



صفحه	نویسندگان	عنوان
۱	جمیل جلال، فریدون رادمنش، عبدعلی ناصری، محمدعلی آخوندعلی و حیدر زارعی	برآورد تبخیر تعرق گیاه نیشکر با استفاده از الگوریتم سبال و روش پریسلی تیلور (مطالعه موردی کشت و صنعت امیرکبیر اهواز)
۱۵	سمیرا سلمان زاده، منوچهر فتحی مقدم، جواد احدیان و سید محسن سجادی	بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر ضریب درگ در پوشش گیاهی صلب و انعطاف پذیر
۳۳	مهدی جعفری تلوکلایی، علی شاهنظری و هنک ریتزما	ارزیابی سهم اجزای شبکه جریان در اطراف زهکش زیرزمینی در یک مزرعه شالیزاری
۵۳	جهانگیر عابدی کوپایی، علیرضا گوهری، سعید اسلامیان و آرمیتا معتمدی	بررسی ویژگی‌های مکانیکی پوشش بتنی کانال‌های انتقال آب حاوی نانوذرات بامبو
۶۷	راضیه ابراهیمی، صفر معروفی و حسین ترابزاده خراسانی	اصلاح اثرات ابرناکی بر محصول پوشش برف روزانه سنجنده مودیس (مطالعه موردی: شمال غرب ایران)
۸۳	حامد مازندرانی زاده و فریبا خدابخشی	ارزیابی عملکرد مدل‌های CANFIS، MLPNN، MLR و M5 در شبیه‌سازی شاخص خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه)
۹۹	سپیده رحیم‌نژاد، مهدی اسمعیلی ورکی، بهنام شفیعی ثابت و السیو رادیس	مطالعه آزمایشگاهی اثر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب
۱۱۹	رضا الهی، مهدی قمشی و محمدرضا زایری	بررسی کشش آب در ناحیه غوطه‌وری جریان‌های غلیظ در محل قوس‌ها

علوم و مهندسی آبیاری  
(علمی)

بهار ۱۴۰۳

جلد چهل و هفتم شماره ۱

مدیر مسؤول: سعید برومندنسب

سر دبیر: سید محمود کاشفی پور

مدیر داخلی: مهدی دریایی

تایپ و صفحه آرایی: ندا یزدانی

ویراستار: ندا یزدانی

هیأت تحریریه:

آخوندعلی، علی محمد	استاد	هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
حیدر پور، منوچهر	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
زندپارسا، شاهرخ	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
قمشی، مهدی	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
کاشفی پور، سید محمود	استاد	سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
لیاقت، عبدالمجید	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران
حسین زاده دلیر، علی	استاد	گروه مهندسی آب- دانشکده کشاورزی- دانشگاه تبریز.
ناصری، عبد علی	استاد	آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
استفانو پالیارا	استاد	گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیزا، ایتالیا
لای سای هین	دانشیار	گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مالایا، مالزی.
رضا احمدیان	استاد	گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاردیف، انگلستان
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](mailto:JISE.Water@scu.ac.ir) و [JISE.Water@yahoo.com](mailto: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

۲۹/۸/۷۸ برای مجله علوم و مهندسی آبیاری

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

## اسامی بررسی کنندگان مقالات این شماره

اصغری پری	سید امین
بهرامی یارا احمدی	محمد
بیژنوند	سجاد
خرمیان	امین
دانش فراز	رسول
دریایی	مهدی
زینی وند	مهدی
شریفی	محمد رضا
صمدی	امیر
عزیزی	رضا
علیزاده	حمزه علی
لشکرآرا	بابک
نوذری	حامد
نوابیان	مریم

