_a and Y_m are actual yield and crop potential in ton per hectare, respectively; AET_i and PET_i are real evapotranspiration and potential in growth period i in mm, respectively; and Ky_i shows crop susceptibility coefficient in growth period i .

Proposed optimization model

The following figure shows the conceptual representation of the proposed optimization model. As can be seen, after estimating the values of the variables by the GA algorithm, FIS is used to evaluate the suitability of the objective functions.

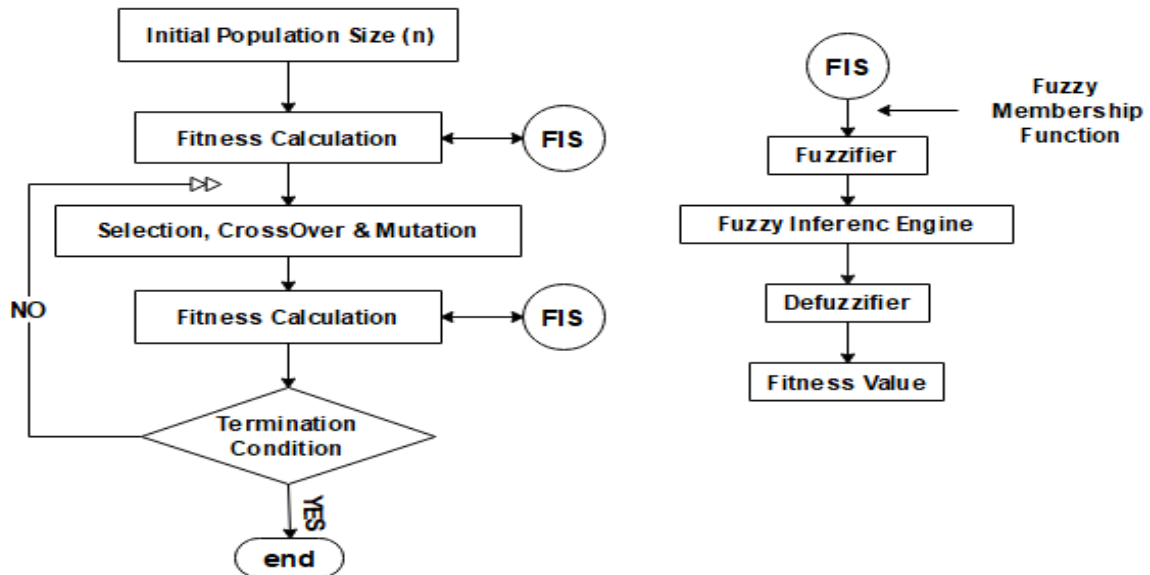


Fig. 1- Fuzzy Genetic algorithm flowchart

The purpose of this study is the optimal monthly redistribution of water with the aim of increasing utility, including the revenue of the entire network and observance of justice in water redistribution. The reason for choosing to increase the revenue of the entire network is to increase the efficiency of water distribution so that the amount of water distributed leads to the highest possible revenue. Besides, the reason for choosing the goal of ensuring justice in water redistribution is to prevent dissatisfaction and increase the participation of users in the implementation of the water redistribution model. This issue has 122 variables that limit the volume of water consumed per month and the volume of water consumed annually.

Results and discussion

Comparison of crop production under the current conditions and the proposed model according to Fig. 8, shows that the highest production growth occurred in the L1 channel and for forage corn. Considering that fodder corn has the highest yield according to the potential yield table, it should have the highest production in the channel with the largest area. The following figure compares the water allocated to each channel in both pre- and post-optimization situations. As can be seen, 9 channels show an increase in water allocation as compared to before. As can be seen, only two channels, L3 and L8, have reduced water levels.

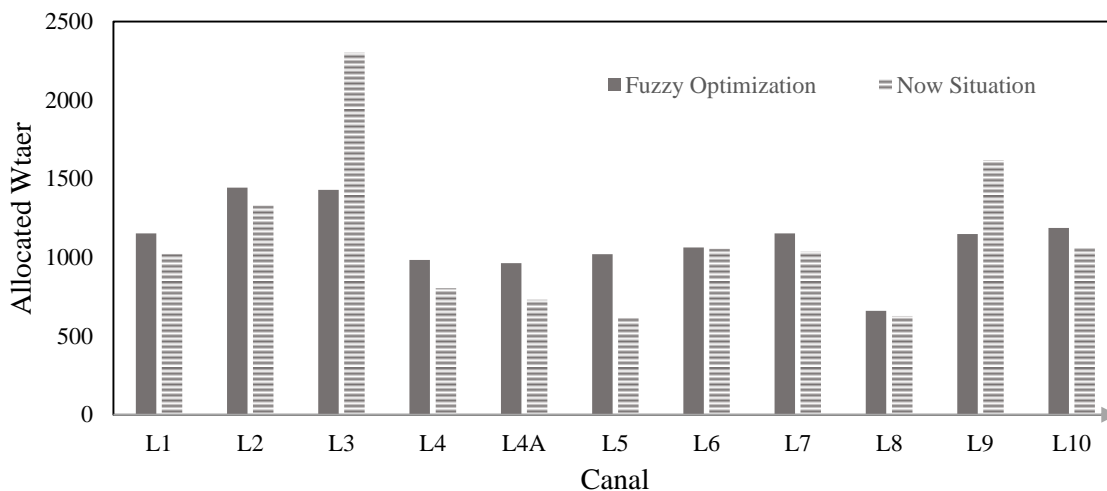


Fig. 2- Comparison of allocated water in current and fuzzy situations ($m^3 \times 10^4$)

The largest increase in the revenue is related to the L1 channel, which has increased about 4.5 times. The reason for this is that in the L1 channel, compared to the other channels, the highest area under forage corn cultivation is observed, which also shows the highest increase in forage corn yield according to the results of the optimal redistribution of water. This has led to the largest revenue increase for the L1 channel among all channels.

Acknowledgment

The current study was conducted at the Imam Khomeini International University and the authors of this paper express their gratitude and appreciation to the university.

References

- 1- Hosseiniasl, A., Mesgari, MS., and Mutkan, AA. (2018). "Conceptual Development of the Basis Factor and Optimization Based on Genetic Algorithm in the Allocation of Water Resources." *Environmental Sciences*, 2, pp.165-184.

- 2- Mazandarani Zadeh, H., and Hosseini, S. (2021). "Optimal Water Allocation among Agricultural Consumers Using Crop Pattern Change Approach to Improve Farmers' Livelihood." *Irrigation Sciences and Engineering*. doi: 10.22055/jise.2021.32941.1915
- 3- Misaghi, F., Amani, A., and Seddigh, A. (2020). "Comparison of the Efficiency of Gray Wolf Optimizer and Imperialist Competitive Algorithms in an Optimal Allocation of Water in Irrigation and Drainage Networks (Case Study: Sofi-Chay Network)." *Environmental Sciences*, 18(2), pp. 203-218.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



باز تخصیص بهینه آب در میان مصرف کنندگان بخش کشاورزی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ژنتیک- فازی با هدف افزایش درآمد و عدالت در توزیع (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین)

شیدا کاکاوند^۱، حامد مازندرانی زاده^۲ و هادی اعتدالی رمضانی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
(mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir)

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۰

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

چکیده

امروزه کم‌آبی به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بخش کشاورزی کشور تبدیل شده است، مشکلی که نه تنها بخش کشاورزی، بلکه بخش صنعت و حتی بخش شرب برخی مناطق کشور را تحت تأثیر قرار داده است. در سال‌های اخیر در پی بروز تغییر اقلیم، افزایش جمعیت و افزایش نیازها انتظار می‌رود شیوه توزیع آب دچار تغییر شود و بازتخصیص بهینه منابع به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد. در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تخصیص آب با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مورد توجه محققین قرار گرفته است. حقایق شبکه آبیاری دشت قزوین در ابتدای تأسیس در حدود ۲۵۵ میلیون مترمکعب در سال بوده است، اما در سال‌های اخیر، آب تخصیص‌یافته به این شبکه به حدود ۱۲۰ میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته است. با توجه به این کاهش شدید، تغییری در برنامه تخصیص ذی‌النفعا شبکه رخ نداده و نسبت‌های تخصیص‌یافته به آن‌ها هم‌چون گذشته است. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به‌منظور بازتخصیص بهینه آب تخصیص‌یافته به شبکه استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور اعمال اهداف متعارض با یکدیگر و با توجه به قابلیت‌های سیستم استنتاج فازی در برآورد عوامل غیر دقیق، از روش بهینه‌سازی چندهدفه فازی با هدف افزایش مطلوبیت کل سیستم، شامل افزایش درآمد بهره‌برداران و هم‌چنین رعایت عدالت در بازتوزیع استفاده شده است. نتایج نشان داد استفاده از روش پیشنهادی باز توزیع آب، باعث افزایش ۴۰/۷ درصد در درآمد کل شبکه و هم‌چنین ۵۴/۵ درصد در عدالت توزیع آب شده است.

کلید واژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، متغیر زبانی فازی، بازتوزیع، عدالت.

مقدمه

دادند می‌توان از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک مدل بهینه‌ساز مؤثر برای برنامه‌ریزی هر سیستم آبیاری استفاده کرد. Monem et al. (2007) در یک تحقیق برنامه‌ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری را بررسی کردند. در این تحقیق روش ریاضی بهینه‌سازی تیرید (SA) و الگوریتم ژنتیک (GA) به کار گرفته شد و در آن حل مسائل توزیع آب در کانال‌های آبیاری را به‌صورت چندهدفه با اهداف متفاوت مدنظر قرار داد با استفاده از مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی فازی (Fuzzy Neural Network and Genetic Algorithm)، اقدام به مدل‌سازی و بهینه‌سازی مصرف آب در دشت نجف‌آباد اصفهان نمودند. این مدل از دو بخش شبکه عصبی فازی، مشتمل بر شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی و الگوریتم ژنتیک تشکیل شده است. اهداف مدل بهینه‌سازی شامل کاهش کمبود تأمین آب آبیاری و هم‌چنین کاهش تخلیه آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان از وجود شکاف میان مقدار آب موجود و مقدار آب موردتقاضا در فصل پاییز و زمستان داشت.

محدودیت منابع آب در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تهدیدی جدی برای رفاه و توسعه پایدار است. از این‌رو بازنگری در سیاست‌های گذشته و تدوین سیاست‌های جدید در این بخش ضروری است. مدیریت ضعیف منابع آب به‌ویژه در بخش کشاورزی باعث افزایش تقاضای آب و هدر رفت آن شده است. بسیاری از مناطق با موازنه نامتعادل مقدار عرضه و تقاضای آب مواجه شده‌اند. استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی کمک شایانی در توزیع بهینه منابع موجود می‌نماید. لیکن اغلب مسائل واقعی مشتمل بر چندین هدف متضاد با یکدیگر هستند. مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه ابزاری مناسب در حل چنین مسائلی هستند. Kamkar و Raju (2004) تحقیقی باهدف افزایش سود یک پروژه آبیاری در مورد استفاده از الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی آبیاری و توسعه الگوی کشت مؤثر انجام دادند و نشان

قابل ملاحظه‌ای توانایی یافتن جواب‌های باکیفیت بالا را برای مسائل بهینه‌سازی سخت، افزایش می‌دهد (Sardar Shahraki et al., 2016).

در اغلب موارد مطلوبیت و خواسته‌های بهره‌برداران با استفاده از متغیرهای زبانی و به صورتی غیردقیق بیان می‌شود. سیستم استنتاج فازی (Fuzzy Inference System) ابزاری قدرتمند در مواجهه با مسائلی مشتمل بر پارامترهای غیردقیق است.

Omidvar et al. (2016) در پژوهشی یک مدل بهینه‌سازی تخصیص آب و الگوی کشت بر مبنای تئوری بازی‌های همکارانه ارائه دادند. به منظور سنجش کارایی مدل، اراضی تحت پوشش یکی از کانال‌های شبکه آبیاری سد درود زن فارس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با تخصیص آب بیشتر به بخش‌های با پتانسیل تولید بیشتر سود و بهره‌وری اقتصادی آب افزایش می‌یابد.

Simyari و Mazandarani Zadeh (2017) در خصوص باز تخصیص بهینه آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک در میان بهره‌برداران بخش کشاورزی شبکه قزوین نشان داد درآمد بهره‌برداران در صورت شکل‌گیری همکاری کامل میان ایشان نسبت به وضعیت موجود بیش از ۳۰ درصد قابل افزایش است.

Li et al. (2017) مطالعه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه فازی برای تخصیص آب آبیاری سطحی و زیرزمینی در دوره‌های مختلف رشد برنج در زیر حوضه‌های مختلف شهرستان چینگان (Qing'an County) شمال شرقی کشور چین، تحت ترکیبی از شرایط خشک و مرطوب، نشان دادند که مدل پیشنهادی برای اکثر مناطق با منابع آب محدود، برای تعیین استراتژی‌های توزیع قابل اجرا است و از آنجا که کمبود آب باعث بروز اختلاف میان بخش‌های مختلف در جامعه می‌شود تخصیص بهینه منابع آب امری لازم و ضروری است. Hosseiniasl et al. (2018) با ارائه چارچوب مفهومی عامل مبنای تخصیص بهینه منابع آب به بخش‌های مختلف، نحوه تعاملات بین عامل‌های مختلف را تشریح و قابلیت بهره‌گیری از این روش مدل‌سازی را ارائه کردند. برای بهینه‌سازی تخصیص آب بین بخش‌های مختلف از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد این بهینه شدن منجر به کاهش سطح زیر کشت در بخش کشاورزی و کاهش مقدار آب تخصیص یافته در مقایسه با وضعیت فعلی شده است. در بخش صنعت نیز به دلیل سودآوری اقتصادی بالاتر این بخش نسبت به بخش کشاورزی، تخصیص بهینه در راستای افزایش سودآوری اقتصادی منجر به تخصیص بیشتر آب در مقایسه با مصرف فعلی شده است.

Xia و Xie (2018) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی تصادفی فازی برای مدیریت تخصیص منابع آب آبیاری و طراحی ساختار مزرعه تحت عدم قطعیت در شهر جینینگ (Jining City) چین نشان دادند که این مدل برای اصلاح تخصیص آب آبیاری موجود

Misaghi et al. (2020) و Ayoubikia (2019) به مسئله تخصیص بهینه آب با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی در حوضه‌های مختلف پرداختند و هر دو کارایی بهتر این الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی تخصیص آب را تأیید کردند.

Xieting et al. (2010) با توجه به اهمیت الگوی کشت و به دلیل عدم قطعیت اطلاعات، به ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی فازی چندهدفه با اعداد مثلثی فازی و مسئله برنامه‌ریزی آرمانی متناظر آن برای تعیین الگوی بهینه کشت پرداختند. نتایج نشان داد مدل خطی چند هدفه فازی در مقایسه با مدل خطی معمول اطلاعات مؤثرتری را بیان می‌کند و راه‌حل‌های پیشنهادی آن رضایت‌مندی تصمیم‌گیران را از اجرا نشان می‌دهد.

به‌طور کلی مسائل بهینه‌سازی پیچیده هستند و نمی‌توان آن‌ها را با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک حل کرد. پیچیدگی‌های مسئله و همچنین توانایی‌های یافتن جواب‌های بهتر در فضای گسسته، سبب استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی شده است (Karamoz and Kerachian, 2011؛ Bozorg Haddad and Seifollahi-Aghmiuni, 2015).

Habibi et al. (2013) با تخصیص بهینه منابع آب در بین بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات، با اولویت تأمین آب بخش خدمات، با استفاده از الگوریتم تلفیقی ژنتیک-هوش جمعی (Genetic Algorithm-Particle Swarm)، نشان دادند با تخصیص بهینه منابع آب بین بخش‌ها می‌توان درآمدهای حاصله در منطقه کویر مرکزی ایران را تا ۵۶ درصد نسبت به وضعیت فعلی بهبود بخشید.

Nabinejad و Mousavi (2013) برای مدل‌سازی مسئله تخصیص منابع آب حوضه‌ای از تلفیق الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات (PSO) و مدل تخصیص منابع آب (MODSIM) استفاده کردند. مدل پیشنهادی قادر به ارائه جواب برای یک مسئله بهره‌برداری و تخصیص آب حوضه‌ای، با احتساب معیارهای کارایی (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) و عدالت در تخصیص آب، از دسته شاخص‌های پایداری، مستقیماً در تابع هدف مدل است. کاربرد این مدل در مسئله تخصیص منابع آب حوضه رودخانه اترک ارزیابی شد. ملاحظه شد که مدل با تابع هدف شامل تمام معیارها می‌تواند به جوابی منجر شود که در آن گرچه مقادیر هر معیار از بهترین جواب حاصل از مدل‌های تک هدفه شامل فقط یکی از معیارهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، عدالت و آسیب‌پذیری به ترتیب ۱/۱، ۰/۶، ۶ و ۷ درصد بدتر است. همچنین با توجه به ماهیت چندهدفه چند هدفه بودن مدل ملاحظه گردید که جواب‌های مختلف با تابع هدف وزنی یکسان ولی با مقادیر معیارهای متفاوت موجود است که بسته به ترجیح تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان قابل بهره‌برداری خواهند بود.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری، روش‌های ابتکاری هستند که می‌تواند با تغییرهای کم برای مسائل مختلف بهینه‌سازی به کار رود. الگوریتم‌های فرا ابتکاری به‌طور

باهدف بیشینه‌سازی مطلوبیت شامل افزایش درآمد کل شبکه و رعایت عدالت با استفاده از سیستم استنتاج فازی، شده است.

محدوده مورد مطالعه

شبکه آبیاری دشت قزوین در غرب کشور و در استان قزوین بین ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). برای انتقال آب رودخانه طالقان از سد انحرافی زیاران به دشت قزوین احداث شده و حدود ۵۸ هزار هکتار اراضی این دشت را تحت پوشش قرار می‌دهد. شبکه دارای یک کانال اصلی به طول ۹۴ کیلومتر، ۱۲ کانال درجه دو که طول آن‌ها در مجموع ۲۱۴ کیلومتر و کانال درجه سه به طول ۲۳۲ کیلومتر است. از لحاظ اقلیمی منطقه طرح دارای اقلیمی نیمه‌خشک، تابستان‌های نسبتاً گرم و زمستان‌های سرد است. منطقه مورد مطالعه، به طول حدودی ۲۰ کیلومتر، شامل پهنه‌ای از دشت قزوین است که تحت پوشش شبکه مدرن آبیاری قرار گرفته است. جدول (۱) به نمایش میزان آب اختصاص یافته به هر بهره‌بردار در طی سال زراعی ۹۴-۹۵ می‌پردازد.

و طرح کشت محصولات برای توسعه اجتماعی اقتصادی تحت عدم قطعیت مطلوب است.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که هرچند مطالعه‌های زیادی روی نحوه بازتخصیص بهینه آب در میان بهره‌برداران صورت گرفته است لیکن هریک با تعریف تابع هدفی مشخص در پی تأمین و بهینه‌سازی آن برآمده‌اند. درحالی‌که بسیاری از توابع هدف از قابلیت توصیف دقیق ریاضی برخوردار نیستند و بهتر است از توصیف زبانی برای مدل‌سازی آن‌ها استفاده شود. در این تحقیق با استفاده از قابلیت‌های فازی در توصیف پدیده‌های پیرامونی، نسبت به تعریف تابع هدف اقدام شده است. حقایق شبکه آبیاری دشت قزوین از گذشته برابر ۲۵۵ میلیون مترمکعب در سال بوده است، لیکن در سال‌های اخیر به دلایل گوناگون از جمله تغییر اقلیم و افزایش برداشت برای تأمین آب شرب شهر تهران، مقدار تخصیص یافته به حدود ۱۲۰ میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته است. شبکه از ۱۱ زیر شبکه تشکیل شده است که هر یک به مثابه یک بهره‌بردار است. با توجه به کم شدن آب تخصیصی در شبکه آبیاری دشت قزوین و عدم اصلاح برنامه آبیاری به این دشت، در این تحقیق سعی بر تخصیص مجدد آب

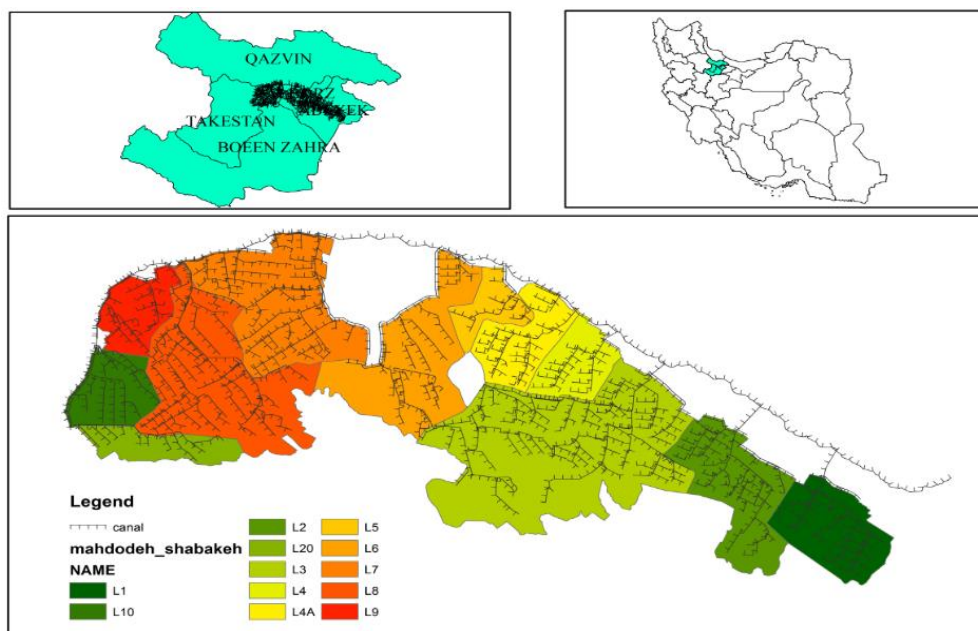


Fig. 1- Irrigation Network of Qazvin Plain

شکل ۱- شبکه آبیاری دشت قزوین

جدول ۱- میزان آب توزیع شده در هر یک از کانال‌های اصلی شبکه آبیاری دشت قزوین (میلیون متر مکعب)

Table 1- Distributed Water in main channels of Qazvin irrigation network (Mm³)

canal month	L1	L2	L3	L4	L4A	L5	L6	L7	L8	L9	L10	
Far.	0.35	0.295	0.192	0.098	0.120	0.090	0.134	0.146	0.062	0.102	0.06	
Ord.	1.90	3.007	5.054	1.738	1.754	1.624	2.812	2.604	1.449	3.937	2.53	
Kho.	2.58	3.420	6.441	1.924	1.838	1.820	3.269	2.978	1.994	5.280	2.67	
Tir	1.55	1.689	2.714	1.183	0.957	0.750	1.212	1.051	0.771	2.020	1.59	
Mor.	1.87	2.363	4.238	1.654	1.274	0.963	1.430	1.620	1.009	2.492	1.78	
Shah.	1.81	2.464	4.303	1.442	1.346	0.870	1.632	1.855	0.992	2.350	1.94	
Mehr	0.05	0.020	0.029	0.005	0.006	0.011	0.022	0.035	0	0.003	0.01	
Aban	0.05	0.020	0.029	0.005	0.006	0.011	0.022	0.035	0	0.003	0.01	
Azar	0.05	0.020	0.029	0.005	0.006	0.011	0.022	0.035	0	0.003	0.01	
Dey	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bah.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Esf.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sum	10.2	13.3	23.03	8.055	7.308	6.151	10.55	10.35	6.276	16.19	10.6	
	Sum(Mm ³)						122.030					

A_{ij} is Constant $\forall i = 1, 2, \dots, m$ and
 $\forall j = 1, 2, \dots, n$

در رابطه بالا P : درآمد کل شبکه، Y_{ij} : عملکرد محصول Z در زمین بهره‌بردار i ، n : تعداد محصولات شبکه، m : تعداد بهره‌برداران، A_{ij} : مساحت زمین اختصاص یافته به محصول Z در زمین بهره‌بردار i جدول (۲) Pr_j : قیمت محصول Z جدول (۳) $ReAll_{i,t}$: مقدار آب تخصیص یافته به بهره‌بردار i در ماه t و $All_{i,t}$: مقدار آب آزاد شده در ماه t بر مبنای جدول (۱) است. بر اساس رابطه (۲) مجموع آب اختصاص یافته به مجموع بهره‌برداران در هر ماه باید از مجموع آب قابل تخصیص آن ماه کمتر باشد و بر اساس رابطه (۳) جمع آب اختصاص یافته در هر سال از مجموع آب قابل تخصیص سالانه کمتر باشد. همچنین بر اساس رابطه (۴) مساحت زمین در اختیار هر بهره‌بردار و مساحت اختصاص یافته به هر کشت عددی ثابت است و تغییر نمی‌کند. ظرفیت کانال‌های انتقال نیز می‌تواند به‌عنوان قید در چنین مسائل بهینه‌سازی مورد توجه طراح قرار گیرد لیکن با بازدید میدانی به‌عمل آمده، ظرفیت کانال‌ها باعث محدودیت ظرفیت انتقال برای حدود احجام آب فعلی نخواهد شد.