## 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 ۴۷، 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	بر آورد تبخیر تعرق گیاه نیشکر با استفاده از الگوریتم سبال و روش پریسلی تیلور (مطالعه موردی کشت و صنعت امیرکبیر اهواز) جمیل جلال، فریدون رادمنش، عبدعلی ناصری، محمدعلی آخوندعلی و حیدر زارعی
۱۵	بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر ضریب درگ در پوشش گیاهی صلب و انعطاف پذیر سمیرا سلمان زاده، منوچهر فتحی مقدم، جواد احدیان و سید محسن سجادی
۳۳	ارزیابی سهم اجزای شبکه جریان در اطراف زهکش زیرزمینی در یک مزرعه شالیزاری مهدی جعفری تلوکلایی، علی شاهنظری و هنک ریتزما
۵۳	بررسی ویژگی‌های مکانیکی پوشش بتنی کانال‌های انتقال آب حاوی نانوذرات بامبو جهانگیر عابدی کوپایی، علیرضا گوهری، سعید اسلامیان و آرمیتا معتمدی
۶۷	اصلاح اثرات ابرناکی بر محصول پوشش برف روزانه سنجنده مودیس (مطالعه موردی: شمال غرب ایران) راضیه ابراهیمی، صفر معروفی و حسین ترابزاده خراسانی
۸۳	ارزیابی عملکرد مدل‌های CANFIS، MLPNN، MLR و M5، در شبیه‌سازی شاخص خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه) حامد مازندرانی زاده و فریبا خدابخشی
۹۹	مطالعه آزمایشگاهی اثر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب سپیده رحیم‌نژاد، مهدی اسمعیلی ورکی، بهنام شفیعی ثابت و السیو رادیس
۱۱۹	بررسی کشتش آب در ناحیه غوطه‌وری جریان‌های غلیظ در محل قوس‌ها رضا الهی، مهدی قمشی و محمدرضا زایری

**EXTENDED ABSTRACT**

**Estimation of Sugar Cane Evapotranspiration Using Sybal Algorithm and Presly Taylor Method (Case Study of Amir Kabir Cultivation and Industry)**

J. Jalali<sup>1</sup>, F. Radmanesh<sup>2\*</sup>, A. A Naseri<sup>3</sup>, M. A. Akhond Ali<sup>4</sup> and H. Zarei<sup>5</sup>

1- Graduated with a PhD in water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2\*- Corresponding Author, Associated Professor, Water resource management, Shahid Chamran university of Ahvaz (radmanesh@scu.ac.ir).

3- Professors of Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

4- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

5- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 20 April 2019

Revised: 11 September 2019

Accepted: 14 September 2019

*Keywords:*

Remote sensing; Irrigation;  
Lysimeter; Landsat; Sentinel.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Jalali, J., Radmanesh, F., Naseri, A., Akhondali, M. A., Zarei, H. (2024). 'Estimation of Sugar Cane Evapotranspiration Using Sybal Algorithm and Presly Taylor Method (Case Study of Amir Kabir Cultivation and Industry)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 1-14. doi: 10.22055/jise.2019.27808.1813.

**Introduction**

Agricultural water management studies require accurate information on actual evapotranspiration. This information must have sufficient spatial detail to allow analysis on the farm or basin level (Sanchez et al., 2008). The methods used to estimate evapotranspiration are grouped into two main groups, which include direct methods and indirect or computational methods (Alizade and Kamali, 2007). Basics of the indirect methods are based on the relationship between meteorological parameters, which impedes the use of these data with a lack or impairment. On the other hand, this information is a point specific to meteorological stations, and their regional estimates are another problem of uncertainty of their own. To this end, the use of remote sensing technology can be a suitable approach to address these constraints. Real evapotranspiration can be estimated by satellite imagery that has short and long wavelengths and is estimated using surface energy equations (Chihda et al., 2010). Examples of such algorithms include SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998 Bastiaanssen, 2000;), METRIC (Allen et al., 2007), SEBS (Su, 2002). Among the above mentioned algorithms, energy billing algorithms have been used (Bagheriharooni et al., 2013; Teixeira et al., 2009). Among the factors of superiority of the SEBAL algorithm, in comparison with other remote sensing algorithms, is a satellite imagery analysis algorithm based on physical principles and uses satellite simulation and requires minimum meteorological information from ground measurements or air models (Bastiaanssen et al., 2002).

**Methodology**

In this research, 24 images from Landsat 8 satellite and 60 Sentinel 2 satellite images were used during growth period of sugarcane in 2016 and 2017, respectively (from May 28 to October 17 of

each mentioned year). The study area is located in the Amir Kabir unit of Sugarcane Industry in the southern province of Khuzestan, one of the seven sugar cane cultivars and industries with local coordinates of 48 ° 16'49"E and 31 ° 2' 2"N. Amir Kabir Cultivation & Industry is located at Km 45 of Ahvaz - Khorramshahr Road, which is located south of Mirza Kuchak Khan's cultivation and is located in the east of Karoon's River. The total area of this farm was 15,000 hectares and its net area was 12,000 hectares, divided into several 25 hectares. The required meteorological information was extracted from the Amir Kabir Crop Production and Meteorological Station. This information includes: wind speed, sunshine hours, maximum and minimum temperatures, and rainfall.

## Results and Discussion

The main objective of this study was to estimate the actual evapotranspiration of the sugarcane by using Landsat 8, Sentinel 2 and SEBAL algorithm. Finally, the results were compared with lysimetric data and analyzed. For statistical analysis of the results, the absolute difference indices and relative differences were used. In order to estimate evapotranspiration, as mentioned earlier, it was necessary to obtain the values of pure radiation and the heat flux for hot and cold pixels. The results are presented in Table 1, by separation of the evapotranspiration estimation method and the date of the images. Table (1) shows the potential evapotranspiration using the Taylor Presley method and the maximum values estimated by the SEBAL algorithm for Amir Kabir cultivation and industry. According to Table 1 the evapotranspiration rate calculated using the Taylor-Presley method is not significantly different from the evapotranspiration calculated by the SEBAL algorithm. In general, it can be stated that the method of using Landsat 8 and Sentinel 2 satellite images can calculate the amount of canopies evapotranspiration and transpiration with a small error value. the lysimeter gives the actual amount of evaporation and transpiration, by comparing the values of evapotranspiration calculated by the SEBAL algorithm and the values provided by the Lysimeter, the rate of error estimation indices represents less values. Therefore, according to Table (1), Sahbal algorithm is a suitable method for estimating the amount of evapotranspiration of cane sugar.

**Table 1- Potential evapotranspiration using the Taylor Presley method and the maximum values estimated by Sybal algorithm for Amir Kabir cultivation and industry**

(%)RMSE	(mm/day)MAE	SEBAL (mm/day)algorithm	Presley- Taylor	Date
5.1	0.21	4.78	4.51	2017/5/26
6.53	0.18	3.95	3.83	2017/6/27
3.12	0.27	2.83	2.65	2017/7/29
5.8	0.12	2.66	2.53	2017/8/30
9.87	0.16	3.65	3.56	2017/9/22
11.1	0.11	3.98	3.93	2017/9/10
7.82	0.09	5.98	5.93	2017/5/26
4.12	0.3	5.71	5.58	2017/6/27
6.32	0.25	4.86	4.55	2017/7/29
9.56	0.14	3.24	3.18	2017/8/30
2.33	0.1	4.98	4.91	2017/9/22
3.53	0.15	5.33	5.23	2017/9/10

The results showed that, despite the fact that the Sentinel 2 satellite does not have thermal bands, it is possible to calculate the actual evapotranspiration using the SEBAL algorithm by combining the satellite images with the Landsat satellite. Landsat satellite images are also challenging to estimate the water requirement, but according to the calculated indices, there is no significant difference with the lysimetric data. Compared to the combination of images, which have a precise accuracy in order to cover the time lag of Landsat 8 and Sentinel 2.



### Conclusions

The SEBAL algorithm solves the energy balance equation to calculate the actual evapotranspiration of the plant, and the calculated parameters such as surface temperature, NDVI are defined in a certain range and are acceptable. The calculations showed that the results were consistent with the acceptable limits stated in the sources and statistics, and they confirmed this algorithm.

Also, in comparison with the Taylor-Presley method, it was observed that SEBAL has calculated the actual evapotranspiration with acceptable results, which is also the reason for this method in calculating evapotranspiration. Due to errors in collecting climatic data such as wind speed, air temperature, solar radiation, day time duration, humidity, and also lack of calibration of coefficients such as coefficient of evaporation pan, plant coefficients for estimating evapotranspiration in many common error methods has it. In this regard, it is possible to consider new methods, such as the use of satellite imagery, to calculate the evapotranspiration of the plant for a wide range of plains as well as a point scale. It is obvious that by using suitable spatial resolution with homogeneity of the field farms and at appropriate time intervals, it is possible to plot the actual evapotranspiration of the plant for each region during the growing season.

### Acknowledgement

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH.1398.801 and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Shahid Chamran University, Ahvaz for their support.

### References

- 1- Alizade, A. and Kamali, G., 2007. Water requirement of plants in Iran. *Emam Reza university publications*. Mashhad.
- 2- Allen, R.G., Tasumi, M. and Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), pp. 380-394 Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).
- 3- Bagheriharooni, M.H., Arshad, S., Majnooni, A. and Morid, S., 2013. Comparing one source and two source remote sensing models for real evapotranspiration in Iran. *Journal of remote sensing and GIS in Iran*, 1(4), pp. 81-96.
- 4- Bastiaanssen, W., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. *Journal of Hydrology*, 229(1), pp. 87-100. Doi: 10.1016/S0022-1694(99)00202-4.
- 5- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R. and Holtslag, A., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 213, pp. 198-212. Doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
- 6- Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D., and Chemin, Y., 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resource Research*, 38(12), pp. 1-9. Doi: 10.1029/2001WR000386.
- 7- Chihda, Wu., Cheng, C., Lo, H. and Chen, Y., 2010. Study on estimating the evapotranspiration cover coefficient for stream flow simulation through remote sensing techniques. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(4), pp. 225-232. Doi: 10.1016/j.jag.2010.03.001.
- 8- Sanchez, J., Kustas, W., Caselles, V. and Anderson, M., 2008. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), pp. 1130-1143. Doi: 10.1016/j.rse.2007.07.018.