تابع هدف دوم

افزایش شاخص عدالت به‌عنوان تابع هدف دوم تعیین شده است. در این تحقیق نسبت تعداد بهره‌بردارانی که پس از توزیع با افزایش درآمد مواجه شده‌اند نسبت به تعداد کل بهره‌برداران، به‌عنوان شاخص عدالت تعیین شده است.

Max Fairness

S. T :

$$\text{Fairness} = \frac{i^+}{m} \quad (5)$$

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

هدف از این مطالعه باز توزیع بهینه ماهانه آب میان ۱۱ بهره‌بردار عمده شبکه آبیاری قزوین برای تولید ۱۱ نوع محصول مختلف با اهداف افزایش مطلوبیت شامل درآمد کل شبکه و رعایت عدالت در باز توزیع آب است. دلیل انتخاب هدف افزایش درآمد کل شبکه افزایش بهره‌وری توزیع آب است به‌گونه‌ای که مقدار آب توزیع شده منجر به کسب بیشترین مقدار درآمد ممکن شود. همچنین دلیل انتخاب هدف تأمین عدالت در باز توزیع آب، جلوگیری از ایجاد نارضایتی و افزایش میزان مشارکت بهره‌برداران در اجرای الگوی باز توزیع آب است. این مسئله دارای ۱۲۲ متغیر است که محدودیت‌ها شامل حجم آب مصرفی در ماه و حجم آب مصرفی سالیانه است. شکل (۲) فلوچارت مدل بهینه‌سازی پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پس از تخمین مقادیر متغیرها توسط الگوریتم GA، به‌منظور ارزیابی مقدار برازندگی توابع هدف از FIS استفاده می‌شود. در ادامه، توابع هدف و سیستم FIS به‌کاررفته در این تحقیق ارائه خواهد شد.

تابع هدف اول

تابع هدف اول عبارت از بیشینه‌سازی درآمد کل شبکه است.

Max P

S. T:

$$P = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \times A_{ij} \times Pr_j \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{11} All_{i,t} \leq Re_t \quad t = 1, 2, \dots, 12 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{12} ReAll_{i,t} \leq \sum_{t=1}^{12} All_t \quad (4)$$

سیستم می‌پردازد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود درآمد و عدالت به سه وضعیت کم، متوسط و زیاد تقسیم شده است، همچنین مطابق جدول (۲) مطلوبیت کل سیستم به پنج وضعیت خیلی بد، بد، متوسط، خوب و خیلی خوب تقسیم شده است.

به این ترتیب با توجه به وجود سه حالت کم، متوسط و زیاد در دو متغیر درآمد و عدالت، بر اساس جدول (۲) شاهد شکل‌گیری نه قانون ورودی به FIS خواهیم بود، به عنوان مثال اگر عدالت کم و درآمد متوسط باشد، مطلوبیت کل سیستم کم خواهد بود. مطابق جدول (۲) پس از تخمین ۱۲۲ متغیر مسئله توسط الگوریتم ژنتیک، دو تابع هدف درآمد و عدالت بر مبنای معادله‌های (۱) تا (۵) محاسبه خواهد شد. سپس میزان عضویت اعداد به دست آمده برای درآمد و عدالت، به دسته‌های کم، متوسط و زیاد سنجیده می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد از ترکیب وضعیت‌های مختلف عدالت و درآمد، نه قانون امکان شکل‌گیری دارند که البته با توجه به شکل تابع عضویت مثلثی به کاررفته در توابع عضویت، هر عدد هم‌زمان فقط به دو قانون وابستگی خواهد داشت، به این ترتیب با ترکیب دو متغیر درآمد و عدالت، چهار قانون فعال خواهد شد و با ترکیب چهار قانون به دست آمده، مقدار مطلوبیت فازی کل سیستم به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از عملگر فازی زدایی مطلوبیت نهایی سیستم قابل محاسبه است.

برای مثال بر اساس شکل (۶) چنانچه شاخص عدالت برابر ۰/۳۶ و مقدار درآمد برابر ۶۸ میلیارد تومان باشد مقدار مطلوبیت نهایی سیستم برابر ۰/۳۸- شده است.

$$i^+ \in \{i \in m / P_i^{\text{ReAll}} \geq P_i^{\text{All}}\} \quad (6)$$

که در رابطه بالا Fairness عبارت از عدالت، i^+ تعداد بهره‌بردارهایی که درآمد آن‌ها نسبت به قبل بیشتر شده است، m تعداد بهره‌برداران و P_i^{All} و P_i^{ReAll} به ترتیب درآمد بهره‌بردار i قبل و بعد از باز تخصیص است.

سیستم استنتاج فازی (FIS)

سیستم استنتاج فازی از سه عملگر فازی ساز، موتور فازی و فازی زدا تشکیل شده است. در این سیستم ابتدا مقادیر عددی و معین به دست آمده برآزش توابع هدف اول و دوم، با استفاده از عملگر فازی ساز تبدیل به عبارت‌های فازی می‌شوند. به عبارت دیگر توسط این عملگر شدت تطابق یک مقدار مشخص با هر یک از قوانین فازی سنجیده می‌شود. سپس با استفاده از موتور فازی، قوانین فوق بر اساس میزان صحت، با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در نهایت با استفاده از عملگر فازی زدایی، عدد مشخص نهایی برآزش به دست خواهد آمد. برای نگاشت ورودی به خروجی دو نوع سیستم استنتاج فازی ممدانی و سوگنو وجود دارد که در این تحقیق از سیستم استنتاج ممدانی استفاده شده است.

توابع عضویت فازی دارای شکل‌های مختلفی است (Nasirzade et al., 2015). در این تحقیق از توابع مثلثی و دوزنقه‌ای فازی برای معرفی توابع درآمد و عدالت و مطلوبیت با استفاده از نظر خبرگان سیستم استفاده شده است. شکل‌های (۳) تا (۵) به نمایش تابع عضویت درآمد، عدالت و همچنین مطلوبیت کل

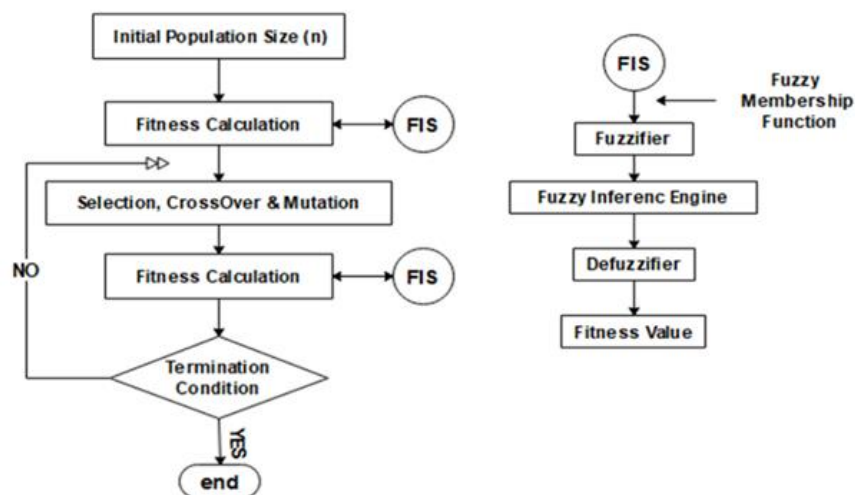


Fig. 2- Fuzzy Genetic algorithm flowchart

شکل ۲- فلوچارت برنامه الگوریتم ژنتیک فازی

جدول ۲- مقادیر مطلوبیت به دست آمده از قوانین اگر-آنگاه

Table 2- Desirability obtained from if-then rules

		Justice		
		Low	Medium	High
Income	Low	Very Low	Low	Medium
	Medium	Low	Medium	High
	High	Low	High	Very high

جدول ۳- عملکرد پتانسیل محصولات زراعی کشاورزی دشت قزوین (تن بر هکتار)

Table 3- Potential yield of agriculture crops in Qazvin (Ton/ha)

CROPS	PRODUCTION POTENTIAL
Wheat	8
Forage corn	70
Tomato	45
Alfalfa	15
Barley	6.5
Sugar beet	38
Pea	1.2
Bean	6.8
Potato	10
Corn	13.1
Lentils	1.12

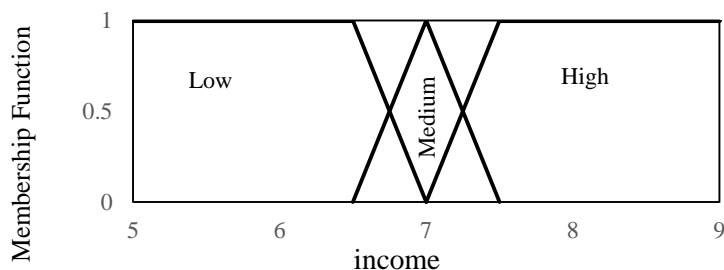


Fig. 3- Income membership function (MToman)

شکل ۳- توابع عضویت درآمد (میلیارد تومان)

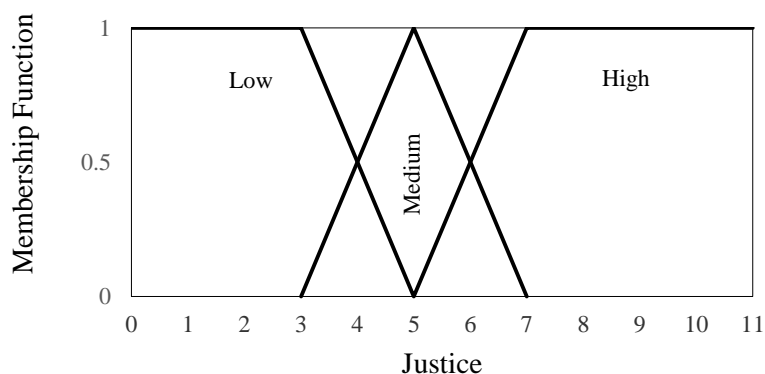


Fig. 4- Justice membership function

شکل ۴- توابع عضویت عدالت

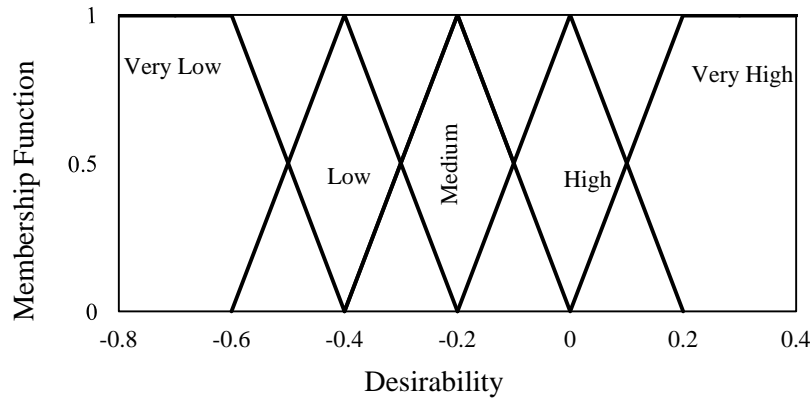


Fig. 5- Final desirability membership function

شکل ۵- توابع عضویت مطلوبیت نهایی

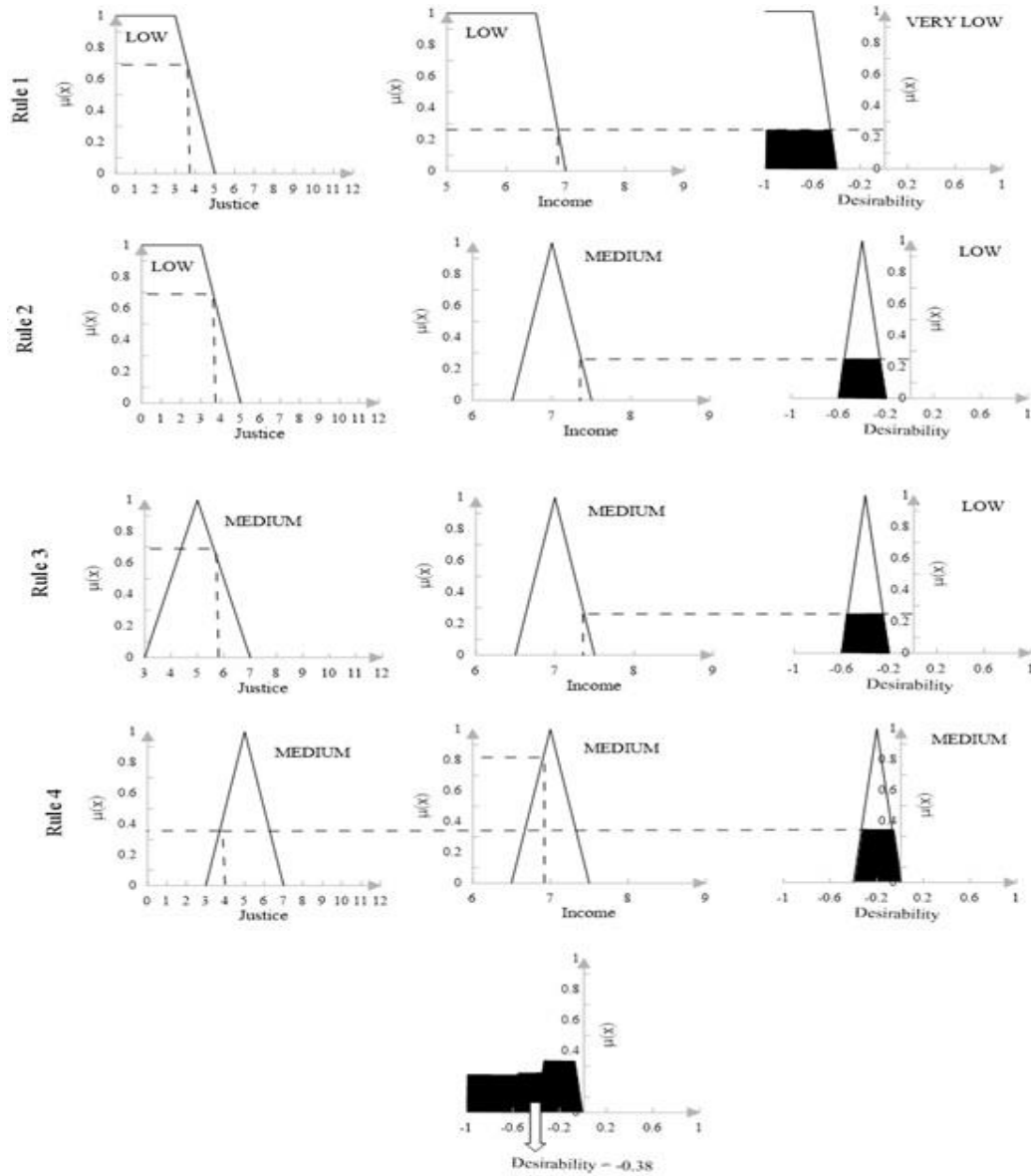


Fig. 6- Fuzzy Inference System

شکل ۶- سیستم استنتاج فازی

الگوریتم ژنتیک

در سال‌های اخیر محققین زیادی رو به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تدریجی از جمله الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی، سرد شدن فلزات مذاب، الگوریتم مورچه آورده‌اند (Mazandarani Zadeh et al. (2020) الگوریتم ژنتیک که امروزه در علوم مهندسی کاربرد فراوانی یافته، نخستین بار توسط جان هلند، متخصص علوم کامپیوتر دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۷۵ ارائه شد. در حل یک مسئله بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک مجموعه‌ای از جواب‌های مسئله به صورت اتفاقی ایجاد می‌گردد و سپس در هر مرحله با اعمال سه عملگر انتخاب، جابجایی و جهش روی جمعیت اولیه، جمعیت‌های بعدی تشکیل شده و در نهایت جواب بهینه به دست می‌آید. پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله فعلی نرخ ازدواج برابر ۰/۸، نرخ جهش برابر ۰/۱، تعداد اعضای جمعیت برابر ۵۰ عضو و تعداد تکرار برابر ۱۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شدند.

تابع تولید آب - عملکرد

برای به دست آوردن عملکرد محصول در رابطه‌ی (۱)، با توجه به آبی که به هر بخش تخصیص داده می‌شود از رابطه تولید آب -

عملکرد که در نشریه ۳۳ فائو (FAO33) به آن اشاره شده، استفاده شده است (Hoseini et al., 2021).

$$\frac{Y_a}{Y_{max}} = \prod_{i=1}^n \left[1 - K_{yi} \left(1 - \frac{AET_i}{PET_i} \right) \right] \quad (۷)$$

که در این رابطه Y_a میزان عملکرد واقعی محصول (تن بر هکتار)، Y_{max} عملکرد پتانسیل محصول در شرایط بدون تنش آبی (کیلوگرم بر هکتار)، K_{yi} ضریب حساسیت محصولات نسبت به کم‌آبی در مراحل مختلف رشد، AET_i مقدار آب داده شده به محصول (تبخیر تفرق واقعی) در مراحل مختلف رشد (میلی‌متر)، PET_i نیاز آبی محصول (تبخیر و تفرق پتانسیل) در دوره‌ی رشد i ام، n تعداد دوره‌های رشد برای هر محصول است. مقدار عملکرد به دست آمده از این رابطه بایستی در رابطه (۱) جای گذاری شود.

برای به دست آوردن تبخیر تفرق با توجه به رابطه (۸) بایستی مقادیر داده‌های نیاز و بارش خالص با هم جمع شوند که در رابطه زیر PET تبخیر تفرق و P_e بارش خالص است. نیاز خالص آبیاری و بارش خالص محصولات زراعی با استفاده از نرم‌افزار نت وات (NetWat) برای دشت قزوین و گیاهان منطقه به دست آمد.

$$I_n = PET - P_e \quad (۸)$$

جدول ۴- سطح کشت محصولات شبکه به تفکیک نوع محصول و کانال فرعی (هکتار)
Table 7- Area of network products by crops type and sub channel (ha)

canal \ crop	L1	L2	L3	L4	L4A	L5	L6	L7	L8	L9	L10
Wheat	1972	2681	6296	1228	1151	1017	3671	2054	1174	3724	2111
Forage corn	296	20	295	104	25	36.7	73.5	0	0	88.5	20
Tomato	227	280	275	6.5	41.5	41	85.5	255	120	75.8	26
Alfalfa	406	496	859	278	136	149	395	192	116	967	517
Barley	67	136	775	190	188	72	682	327	263	974	505
Sugar beet	10	9.5	609	0	125	0	423	27.5	0	176	101
Pea	4	11.2	42	0	1	27	29.5	38.7	26	95.6	103
Bean	78	39	103	125	23	9.5	42.8	90.2	52	87.1	20
Potato	0	0	16	5	0	2	2	39.8	41.5	17	16
Corn	0	5.6	171	5	80	1.5	103	35	0	0	0
Lentils	0	0	7	0	0	0	12	46	20	20	15

جدول ۵- قیمت محصولات زراعی شبکه آبیاری دشت قزوین ۱۳۹۴ (تومان بر کیلوگرم)
Table 8- Crops price in Qazvin irrigation plain 1394(Toman/Kg)

CROPS	PRICE
Wheat	705
Forage corn	570
Tomato	300
Alfalfa	450
Barley	520
Sugar beet	120
Pea	700
Bean	900
Potato	450
Corn	410
Lentils	1100

نتایج و بحث

در این پژوهش باز توزیع بهینه آب در شبکه آبیاری دشت قزوین با دو هدف افزایش درآمد و همچنین رعایت عدالت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و با استفاده از متغیرهای فازی زبانی در نرم‌افزار متلب (Matlab) پرداخته شد. در شکل (۷) مقایسه آب تخصیص‌یافته به هر کانال در دو وضعیت قبل و بعد از بهینه‌سازی رسم شده است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود تعداد نه کانال با افزایش آب تخصیصی نسبت به قبل مواجه شده‌اند. همان‌گونه که جدول (۶)، درصد تغییرات آب تخصیصی را نشان می‌دهد تنها دو کانال L3 و L8 کاهش میزان آب داشتند.