- 
- 9- Su, Z., 2002. The Surface Energy Balance System(SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences.*,6(1), pp. 85-100.
- 10-Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D. and Bos, M.G., 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3), pp. 462-476. Doi: 10.1016/j.agrformet.2008.09.016.



© 2024 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/>).

## برآورد تبخیر تعرق گیاه نیشکر با استفاده از الگوریتم سبال و روش پریسلی تیلور (مطالعه موردی کشت و صنعت امیرکبیر اهواز)

جمیل جلالی<sup>۱</sup>، فریدون رادمنش<sup>۲\*</sup>، عبدعلی ناصری<sup>۳</sup>، محمدعلی آخوندعلی<sup>۴</sup> و حیدر زارعی<sup>۵</sup>

- ۱- دانش آموخته دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- نویسنده مسئول، استاد گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. radmanesh@scu.ac.ir
- ۳- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.
- ۴- استاد گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.
- ۵- استاد گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۳۱

### چکیده

تبخیر یکی از پارامترهای مهم در مدیریت پیکره‌های آبی است، با توجه به محدودیت روش‌های فیزیکی و تجربی برآورد تبخیر، استفاده از فناوری سنجش از دور به دلیل امکان برآورد مکانی اطلاعات و همچنین حداقل نمودن استفاده از داده‌های هواشناسی می‌تواند کاربرد وسیعی در محاسبه تبخیر داشته باشد. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم سبال برای محاسبه آلبیدوی سطح، دمای سطحی و شاخص وضعیت پوشش گیاهی از داده‌های ماهواره‌ای لندست هشت و سنتینل دو چند طیفی و اطلاعات هواشناسی مانند درجه حرارت، ساعات آفتابی، باد و غیره استفاده شده و در نهایت تبخیر تعرق در کشت و صنعت نیشکر واحد امیرکبیر واقع در جنوب غربی خوزستان، محاسبه شد و نقشه‌های تبخیر تعرق برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ تهیه گردید. هم‌چنین تبخیر تعرق واقعی با استفاده از روش پریسلی تیلور محاسبه شد و با روش سبال مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین تفاضل مطلق بین روش الگوریتم سبال و پریسلی تیلور برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به ترتیب برابر ۰/۱۷۵ و ۰/۱۷۱ میلی متر بر روز به دست آمد و میانگین تفاضل مطلق بین روش الگوریتم سبال و لایسیمتر برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به ترتیب برابر ۰/۱۸۵ و ۰/۲۳۶ به دست آمد. نتایج نشان داد که تبخیر تعرق محاسبه شده با این دو روش قابل قبول است و الگوریتم سبال توانایی بالایی در تعیین تبخیر تعرق برخوردار است.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، آبیاری، لایسیمتر، لندست، سنتینل.

### مقدمه

تبخیر تعرق واقعی گیاه تبدیل می‌شود (Allen et al, 1998). روش‌های اندازه‌گیری تبخیر تعرق با استفاده از لایسیمتر برای کاربرد پیوسته در فاصله‌های مناسب در منطقه، بسیار پرخرج و وقت‌گیر است. هم‌چنین چون این اندازه‌گیری‌ها نقطه‌ای است، به خاطر شرایط متغیر آب و هوایی و منطقه‌ای، قابل تعمیم به حوضه‌های بزرگ نمی‌باشد، بنابراین تخمین به‌وسیله سنجش از دور در زمین‌های وسیع، بسیار کارآمدتر می‌باشد (Purmohammadi and Rahimian, 2010).

مبنای بیشتر روش‌های غیرمستقیم ارایه شده، بر پایه رابطه‌های بین پارامترهای هواشناسی است که کمبود و یا نقصان این داده‌ها، استفاده از آن‌ها را با محدودیت روبرو می‌کند. از طرفی این اطلاعات، نقطه‌ای و مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی است و برآورد منطقه‌ای آن‌ها مشکل دیگری است که عدم قطعیت‌های خاص خود را دارد.

بررسی‌های مدیریت آب کشاورزی به اطلاعات دقیقی از تبخیر تعرق واقعی نیاز دارد. این اطلاعات باید دارای جزئیات مکانی کافی باشد تا بتوان تحلیل‌ها را در سطح مزرعه و یا حوضه انجام داد (Sanchez et al., 2008). روش‌هایی که برای برآورد تبخیر تعرق به کار گرفته می‌شود در دو گروه اصلی قرار می‌گیرند که عبارتند از: روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم یا محاسباتی (Alizade and Kamali, 2007). معمول‌ترین روش مستقیم برآورد تبخیر تعرق استفاده از اصل بیلان جرمی در یک حجم کنترل شده از خاک است. از میان روش‌های غیرمستقیم تبخیر تعرق گیاه نیز می‌توان به روش ذکر شده در نشریه‌ی فائو ۵۶ اشاره کرد. در این روش ابتدا تبخیر تعرق پتانسیل با استفاده از روش استاندارد پنمن-مانتیت محاسبه شده و سپس با استفاده از ضریب گیاهی به

گندم، گیاهان مرتعی و نیزارها) تبخیر تعرق جداگانه‌ای را ارائه داد. در ضمن تبخیر تعرق به‌دست‌آمده از الگوریتم سبال با تبخیر تعرق مرجع محاسبه‌شده از معادله پنمن-مانتیت حدود ۸۵ درصد همبستگی نشان داد.

آنچه که مسلم است کارایی این الگوریتم در مدیریت بهینه منابع آب است. به‌طوری‌که با داشتن مقدار تبخیر تعرق واقعی به صورت مکانی، تصویر صحیحی از الگوی مصرف آب در هر منطقه (حتی در مقیاس وسیع) به‌دست می‌آید. براساس آن می‌توان اقدام به برنامه‌ریزی و تعیین مقدار آب مورد نیاز به هر منطقه نمود. هدف از پژوهش حاضر نیز تعیین میزان تبخیر تعرق واقعی به کمک الگوریتم سبال با استفاده از ماهواره لندست و سنتینل در واحد کشت و صنعت امیرکبیر است که با استفاده از اطلاعات لایسیمیتری و روش تجربی پریسلی تیلور به مقایسه کارایی الگوریتم سبال با این روش‌ها پرداخته شد.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات منطقه

در این تحقیق از ۲۴ تعداد تصویر ارسال شده از ماهواره لندست ۸ و ۶۰ تصویر ماهواره سنتینل دو در دوره رشد رشد تا برداشت گیاه نیشکر در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ میلادی مصادف با سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ شمسی (۲۸ اردیبهشت تا ۱۷ مهرماه) استفاده شد. سری زمانی تصاویر ارسالی از ماهواره هر ۱۶ روز با شفافیت ۳۰ متر می‌باشد. در این دوره هیچ کدام از تصاویر مشکل ابری بودن را نداشتند. منطقه مورد مطالعه در کشت و صنعت نیشکر واحد امیرکبیر واقع در جنوب استان خوزستان، یکی از هفت شرکت توسعه‌ی کشت نیشکر و صنایع جانبی با مختصات محلی  $48^{\circ} 16' 49'' E$  و  $31^{\circ} 2' 2'' N$  می‌باشد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی کشت و صنعت توسعه نیشکر امیرکبیر را نشان می‌دهد. مساحت ناخالص اراضی این کشت و صنعت ۱۵۰۰۰ هکتار و مساحت خالص آن ۱۲۰۰۰ هکتار بوده که به چندین قطعه ۲۵ هکتاری تقسیم‌بندی شده است. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه هواشناسی کشت و صنعت امیرکبیر استخراج شد. این اطلاعات شامل: سرعت باد، ساعات آفتابی، دمای حداکثر و حداقل و بارش می‌باشند. داده‌های مذکور برای سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ همراه با شروع ارسال عکس‌های ماهواره landsat8 و Sentinel مورد استفاده قرار گرفتند.