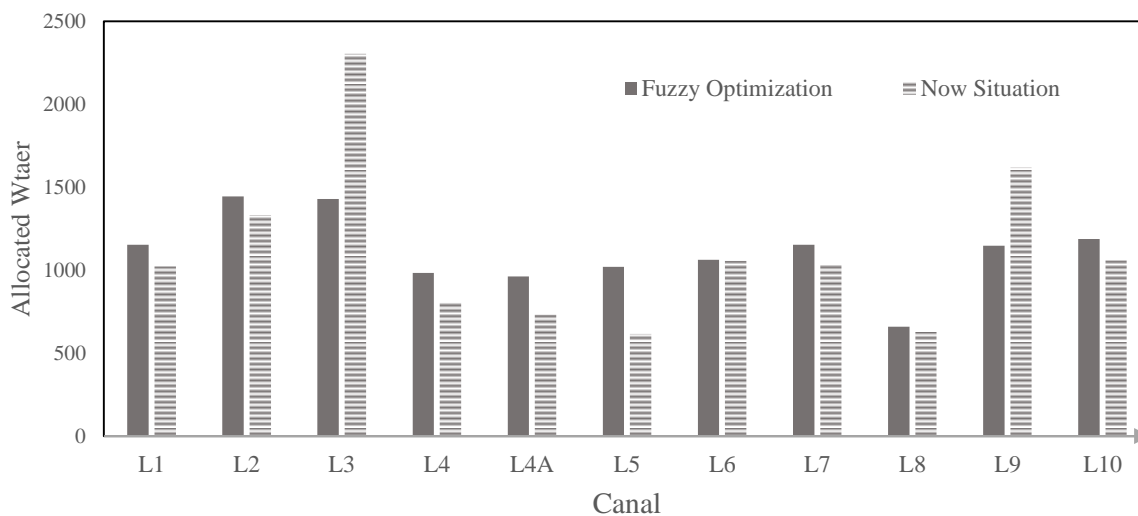


Fig. 7- Comparison allocated water in current and fuzzy situation ($m^3 \times 10^4$)

شکل ۷- مقایسه آب تخصیص‌یافته در دو وضعیت کنونی و بهینه‌سازی فازی (ده هزار مترمکعب)

جدول ۶- درصد تغییرات آب تخصیصی

Table6- Percentage of change allocated water

canal	Percentage of change allocated water
L1	12.87
L2	8.6
L3	-37
L4	22.1
L4A	31.7
L5	65.8
L6	0.73
L7	11.3
L8	5.11
L9	-29.1
L10	12.11

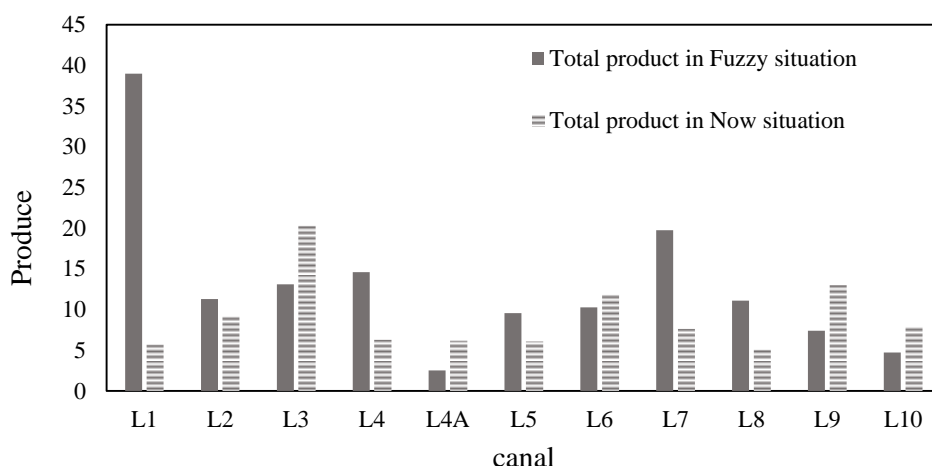


Fig. 8- Comparison of total production of crops for each operator (ton)
 شکل ۸- مقایسه تولید کل محصولات برای هر بهره‌بردار (تن)

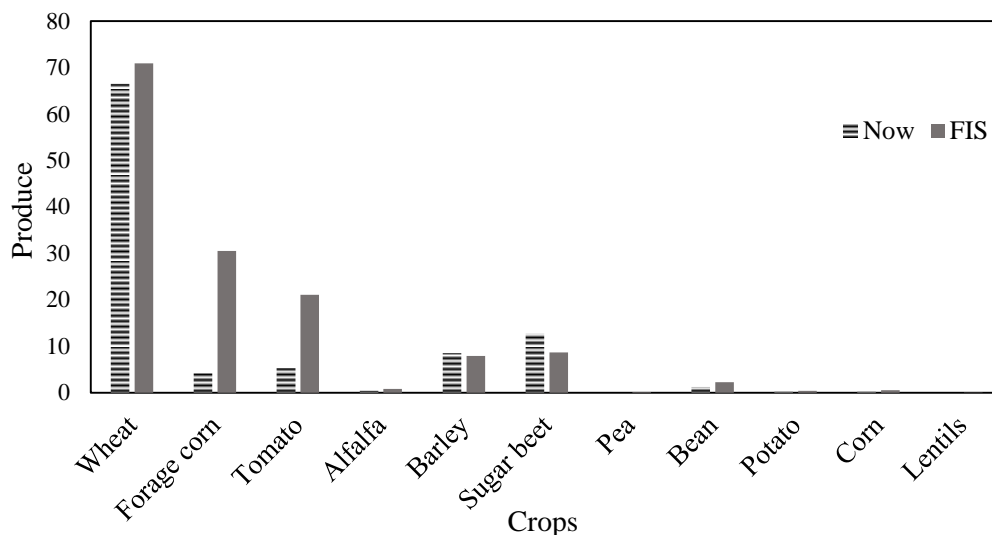


Fig. 9- Compare amount of production of each crops in current and fuzzy optimization situations (ton)
 شکل ۹- مقایسه مقدار تولید هر محصول در دو وضعیت کنونی و بهینه‌سازی فازی (تن)

که حدود ۴/۵ برابر شده است. دلیل این موضوع این است که در کانال L1 شاهد بیشترین میزان سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای نسبت به سایر کانال‌ها هستیم و بر اساس شکل (۹) باز توزیع بهینه آب منجر به بیشترین افزایش راندمان در محصول ذرت علوفه‌ای شده است. این موضوع باعث شکل‌گیری بیشترین افزایش درآمد برای کانال L1 در بین همه کانال‌ها شده است.

در جدول (۷) مقدار درآمد هر کانال و کل شبکه به تفکیک نشان داده شده است. بر اساس این جدول، درآمد کل شبکه با رشد ۴۰/۷ درصدی به ۸۱/۸ میلیارد تومان رسید که باعث شد مقدار شاخص عدالت برابر ۵۴/۵ درصد شود. شکل (۱۰) نمودار مقایسه درآمد حاصل از توزیع بهینه فازی و شرایط کنونی در هر کانال اصلی را نشان می‌دهد، همان‌طور که در شکل (۱۰) و جدول (۷) مشاهده می‌شود، بیشترین افزایش درآمد مربوط به کانال L1 است

جدول ۷- درآمد خالص (میلیارد تومان) و درصد تغییرات آن در دو حالت بهینه‌سازی فازی و ساده

Table 10- Net income (Mtoman) and Percentage of changes in current and fuzzy situation

canal	Now income	Fuzzy income	%Income Changes
L1	3.8	21.3	460.52
L2	5.7	7.8	36.84
L3	11.1	7.5	-32.43
L4	4.1	9.2	124.39
L4A	3.1	4.1	-54.83
L5	3.7	5.7	54.054
L6	6.4	5.3	-17.18
L7	4.7	10.2	117.02
L8	3.1	6.1	96.7
L9	7.8	4.4	-43.58
L10	4.6	2.9	-36.95
Sum	58.1	81.8	

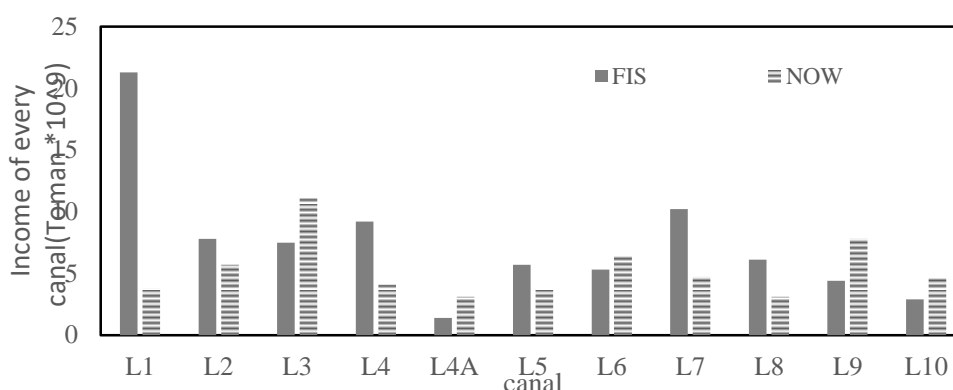


Fig. 10- Revenu comparison in current and fuzzy situation for main channels

شکل ۱۰- مقایسه درآمد حاصل از توزیع بهینه فازی و شرایط کنونی در هر کانال اصلی

اگرچه برای برخی از بهره‌برداران وضعیت توزیع آب شرایط به‌گونه‌ای تغییر یافت که در حالت بهینه سود کمتری نسبت به وضعیت کنونی کسب نمودند و برخی دیگر افزایش سود داشتند، در نهایت درآمد خالص شبکه در وضعیت توزیع بهینه آب با استفاده از سیستم استنتاج فازی، رشد ۴۰/۷ درصدی را در پی داشت و شاخص عدالت نیز به ۵۴/۵ درصد به‌دست آمد. لذا همان‌طور که مشاهده می‌شود، طبق شاخص عدالت، بیش از نیمی از کانال‌ها با افزایش درآمد مواجه شدند. نتایج الگوریتم بهینه‌ساز چند هدفه فازی، نشان داد عامل مساحت دلیل برافزایش آب تخصیصی به بهره‌برداران نیست.

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق با تحقیق مشابه دیگری که در سال ۱۳۹۹ در شبکه قزوین انجام شده است نشان می‌دهد بر اساس آن تحقیق نیز باز توزیع بهینه آب باعث افزایش ۲۵ درصد در درآمد مجموع بهره‌برداران شده است (Mazandarani Zade and Hosseini., 2021).

تقدیر و تشکر

محققین بر خود لازم می‌دانند از امکاناتی که دانشگاه بین‌المللی امام خمینی در جهت انجام تحقیق در اختیارشان قرار داده است، تقدیر و تشکر نمایند.

نتیجه‌گیری

اکثر روش‌های بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا یا دیگر تکنیک‌های بهینه‌سازی تقاضا را به عنوان مقادیر شناخته‌شده قطعی در نظر گرفته‌اند (Bhave, 2004). افزایش مصرف و کاهش منابع آب در دسترس در سراسر دنیا، باعث شده مسئله تخصیص آب به‌ویژه در بخش کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. مطالعات بسیاری در زمینه باز توزیع آب با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی از جمله الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است؛ اما با توجه به ماهیت غیرقطعی بودن بسیاری از شرایط در بهینه‌سازی تخصیص آب، سیستم استنتاج فازی در این تحقیق به کار گرفته شد.

برنامه‌ریزی فازی به دلیل اینکه امکان دخالت داده‌های غیردقیق در پارامترها را به تصمیم‌گیرندگان می‌دهد، نسبت به سایر مدل‌های کلاسیک که حتی از روش‌های تکاملی در آن‌ها استفاده شده است، در مسائل بهینه‌سازی دارای کاربرد و انعطاف‌پذیری بیشتر است. در این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه فازی به تخصیص بهینه منابع آب آبیاری در شبکه قزوین پرداخته شد. این مدل شامل دو هدف بهینه‌سازی درآمد کل شبکه و عدالت است.

References

- 1- Ayoubikia, R., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A. and Shafiei Sabet, B., 2019. Optimization of Regional Water Resources Allocation in Sefidroud River Basin by Social Equity Approach. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), pp.236-252.
- 2- Bhave, P. R. 2004. Optimal design of water distribution networks for fuzzy demands. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 229-245.
- 3- Bozorg Haddad O., Seifollahi-Aghmiuni S., 2015. *An introduction to uncertainty analysis in water resources systems*. Tehran; University of Tehran Press: 1394. (Persian).
- 4- Habibi, Davijani.M., Banihabib, M. and Hashemi, S., 2013. Development of Optimization Model for Water Allocation in Agriculture, Industry and Service Sectors by Using Advanced Algorithm, GAPSO. *Journal of Water and Soil*. 27(4), pp.680-691. (In Persian)
- 5- Hoseini, M., Hamed Mazandaranzadeh, and Bijan Nazari. "Simultaneously Management of Surface and Groundwater Resources and Increasing Farmers' Resilience to Water Scarcity by Predicting the Price of Agricultural Products and using GA (Case Study of Irrigation and Drainage Network of Qazvin Plain)." *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52, no. 2 (2021): 563-576.
- 6- HosseiniAsl, A., Mesgari, MS. and Mutkan, AA., 2018, Conceptual development of the basis factor and optimization based on genetic algorithm in the allocation of water resources. *Environmental sciences*, 2, pp,165-184.
- 7- Karamoz, M., Kerachian, R., 2011. *Planning and Quality Management of Water Resources Systems*. Tehran; Amirkabir University of Technology Press: (Persian).
- 8- Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Ma, M. and Liu, X., 2017. An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*, 555, pp.80-94.
- 9- Mazandarani Zadeh, H., Piadeh koohsar J and Sadr S K., 2020. Performance Comparison Of MOPSO And NSGA-II Algorithms In Calculating The Rule Curve Of Multi Reservoir Systems. *Dam and Hydroelectric Powerplant*. 7 (24), pp. 52-62.
- 10- Mazandarani Zadeh, H., Hosseini, S. 2021. Optimal Water Allocation among Agricultural Consumers Using Crop Pattern Change Approach to Improve Farmers' Livelihood, *Irrigation Sciences and Engineering*. doi: 10.22055/jise.2021.32941.1915
- 11- Misaghi, F., Amani, A., Seddigh, A. 2020. Comparison of the efficiency of gray wolf optimizer and imperialist competitive algorithms in an optimal allocation of water in irrigation and drainage networks (case study: Sofi-Chay network). *Environmental Sciences*, 18(2), pp. 203-218.
- 12- Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Ma, M. and Liu, X., 2017. An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*, 555, pp.80-94.
- 13- Monem, M.J., Najafi, M.R. and Khoshnavaz, S., 2007. Optimal Water Scheduling in Irrigation Networks Using Genetic Algorithm. *Iran-Water Resources Research*. 3(1), pp.1-11.
- 14- Nasirzade, F., Khanzadi, M. and Alipour, M., 2015. Integrating System Dynamic and Fuzzy Logic for Economic Assessment of BOT Projects. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2(4).pp.90-103.
- 15- Nabinejad, SH. and Mousavi, J., 2013. Simulation-optimization for Basin-wide Optimum Water Allocation Considering System's Performance and Equity Measures. *Journal of Water & Wastewater*, 2. , pp.70-79.

- 15- Omidvar, M., Honar1, T., Nikoo, M.R. and Sepaskhah, A.R., 2016. Developing a Fuzzy Crop Pattern and Water Allocation Optimization Model Based on Cooperative Game Theory: A Case Study, Ordibehesht Canal at the Doroodzan Irrigation Network, Northwest of Fars Province in Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 20 (76), pp.1-13.
- 16-Raju, K.S. and Kamkar, N.D., 2004. Irrigation planning using genetic algorithms. *J. Water Resources Management*. 2. pp,163-176.
- 17-Sardar Shahraki, A., Shahraki, J., Hashemi Monfared, S. 2016. Investigation of Water Resources Management Approaches of Sistan Region Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). *Management Researches*, 9(31), pp. 73-98.
- 18- Simyari, F. and Mazandarani Zadeh, H..2017. The optimal redistribution of water agricultural with Genetic Algorithm. *In 2th National Irainain Conferance on Hydrology*.(In Persian)
- 19- Xie, Y.L., Xia, D., 2018. An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall. *Ecological Indicators*. pp,301-311.
- 20- Xieting, Z., Shaozhong, K., Fusheng, L., Lu, Zh. and Ping, G., 2010. Fuzzy multi-objective linear programming applying to crop area planning. *Agricultural Water Management*. pp,134-142.

EXTENDED ABSTRACT

The effect of distance in flow induced vibration on power conversion caused by the oscillations of two tandem cylinders

V. Atashi¹, M. Ghomeshi^{2*}, S. M. Sajadi³ and M. Bernitsas⁴

1- Ph.D. in water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2*- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (m.ghomeshi@yahoo.com).

3- Assistant Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz,

4- Professor, Naval Architecture and Marine Engineering Faculty, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 December 2020

Revised: 12 June 2021

Accepted: 14 June 2021

TO CITE THIS ARTICLE:

Atashi, V., Ghomeshi, M., Sajjadi, S. M., Bernitsas, M. (2023). 'The effect of distance in flow induced vibration on power conversion caused by the oscillations of two tandem cylinders', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 95-110. doi: 10.22055/jise.2017.20430.1476.

Keywords:

Vortex Induced Vibrations, galloping instability, harnessed power.

Introduction

Flow-induced vibrations (FIVs) are a type of vibration that is caused by the interaction of a structure with a fluid flow. FIVs can occur in a variety of structures, including bridges, buildings, and offshore structures. In the case of tandem cylinders, FIVs can be caused by the interaction of the two cylinders with the fluid flow.

FIVs are suppressed because of their destructive nature. MRElab managed to convert the kinetic energy of water flows into electricity by enhancing FIV (Bernitsas, 2016; Bernitsas et al., 2008). In MRElab, Flow Induced Vibrations (FIV) are studied to convert marine hydrokinetic energy, from oceans, tidal and rivers to electricity using the VIVACE energy harvester. Vortex Induced Vibrations for Aquatic Clean Energy Converter is probably the closest to commercialization because it has suffered extensive laboratory testing and many field deployments since its introduction in 2006. The objective of the Marine Renewable Energy Lab (MRELab) is to investigate FIV of single and multiple cylinders and find different ways to enhance FIV to design VIVACE Converters and optimize the power output for various flow velocities. Vortex-induced vibration (VIV) to a cylinder has been studied experimentally (Alam et al., 2003; Park, 2012) and numerically (Ding et al., 2013; Kim et al., 2021) by researchers in order to eliminate or at least regulate this unsteady fluid-structure interaction phenomenon since it has been identified as the cause for many structural failures. But it is challenging, and it is still being debated due to the complexity of the interaction between body dynamics and fluid dynamics. The two cylinders arrangement has been studied in many types of research as the simplest arrangement. In this research, both cylinders can oscillate which has not been done very often in previous papers up to now. Moreover, most of the previous experiments on VIV were conducted in TrSL2 regime which fluctuating lift coefficient rises as the Re increases. But in this research, experiments placed in TrSL3 that shear layer becomes fully turbulent, and the fluctuating lift coefficient of a smooth cylinder reaches its maximum value.

Methodology

An experiment was conducted to study the flow-induced vibrations (FIVs) of two tandem cylinders in a fluid flow. The experiment was conducted in the LTFSW Channel of the Marine Renewable Energy Laboratory (MRElab) at the University of Michigan. The channel has the potential to re-circulate about 37,854 liters of water at a speed up to 1.4 m/s by an impeller powered by a 20hp induction motor. The test section is 2.44 m long, 1 m wide and 1.52 m deep and made of transparent flex-glass, thus allowing for visualization of the VIV and galloping characteristics. The stoppers were installed to keep safe the bottom flex-glass of the test section from breaking by the cylinder impact.

Two PTC circular cylinders of diameter $D = 0.0889\text{m}$ and length $L = 0.914\text{m}$ were utilized for these experiments. The test cylinders were mounted on two linear end springs and the cylinder motion was allowed in the cross-flow direction only. In this study, center to center distance between two cylinders is between $1.57D$ and $2.57D$. Specific design of the two single-cylinder Converter modules is listed in Table 1. The added mass inclusion through a constant added mass coefficient (from potential theory) is still debated. In this study, it is accepted that added mass coefficient is equal to 1. It also has a power take-off (PTO) system consisting of a heat bank for dissipation of the generated energy. The excitation comes from the fluid-structure interaction (FSI) and is applied to the cylinders throughout the forces imparted by the motion of the fluid.

Findings

The hydrodynamic interaction between the cylinders can have a significant impact on the FIVs. Hydrodynamic interaction can lead to the formation of vortices that can excite the vibrations of the cylinders. The nonlinear nature of VIV and galloping can also contribute to the drops and jumps in harnessed power.

The effects of damping and stiffness can also affect the FIVs. In general, increasing the damping or stiffness of the cylinders will tend to suppress the vibrations. However, there is an optimal level of damping and stiffness that will maximize the power output of the FIVs.

The findings of this study provide new insights into the hydrodynamic interaction between multiple cylinders in tandem and can be used to improve the design and performance of VIVACE Converters and other FIM-based energy harvesters. In addition to the factors mentioned above, it is also important to consider the following factors that may affect the FIVs of tandem cylinders:

- The shape of the cylinders: The shape of the cylinders can have a significant impact on the FIVs. In general, cylinders with a larger cross-section will be more susceptible to FIVs.
- The surface roughness of the cylinders: The surface roughness of the cylinders can also affect the FIVs. In general, cylinders with a rougher surface will be more susceptible to FIVs.
- The presence of other objects in the flow field: The presence of other objects in the flow field can also affect the FIVs. In general, cylinders that are in close proximity to other objects will be more susceptible to FIVs.

The study of FIVs of tandem cylinders is a complex and challenging problem, but it is an important one for the design of efficient and reliable FIM-based energy harvesters. The study found that the cylinders go up and down out of phase before a drop occurs, and they don't affect each other negatively. However, at the drop point, the cylinders move approximately in phase, and the upstream cylinder affects the downstream cylinder negatively. This interaction causes the galloping instability to disappear, and the harnessed power decreases sharply. The study concludes that there is a firm interaction between cylinders, and this interaction can cause the galloping instability to disappear and the harnessed power to decrease sharply.

Acknowledgements

This article has been prepared from the results of the MSc. thesis of the first author and with the support of the university's research unit through the second author's Grant (95/3/02/31400) and using

experimental facilities of Marine Renewable Energy Laboratory (MRELab) at the University of Michigan by which the authors thank and appreciate the university's vice chancellor for research. We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support. In addition, the spiritual support of the scientific center "Improvement and maintenance of irrigation and drainage networks" is thanked and appreciated.

References

- 1- Alam, M.M., Moriya, M., Takai, K. and Sakamoto, H., 2003. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(1-2), pp.139-154.
- 2- Bernitsas, M.M., 2016. Harvesting energy by flow induced motions. *Springer handbook of ocean engineering*, pp.1163-1244.
- 3- Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. (2008). VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130(4).
- 4- Ding, L., Bernitsas, M.M. and Kim, E.S., 2013. 2-D URANS vs. experiments of flow induced motions of two circular cylinders in tandem with passive turbulence control for $30,000 < Re < 105,000$. *Ocean Engineering*, 72, pp.429-440.
- 5- Kim, G.Y., Lim, C., Kim, E.S. and Shin, S.C., 2021. Prediction of Dynamic Responses of Flow-Induced Vibration Using Deep Learning. *Applied Sciences*, 11(15), p.7163.
- 6- Park H. *Mapping of passive turbulence control to flow induced motions of circular cylinders* (Doctoral dissertation, University of Michigan).



تأثیر فاصله بر توان مهار شده حاصل از نوسانات دو سیلندر با آرایش پشت سرهم

ویدا آتشی^۱، مهدی قمشی^{۲*}، سید محسن سجادی^۳ و مایکل برنیتاس^۴

- ۱- دانش آموخته دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
 ۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز. m.ghomeshi@yahoo.com.
 ۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
 ۴- استاد گروه معماری دریایی و مهندسی دریا، دانشکده مهندسی دانشگاه میشیگان.

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱

چکیده

در این مقاله اثر فاصله دو سیلندر زبر دایره‌ای پشت سر هم بر حرکت ناشی از جریان بررسی شده است. حرکت ناشی از جریان، پدیده‌ای است که در سازه‌های مختلف در جریان‌های پایدار مانند مبدل‌های حرارتی، پل‌ها، ساختمان‌ها و سازه‌های دریایی رخ می‌دهد. ارتعاش ناشی از گردابه‌ها و گالوپینگ رایج‌ترین پدیده‌ها در حرکت ناشی از جریان هستند که در دستگاه مبدل گردابه به دلیل اثر متقابل لایه‌ی برشی و کفاب سیلندر بالادست رخ می‌دهد. برای نیل به این هدف، توان مهار شده برای سیلندر بالادست، پایین‌دست و مجموع انرژی استخراج گردیده است. معمولاً با افزایش سرعت مقدار توان مهار شده در منطقه‌ی گالوپینگ افزایش می‌یابد، اما برخلاف انتظار در محدوده‌ی سرعت‌های بین $0.9 < U < 1.3$ متر در ثانیه، یک افت یا یک پرش ناگهانی در مقدار توان مهار شده دیده می‌شود. هدف این مقاله، یافتن دلیل حضور این تغییرات و ارتباط آن با فاصله‌ی بین دو سیلندر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، افزایش فاصله‌ی دو سیلندر بر الگوی جریان بین دو سیلندر و در نتیجه افت‌ها و پرش‌ها موثر است.

کلید واژه‌ها: سیلندر پشت سرهم، توان مهار شده، ارتعاش ناشی از گردابه‌ها، گالوپینگ.

مقدمه

گردابه‌ها، نیروهای نوسانی بر سیلندر اعمال کرده که نتیجه‌ی آن ارتعاش ناشی از گردابه‌ها می‌باشد. مشخصه‌ی ارتعاش ناشی از گردابه‌ها تشدید می‌باشد به این معنی که در محدوده‌ی همگام سازی (synchronization)، فرکانس جریان گردابه‌ها با فرکانس نوسانات سیلندر تقریباً برابر شده و حرکات بزرگ سیلندر مشاهده می‌شود (Govardhan and Williamson, 2000).