بدین منظور استفاده از فناوری سنجنش از دور و تصویرهای ماهواره‌ای، می‌تواند رویکرد مناسبی برای پاسخ به این محدودیت‌ها باشد. تبخیر تعرق واقعی را می‌توان با تصویرهای ماهواره‌ای که دارای طول موج‌های کوتاه و بلند هستند و با کاربرد معادله‌های بیلان انرژی سطحی برآورد کرد (Chihda et al., 2010). از نمونه الگوریتم‌های مطرح می‌توان به مدل‌های SEBAL، Bastiaanssen et al. (2000)، Bastiaanssen et al. (1998)، Metric، Allen et al. (2007)، SEBS، Su (2002) اشاره کرد. از بین الگوریتم‌های ذکرشده از الگوریتم بیلان انرژی استفاده‌ی بیشتری شده است (Bagheriharooni et al., 2013; Teixeira et al., 2009). از عوامل برتری الگوریتم سبال نسبت به دیگر الگوریتم‌های سنجنش از دور این است که سبال شامل الگوریتم آنالیز تصاویر ماهواره‌ای بر مبنای اصول فیزیکی است و از شبیه‌سازی ماهواره‌ای استفاده می‌کند و نیاز به حداقل اطلاعات هواشناسی از اندازه‌گیری‌های زمینی یا مدل‌های هوایی دارد (Bastiaanssen et al. 2002).

Ogunjobi et al (2018) مقدار تبخیر تعرق واقعی را در دشت آکوره کشور نیجریه با استفاده از تصاویر لندست ۸ محاسبه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد مقدار تبخیر تعرق واقعی در مقایسه با مقدار تبخیر تعرق حاصل از لایسیمتر تفاوت قابل توجهی ندارند. Li et al (2008) مطالعه‌ای با استفاده از تصاویر NOAA و الگوریتم SEBAL روی میزان آب مصرفی و بهره‌وری آب گیاه گندم در دشت‌های شمال چین انجام داد. طبق نتایج به‌دست‌آمده خطای نسبی بین مقدار تبخیر تعرق فصلی با داده‌های لایسیمتری وزنی ۴/۲ درصد می‌باشد.

Bastiaanssen et al. (2005) به بررسی دقت سبال در شرایط مختلف آب و هوایی و در مقیاس مزرعه‌ای و حوزه‌ای پرداختند. برای شرایط رطوبت خاک و شرایط گیاهی رایج در منطقه، صحت در مقیاس مزرعه‌ای ۸۵ درصد برای دوره یک روزه و تا ۹۵ درصد برای دوره فصلی گزارش شده است. دقت تعیین تبخیر تعرق سالیانه نیز در حوزه‌های بزرگ به‌طور متوسط ۹۶ درصد بیان شده است.

در پژوهش Purmohammadi و Rahimiyan (2010) میزان تبخیر تعرق واقعی گیاهان تحت تنش‌های محیطی در دشت آزادگان واقع در استان خوزستان توسط الگوریتم سبال برآورد شد. نتایج این پژوهش برای هر یک از سایت‌های موجود در منطقه (گیاه

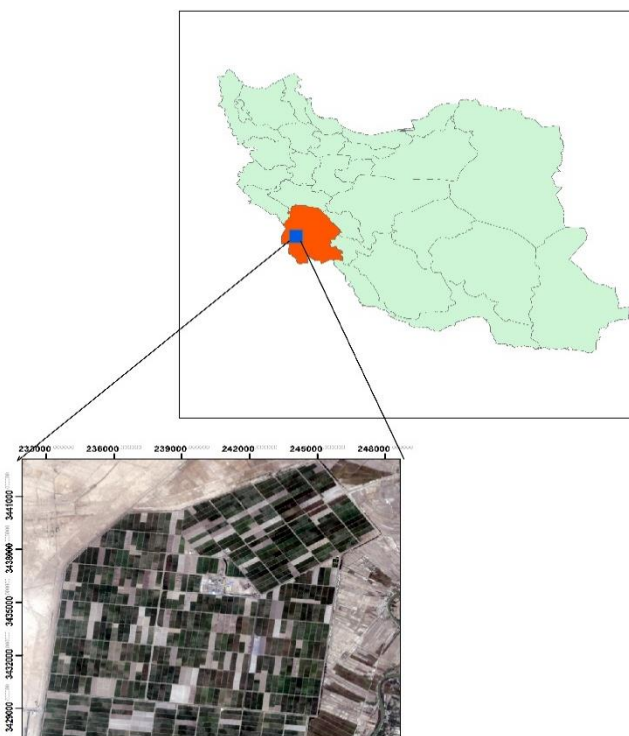


Fig. 1- location of Amir Kabir Sugarcane plantation and industry

شکل ۱- موقعیت کشت و صنعت توسعه نیشکر امیر کبیر

شامل: ارایه تصاویر چندطیفی با پوشش جهانی و دارای توان تفکیک مکانی و زمانی بالا ارایه تصاویری که مکمل داده‌های تصویری لندست و اسپات باشد. این تصاویر دارای توان تفکیک مکانی متغیر ۱۰ تا ۶۰ متر و شامل ۱۳ باند در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه می‌باشند. علاوه بر این، سنتینل دو دارای عرض برداشت ۲۹۰ کیلومتر و توان تفکیک زمانی ۵ روز در استوا می‌باشد (Ezatabadipur, 2016).

#### الگوریتم سبال

در این الگوریتم با استفاده از معادله توازن انرژی مقدار شار گرمای نهان تبخیر برای هر پیکسل از رابطه (۱) به دست می‌آید (Bastiaanssen et al, 2002):

$$\lambda_{ET} = R_n - G - H \quad (1)$$

که در آن:

$\lambda_{ET}$  شار گرمای نهان تبخیر ( $W/m^2$ ),  $R_n$  میزان تابش خالص خورشیدی ( $W/m^2$ ),  $G$  شار گرمای خاک ( $W/m^2$ ) و  $H$  شار گرمای محسوس می‌باشد.

#### اطلاعات لایسینتر

در این مطالعه از لایسینترهای زهکش‌دار شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر به عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی استفاده شد. داده‌های لایسینتر برای صحت‌سنجی داده‌های تبخیرتغرق استفاده شد. مساحت این لایسینترها ۱۲۰ مترمربع است و از ۱۰ لایسینتر کوچکتر با ابعاد ۶×۲ متر با کف شیب‌دار و عمق حدود دو متر و شیب ۰/۰۰۵ تشکیل شده است.

#### ماهواره‌های مورد استفاده در این پژوهش

از ماهواره لندست ۸ و سنتینل دو استفاده شد. ماهواره لندست ۸ در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ راه‌اندازی شد که محصول همکاری بین ناسا و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) است. ویژگی مهم لندست قابلیت مطالعه پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی در طول زمان است زیرا داده‌های تولیدی آن‌ها از لحاظ اخذ داده، کالیبراسیون، ویژگی‌های طیفی و در نهایت محصول خروجی سازگار هستند. سنتینل دو، بخشی از برنامه Copernicus است که توسط آژانس فضایی اروپا برای جمع‌آوری اطلاعات از زمین طراحی و ایجاد شده است. سنتینل دو، شامل دو ماهواره تصویربرداری به نام‌های سنتینل دو A و سنتینل دو B است. دو ماموریت اصلی سنتینل دو

در مناطق خشک و نیمه خشک تنک بودن پوشش گیاهی باعث می‌شود اثرات بازتاب خاک زمينه، اثر بازتاب پوشش گیاهی را تحت تاثیر قرار دهد و بر آن غلبه کند. SAVI شاخص تصحیح شده NDVI است که اثرات زمينه و رطوبت خاک را در شاخص NDVI کاهش می‌دهد و از رابطه (۶) به دست می‌آید ( Bastiaanssen et al., 2002):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_4 - \rho_3)}{\rho_4 + \rho_3 + L} \quad (6)$$

که در آن L فاکتور تصحیح اثرات خاک می‌باشد که دامنه‌ی آن صفر برای پوشش گیاهی متراکم تا یک برای پوشش گیاهی با تراکم کمتر متغیر است. مقدار L با استفاده از اطلاعات تصاویر و روابط (۷) و (۸) به دست می‌آید:

$$L = 1 - (2 \times a \times NDVI \times WDVI) \quad (7)$$

$$WDVI = \rho_4 - \gamma \rho_3 \quad (8)$$

که در آن  $\gamma$  ضریب خط خاک می‌باشد که در واقع شیب خط برازش داده شده بر نمودار طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک (باند ۴) و قرمز (باند ۳) است (Yang et al., 2006). WDVI شاخص وزنی (مادون قرمز نزدیک) اختلاف پوشش گیاهی و a برابر با شیب خاک بوده که مقدار آن برابر با ۱/۶ می‌باشد. مقدار آلبدو در بالای اتمسفر با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) به دست می‌آیند:

$$\alpha_{Toa} = \sum_{i=1}^n (W_{\lambda i} \times \rho_{\lambda i}) \quad (9)$$

$$W_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum_{i=1}^n ESUN_{\lambda}} \quad (10)$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} \times \cos \theta \times d_r} \quad (11)$$

$\alpha_{Toa}$  تابش بالای اتمسفر،  $L_{\lambda}$  تابش طیفی ( $W/m^2/sr/\mu m$ )،  $\theta$  زاویه میل خورشیدی،  $d_r$  معکوس فاصله نسبی زمین تا خورشید،  $W_{\lambda}$  ضریب وزنی برای هر باند،  $ESUN_{\lambda}$  پتانسیل تابش خورشید در هر باند ( $W/m^2/\mu m$ ) و  $\rho_{\lambda}$  میزان انعکاس در هر باند سنجنده در سطح (بدون بعد) می‌باشد.