مطالعه‌های کاملی در خصوص ارتعاش ناشی از گردابه‌ها در مقالات Bearman (1984 & 2011)، Sarpkaya (2004) و Williamson و Govardhan (2004) انجام شده است. گالوپینگ (Galloping) شکل دیگری از حرکت ناشی از جریان می‌باشد که از لحاظ هیدرودینامیکی - آیرودینامیکی ناپایدار بوده و در فرکانس کم‌تر و دامنه‌ی بیشتری نسبت به ارتعاش ناشی از گردابه‌ها رخ می‌دهد. این پدیده عمود بر جریان بوده و نسبت به ارتعاش ناشی از گردابه‌ها مخرب‌تر می‌باشد ولی پیچیدگی‌های ارتعاش ناشی از گردابه‌ها را ندارد. گالوپینگ حاصل از کوپل نیروی بین نیروهای وارد بر سیال و نوسان ناشی از بدنه‌ی غوطه‌ور است. به طور معمول، با افزایش سرعت جریان ابتدا ارتعاش ناشی از گردابه‌ها ظاهر شده و به دنبال آن گالوپینگ مشاهده می‌شود. همان طور که مشهود است، دامنه‌ی نوسانات قبل از شروع گالوپینگ

از دیرباز بشر دریافت با وزش باد روی سیم‌های سازه‌های موسیقی می‌توان باعث لرزش سیم‌ها و تولید صدا شد. لئوناردو داوینچی نقاش قرن ۱۵ میلادی طرحی از یک ردیف منظم از گردابه حول جسم یک انسان در یک رودخانه کشیده است. مطالعه‌های عددی و آزمایشگاهی انجام شده در مورد این پدیده بسیار گسترده‌تر از آن است که بتوان در این فرصت محدود به تمامی آن‌ها اشاره نمود. به‌منظور اطلاعات بیشتر در این زمینه به مقالات مروری توسط محققینی مانند Bearman (1984)؛ Govardhan و Parkinson (1989)؛ Williamson (1996)؛ Govardhan و Williamson (2006) و Williamson (2004) ارجاع داده می‌شود. حرکت ناشی از جریان (FIM) یک پدیده است که اغلب در سازه‌های بلند و باریک که در معرض جریان عرضی هستند، رخ می‌دهد. پدیده‌ی ارتعاش ناشی از گردابه‌ها ((vortex induced vibration (VIV)، رایج‌ترین پدیده در حرکت ناشی از جریان است که البته اولین بار در سال ۱۵۰۴ توسط لئوناردو داوینچی ارائه داده شد و فرمول ریاضی آن توسط استرومال در سال ۱۸۷۸ ارائه گردید. وقتی یک سیلندر الاستیک دایره‌ای نصب شده در معرض جریان یکنواخت عرضی قرار بگیرد،

از حدود هفت سال پیش تحقیقاتی انجام شد که برخلاف تحقیقات گذشته، منجر به استحصال انرژی حاصل از ارتعاشات ناشی گردابه‌ها می‌شد. نخستین بار Bernitsas استاد دانشگاه میشیگان، در سال ۲۰۰۵ میلادی، چنین ایده‌ای را مطرح کرد. (Bernitsas & Raghavan, 2005) از آن زمان تاکنون نیز این دانشگاه مرکز اصلی تحقیقات روی این موضوع بوده است. تمرکز محققان آزمایشگاه دریایی انرژی‌های نو در دانشگاه میشیگان روی حرکت نوسانی استوانه‌ی افقی در جهت قائم، در اثر گردابه‌های ناشی از حرکت جریان سیال می‌باشد. در این آزمایشگاه، مدل آزمایشگاهی مذکور در سال ۲۰۰۵ ساخته شده است و مورد آزمایش‌های متعددی تا به حال قرار گرفته است و در ادامه، تأثیر سختی فنر و میرایی دستگاه و تأثیر زبری سطح استوانه به صورت آزمایشگاهی بررسی شده اند.

نمونه‌ی اولیه‌ی این دستگاه در آزمایشگاه تنها استوانه‌ای براق است که به تعدادی فنر متصل می‌باشد. این استوانه به صورت افقی مقابل جریان آب و در داخل مخزنی به اندازه‌ی یک تراکتور در آزمایشگاه انرژی تجدید پذیر دریایی برنیتساس قرار گرفته است. آب در داخل مخزن با سرعت ۱/۵ گره جریان می‌یابد. نحوه‌ی عملکرد "دستگاه مبدل انرژی ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها به انرژی پاک" از عبارت "مبدل گردابه" بدین صورت است: حضور استوانه در مقابل جریان آب موجب ایجاد گرداب‌های متناوب می‌شود که در بالا و پایین استوانه شکل می‌گیرند. این گرداب‌ها استوانه را روی فنرها به بالا و پایین حرکت می‌دهند و انرژی مکانیکی ایجاد می‌کنند. سپس، دستگاه، انرژی مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می‌کند (شکل ۳). Igarashi, (1981) و Ljungkrona et al (1991) تأثیر عدد رینالدز را بر الگوی جریان بین دو سیلندر ثابت با آرایش پشت سرهم و در فاصله‌ی بحرانی که در آن یک پرش ناپیوسته در اندازه‌گیری نیرو یا فشار بر سیلندر پایین دست رخ می‌دهد، به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. این ناپیوستگی به وسیله‌ی بسیاری از محققان مشاهده شده است (Zdravkovich, 1977؛ Igarashi, 1981؛ 2003b & Alam et al., 2003a Alam et al.). همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، الگوی جریان بین دو سیلندر ثابت پشت سر هم بستگی به عدد رینالدز و فاصله‌ی طولی آنها دارد اما این رژیم در ناحیه‌ی عدد رینالدز $Re > 35000$ فقط مقدار اندکی تحت تأثیر عدد رینالدز می‌باشد. فاصله‌ی بحرانی نیز به تغییرات عدد رینالدز حساس بوده و روند آن با توجه به وابستگی عدد رینالدز به طول شکل‌گیری گردابه‌ی حاصل از یک سیلندر تنها پیروی می‌کند.

با افزایش فاصله‌ی طولی دامنه‌ی نوسانات کاهش پیدا می‌کند چرا که با افزایش فاصله گردابه‌ها از سیلندر بالادست بیشتر پراکنده می‌شوند (Assi et al., 2010). به علاوه، Brika و Laneville (1999) نتوانستند تغییر متناوب در واکنش دامنه برای سیلندر پایین دست را مشاهده کنند، این در حالی است که واکنش دامنه‌ی

نزدیک به صفر می‌باشد. در سرعت‌های بالاتر، بسته به انحراف هندسی سیلندر از سطح مقطع دایره‌ای ممکن است گالوپینگ حاصل شود (Blevins and Vibration, 1990 & Chang et al., 2011) هدف از این تحقیق، بررسی تغییرات در مقدار توان مهار شده در منطقه‌ی گالوپینگ برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم می‌باشد.

ارتعاش ناشی از گردابه‌ها برای یک سیلندر، به دلیل پیچیدگی دینامیک آن، برای دهه‌ها مورد مطالعه بوده و هنوز هم موضوع بحث بسیاری از مقالات Sarpkaya (2004) و Williamson و Govardhan (2004) می‌باشد. تداخل جریان در یک گروه سیلندر، موضوع بسیاری از مطالعه‌های گذشته با توجه به کاربرد عملی در زمینه‌های مهندسی شده است. سیستم دو سیلندری بیشترین مورد مطالعه را در بین چند سیلندری‌ها به دلیل آرایش ساده‌ی آن داشته است. دو سیلندر می‌توانند به صورت کنار هم (Side by side)، پشت سرهم (Tandem) و یا زیگزآگی (staggered) در کنار هم قرار بگیرند (شکل ۱). اثر متقابل بین سیلندرها به آرایش بین سیلندرها، خصوصیات جریان و عدد رینالدز بستگی دارد. بر طبق تحقیقات Zdravkovich (1987 & 1977)، سه نوع اثر متقابل بین دو سیلندر می‌تواند وجود داشته باشد (شکل ۲):

- ۱- اثر متقابل نزدیک: زمانی رخ می‌دهد که سیلندرها به یکدیگر نزدیک باشند.
- ۲- اثر متقابل کفاب: زمانی رخ می‌دهد که یک سیلندر در کفاب سیلندر دیگر قرار گیرد.
- ۳- بدون اثر متقابل: زمانی رخ می‌دهد که سیلندرها به اندازه‌ی کافی از هم دور باشند که دینامیک جریان آن‌ها از یکدیگر مستقل باشد.

تحقیقات پیشین روی یک گروه سیلندر عمدتاً در جهت محافظت از تخریب اجسام در مقابل ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها انجام شده بود. در این راستا، محققین یکی از موثرترین روش‌های کنترل ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها، استفاده از سیلندر کنترلی (ثانویه) می‌دانستند. Strykowski و Sreenivasan (1990) با

بهره‌گیری از قرار دادن یک سیلندر کنترلی با قطر کوچک‌تر از سیلندر اصلی در ناحیه ایجاد گردابه‌ها، توانستند تا حدود زیادی تشکیل گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی را به تعویق انداخته و از میزان نیروی درگ و لیفت وارد شده بر آن بکاهند.

Abeele و Voorde (2010) به بررسی تأثیر قرار گرفتن دو سیلندر پشت سر هم که به صورت ثابت قرار داشتند، بر تشکیل گردابه‌ها و ضریب درگ در پشت سیلندرها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که قطر سیلندر قرار گرفته در پشت سیلندر جلویی بر خطوط جریان و گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر اصلی تأثیرگذار است. همچنین ضریب درگ روی سیلندر قرار گرفته در عقب کمتر از سیلندر قرار گرفته در جلوی آن است.

انجام گرفت. یافته‌های آن‌ها معمولاً در مطالعه‌های دیگران نیز مشاهده شد. مکانیزم نوسانات سیلندر پایین‌دست به دلیل پیچیدگی‌های ساختار جریان بین دو سیلندر همواره مورد بحث بوده است. ساختار جریان به عدد رینالدز و فاصله‌ی بین دو سیلندر و همچنین تغییرات مداومی که در اثر جابجایی سیلندر پایین‌دست در حال نوسان رخ می‌دهد، وابسته است.

ارتعاش ناشی از گردابه‌ها برای تک سیلندر مشاهده شد. نتایج آنها نشان داد که همگام‌سازی برای دو سیلندر در سرعت کاهشی بالاتری نسبت به تک سیلندر شروع می‌شود و منطقی‌همگام-سازی بسیار طولانی‌تر و با دامنه‌ی بزرگتر است. یافته‌ی جالب توجه Brika و Laneville (1999) این بود که کفاب سیلندر بالادست واکنش سیلندر پایین‌دست را برای فاصله‌ی طولی ۲۵ هم تحت تأثیر قرار می‌دهد، حتی با اینکه این آزمایش در تونل باد

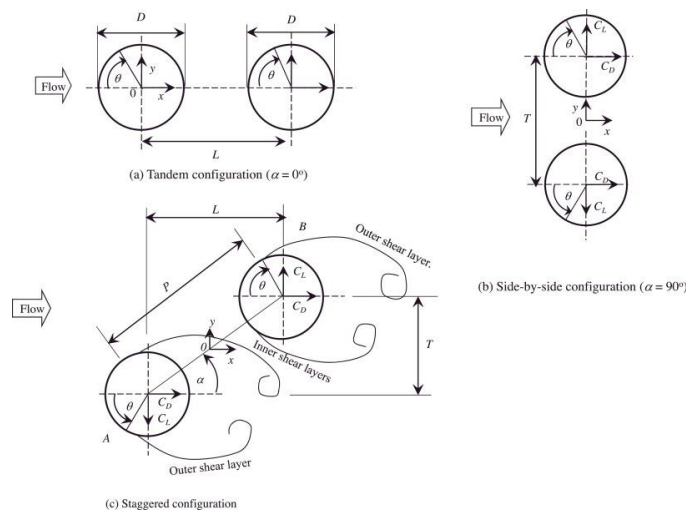
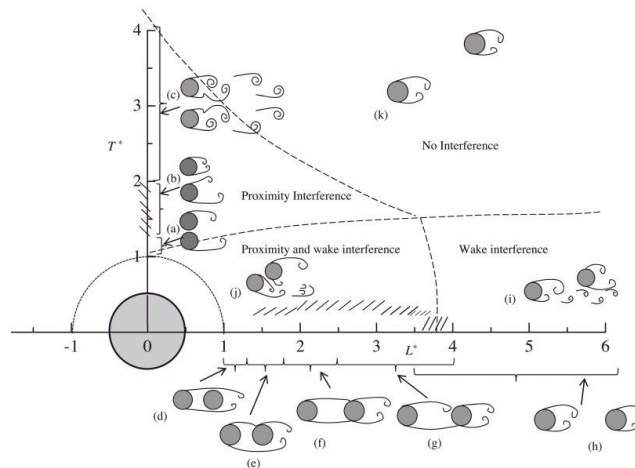


Fig. 1- Arrangement of circular cylinders in cross-flow: (a) tandem, (b) side-by-side, and (c) staggered (Zdravkovich (1987)

شکل ۱- دسته بندی اثر متقابل رژیم‌های جریان (منتشر شده توسط Zdravkovich, 1987)



شکل ۲- دسته بندی اثر متقابل رژیم‌های جریان (منتشر شده توسط Zdravkovich, 1987)

Fig. 2- Flow-induced vibration experimental setup. Shaded areas indicate bistable flow regions. Modified from Zdravkovich (1987).

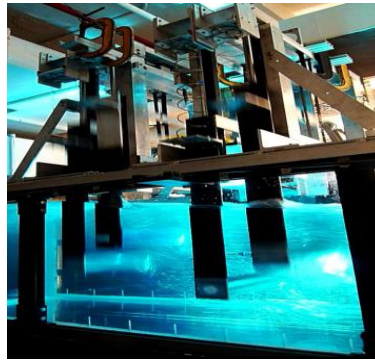


Fig. 3- Vortex Hydro Energy completed the first 4-cylinder VIVACE converter- University of Michigan

شکل ۳- دستگاه مبدل گردابه دانشگاه میشیگان

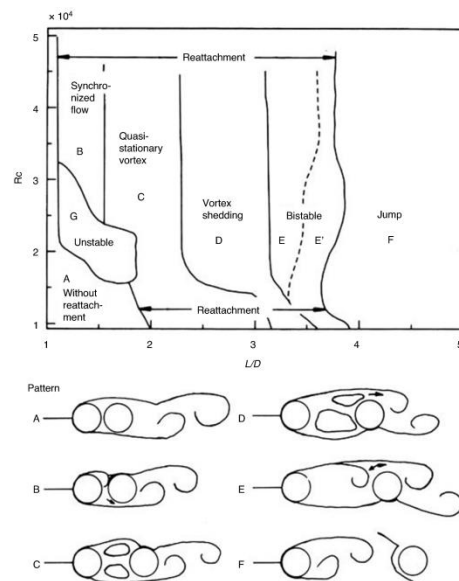


Fig. 4- Classification of flow patterns for two tandem circular cylinders in cross-flow, as a function of the longitudinal center-to-center pitch ratio and Reynolds number

شکل ۴- طبقه‌بندی الگوی جریان برای دو سیلندر استوانه‌ای پشت سرهم در مقطع عرضی به صورت تابعی از L/D نسبت فاصله‌ی طولی مرکز به مرکز دو سیلندر و عدد رینالدر

کفاب باشد، و در عین حال، ساختار ورتکس ناپایدار نقش مهمی در حفظ ساز و کار ارتعاش ناشی از کفاب بازی می‌کند (Assi et al., 2010). شکل (۵) نمایش شماتیکی از ساختار گردابه‌ها را نمایش می‌دهد. اگرچه تلاش‌های بسیاری شده است تا به لحاظ نظری ساز و کار ارتعاش ناشی از کفاب توضیح دهد، ولی تاکنون هیچ توضیح کاملاً رضایت بخشی ارائه نشده است. (Assi et al. & 2006) (2010) در مورد ترم گالوپینگ ناشی از کفاب تردید داشتند چرا که بر این باور بودند یک نیروی بازگرداننده هیدرودینامیکی نقش مهمی در واکنش سیلندر پایین‌دست در کفاب سیلندر بالادست ایفا می‌کند. نیروی بازگرداننده باعث بازگشت سیلندر به جایگاه اصلی خود می‌شود و این می‌تواند به‌عنوان عاملی برای پایداری سیلندر در نظر گرفته شود نه ناپایداری آن. آن‌ها استفاده از این ترم را تنها محدود به رژیم‌های کردند که در آن اثر متقابل ساختار گردابه‌ها بین

Assi et al., (2010) آزمایش‌هایی برای بررسی ساز و کار ارتعاش ناشی از کفاب (WIV) سیلندر پایین‌دست در کفاب یک سیلندر ثابت انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که دامنه‌ی نوسانات همچنان به افزایش ادامه خواهد داد حتی اگر فرکانس نوسانات بیش از فرکانس طبیعی سیستم شود. علاوه بر این، با از بین بردن جریان گردابه‌های بالادست با استفاده از صفحات و آرام‌کننده‌های جریان، آن‌ها اثر گردابه‌ها را بر ارتعاش ناشی از کفاب بررسی کرده و متوجه شدند که سیلندر پایین‌دست یک ارتعاش ناشی از گردابه‌ها معمولی را تجربه می‌کند. بر اساس مشاهدات، ارتعاش ناشی از کفاب یک پدیده‌ی تشدید شونده و یک نوع کفاب مستقل از حرکت ناشی از جریان نیست. آن‌ها پیشنهاد دادند که مکانیزم کفاب جایگزین که اولین بار توسط Zdravkovich (1977) پیشنهاد داده شد، می‌تواند متقاعد کننده‌ترین تشریح برای ارتعاش ناشی از

حال نوسان با استفاده از دو روش محاسبه می‌شود: (۱) یک مبدل کابلی (پتانسیومتر) و (۲) از طریق رمزگذاری موتور/ژنراتور در سیستم پی تی او (Power take-off (PTO) که عبارت است از توان کشی از موتور به منظور راه‌اندازی دستگاه‌هایی مانند وینچ، جک‌های هیدرولیکی، کمپرسی‌های کوچک و غیره، که این امر به-وسیله‌ی محور تواندهی انتهایی تراکتور مقدر است که توان مورد نیاز خود را از موتور دریافت کرده که به‌صورت کاملاً مکانیکی کار می‌کند و شامل تعدادی چرخ دنده است) اندازه‌گیری شد. ولتاژ مستقیماً با اتصال ژنراتور به سیستم داده‌برداری انجام می‌شود. در هر آزمایش، پس از اینکه حالت پایدار حاصل شد، به مدت ۶۰ ثانیه داده‌برداری انجام می‌شود. برای نقشه‌های دامنه، ۶۰ عدد از بزرگترین مجموع مربعات، چه مثبت چه منفی، داده‌برداری شده‌اند. فرکانس نوسانات حقیقی f_{osc} نیز توسط تبدیل سریع فوریه (Fast Fourier Transform) برای یک سیگنال خاص محاسبه شده است.

۲- نوسان کننده‌ها

شکل ساده‌ی شماتیکی از مبدل گردابه یک تک سیلندر در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. بخش‌های مختلف این مدل عبارتند از: یک سیلندر صلب با قطر D و طول L ، دو فنر خطی نگهدارنده به سختی $\frac{K_{spring}}{2}$ و میرایی حاصل از مکانیزم انتقال و PTO_{system} سیلندر با محور خود در جهت Z قرار می‌گیرد، که عمود بر سرعت جریان U است که در جهت x می‌باشد. مبدل ساده متشکل از یک درجه آزادی، نوسان‌گر با جرم میرایی فنر و دو سیلندر دایره‌ای ساده می‌باشد که از دو طرف توسط فنر معلق می‌باشند. جرم نوسان کننده m_{osc} شامل جرم سیلندر، یک سوم جرم فنر و جرم معادل تسمه‌ها و قرقره‌ها و همه قطعات در حال نوسان از جمله سیستم V_{CK} می‌باشد. میرایی شامل دو جزء می‌باشد: انتقال مکانیکی میرایی سیستم است که از دست رفتن انرژی است و میرایی اضافه شده برای بهره‌برداری از انرژی است. در این تحقیق، تمام میرایی‌ها، متشکل از میرایی سازه، توسط سیستم V_{CK} فراهم می‌شود که در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. میرایی سیستم برای هر ترکیب جرم و سختی برای رسیدن به $\zeta_{structure}=0.02$ متنوع است. این دستگاه همچنین دارای یک سیستم قدرت پی تی او متشکل از یک منبع حرارتی برای اتلاف انرژی تولید شده می‌باشد. سیستم از تعامل آب و سازه تحریک شده و از طریق نیروهای سهمیه توسط حرکت مایع به سیلندر اعمال می‌شود. سیلندر در جهت y نوسان می‌کند که عمود بر محور خود (جهت Z) و سرعت جریان (جهت x) می‌باشد. نمونه‌ی واقعی مبدل‌های گردابه دو سیلندر نیز در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. هر کدام از دستگاه‌ها می‌توانند روی ریل حرکت کرده و در فاصله‌ی مناسب طولی بین دو سیلندر تنظیم شوند. فاصله‌ی عمودی بین سیلندرها را نیز می‌توان با نصب سیستم فنر، که قابل افزایش برای فواصل $0.25/0.4$ اینچی (۰/۶۴ سانتی‌متری) می‌باشد، تنظیم کرد. مشخصات یک مبدل گردابه برای دو سیلندر در جدول (۱) آورده شده است. سختی فنر و میرایی سیستم با آزمون‌های تست میرایی آزاد در هوا

کفاب بالادست و سیلندر پایین دست باعث نوسان سیلندر پایین دست شده باشد. همان‌گونه که اشاره شد، ساختار جریان دو سیلندر که هر دو در حال نوسان باشند بیشترین پیچیدگی را در بین سه وضعیت اشاره شده دارد و تا به امروز مطالعه‌های بسیار معدودی در این راستا صورت گرفته است. Sun et al (2015) با بررسی دو سیلندر همسان پشت سرهم، که هر دو سیلندر مجاز به نوسان در جهت جریان بودند، با فواصل $L/D=1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0$ و 6.0 (که در آن L فاصله‌ی مرکز به مرکز دو سیلندر و D قطر سیلندر می‌باشد) چهار رژیم را مشاهده کردند. در رژیم ۱ ($L/D \leq 1.5$) هر دو سیلندر گالوپینگ را تجربه می‌کنند و سیلندر پایین دست دامنه‌ی ارتعاشات کوچکتری نسبت به سیلندر بالادست دارد. در رژیم ۲ ($1.5 < L/D < 2.5$) گالوپینگ بزرگتری برای سیلندر بالادست نسبت به پایین دست در سرعت‌های کاهشی (U_r) کمتر رخ می‌دهد و برعکس آن در U_r بزرگتر حاکم است. در رژیم ۳ ($2.5 < L/D < 3.0$) دامنه‌ی ارتعاش سیلندر پایین دست بزرگتر از سیلندر بالادست است. در این وضعیت اتصال مجدد لایه‌ی برشی سیلندر بالادست در جلوی سطح سیلندر پایین دست رخ می‌دهد. رژیم $(L/D > 4)$ لرزش‌های کوچک برای سیلندر پایین دست ناشی از گردابه‌های همرفتی از سیلندر بالادست می‌باشد و لرزشی برای سیلندر بالادست مشاهده نشده است. با توجه به اهمیت آرایش چند سیلندری، هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی تغییرات در مقدار توان مهار شده در منطقه‌ی گالوپینگ برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این بخش تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده شده معرفی شده است و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و داده‌برداری به تفسیر آمده است.

۱- کانال

تمامی آزمایش‌های انجام شده در این مقاله در کانالی (LTFSW) در آزمایشگاه دانشگاه میشیگان (MRELab (Marine Renewable Energy Laboratory) انجام شد.

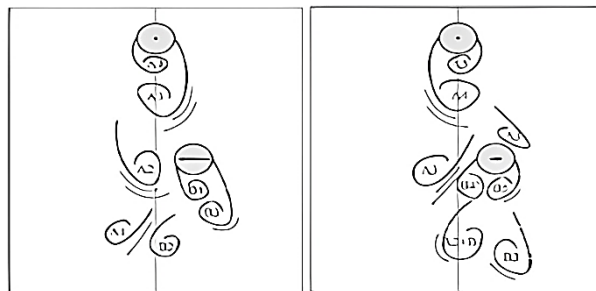
مقطع مورد آزمایش دارای $2/44$ متر طول، یک متر عرض و از جنس پلکسی گلس بوده که قابلیت مشاهده توسط دو لیزر پنج وارگون به کمک ذرات آلومینیوم اکسید 100 میکرومتر را فراهم می‌نماید. برای انجام این آزمایش‌ها عمق مقطع مورد آزمایش $1/17$ متر بوده و ماکزیمم سرعت $1/35$ متر در ثانیه که برای ایمنی در مقابل ناپایداری گالوپینگ محدود می‌باشد، انتخاب گردید. این کانال حدود 10000 گالن آب را تا سرعت $1/4$ متر در ثانیه توسط پروانه‌ی طراحی شده با یک موتور القایی 20 اسب بخاری در سیستم به چرخش در می‌آورد (شکل ۶-ب). آزمایش‌ها توسط دو سیلندر زیر از جنس آلومینیوم با قطر $8/89$ سانتی‌متر ($3/5$ اینچ) و طول $91/4$ سانتی‌متر (36 اینچ) انجام شد. جابه‌جایی سیلندر در

آزمایشگاه دانشگاه میشیگان صورت گرفت (Bernitsas and Raghavan., 2005 & Park, 2012). در این روش دو نوار زبر موازی با محور سیلندر در تمام طول سیلندر به سیلندرها چسبانده شد. ضخامت نوار تقریباً مساوی با ضخامت لایه مرزی بوده و به شدت بر حرکت ناشی از جریان تأثیر می‌گذارد. عرض نوار ۰/۵ اینچ (۱/۲۷ سانتی‌متر) بوده که ۱۶ درجه از سطح سیلندر به قطر ۳/۵ اینچی (۸/۸۹ سانتی‌متری) را تحت پوشش قرار می‌دهد.

اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، از سیستم فنرهای مجازی به جای فنرها و دمپرهای واقعی در آزمایش‌ها برای تولید توان استفاده شده است.

۳- کنترل آشفتگی غیر فعال PTC(Passive Turbulence Control)

برای افزایش حرکت ناشی از جریان سیلندرها و تولید انرژی جنبشی بیشتر از روش زبر کردن سیلندر استفاده شد. این کار به صورت معرفی دو نوار زبر و مطالعه‌ها و آزمایش‌های گسترده در



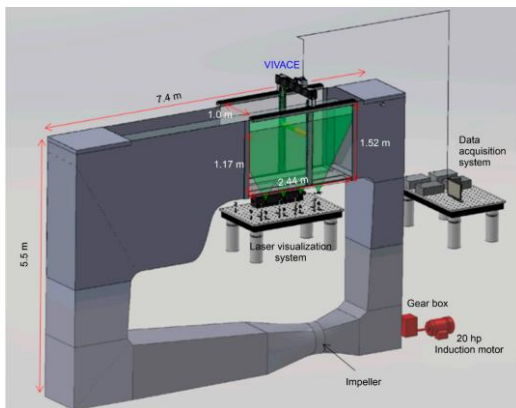
(ب)

(الف)

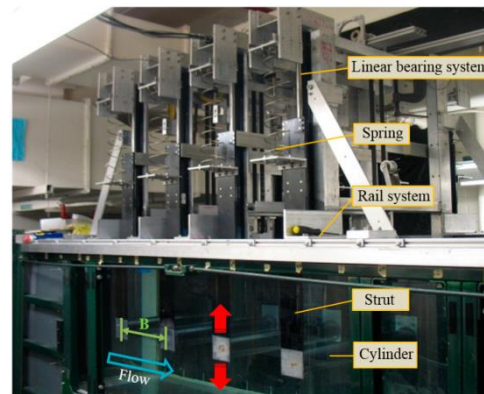
Fig. 5- Schematic figure of interaction effect of vortices structure (a) Suppressor (b) Enhancer of vibration

شکل ۵- شکل شماتیک اثر متقابل ساختار گردابه‌ها:

(الف) سرکوب کننده (ب) افزایش دهنده‌ی ارتعاش ناشی از کفاب سیلندر پایین دست



(ب)



(الف)

Fig. 6- (a) Two-oscillator Converter with Vck mounted in the LTFSW Channel (side view) (b) Schematic of the LTFSW Channel and two-cylinder Oscillator.

شکل ۶- (الف) شکل واقعی و (ب) شکل شماتیک کانال LTFSW

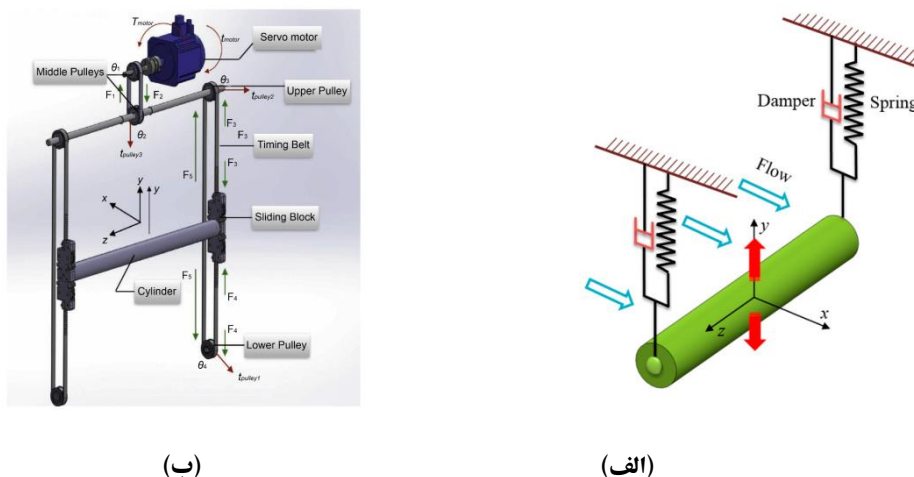


Fig. 7- (a) Schematic of virtual VIVACE convertor (b) Schematic of a single-cylinder VIVACE (Atashi et al., 2019; Kim et al., 2021)
 شکل ۷- (الف) شکل شماتیک یک تک سیلندر متصل به فنر و (ب) شکل شماتیک مبدل گردابه تک سیلندر (Atashi et al., 2019; Kim et al., 2021)

جدول ۱- اجزای مبدل گردابه برای دو سیلندر

Table 1- Characteristics of two cylinders in tandem

Parameters	Symbol	1st device	2nd device
Diameter (m)	D	0.0889	0.0889
Length (m)	L	0.914	0.914
Oscillating mass (kg)	m	7.286	7.286
Spring Const. (N/m)	k	1200-400	1200-400
Damping ratio	ζ	0.24	0.24
Total Damping (Ns/m)	C	8.55	8.55
Natural Freq. in water	$F_{n,w}$	1.67 ~ 0.97	1.67 ~ 0.97
Added Mass (kg)	m_d	5.425	5.425
Mass ratio	m^*	1.342	1.342

پرش‌ها در مقادیر توان مهار شده برای مقادیر مختلف سختی فنر K و میرایی نسبی $\zeta_{harness}$ در جدول (۳) قابل مشاهده است. از اهداف دیگر این تحقیق بررسی علت حضور افت و پرش، یافتن توضیحی برای حضور این افت و پرش در نمودار توان می‌باشد. برای بررسی این موضوع مشاهدات تکمیلی‌ای در آزمایشگاه دانشگاه میشیگان انجام گرفت. در سری جدید آزمایش‌ها با استفاده از دوربین سونی مدل آر ایکس II-۱۰ و اضافه کردن ذرات آلومینیوم اکسید فیلمبرداری دقیق‌تر و با وضوح بیشتر از هر ران صورت گرفت. روش انجام آزمایش‌ها به این صورت می‌باشد که با روشن کردن پمپ آب وارد کانال شده و در حین انجام آزمایش‌ها آب در کانال سیرکولیت می‌شود. تمامی تنظیمات پارامترهای آزمایش‌ها اعم از: سرعت، سختی، میرایی نسبی و دامنه‌ی نوسانات توسط سیستم V_{ck} تنظیم می‌گردد. جرم نسبی سیلندر نیز با قرار دادن سیلندر در غلاف‌های متعدد قابل تغییر می‌باشد. با برخورد جریان به سیلندر در جلوی سیلندر گردابه‌هایی ایجاد شده که این گردابه‌ها ابتدا سبب

شکل (۸) و جدول (۲) جزئیات نوار زبر P۶۰ قابل دسترس تجاری) را که در این تحقیق از آن‌ها استفاده شده است به جزئیات نشان می‌دهد.

هدف اصلی از انجام آزمایش‌ها، تولید حداکثر توان با راندمان بالا می‌باشد. بدین منظور آزمایش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری حرکات جریان ناشی از دو سیلندر پشت سر هم با پارامترهای مختلف مانند سختی فنر، میرایی، نسبت فاصله مرکز به مرکز (L/D) و نسبت جرم ($m^*=۱.۳۴۲$) انجام شد.

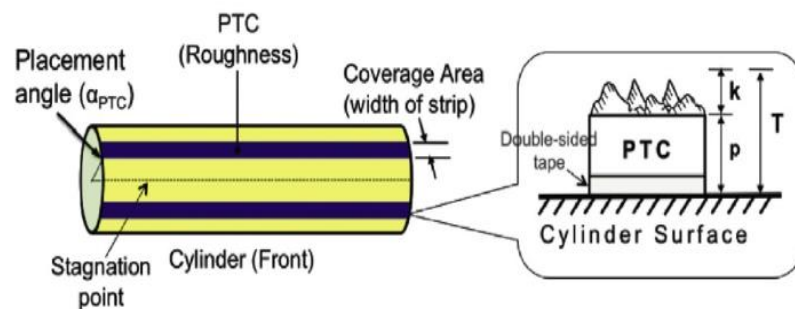
بخشی از این آزمایش‌ها که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته شده است، در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد. این آزمایش‌ها در محدوده‌ی سرعت جریان (U) بین ۰.۳۵ و ۱.۳۵ متر در ثانیه و عدد رینولدز $۱۰^۴ \leq Re \leq ۱۰^۵$ که در رژیم TrSL3 می‌افتد، قرار می‌گیرد. با ارزیابی نتایج حاصل از توان مهار شده این نتیجه حاصل شد که در محدوده‌ی سرعت $۰.۹ < U < ۱.۳$ متر در ثانیه معمولاً یک افت و یک جهش در توان مهار شده مشاهده می‌گردد. این افت‌ها و

افزایش در مقدار L/D افت و جهش در نمودار، نمایان خواهد شد شکل (۹-ب و ج). بنابراین فرضیه‌ی این تحقیق این خواهد بود که با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر با آرایش پشت سرهم، افت و پرش در نمودار توان ظاهر گشته و رو به افزایش خواهد بود. برای نسبت فواصل کوچک (تقریباً $1/8 < L/D < 1/2$) Zdravkovich (1987) یا $L/D < 2$ و Yui و Zhou (2006) بسته به محدوده‌ی عدد رینالدز) دو سیلندر مانند یک بدنه‌ی تک و یا در اصطلاح "بدنه‌ی کشیده شده" (extended-body) رفتار می‌کنند، یعنی سیلندر پایین‌دست در داخل منطقه‌ی تشکیل گرداب سیلندر بالادست قرار می‌گیرد (Ishigai et al (1972) و لایه‌های برشی مجزا از سیلندر بالادست در اطراف سیلندر پایین دست، پیش از اینکه گردابه‌های فون کارمن متناوباً پشت سیلندر پایین دست چرخش کنند، جریان (Von Kármán vortices) یافته و آنرا محصور می‌کنند. اما، برای نسبت فواصل متوسط (تقریباً $3/8 - 3/4 < L/D < 1/2 - 1/8$) Zdravkovich (1987) یا $2 < L/D < 5$ (ژو و یو، ۲۰۰۶)، بسته به محدوده عدد رینالدز)، دو سیلندر به میزان کافی از یکدیگر فاصله دارند تا لایه‌های برشی جریان یافته از سیلندر بالادست نتواند سیلندر پایین‌دست را محصور کند. شکل (۱۰) دسته‌بندی الگوی جریان برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم را نشان می‌دهد. تحقیق حاضر در دو گروه اول دسته بندی می‌شود.

نوسان سیلندر بالادست شده و به دلیل اتصال سیلندر به فتر این نوسانات به فتر منتقل می‌گردد. سیلندر پایین‌دست نیز به دلیل قرار گرفتن در کفاب سیلندر بالادست شروع به نوسان می‌کند. برای مشاهده‌ی بهتر این نوسانات ذرات آلومینیوم اکسید به جریان اضافه شده که با تاباندن نور لیزر الگوی جریان قابل مشاهده و فیلمبرداری می‌باشد. سیستم V_{ck} در ران‌های یک دقیقه‌ای سرعت و دامنه‌ی نوسانات هر سیلندر را ضبط کرده و محاسبات تکمیلی برای برآورد توان مهار شده انجام گردید. در بخش بعدی نتایج حاصل از انجام مجدد آزمایش‌ها آورده شده است.

نتایج و بحث

همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، سه مجموعه از آزمایش‌ها با سه نسبت فاصله L/D مختلف و سه مقدار سختی فتر K مختلف (که مقادیر بهینه مربوط به هر فاصله می‌باشد) انتخاب شده‌اند. اشکال (۹-الف، ب و ج) توان مهار شده را به‌عنوان تابعی از سرعت جریان نشان می‌دهند. خط مربعی توان مهار شده برای یک تک سیلندر، خط دایره‌ای، خط مثلثی و خط مثلثی وارونه نیز به ترتیب توان مهار شده برای سیلندر بالادست، سیلندر پایین دست و مجموع انرژی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۹-الف) نشان می‌دهد برای نسبت فاصله $L/D=1.57$ ، سختی فتر $K=1200$ ، که $K_{sharness}=0.24$ هیچ افتی در نمودار توان برای محدوده‌ی مذکور وجود ندارد. با



8- Configuration of the passive turbulence control (PTC) on the cylinder. Fig

شکل ۸- چیدمان نوار زبر بر روی سیلندر

جدول ۲- جزئیات نوار زبر

Table 2- PTC parameters (P60)

Item	Index	Value
Strip placement angle	α_{PTC} (degree)	20
Angular coverage of strip	θ (degree)	16
Sandpaper thickness	P(mm)	0.586
Average grit height	K(mm)	0.26
Total thickness of strip	$T=P+k$ (mm)	0.847

جدول ۳- پارامترهای مورد آزمایش

Table 3- Experiment parameters

Phase	Velocity (m/s)	ζ_{harness}	Spring Const. (N/m)	Length ratio (L/D)
-	-	0.24	1200	1.57
Jump	1.06	0.24	800	2.01
Drop	1.15	0.24	400	2.57

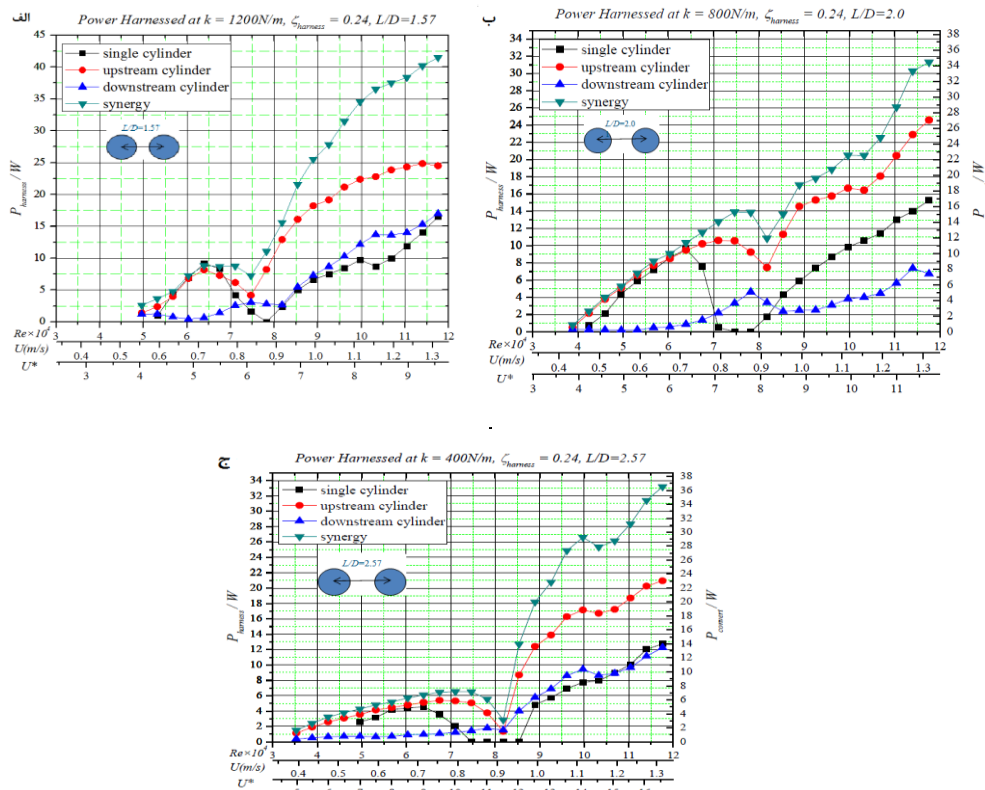


Fig. 9- Harnessed Power curves for $m^* = 1.343$ and $\zeta_{\text{harness}} = 0.24$ (a) with $K = 1,200$ N/m spacing $L/D = 1.57$ (b) with $K = 800$ N/m spacing $L/D = 2.01$ (c) with $K = 400$ N/m spacing $L/D = 2.57$

شکل ۹- نمودار توان مهار شده در مقابل سرعت الف) $K=1200$ نیوتن در متر $L/D=1.57$ ب) $K=800$ نیوتن در متر $L/D=2.01$ ج) $K=400$ نیوتن در متر $L/D=2.57$

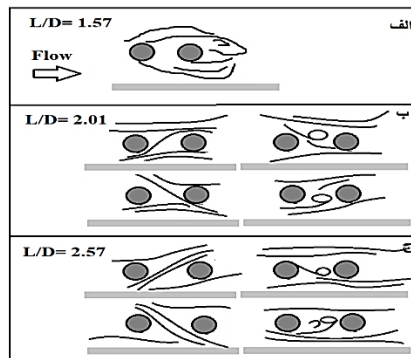


Fig. 10- Simplified classification scheme of the flow patterns for two tandem circular cylinders in cross-flow, from (Xu and Zhou, 2004) and (Zhou and Yiu, 2006).

شکل ۱۰- شکل شماتیک دسته‌بندی ساده شده‌ی الگوی جریان برای دو سیلندر با آرایش پشت سرهم

۱۱-ب و ج). باز هم، بخش بزرگی از نیروی عرضی دینامیک سیال سبب بازگشت سیلندر پایین دست به آرایش پشت سرهم می شود. این چرخه برای چندین بار تکرار خواهد شد. در این وضعیت می توان این نتیجه را گرفت که برای نسبت فاصله $L/D=1.57$ به دلیل اینکه فاصله کم بوده و همانطور که اشاره شد، دو سیلندر مانند یک سیلندر تک عمل می کنند، پس افت و به دنبال آن پرشی در مقدار توان مهار شده مشاهده نمی شود. اما، با افزایش نسبت فاصله L/D الگوی جریان تغییر نموده و به سبب این الگوی جریان در محدوده سرعت مذکور تغییرات ناگهانی در میزان توان مهار شده به وجود می آید. با مراجعه به نمودارهای شکل (۹) می توان این تغییرات ناگهانی در میزان توان را مشاهده نمود.

شکل (۱۲) نسبت دامنه‌ی حرکت دو سیلندر را در مقابل زمان برای مدت ۳۰ ثانیه نشان می دهد. خط قرمز دامنه‌ی مربوط به سیلندر بالادست و خط آبی دامنه‌ی مربوط به سیلندر پایین دست می باشد. این نمودار مربوط به سرعت معادل $1/1$ متر در ثانیه، یعنی اندکی قبل از وقوع افت، می باشد. شکل ۱۳ نیز نسبت دامنه‌ی حرکت دو سیلندر را در مقابل زمان (۳۰ ثانیه) برای سرعت معادل $1/15$ متر در ثانیه نشان می دهد. در این نمودار نیز، خط قرمز دامنه‌ی مربوط به سیلندر بالادست و خط آبی دامنه‌ی مربوط به سیلندر پایین دست می باشد. این نمودار مربوط به سرعتی می باشد که در آن افت رخ داده است. همان طور که در شکل (۱۲) دیده می شود، حرکت دو سیلندر در سرعت 1.1 متر در ثانیه، سرعت قبل از وقوع افت، برای $K=1200$ نیوتن بر متر، $C_{\text{harness}}=0.24$ و $L/D=2.57$ ، غیر هم فاز می باشد. اما همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده می شود، در سرعت $1/15$ متر در ثانیه و ثابت بودن بقیه‌ی پارامترهای مورد آزمایش حرکت دو سیلندر هم فاز خواهد بود. این حرکت هم فاز سبب خواهد شد که سیلندر پایین دست کاملاً تحت تأثیر اثر متقابل سیلندر بالادست باشد. می توان با مشاهده‌ی این دو شکل این نتیجه را گرفت که حرکت غیر هم فاز سیلندر بالادست اثر متقابل شدیدی بر سیلندر پایین دست نخواهد گذاشت. بنابراین، ناپایداری در گالوپینگ مشاهده نمی شود. پس، نمودار توان مهار شده در مقابل سرعت به روند افزایشی خود ادامه خواهد داد و اما، در سرعت $1/15$ متر در ثانیه، به دلیل اثر متقابل شدید دو سیلندر در اثر حرکت هم فاز، منطقه‌ی گالوپینگ ناپایدار گشته و متعاقب آن افت در میزان توان مهار شده مشاهده می گردد.

برای انجام مشاهدات دقیق تر، دوربین سونی مدل آر ایکس II-۱۰ برای ضبط ویدئوهای یک دقیقه‌ای از هر آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، دو لیزر پنج وارگون به کمک ذرات آلومینیوم اکسید 100 میکرومتر امکان مشاهده‌ی جزئیات آزمایش را فراهم نمود. با استفاده از این روش، می توان مسیر و جهت هر ذره را به وضوح مشاهده نمود. پس از فیلم برداری به منظور تحلیل نتایج و پردازش پدیده، هر فیلم به تعدادی فریم (بسته به نیاز به وضوح تصویر و سرعت جریان) تقسیم گردید. لازم به ذکر است؛ در این سری آزمایش ها، هر دو استوانه به صورت هم فاز در نوسان می باشند. شکل (۱۱) الگوی جریان حاصل از داده برداری با دوربین پیشرفته اطراف دو سیلندر پشت سرهم را نشان می دهد. مشاهده‌ی الگوی جریان نشان می دهد در بیشتر موارد برای نسبت فاصله $L/D=1.57$ الگوی جریان مشابه شکل (۱۱-الف) خواهد بود. همان طور که مشاهده می شود، هیچ خطوط جریانی از بین دو سیلندر عبور نمی کند و رفتار دو سیلندر، صرف نظر از جهت حرکت هر دو سیلندر رو به بالا یا پایین، به مثابه‌ی یک تک سیلندر است.

در اشکال (۱۱ ب و ج) لایه‌ی برشی سیلندر بالایی مستقیماً اثر متقابل بر سیلندر پایینی دارد. بدین معنا که بسته به فاصله‌ی بین دو سیلندر، بخشی یا تمامی سیلندر پایین دست در کفاب سیلندر بالادست مستغرق خواهد شد. در بیشتر مواقع، گردابه‌های حاصل از سیلندر بالادست با سیلندر پایین دست برخورد نخواهند کرد، بلکه، از فضای بین دو سیلندر عبور خواهند کرد. این نوع اثر متقابل بین دو سیلندر غالباً بسیار قوی بوده و باعث تقویت نوسانات ناشی از جریان گردابه از طریق افزایش ضریب درگ و ضریب بالابرنده می نماید.

وقتی که هر دو سیلندر شروع به پایین رفتن می کنند، الگوی جریان مطابق شکل (۱۱ ب و ج) خواهد بود. جریان از پایین سیلندر بالادست به سمت سیلندر پایین دست حرکت می کند و سیلندر پایین دست را به سمت پایین می کشد تا دو سیلندر آرایش پشت سرهم بودن خود را حفظ کرده و حرکت زیگزاگی نسبت بهم نداشته باشند. این الگو تا زمانی که هر دو سیلندر به پایین ترین مکان خود در کانال برسند ادامه می یابد. سپس، سیلندر بالادست تغییر جهت داده و شروع به حرکت به سمت بالا می نماید. در این زمان یک گرداب از پایین سیلندر بالادست و بین دو سیلندر جریان می یابد. بنابراین الگوی جریان کاملاً تغییر شکل می یابد (شکل

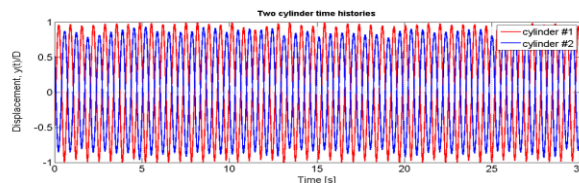


Fig. 11- Schematic flow pattern around two tandem cylinders for spacing (a) $L/D = 1.57$ (b) $L/D = 2.01$ (c) $L/D = 2.57$

شکل ۱۱- شکل شماتیک الگوی جریان اطراف دو سیلندر با آرایش پشت سرهم الف) $K=1200$ نیوتن در متر $L/D=1.57$ ب) $K=800$ نیوتن در متر $L/D=2.01$ و ج) $K=400$ نیوتن در متر $L/D=2.57$

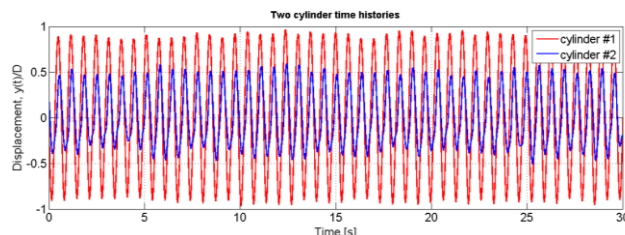


Fig. 12- Time history for two tandem cylinders before drop $U = 1.10$ m/s, $K = 1,200$ N/m, $\zeta_{\text{harness}} = 0.24$ and $L/D = 2.57$ (for 30 seconds)

شکل ۱۲- نمودار دامنه-زمان برای دو سیلندر پشت سرهم در سرعت ۱.۱ متر در ثانیه ($k=1200$ نیوتن بر متر، $\zeta_{\text{harness}}=0.24$ و $L/D=2.57$)

سبب اثر متقابل شدید دو سیلندر گشته و متعاقب آن سبب ناپایداری در منطقه‌ی گالوپینگ و افت در نمودار توان مهار شده می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله از نتایج پایان نامه دکتری نویسنده اول و با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده دوم (۹۶/۳/۰۲/۱۶۶۷۰) و با استفاده از امکانات آزمایشگاهی مرکز مطالعات انرژی‌های نو دریایی (MRELab) واقع در دانشگاه میشیگان کشور آمریکا تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی میکنند. ضمناً از حمایت معنوی قطب علمی "بهسازی و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی" تشکر و قدردانی میگردد.

نتیجه‌گیری

۱- استفاده از دو سیلندر به جای یک تک سیلندر میزان توان مهار شده را افزایش داده و الگوی جریان اطراف سیلندر را پیچیده‌تر می‌نماید.

۲- برای $L/D=1.57$ ، $k=1200$ نیوتن بر متر و $\zeta_{\text{harness}}=0.24$ افت و یا پرشی در نمودار توان مهار شده نسبت به سرعت مشاهده نمی‌شود. ولی، برای ۲ و $L/D=2.57$ ، $k=1200$ نیوتن بر متر و $\zeta_{\text{harness}}=0.24$ در محدوده‌ی سرعت $0.9 < U < 1.3$ متر در ثانیه افت و همچنین پرش در نمودار توان مهار شده نسبت به سرعت مشاهده می‌شود. نحوه‌ی الگوی جریان در نسبت فواصل بالاتر سبب پیچیدگی الگوی جریان و متعاقباً بروز افت و پرش در نمودار توان مهار شده گشته است.

۳- در سرعت $1/1$ متر در ثانیه حرکت دو سیلندر نسبت به هم غیر هم فاز بوده ولی، برای سرعت $1/15$ متر در ثانیه (سرعت وقوع افت) این حرکت به شکل هم فاز خواهد شد. پس حرکت هم فاز

References

- 1- Alam, M.M., Moriya, M. and Sakamoto, H., 2003a. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. *Journal of Fluids and Structures*, 18(3-4), pp.325-346.
- 2- Alam, M.M., Moriya, M., Takai, K. and Sakamoto, H., 2003b. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(1-2), pp.139-154.
- 3- Assi, G.D.S., Meneghini, J.R., Aranha, J.A.P., Bearman, P.W. and Casaprima, E., 2006. Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders. *Journal of fluids and structures*, 22(6-7), pp.819-827.
- 4- Assi, G.R., Bearman, P.W. and Meneghini, J.R., 2010. On the wake-induced vibration of tandem circular cylinders: the vortex interaction excitation mechanism. *Journal of Fluid Mechanics*, 661, pp.365-401.
- 5- Atashi, V., Ghomeshi, M., Sajjadi, S. M., & Bernitsas, M. (2019). Effect of spacing on harnessed power for two tandem cylinders. *Irrigation Sciences and Engineering*, -. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.20430.1476>
- 6- Bearman, P.W., 2011. Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 27(5-6), pp.648-658.

- 7- Bearman, P.W., 1984. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. *Annual Review of Fluid mechanics*, 16(1), pp.195-222.
- 8- Bernitsas, M.M. and Raghavan, K., 2005a. Fluid motion energy converter, international. Provisional Patent Application. *US Patent and Trademark Office Serial*.
- 9- Blevins, R.D. and Vibration, F.I., 1990. Van Nostrand Reinhold. *New York*, 34.
- 10- Chang, C.C.J., Kumar, R.A. and Bernitsas, M.M., 2011. VIV and galloping of single circular cylinder with surface roughness at $3.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$. *Ocean Engineering*, 38(16), pp.1713-1732.
- 11- Govardhan, R. and Williamson, C., 2000. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 420, pp.85-130.
- 12- Govardhan, R.N. and Williamson, C.H.K., 2006. Defining the 'modified Griffin plot' in vortex-induced vibration: revealing the effect of Reynolds number using controlled damping. *Journal of Fluid Mechanics*, 561, pp.147-180.
- 13- Igarashi, T. 1981. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem: 1st report. *Bulletin of JSME*, 24(188), 323-331.
- 14- Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K., & Cho, K. 1972. Experimental study on structure of gas flow in tube banks with tube axes normal to flow: Part 1, Karman vortex flow from two tubes at various spacings. *Bulletin of JSME*, 15(86), 949-956.
- 15- Kim, S., Alam, M. M., Sakamoto, H., & Zhou, Y. 2009. Flow-induced vibrations of two circular cylinders in tandem arrangement. Part 1: Characteristics of vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(5-6), 304-311.
- 16- Laneville, A. and Brika, D., 1999. The fluid and mechanical coupling between two circular cylinders in tandem arrangement. *Journal of Fluids and Structures*, 13(7-8), pp.967-986.
- 17- Ljungkrona, L., Norberg, C.H. and Sundén, B., 1991. Free-stream turbulence and tube spacing effects on surface pressure fluctuations for two tubes in an in-line arrangement. *Journal of Fluids and Structures*, 5(6), pp.701-727.
- 18- Park, H., 2012. *Mapping of passive turbulence control to flow induced motions of circular cylinders* (Doctoral dissertation, University of Michigan).
- 19- Parkinson, G., 1989. Phenomena and modelling of flow-induced vibrations of bluff bodies. *Progress in Aerospace Sciences*, 26(2), pp.169-224.
- 20- Sarpkaya, T., 2004. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of fluids and Structures*, 19(4), pp.389-447.
- 21- Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R., 1990. On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 218, pp.71-107.
- 22- Sun, Q., Alam, M.M. and Zhou, Y., 2015. Fluid-Structure coupling between two tandem elastic cylinders. *Procedia Engineering*, 126, pp.564-568.
- 23- Van den Abeele, F. and Voorde, J.V., 2010. Flow Induced Oscillations of Marine Risers with Wake Interference. In *Proceeding of the Comsol Conference. Paris. France*.
- 24- Williamson, C.H., 1996. Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28(1), pp.477-539.
- 25- Williamson, C.H. and Govardhan, R., 2004. Vortex-induced vibrations. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 36, pp.413-455.

-
- 26- Zdravkovich, M.M., 1977. Review of flow interaction between two circular cylinders in various arrangement. *Trans. ASME*.
- 27- Zdravkovich, M.M., 1985. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. *Journal of Sound and Vibration*, 101(4), pp.511-521.
- 28- Zdravkovich, M.M., 1987. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and Structures*, 1(2), pp.239-261.
- 29- Zhou, Y. and Yiu, M.W., 2006. Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 548, pp.17-48.

EXTENDED ABSTRACT

Uncertainty estimation of rainfall-runoff calibration process using the generalized likelihood method (GLUE) in the HBV model

M. Ahmadizadeh¹ and S. Marofi^{2*}

1- Ph.D. of Water Resources Engineering, Department of Water Science Engineering, Bu-Ali Sina University.

2*-Corresponding Author, Professor, Department of Water Science Engineering, Bu-Ali Sina University (marofi@basu.ac.ir).

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 8 May 2020

Revised: 1 June 2021

Accepted: 2 June 2021

Keywords:

Bayesian analysis, Monte Carlo, Equatability, Simulation, Shahid Rajaei Dam.

TO CITE THIS ARTICLE :

Ahmadizadeh, M., Marofi, S. (2023). 'Uncertainty estimation of rainfall-runoff calibration process using the generalized likelihood method (GLUE) in the HBV model', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 111-124. doi: 10.22055/jise.2018.14179.1106.

Abstract

The accurate determination of the amount of runoff resulting from precipitation on the surface of the watersheds is accompanied by errors due to the effect of various components, such as soil moisture, evaporation and transpiration, infiltration, and the impossibility of accurately measuring them. Therefore, the simulation of the precipitation-runoff process is associated with uncertainty. Uncertainty in calibrating models is caused by input information, model structure, and used parameters. Quantifying uncertainty is necessary for making decisions in water resource plans. One of the methods of calculating the uncertainty in the simulation process is to use Bayes's theory as the basis of calculations. In this research, an innovative method, which is a combination of Bayes analysis and the Monte Carlo method, taking into account the goodness of fit criteria, under the title of generalized similarity function, was used to calculate uncertainty. To determine the uncertainty of the parameters used in the calibration of the HBV rainfall-runoff model, the equation of daily flow entering the Shahid Rajaei dam in the Tajen catchment was used. The results showed that the mentioned method can detect uncertainty in the model. So the Nash index was obtained in the range of 0.4 to 0.68. The mentioned method is effective in identifying and introducing the co-termination theory, using a set of different parameters in the calibration of the model. So that by using the set of parameters, the same value of the goodness of fit index is obtained.

Introduction

In hydrologic studies considering and quantifying uncertainty are of high importance for applying the rainfall-runoff models. In general, the uncertainty sources of rainfall-runoff models are categorized into three major groups namely, the uncertainty of input data, model structure, and model parameters. It is crucial to quantify uncertainty to consider the future risks due to simulated data. The applied equations have multiple parameters. It is possible to quantify the uncertainty, applying the parameters and defining a likelihood function. Uncertainty analysis of models helps to investigate

their efficiency better, comprise the results and finally select the appropriate model. Different methods such as Bayesian inference, data assimilation (Moradkhani, 2005), and Bayesian model averaging are employed and developed for identifying uncertainty. One of the above-mentioned methods which are applied frequently for uncertainty estimation regarding the calibration of models is Bayesian theory. In this research, an innovative method based on the combination of Bayesian theory, Monte Carlo method, and likelihood function have used to quantify the uncertainty, namely generalized likelihood unbiased estimation. This method is based on the equatability principle. This principle suggests that various parameter sets can reach the same value in terms of the likelihood function. This principle shows that by applying the optimization and automatic methods (Soroshian, 1980, Duan et al., 1992) aiming to find the optimum solution, it is not possible to reach acceptable results, as different parameter sets may reach the same likelihood function value. Therefore, it is not logical to consider merely one optimum parameter set, and feasible parameter sets should be used in the analysis phase. With this strategy, one can consider the role of parameter uncertainty in the calibration of rainfall-runoff models. In this regard, it is also necessary to define utility constraints for assessing the calibration results to discard the inappropriate parameter sets. In the past two decades, numerous studies have been implemented, aiming to investigate uncertainty with different methods. In a study, the role of erroneous in the calibration of the rainfall-runoff model has been evaluated to quantify uncertainty with an innovative approach of Bayesian theory, and the Monte Carlo method (Beven & Binely, 1992). Finally, to quantify the uncertainty, generalized likelihood uncertainty estimation is used. It has been applied for calculating the uncertainty of modeling daily stream flow upstream of the Shahid Rajae dam in the Tajan watershed in Mazandaran province with the HBV model.

Methodology

The HBV hydrology model is a computer simulation model developed to analyze river discharge and water pollution. This method contains uncertainty that should be quantified with an appropriate method such as Bayesian inference. Bayesian inference is a method of statistical inference in which Bayes' theorem is employed to update the probability of a hypothesis as more information becomes available. Bayesian inference is a crucial technique in statistics, especially in hydrological statistics. Bayesian updating is particularly important in the dynamic analysis of a sequence of historical data such as streamflow that sheds from a watershed, as outflow.

Results and Discussion

The results showed that it is possible to quantify the uncertainty with the generalized likelihood unbiased estimation approach. Discarding the inappropriate results has been implemented by defining the constraint value of 0.5. Moreover, the Nash-Sutcliffe measure varied between 0.4 and 0.68. The results have shown that the GLUE approach is a suitable method for both quantifications of uncertainty and also an investigation of the equatability theory which states that different parameter sets can result in a similar goodness of fitness index value. The boundary of uncertainty related to extreme values is wider owing to flood events in the Tajan watershed, hence the model results are not satisfactory on days with a flood. However, it is observed that normal daily streamflow due to base flow and the recession limb of the hydrograph have better simulation outputs.

Conclusions

The results of this study showed that uncertainty analysis by applying generalized likelihood unbiased estimation can help in recognizing the role of parameter uncertainty in the calibration of the HBV rainfall-runoff model. It also resulted that the Nash-Sutcliffe efficiency index has a good performance in terms of the defined likelihood function. It is vital to choose a constraint for the rejection of inappropriate simulations. Therefore, the uncertainty of different days is quantified based on the acceptable likelihood functions and regarding the related calculations for 95% and 5%

confidence intervals. Moreover, the average value of the optimum Nash-Sutcliffe is obtained at 0.68. It is worth noting that uncertainty analysis with generalized likelihood unbiased function, not only do consider the different parameter sets, but also investigates the effect of model structures on the amount of uncertainty that rainfall-runoff models contain. The results also showed that various parameter sets may reach the same amount of efficiency function value due to the equitability principle. Hence, it is crucial to consider the equitability principle in the model simulation phase. In conclusion, by applying the abovementioned principle, one can quantify the uncertainty of rainfall-runoff models and consider its role of it in hydrologic studies.

Acknowledgments

The authors express their special thanks and gratitude to the Bu-Ali Sinal University Managers for their support in providing this research process.

References

- 1- Beven, K. and Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), pp.279-298. Beven, K.J. 2001. *Rainfall-Runoff Modeling: The Primer*. Wiley, Chichester. 488 pages.
- 2- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28(4), pp.1015-1031.
- 3- Moradkhani, H., Hsu, K.L., Gupta, H. and Sorooshian, S., 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water resources research*, 41(5).
- 4- Sorooshian, S. and Dracup, J.A., 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrology rainfall-runoff models: Correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, 16(2), pp.430-442.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

تخمین عدم قطعیت در واسنجی فرآیند بارش- رواناب روزانه با استفاده از

تابع تشابه تعمیم یافته در مدل HBV

مجتبی احمدی زاده^۱ و صفر معروفی^{۲*}

۱- دانش آموخته دوره دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی علوم آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان. marofi@basu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲

چکیده

تعیین دقیق میزان رواناب حاصل از بارش در سطح حوضه‌های آبریز، به دلیل تأثیر مؤلفه‌های مختلف، نظیر رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، نفوذ و عدم امکان اندازه‌گیری دقیق آن‌ها، توأم با خطا است. از این‌روی شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب با عدم قطعیت همراه است. عدم قطعیت در واسنجی مدل‌ها، ناشی از اطلاعات ورودی، ساختار مدل و پارامترهای به کار رفته می‌باشد. کمی‌سازی عدم قطعیت، برای تصمیم‌گیری در طرح‌های منابع آب، ضروری است. یکی از روش‌های محاسبه عدم قطعیت در فرآیند شبیه‌سازی، استفاده از تئوری بیز به عنوان پایه محاسبات است. در این تحقیق از روش ابتکاری که ترکیبی از تحلیل بیز و شیوه مونت کارلو با در نظر گرفتن معیارهای نکویی برازش است، تحت عنوان تابع تشابه تعمیم یافته در محاسبه عدم قطعیت استفاده گردید. به منظور تشخیص عدم قطعیت پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل بارش- رواناب HBV از معادله جریان روزانه ورودی به سد شهید رجایی در حوضه آبریز تجن، استفاده گردید. نتایج نشان داد روش مزبور قابلیت تشخیص عدم قطعیت در مدل را دارد. به طوری که شاخص ناش در در بازه $0/4$ تا $0/6$ به دست آمد. روش مزبور در خصوص شناسایی و معرفی نظریه همپایانی، با استفاده از دسته پارامترهای مختلف در واسنجی مدل، موثر است. به طوری که با به کارگیری دسته پارامترها، مقدار یکسانی از شاخص نکویی برازش، حاصل می‌گردد.

کلید واژه‌ها: تحلیل بیز، مونت کارلو، همپایانی، شبیه‌سازی، سد شهید رجایی.

مقدمه

با توجه به ماهیت فرآیند بارش- رواناب، امکان محاسبه دقیق رواناب، در حوضه‌های آبریز، به صورت قطعی وجود ندارد. پیچیدگی‌های فراوانی در مؤلفه‌های مختلف موثر بر فرآیند بارش- رواناب، نظیر نفوذ، ذوب برف و تبخیر و تعرق، در محاسبه رواناب در خروجی حوضه‌ها وجود دارد. از این‌روی با استفاده از فرضیات علمی و ساده‌سازی روابط حاکم بر این پدیده‌ها، آن‌ها را مدل نمود. در نتیجه استفاده از روابط توسعه داده شده، عدم قطعیت بر خروجی مدل‌ها وارد می‌گردد. لذا نتایج را به صورت قطعی نمی‌توان به کار برد و همواره تحلیل‌های هیدرولوژیکی با عدم قطعیت همراه است.

در مطالعه‌های هیدرولوژیکی شناخت عدم قطعیت و میزان آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به طور کلی منابع عدم قطعیت موجود در مدل‌های مورد استفاده به سه دسته، شامل از اطلاعات ورودی، ساختار مدل و پارامترهای مدل، تقسیم می‌شود. محاسبه عدم قطعیت برای در نظر گرفتن ریسک‌های آبی در زمینه اطلاعات تولیدی، مورد نیاز می‌باشند. روابط مورد استفاده در مدل‌ها دارای پارامترهای متعددی می‌باشند. می‌توان بر مبنای این پارامترها و نیز تعریف شاخص‌های نکویی برازش، نسبت به

محاسبه عدم قطعیت اقدام نمود. تحلیل عدم قطعیت مدل‌ها، می‌تواند در شناسایی کارایی آن‌ها، مقایسه نتایج و در نهایت انتخاب مدل مناسب، کمک نماید. روش‌های مختلفی نظیر تحلیل کلاسیک بیز، شبه بیز، بروزرسانی متوالی داده‌ها و میانگین‌گیری چندگانه مدل‌ها، برای شناسایی عدم قطعیت معرفی و استفاده شده‌اند (Moradkhani et al., 2005). یکی از روش‌های محاسبه عدم قطعیت در فرآیند واسنجی مدل‌ها استفاده از تئوری بیز به عنوان پایه محاسبات می‌باشد. در این تحقیق روش ابتکاری تخمین عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته که ترکیبی از تحلیل بیز و شیوه مونت کارلو و معیارهای نکویی برازش (Generalized likelihood unbiased estimation) می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. این شیوه بر مبنای نظریه همپایانی (Equiparity) می‌باشد. نظریه همپایانی بیان می‌دارد که مجموعه پارامترهای متعددی می‌توانند به یک معیار مشابه در سنجش کارایی مدل‌های بارش- رواناب منتهی شوند. نظریه همپایانی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و خودکار در یافتن جواب برتر در فضای پارامتری چندان نمی‌تواند اثربخش باشد. همچنین در فضای پارامتری، دسته جواب‌های گوناگون، به شاخص ارزیابی یکسانی، ختم می‌شوند (Sorooshian and Dracup, 1980; Duan et al.,)

به کارگیری شیوه ترکیبی نمونه‌گیری مونت‌کارلو و زنجیره مارکف (Markov chain Monte Carlo) در واسنجی سه مدل متفاوت، در دو حوضه آبریز متفاوت، به کار برده شدند (Blasone et al., 2008). نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که شیوه پیشنهادی نسبت به شیوه متداول تخمین عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه تعمیم‌یافته، نتایج بهتری را ارائه می‌نماید. روش تابع تشابه تعمیم‌یافته می‌تواند روابط بین پارامترها و غیرخطی بودن مدل را به شکل ضمنی، از طریق تابع درست‌نمایی مورد تحلیل و بررسی قرار دهد (Vázquez et al., 2009). به دلیل تنوع جغرافیایی در حوضه‌های آبریز، مطالعه عدم قطعیت پارامترهایی که فرآیند مدل‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، دارای اهمیت بالایی می‌باشد (Xu et al., 2011). عدم قطعیت پارامترها در مدل‌سازی هیدرولوژیکی امری اجتناب ناپذیر می‌باشد، به‌طوری‌که تحلیل این مهم، بایستی قبل از پیش‌بینی‌ها، در فرآیند تصمیم‌گیری انجام گیرد. مطالعه‌های عدم قطعیت پارامترها در زمینه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب، Zacharias et al., (2005)، پیش‌بینی مقادیر سیلاب Jorgeson و Julien (2005)، ارزیابی تغییرات تغییر اقلیم Kingston و Taylor (2005) در مطالعه‌های متعدد دیگری انجام شده است. در مطالعه حاضر هدف اصلی کمی‌سازی عدم قطعیت در شبیه‌سازی مدل بارش رواناب روزانه HBV در سد مخزنی شهید رجایی در حوضه آبریز تجن شکل (۱) با مساحت ۱۲۵۰ کیلومتر مربع در استان مازندران در سال‌های آبی ۸۱-۸۰ لغایت ۸۲-۸۱ می‌باشد. با توجه به اهمیت استفاده از مدل‌های بارش- رواناب روزانه، و تعیین عدم قطعیت مدل‌های مزبور در بازه‌های اطمینان مورد نظر و نیز عدم سابقه تحقیقی در این خصوص، دلیل استفاده از روش ترکیبی تحلیل بیز و شیوه مونت-کارلو، در حوضه‌های آبریز کشور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

HBV Model

این مدل می‌تواند به شکل توزیعی یا نیمه‌توزیعی به وسیله طبقه‌بندی حوضه مورد مطالعه به کار برده شود (Bergström, and Graham, 1998). مدل مذکور از چهار بخش اصلی شامل بخش‌های ذوب برف، رطوبت خاک و بارش موثر، تبخیر- تعرق و رواناب می‌باشد. شکل (۲) فرآیندهای عمومی نسخه یکپارچه و آموزشی مدل را نشان می‌دهد. اطلاعات مورد استفاده در این مدل، شامل بارش، دما و همچنین اطلاعات متوسط بلندمدت ماهانه دما و تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، مدل مذکور دارای بخش تحلیل بارش که شامل باران یا برف، بر پایه دمای ثبت شده در هر گام زمانی می‌باشد. باران یا ذوب برف، سپس در بخش رطوبت خاک مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند و بارش موثر در رواناب محاسبه می‌گردد.

(1992). بنابراین در نظر داشتن صرفاً یک مجموعه پارامتر بهینه، نمی‌تواند چندان منطقی باشد، لذا می‌بایست فضای پارامترها را، به نحوی استفاده نمود که عدم قطعیت حاصل از پارامترها، در فرآیند واسنجی مدل، محاسبه شود. در این خصوص لازم است که با تعریف قید مطلوبیت به‌عنوان معیار واسنجی، نسبت به حذف مجموعه پارامترهای ناکارآمد اقدام گردد. در دو دهه گذشته مطالعه‌های مختلفی به‌منظور بررسی عدم قطعیت با شیوه‌های مختلف، صورت گرفته است. در تحقیقی، با هدف کمی‌سازی عدم قطعیت، از تلفیق تئوری بیز (Bayesian theory) و شیوه مونت‌کارلو (Monte Carlo)، با استفاده از معیار نکویی برازش، برای شناسایی میزان خطا در واسنجی مدل‌های بارش رواناب استفاده گردید (Beven and Binnely, 1992). ایشان میزان عدم قطعیت واقعه‌های مختلف بارش- رواناب را محاسبه و ارائه نمودند. در تحقیقی، تحلیل مونت‌کارلو و الگوریتم متروپلیس- هسستینگ (Metropolis-Hasting Algorithm) ارائه شده توسط Metropolis et al (1953)، به‌منظور شناسایی عدم قطعیت، سه مدل مختلف با پارامترهای متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت (Kuczera and Parent, 1998). تحلیل عدم قطعیت در ناحیه‌بندی و برون‌یابی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری به کار برده شده است (Vrugt et al., 2006). در تحقیقی نشان داده شد که روش پیشنهادی Beven و Binely (1992) در صورتی که با توابع احتمالی مناسب به کار گرفته شود، می‌تواند بازه‌های عدم قطعیت را برای پیش‌بینی‌های آبی به خوبی محاسبه نماید. این موضوع به دلیل آماری نیز قابل قبول می‌باشد (Stedinger et al., 2008). شیوه آماری پیشنهادی Beven و Binely (1992) در شبیه‌سازی مدل‌های بارش- رواناب، با شیوه بیز به‌منظور شناسایی عدم قطعیت پارامترهای مورد استفاده، به کار برده شد (Jin et al., 2010). در استفاده از تابع تشابه نیز مطالعه‌های مختلفی توسط محققین مورد نظر بوده است (Mantovan and Todini, 2006). در تحقیقی نشان داده شد که عدم قطعیت حاصل از ساختار مدل مفهومی بیلان آب، بیشتر از عدم قطعیت پارامترهای به کار رفته در آن، می‌باشد (Engeland et al., 2005). عدم قطعیت حاصل از داده‌های ورودی، با استفاده از افزودن مقادیر تصادفی به این داده‌ها، بررسی شدند و رابطه تجربی بین خطای پارامترها و مقادیر تصادفی ارائه گردید (Chowdhury and Sharma, 2007). شناسایی عدم قطعیت حاصل از ساختار مدل، با توسعه گزینه‌هایی بررسی شد (Marshall et al., 2004). همچنین در تحقیقی با ترکیب خروجی مدل‌های مختلف، نسبت به تولید مجموعه‌ای از هیدروگراف‌ها، اقدام گردید تا بدین ترتیب عدم قطعیت ساختار مدل مشخص گردد. بررسی مزبور نشان داد که کیفیت اطلاعات بارش‌های به کار برده شده در فرآیند واسنجی، بر خطاهای شبیه‌سازی و نیز مقادیر پارامترها اثرگذار می‌باشند (Xu, 2001). تخمین عدم قطعیت با تابع تشابه تعمیم‌یافته و با

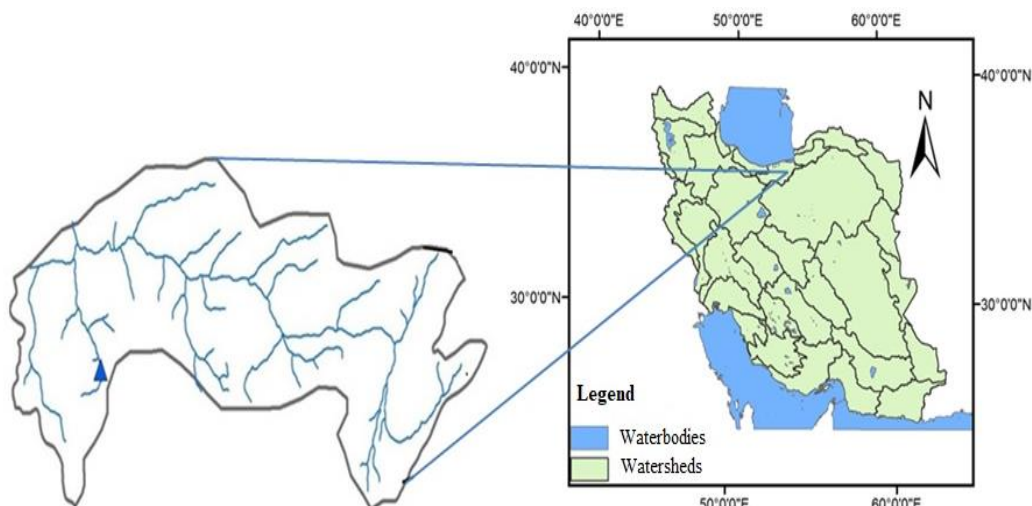


Fig. 1- The location of Shahid Rajaee Dam catchment area in the Tajen catchment area
 شکل ۱- موقعیت حوزه آبریز سد شهید رجایی در حوزه آبریز تاجن

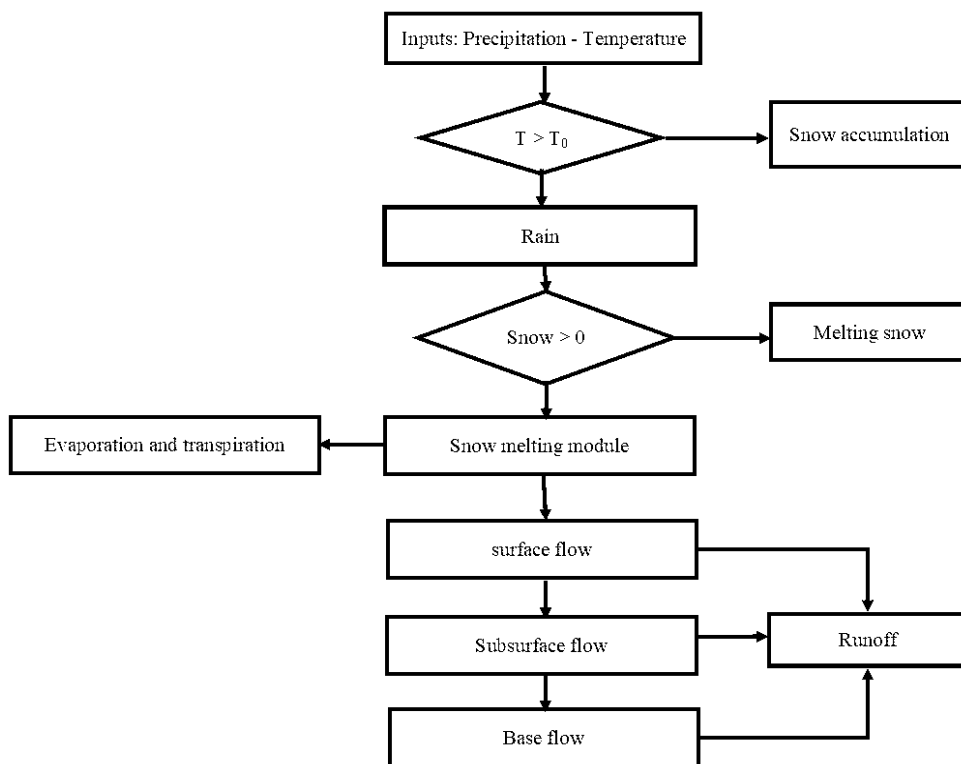


Fig. 2- Process of the HBV model
 شکل ۲- روندنمای مدل HBV

رواناب بخش‌های مختلف را با توجه به توابع مختلف نشان می‌دهند. در این معادله‌ها ضرایب $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$ و L و A به ترتیب معرف ضریب ذخیره جریان سطحی، ضریب ذخیره جریان زیرسطحی، ضریب جریان پایه، سطح آب مخزن زیرین، سطح آب مخزن بالایی، تراز آب و مساحت حوزه آبریز می‌باشند.

$$Q_0 = K_0 \cdot (S_u - L) \cdot A \quad S_u > L \quad \text{اگر (۱)}$$

بخش باقی‌مانده بارش به شکل رطوبت ذخیره در خاک مشارکت می‌نماید که بخشی از آن از طریق تبخیر از دسترس خارج می‌شود. خروجی اصلی مدل رواناب بوده که شامل سه بخش رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی و رواناب پایه است. این مدل شامل پارامترهای متعددی می‌باشند که بایستی بر مبنای داده‌های مشاهداتی واسنجی شوند. در تحقیق حاضر ۱۰ پارامتر اصلی مبنای تحلیل و بررسی قرارگرفتند و در فرآیند واسنجی مدل ارزیابی شدند. روابط (۱) تا (۵)،

در هر گام زمانی به صورت ضربی در محاسبه توزیع پسین می‌شود. این خاصیت وزن بیشتری را به مقادیر جریان در بازه‌های زمانی جدیدتر تعلق می‌دهد. و نقش خود را در توزیع پسین تابع درستیابی نمایان می‌کند. الگوریتم این شیوه در تحقیق انجام شده توسط Kuczera و Parent (1998) شرح داده شده است. طرح زنجیره مارکف یک شیوه عمومی برای نمونه‌گیری از توزیع پسین می‌باشد. این شیوه بر خلاف نمونه‌گیری معمولی، نمونه‌هایی را بر پایه گام‌های تصادفی که با توزیع پسین تطبیق می‌یابد، تولید می‌نماید. در مواردی که توزیع مینا با توزیع پسین متفاوت است، زنجیره مارکف نمونه‌های مناسب‌تری تولید می‌نماید. یکی از مشکلات عمده در تحلیل بیز انتخاب تابع احتمال پیشنهادی برای تابع درست‌نمایی می‌باشد.

تخمین عدم قطعیت مدل هیدرولوژیکی

تخمین عدم قطعیت بر مبنای روش بیزی با استفاده از شبیه‌سازی‌های مدل و فضای پارامترهای مدل انجام می‌گیرد. توزیع جریان‌های شبیه‌سازی شده از توزیع پسین محاسبه می‌گردند. توزیع پسین از ضرب نمودن توزیع اولیه پارامترها و تابع درست‌نمایی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در بازه زمانی مورد نظر محاسبه می‌گردند. با استفاده از رابطه بیز، مقدار تابع پسین مدل از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$f(\theta | z) = L(z | \theta) \cdot f(\theta) \quad (7)$$

در این رابطه $f(\theta)$ توزیع اولیه پارامترها می‌باشد و $L(z|\theta)$ تابع درست‌نمایی مقادیر مشاهداتی (z) است. رابطه (۷) در محاسبه محدوده اطمینان شبیه‌سازی‌های مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رابطه شامل تمام پارامترهای به کار گرفته شده در مدل می‌باشند. برای محاسبه عدم قطعیت نیاز به لحاظ نمودن پارامترها به صورت تفکیکی نمی‌باشد. همچنین توزیع حاشیه‌ای پارامترها به تنهایی یا گروهی از آن‌ها با استفاده از تجمیع توزیع پسین فضای پارامترها قابل محاسبه می‌باشند. در محاسبات هیدرولوژیکی، توزیع‌های پسین بر مبنای توزیع درست‌نمایی در دوره واسنجی به روزرسانی می‌گردد. به منظور به کارگیری روش‌های آماری متداول در تخمین عدم قطعیت و استفاده از روش حداقل مربعات معمولی بایستی شرایطی فراهم باشد که توزیع دنباله خطای حاصل از مقادیر شبیه‌سازی شده دو به دو، مستقل بوده و دارای توزیع یکسان باشند. توزیع پیش‌بینی‌های مدل، بستگی به مدل غیرخطی هیدرولوژیکی و خطاهای مدل دارد. شیوه پیشنهادی برای محاسبه بازه اطمینان جریان پیش‌بینی شده، در به کارگیری روش تخمین ناریب تابع درست‌نمایی، حذف خطاهای آماری از توزیع مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد. معادله این شیوه به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$P_r(Y_t | z) = \int f(\theta | z) d\theta \quad (8)$$

$$Q_0 = 0 \quad S_u \leq L \quad (2) \text{ اگر}$$

$$Q_0 = K_1 \cdot S_u \cdot A \quad (3)$$

$$Q_{perc} = K_{perc} \cdot S_u \cdot A \quad (4)$$

$$Q_2 = K_2 \cdot S_l \cdot A \quad (5)$$

روش تحلیل بیز

فرض بر این است که متغیر تصادفی Y با مقدار y بوده و پارامتر θ ، دارای توزیع اولیه $P(\theta)$ می‌باشد. پارامتر θ بر پایه داده‌های مشاهداتی یا بر مبنای قضاوت کارشناسی، تخمین زده می‌شود. همچنین $L(Y|\theta)$ تابع درست‌نمایی را تعریف می‌کند. این تابع بر مبنای داده‌های مشاهداتی محاسبه می‌گردد. تئوری بیز روشی را برای محاسبه توزیع ثانویه پارامتر θ ، فراهم می‌آورد که بر مبنای توزیع اولیه و نیز توزیع درست‌نمایی بوده و مطابق معادله (۶) محاسبه می‌گردد (Beven, 2001).

$$P(\theta | Y) = \frac{L(Y | \theta) \cdot P(\theta)}{L(Y | \theta) \cdot P(\theta)} \propto L(Y | \theta) \cdot P(\theta) \quad (6)$$

در اغلب موارد به‌ویژه در مدل‌های هیدرولوژی توزیع پسین دارای یک توزیع استاندارد نمی‌باشد و توزیع‌های مختلفی را می‌توان با توجه به خواص اطلاعات مورد تحلیل برای این توزیع تعریف نمود. در این توزیع‌ها نقش خطا و اطلاعات شبیه‌سازی شده بسیار اهمیت دارد. در تحلیل بیز، الگوریتم متروپلیس - هستینگ، شیوه مونت‌کارلو زنجیره مارکف مجموعه‌ای از پارامترها بر پایه زنجیره مارکف تولید می‌نمایند که به توزیع پسین همگرا می‌گردند. این مجموعه از یک مقدار اولیه شروع شده و سپس با استفاده از توزیع مورد نظر، پارامترها تولید می‌شوند. سپس با توجه به معیار رد یا پذیرش پارامترها، مجموعه پارامترهای برتر تکمیل می‌شوند. در استفاده از توزیع بیز فرآیند انجام در اغلب موارد به‌ویژه در مدل‌های هیدرولوژی توزیع پسین دارای یک توزیع استاندارد نمی‌باشد و توزیع‌های مختلفی را می‌توان با توجه به خواص اطلاعات مورد تحلیل برای این توزیع تعریف نمود. در این توزیع‌ها نقش خطا و اطلاعات شبیه‌سازی شده بسیار اهمیت دارد. در تحلیل بیز، الگوریتم متروپلیس - هستینگ، شیوه مونت‌کارلو زنجیره مارکف مجموعه‌ای از پارامترها بر پایه زنجیره مارکف تولید می‌نمایند که به توزیع پسین همگرا می‌گردند. این مجموعه از یک مقدار اولیه شروع شده و سپس با استفاده از توزیع مورد نظر، پارامترها تولید می‌شوند. سپس با توجه به معیار رد یا پذیرش پارامترها، مجموعه پارامترهای برتر تکمیل می‌شوند. در استفاده از توزیع بیز فرآیند انجام محاسبات به صورت متوالی و بازگشتی می‌باشد و توزیع‌های پسین محاسبه شده در هر گام به‌عنوان توزیع اولیه گام بعدی در محاسبات لحاظ می‌شوند. استفاده متوالی از توزیع بیز سبب ورود مجموع خطاها

معیارناش - ساتکلیف با توجه به نتایج محاسبه شد (Nash and Sutcliffe, 1970). گزینه‌های نامطلوب از دسته پارامترهای مختلف حذف شدند. قید مطلوبیت ۰/۵ برای حذف نتایج نامناسب در نظر گرفته شد و دسته پارامترهایی که نتایج شاخص آن‌ها کمتر از این حد بود، حذف گردیدند و با توجه به دسته‌های باقی‌مانده، تابع تجمعی احتمال به مقادیر باقی‌مانده برازش داده شد. همچنین نسبت به محاسبه دامنه چارکی برای محاسبه عدم قطعیت فرآیند واسنجی اقدام گردید. لازم به ذکر است که توزیع پسین با توجه به تحلیل بیز و محاسبات انجام شده در پایان مطابق رابطه (۱۲) می‌باشد که برابر با ضریبی از تابع تشابه است. در صورتی که بخواهیم تابع تجمعی احتمال را بر آن برازش دهیم، بایستی مقادیر تابع به حاصل جمع مقایر تابع تشابه طبق رابطه (۱۳) در بازه مورد نظر تقسیم شوند.

$$R_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^f - Q_t^b)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^f - \bar{Q}_0)^2} \quad (11)$$

$$f_{\theta|Q}[\theta|Q] = k \exp \left[-\frac{n.S^2}{2\sigma^2} \right] \quad (12)$$

$$P_i = \frac{f_{\theta|Q}[\theta_i|Q]}{\sum_{i=1}^m f_{\theta|Q}[\theta_i|Q]} \quad (13)$$

جدول (۱) محدوده پارامترهای مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد.

در این رابطه Y_t مقدار قطعی جریان می‌باشد. بازه اطمینان معمولاً در محدوده ۹۰ درصد محاسبه می‌شود. برای محاسبه این محدوده از رابطه‌های (۹) و (۱۰) استفاده می‌گردد.

$$P(z_t < z_l | z) = 0.05 \quad (9)$$

$$P(z_t < z_u | z) = 0.95 \quad (10)$$

تخمین عدم قطعیت با استفاده از روش GLUE

روش تخمین عدم قطعیت، با استفاده از تابع تشابه تعمیم‌یافته در سال ۱۹۹۲، بر اساس مبانی قبلی توسعه داده شد (Hastings, 1970). مراحل انجام این روش در روند نمای شکل (۳) نشان داده شده است. در این شیوه مقادیر تابع تشابه به‌عنوان وزن‌های نسبی از هر مجموعه پارامتر، محاسبه می‌شوند. در این شیوه تابع تشابه و مقادیر آستانه پذیرش، اختیاری بوده و با توجه به شرایط انتخاب می‌شوند. در تحقیق حاضر با توجه به اینکه در مطالعات مختلف، تابع تشابه ناش - ساتکلیف رابطه (۱۱)، مورد استفاده قرار گرفته است. لذا این تابع به‌عنوان معیار نکویی برازش مورد استفاده قرار گرفت. Q_0^f و Q_0^b به ترتیب مقدار جریان شبیه‌سازی شده، جریان مشاهداتی و متوسط جریان مشاهداتی در دوره زمانی مورد نظر می‌باشند. با توجه به شیوه پیشنهادی در ابتدا با استفاده از توزیع یکنواخت نسبت به تولید اعداد تصادفی با توجه به محدوده پارامترها به‌عنوان توزیع اولیه به جداسازی پارامترها اقدام گردید. لذا فضای حالت مورد نظر مطابق شکل (۴) در فرآیند واسنجی ایجاد گردید مدل به تعداد ۵۰۰۰ بار اجرا شد و

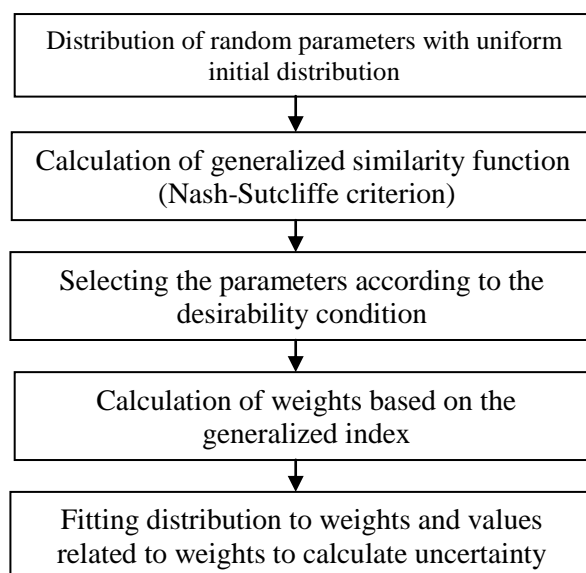


Fig. 3- The uncertainty estimation method using the GLUE method
 شکل ۳- شیوه برآورد عدم قطعیت با استفاده از روش GLUE

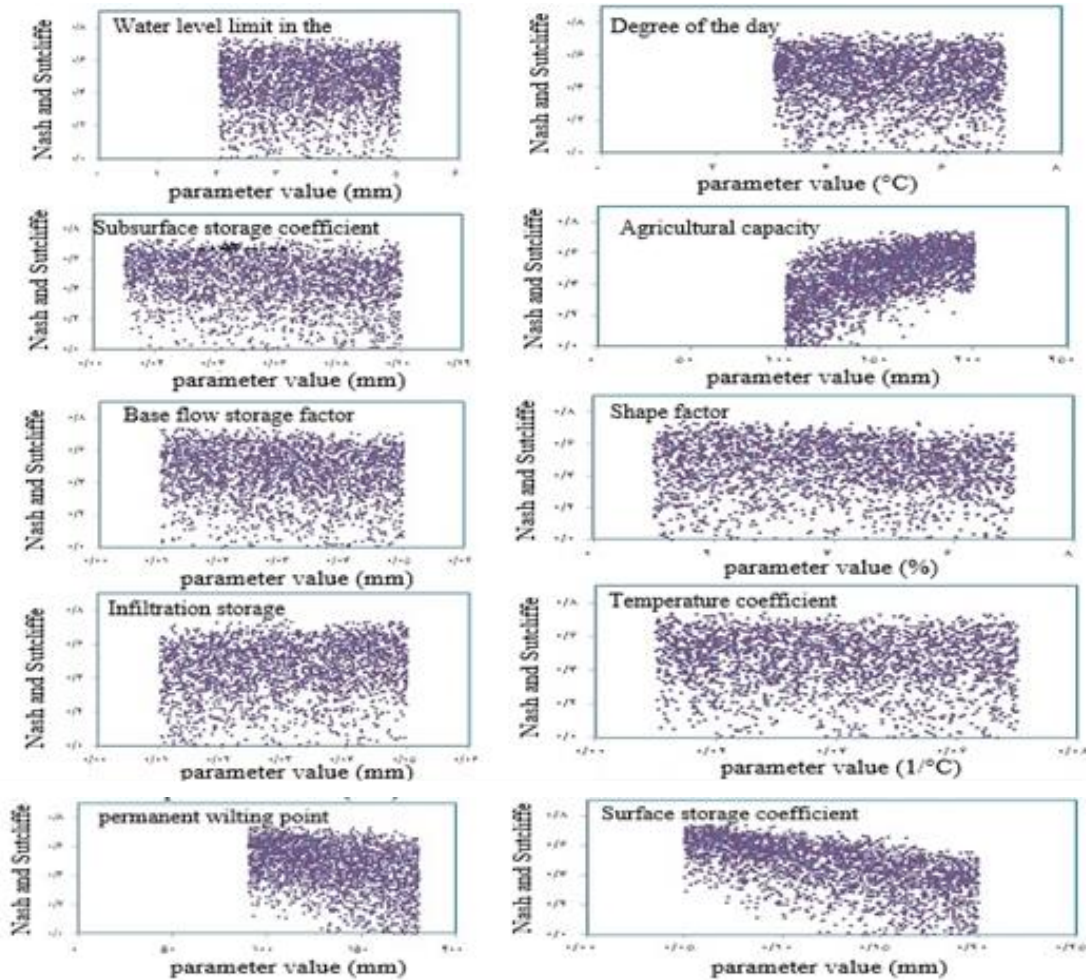


Fig. 4- The graph of the produced values of the parameters using the initial distribution and the degree of similarity function resulting from them in the implementation of the model based on the Nash-Sutcliffe index

شکل ۴- نمودار مقادیر تولید شده پارامترها با استفاده از توزیع اولیه و میزان تابع تشابه حاصل از آنها در اجرای مدل بر مبنای شاخص ناش- ساتکلیف

جدول ۱- محدوده مقادیر پارامترهای مدل HBV

Table 1- The range of values of the HBV model parameters

Row	Parameter	Equivalent	Unit	Range	Row	Parameter	Equivalent	Unit	Range
1	Day degree	DD	°C	2-8	6	Water level limit in the tank	L	mm	0-6
2	Agricultural capacity	FC	mm	75-225	7	Infiltration storage	K_p	mm	0-0.06
3	Shape factor	Beta	-	0-8	8	Subsurface storage coefficient	K_1	mm	0-0.15
4	Surface storage coefficient	K_0	mm	0-0.25	9	Permanent wilting point	pwp	mm	70-220
5	Base flow storage factor	K_2	mm	0-0.06	10	Temperature coefficient	c	C^{-1}	0-0.08

نتایج و بحث

توزیع اولیه پارامترها

با توجه به مراحل انجام تحلیل، در گام اول تخمین عدم قطعیت، توزیع اولیه پارامترها تعیین می‌گردد. در انتخاب توزیع اولیه لازم است با توجه به تجربه، برای انتخاب توزیع مناسب برای تولید مجموعه پارامترها اقدام نموده و توزیع مورد نظر، تمام فضای حالت را پوشش دهد تا در مرحله واسنجی مدل، بتوان شبیه‌سازی مناسبی از مشاهدات به دست آورد. در تئوری بیز، تعیین توزیع اولیه پارامترها به معنی شناخت اولیه از پارامتر مورد نظر می‌باشد. به عبارت دیگر به منظور رفع ابهام از پارامترها، توزیع اولیه پارامترها تعیین می‌گردد، تا بررسی‌های لازم در خصوص فرآیند شبیه‌سازی انجام گیرد. در این تحقیق توزیعی یکنواخت، به عنوان توزیع اولیه در ایجاد مجموعه پارامترها، برای واسنجی مدل HBV مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به پارامترهای ده‌گانه مدل نسبت به شبیه‌سازی با توجه به داده‌های ورودی اقدام شد.

در شکل (۴) محدوده پارامترها و مقادیر محاسبه شده شاخص ناش- ساتکلیف برای پارامترهای مدل نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، پارامترهای ظرفیت زراعی و ضریب ذخیره سطحی، در محدوده مورد نظر تراکم یکنواختی نداشته و در مقادیر پایینی، مقادیر بیشتری را در محاسبات شامل شده‌اند. اما برای سایر پارامترها مقادیر لحاظ شده به صورت یکنواخت در محدوده عددی پارامترها در شبیه‌سازی مشارکت داشته‌اند.

با توجه به عدم شناخت از توزیع مناسب قابل برازش بر پارامترهای مورد استفاده در مدل، توزیع یکنواخت، توزیعی نارایب محسوب می‌گردد که می‌توان از آن در محاسبات مورد نیاز، در قالب فرمول بیز استفاده نمود. توزیع مورد نظر را توزیع غیرمعرف می‌نامند. زیرا وضعیت واقعی توزیع برازش یافته بر پارامترها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است دو پارامتر ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی در محدوده مورد نظر تغییرات یکنواختی را نداشته و تجمع بیشترین مقادیر برای این دو پارامتر به ترتیب در حد پایین و بالا می‌باشد. اما در خصوص پارامترهای ضرایب توزیع به شکل یکنواخت می‌باشند. این موضوع نشان‌گر پویا بودن پارامترهای مربوط به مشخصات فیزیکی خاک می‌باشد. اما در بین ضرایب، صرفاً ضریب ذخیره سطحی تغییرات غیریکنواختی را در خصوص شاخص نشان می‌دهد. با توجه به استفاده از تابع احتمال پسین در قالب شاخص درست‌نمایی، اکثر مقادیر پارامترها در محدوده خاص متمرکز شده‌اند. همچنین بخشی از رفتار پارامترها بر مبنای تصادفی بودن و عدم قطعیت شکل می‌گیرد. از این‌روی تحلیل فیزیکی نیز در این خصوص قابل ارائه نمی‌باشد.

جدول (۱) محدوده پارامترهای مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد. پس از انتخاب توزیع اولیه و ایجاد فضای پارامترهای تصادفی، از این پارامترها برای شبیه‌سازی مدل استفاده می‌شود. بر

مبنای شبیه‌سازی انجام شده و تعریف توزیع پسین که معرف درست‌نمایی محاسبات می‌باشد و استفاده از فرمول بیز توزیع پسین محاسبه گردید. توزیع تحلیل شده با توجه به روش الگوریتم متروپلیس محاسبه گردید (Kuczera and Parent, 1998). در این الگوریتم زنجیره مارکف توالی پارامترها را ایجاد می‌نماید. بر مبنای خاصیت ارگودیک، توزیع ایجاد شده به توزیع ایستای پسین همگرا می‌گردد.

تخمین عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها

با توجه به معیار ناش- ساتکلیف (Nash-Sutcliffe)، خروجی‌های مختلف بر مبنای دسته پارامترهای تولیدی در محاسبه معیار مورد نظر استفاده گردیدند. به منظور تخمین عدم قطعیت از بین مقادیر تابع تشابه محاسبه شده، مقادیر برتر با لحاظ قید مطلوبیت انتخاب گردیدند. در این خصوص Montanari (2005) و Mantovan و Todini (2006) به منظور تخمین پارامترهای مدل‌های زیست محیطی در بازه‌های مختلف پیش‌بینی اقدام به تخمین عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه نمودند. در این مطالعه نیز این موضوع در خصوص مدل HBV به کار برده شد و بر مبنای آن میزان عدم قطعیت محاسبه گردید. سپس به منظور محاسبه عدم قطعیت، به مقادیر باقی‌مانده تابع توزیع تجمعی، برازش داده شود. همچنین در هر گام زمانی مقادیر دبی محاسباتی حاصل از واسنجی‌های مختلف، به صورت صعودی مرتب می‌شوند. با استفاده از وزن‌های تابع تشابه حاصل از هر بار اجرای مدل، تابع توزیع احتمال تجمعی محاسبه می‌شود. بر مبنای تابع محاسبه شده در هر گام زمانی، میزان عدم قطعیت در سطح‌های پنج و ۹۵ درصد، با استفاده از روابط (۸) و (۹)، درگام‌های زمانی روزانه محاسبه و مشخص شدند. لذا میزان عدم قطعیت پارامترها در فرآیند شبیه‌سازی طبق شیوه تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته محاسبه شد. در جدول (۲) مقادیر حد بالا و پایین داده‌های جریان آب در سطوح پنج و ۹۵ درصد آماری به عنوان نمونه برای یک ماه نشان داده شده است.

ضمن به‌کارگیری تئوری هم‌پایانی و نظر به اینکه دسته جواب‌های مختلف می‌توانند به‌عنوان راه‌حل برتر در نظر گرفته شوند، لذا ترکیب‌های مختلف از پارامترها محاسبه عدم قطعیت به کار گرفته شدند. لذا با توجه به این تئوری و نیز شیوه استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته بازه عدم قطعیت هیدروگراف محاسباتی محاسبه گردید. شکل (۵) نمودار دبی محاسباتی و نیز محدوده عدم قطعیت محاسباتی این هیدروگراف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است میزان بازه عدم قطعیت مقادیر حدی مربوط به وقوع سیل در حوضه تجن با عدم قطعیت بیشتری روبه‌رو می‌باشد و مدل در شبیه‌سازی مقادیر پیشینه عملکرد خوبی ندارد.

اما در خصوص جریان‌های روزانه نرمال که ناشی از آبدهی حاصل از جریان پایه رودخانه و منحنی فروکش جریان آبنمود

مشاهده می‌شود خطا در مقایسه با توزیع نرمال، برازش قابل قبولی دارد. استفاده از مجموعه پارامترهای گوناگون و تابع تشابه تأثیر این مقادیر بر ساختار مدل، بررسی شد و نتایج نشان داد که پارامترها همان‌طور که در شکل (۴) نیز نشان داده شده‌اند، نقش بسزایی در مرحله شبیه‌سازی و انتخاب محدوده برتر ایفا می‌نمایند. این نتیجه اهمیت ایده تأثیرپذیری مدل و نقش پارامترها را که در مطالعات Beven و Binely (1992) به آن پرداخته شده است نشان می‌دهد.

روزانه می‌باشند شبیه‌سازی در مجموع مقادیر بهتری را با استفاده از مدل HBV نسبت به بهینه‌سازی که عموماً در بهینه‌های موضعی متوقف می‌گردد، نتیجه می‌دهد. همچنین با توجه به شبیه‌سازی‌های مختلف، مقادیر شاخص ناش ساتکلیف در دامنه ۰/۴ تا ۰/۶۸ به دست آمد. با توجه به مقدار حداقل لازم شاخص ناش (۰/۵) شبیه‌سازی‌های نامطلوب حذف گردیدند. همچنین به منظور بررسی خطای حاصل از مدل و تبعیت نتایج از توزیع نرمال در شکل (۶) نمودار تابع توزیع خطا رسم شده است. همان‌طور که

جدول ۲- حدود بالا و پایین عدم قطعیت در سطوح اطمینان ۵ و ۹۵ درصد برای داده‌های جریان آب (متر مکعب بر ثانیه) در یک ماه

Table 2- Upper and lower bounds of uncertainty at 5 and 95 % confidence levels for water flow data (cubic meters per second) in a month

Day	Observation	Level (%)		Day	Observation	Level (%)	
		5	95			5	95
1	7.9	1.94	13.5	16	4.1	0.52	3.8
2	11.9	2.4	18	17	3.9	0.55	3.3
3	10.4	1.8	16.7	18	3.7	0.57	4.1
4	10.4	1.1	13	19	3.7	0.65	3.9
5	8.5	0.65	10.7	20	3.5	0.31	7.4
6	6.8	0.31	8.7	21	4.5	0.5	10
7	6.1	0.07	7.1	22	16.9	1.5	22.9
8	7.6	0.13	7.7	23	14.8	5.1	39
9	9.5	0.12	10.5	24	13.1	7.9	40
10	10.3	0.11	8.4	25	12.5	8.3	34.6
11	9.2	0.24	6.9	26	11.7	7.2	26
12	7.3	0.33	5.7	27	10.4	6	21.3
13	6.1	0.39	4.8	28	12	7.3	23.7
14	5.2	0.5	4.4	29	14.4	12.3	35
15	4.5	0.47	4.5	30	14.8	14	33.1

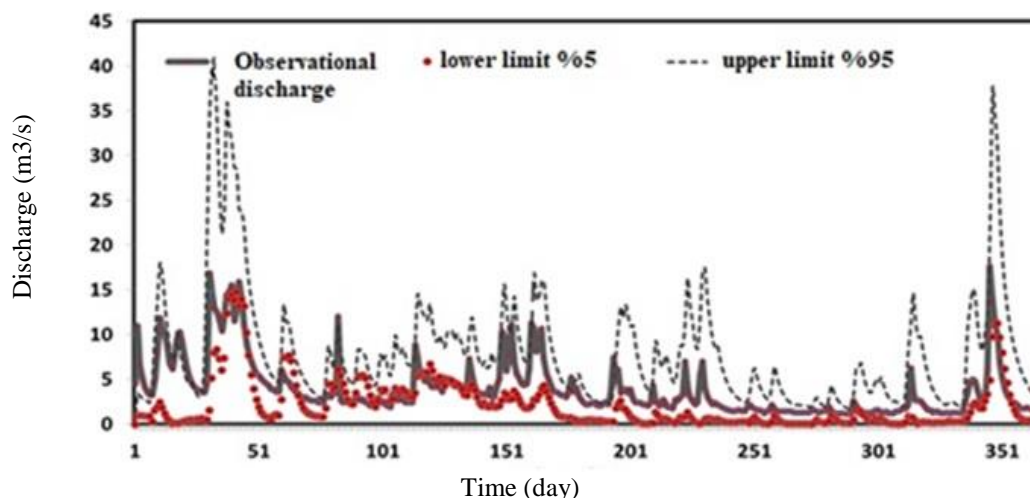


Fig. 5- Calculation flow chart and calculated uncertainty limits

شکل ۵- نمودار دبی محاسباتی و حدود عدم قطعیت‌های محاسبه شده

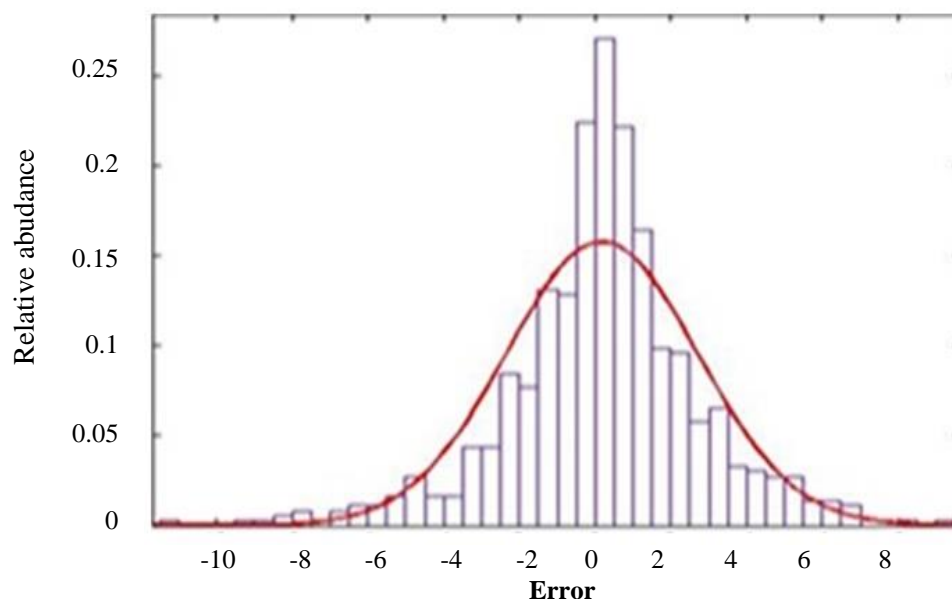


Fig. 6- The diagram of the error of the simulation process and its dependence on the normal distribution

شکل ۶- نمودار خطای فرآیند شبیه‌سازی و تبعیت آن از توزیع نرمال

نمودن مجموعه پارامترهای گوناگون، تأثیر ساختار مدل‌های مختلف را در میزان عدم قطعیت مدل‌های بارش-رواناب مورد بررسی قرار دهد. همچنین بررسی انجام شده در خصوص نظریه همپایانی بیانگر این موضوع می‌باشد که مجموعه پارامترهای مختلف به یک مقدار یکسان از تابع تشابه منتهی می‌شوند. لذا بایستی در فرآیند شبیه‌سازی پدیده همپایانی لحاظ گردد. لذا بر مبنای همپایانی می‌توان عدم قطعیت موجود در فرآیند شبیه‌سازی مدل‌های بارش رواناب را محاسبه و نتایج را در مطالعه‌های هیدرولوژیکی بکار برد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت و کمک مدیران دانشگاه بوعلی سینا به‌منظور ایجاد شرایط مناسب انجام این تحقیق تشکر نمایند.

نتیجه‌گیری

بررسی انجام شده نشان داد که تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه، می‌تواند در محاسبه و شناسایی عدم قطعیت پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل بارش-رواناب HBV مفید باشد. همچنین کارایی تابع تشابه ناش-ساتکلیف در ارزیابی نکویی برازش نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، به‌خوبی مشخص گردید. در به‌کارگیری تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه بایستی قید مورد نظر برای حذف مقادیر نامطلوب تابع تشابه تعریف گردد. لذا بر مبنای مقادیر تابع تشابه مورد قبول و انجام محاسبات مربوطه، میزان عدم قطعیت در روزهای مختلف، با استفاده از دامنه اطلاعات بدست آمده در سطوح پنج درصد و ۹۵ درصد مشخص گردید. همچنین مقدار متوسط شاخص ناش در گزینه برتر برابر با ۶۸ درصد به‌دست آمد. باید در نظر داشت که تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه می‌تواند ضمن لحاظ

References

- Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B.A. and Zyvoloski, G.A., 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 31(4), pp.630-648.
- Bergström, S. and Graham, L.P., 1998. On the scale problem in hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 211(1-4), pp.253-265.
- Beven, K. and Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), pp.279-298. Beven, K.J. 2001. *Rainfall-Runoff Modeling: The Primer*. Wiley, Chichester. 488 pages.
- Beven, K.J., 2001. *Rainfall-runoff modelling: The primer*. John Wiley & Sons, Chichester. *Rainfall-runoff modelling: The primer*. John Wiley & Sons, Chichester.

- 5- Chowdhury, S. and Sharma, A., 2007. Mitigating parameter bias in hydrological modelling due to uncertainty in covariates. *Journal of Hydrology*, 340(3-4), pp.197-204.
- 6- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), pp.1015-1031.
- 7- Engeland, K., Xu, C.Y. and Gottschalk, L., 2005. Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology/Estimation bayésienne des incertitudes au sein d'une modélisation conceptuelle de bilan hydrologique. *Hydrological Sciences Journal*, 50(1).
- 8- Hastings, W.K., 1970. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1), pp.97-109.
- 9- Jorgeson, J. and Julien, P., 2005. Peak flow forecasting with radar precipitation and the distributed model CASC2D. *Water International*, 30(1), pp.40-49.
- 10- Jin, X., Xu, C.Y., Zhang, Q. and Singh, V.P., 2010. Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*, 383(3-4), pp.147-155.
- 11- Kingston, D.G. and Taylor, R.G., 2010. Sources of uncertainty in climate change impacts on river discharge and groundwater in a headwater catchment of the Upper Nile Basin, Uganda. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), p.1297.
- 12- Kuczera, G. and Parent, E., 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211(1-4), pp.69-85.
- 13- Mantovan, P. and Todini, E., 2006. Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 330(1-2), pp.368-381.
- 14- Marshall, L., Nott, D. and Sharma, A., 2004. A comparative study of Markov chain Monte Carlo methods for conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 40, W02501.
- 15- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H. and Teller, E., 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), pp.1087-1092.
- 16- Montanari, A., 2005. Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resources Research*, 41(8).
- 17- Moradkhani, H., Hsu, K.L., Gupta, H. and Sorooshian, S., 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water Resources Research*, 41(5), (In Persian).
- 18- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 282-290.
- 19- Sorooshian, S. and Dracup, J.A., 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, 16(2), pp.430-442.
- 20- Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Lee, S.U. and Batchelder, R., 2008. Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method. *Water Resources Research*, 44(12).
- 21- Vázquez, R.F., Beven, K. and Feyen, J., 2009. GLUE based assessment on the overall predictions of a MIKE SHE application. *Water Resources Management*, 23(7), pp.1325-1349.

-
- 22- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Dekker, S.C., Sorooshian, S., Wagener, T. and Bouten, W., 2006. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. *Journal of Hydrology*, 325(1-4), pp.288-307.
- 23- Xu, C.Y., 2001. Statistical analysis of parameters and residuals of a conceptual water balance model—methodology and case study. *Water Resources Management*, 15(2), pp.75-92.
- 24- Xu, H., Taylor, R.G. and Xu, Y., 2011. Quantifying uncertainty in the impacts of climate change on river discharge in sub-catchments of the Yangtze and Yellow River Basins, China, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), pp.333-344.
- 25- Zacharias, I., Dimitriou, E. and Koussouris, T., 2005. Integrated water management scenarios for wetland protection: application in Trichonis Lake. *Environmental Modelling & Software*, 20(2), pp.177-185.

In The Name of God

Irrigation Sciences and Engineering

(Scientific)

Vol. 46 (1)

Spring 2023

Board of Editors

AkhondAli, A. M.	Professor	Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
Ghomeshi, M	Professor	Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
Heydarpour, M.	Professor	Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology
Kashefipour, S. M.	Professor	Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
Liaghat, A. M.	Professor	Faculty of Agriculture, University of Tehran
Hosseinzadeh Dalir, A.	Professor	Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.
Naseri, A. A.	Professor	Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
Zand Parsa, Sh.	Professor	Faculty of Agriculture, Shiraz University of Technology
Pagliara, Stefano.	Professor	Department of Civil Engineering, University of Pisa, Italy
Sai Hin, L.	Associate Professor	Department Of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Malaysia
Ahmadian, R.	Professor	Department of Civil Engineering, School of Engineering, Cardiff University, UK
Ritzema, H.	Associate Professor	Water Resources Management Group, Environmental Sciences Group, Wageningen University & Research, Netherland

Published by: Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Water Sciences Engineering, Ahvaz, Iran.

Director: BoromandNasab, S.

Editor-in-Chief: Kashefipour, S.M.

Editorial Manager: Yazdani, N. and English language Mashhadi, A.

Type Setting: Yazdani, N.

E-mail: JISE.Water@Scu.ac.ir
JISE.Water@yahoo.com

Publication license of the Ministry of Culture and Islamic Guidance No. 10362/124 on 29/12/1998 and license of the Journal Review Office of the Ministry of Science, Research and Technology No. 11/3/1264 on 21/10/2009 for the Journal of Irrigation Sciences and Engineering.

Contents

Title	Authors	Page
Evaluation of heavy metals pollution and qualitative zonation Sediment of Qarasu River using the indicators of ecological and geochemical risk assessment of Muller	S. Mortazavi, F. Mohammadyari and M. Ebrahimian	1
Simulation of dam break flow based on numerical solving of shallow water equations in curvilinear coordinate	B. Mehrmoosavi, R. Ghobadian and M. Javn	15
Experimental Study on the Effect of Quadrate Hydraulic Jet Distance relative to Sediment Surface on the Efficiency of Hydrosuction Systems	M. Kiani Nejad, M. Zounemat-Kermani and S. Golestani Kermani	33
The effect of changing the cultivation pattern and improving the efficiency of irrigation systems on reducing the withdrawal of groundwater resources under climate change scenarios (Case study: Kavar Plain)	M. K. Shaabani, J. Abedi-Koupai, S. S. Eslamian, and S. A. R. Gohari	47
Investigation the Energy Dissipation on Gabion Stepped Weirs and Downstream Hydraulic Jump Characteristics	F. Mahjoubi and S. M. Kashefipour	65
Optimal Redistribution of Water among Agricultural Sector Operators Using a Fuzzy Multi-objective Optimization Model	Sh. Kakavand, H. Mazandaranizade and H. Etedali Ramezani	87
The effect of distance in flow induced vibration on power conversion caused by the oscillations of two tandem cylinders	V. Atashi, M. Ghomeshi, S. M. Sajadi and M. Bernitsas	95
Uncertainty estimation of rainfall-runoff calibration process using the generalized likelihood method (GLUE) in the HBV model	M. Ahmadizadeh1 and S. Marofi	111