اندازه‌گیری شار گرمای خاک (G) به‌طور مستقیم با استفاده از سنجش از دور امکان‌پذیر نیست اما مطالعه‌های بسیاری نشان دادند

مقدار تابش خالص از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید که عبارتند از تابش طول موج کوتاه ورودی ( $R_s \downarrow$ )، بازتابش طول موج باند خروجی ( $R_s \uparrow$ )، تشعشع‌های طول موج بلند ورودی به اتمسفر ( $R_L \downarrow$ ) و تشعشعات طول موج بلند گسیل شده از سطح ( $R_L \uparrow$ ). تابش خالص با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Bastiaanssen et al., 1998):

$$R_n = (1-\alpha) R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1-\epsilon_0) R_L \uparrow \quad (2)$$

که در آن:

$\alpha$  آلبدوی سطح (بدون بعد) و  $\epsilon_0$  گسیلندگی سطح به دست آمده از طریق شاخص سطح برگ (LAI) می‌باشد. در الگوریتم سبال دو نوع گسیلندگی از سطح استفاده می‌شود که عبارتند از:  $\epsilon_{NB}$  که برای محاسبه‌ی دمای سطح و  $\epsilon_0$  که برای محاسبه تشعشع‌های طول موج بلند گسیل یافته از سطح استفاده می‌شود. مقادیر  $\epsilon_{NB}$  و  $\epsilon_0$  برای شرایطی که شاخص تعدیل شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) بزرگ‌تر از صفر باشد از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آید:

$$\epsilon_{NB} = 0.97 + 0.0033 LAI \quad LAI < 3 \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = 0.95 + 0.01 LAI \quad LAI > 3 \quad (4)$$

که در آن  $\epsilon_0$  قابلیت انتشار حرارتی سطح (بدون بعد)،  $\epsilon_{NB}$  قابلیت انتشار تشعشع‌های طول موج بلند گسیل یافته از سطح (بدون بعد) و LAI شاخص سطح برگ (بدون بعد) می‌باشد. شاخص گیاهی NDVI، وضعیت پوشش گیاهی در سطح زمین را مشخص می‌کند. NDVI با استفاده از رابطه‌ی (۵) برای تصاویر لندست استفاده می‌شود (Bastiaanssen et al., 2002):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (5)$$

که  $\rho_4$  و  $\rho_3$  بازتاب طیفی باندهای سه و چهار می‌باشند. شاخص گیاهی NDVI بین +۱ و -۱ است. زمین‌های شامل پوشش گیاهی متراکم دارای مقادیر مثبت ۰/۳ تا ۰/۸ هستند. برخلاف ابر، آب و برف طول موج بخش مرئی را بیشتر از طول موج مادون قرمز نزدیک انعکاس می‌دهند (Bastiaanssen, 2000). بنابراین، این پدیده‌ها دارای شاخص‌های منفی هستند. صخره‌ها و مناطق خاکی بدون پوشش، در هر دو باند انعکاس مشابهی داشته و در نتیجه شاخص پوشش گیاهی آن‌ها صفر خواهد بود.

حالت معادله پنمن حد پایینی برای مقدار تبخیرتغرق از سطح مرطوب را به دست می‌دهد که تبخیرتغرق تعادلی نامیده می‌شود و به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد:

$$E_e = \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_n}{\lambda} \quad (14)$$

در این رابطه  $E_e$  تبخیرتغرق تعادلی (میلی‌متر در روز)،  $R_n$  تابش خالص (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $\lambda$  گرمای ویژه آب (مگاژول بر کیلوگرم)،  $\gamma$  ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) است. Priestley و Taylor (1972) مفهوم تبخیرتغرق تعادلی را به‌عنوان پایه‌ای برای ایجاد معادله‌ای تجربی که تبخیر از یک سطح مرطوب تحت شرایط حداقل تغییرات را به دست می‌دهد، استفاده کردند. در این روش تبخیرتغرق مرجع با استفاده از ضریب  $\alpha$  به صورت مستقیم از تبخیر تعادلی در رابطه (۱۵) به دست می‌آید:

$$ET_0 = \alpha E_e \quad (15)$$

$ET_0$  تبخیرتغرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)،  $E_e$  تبخیرتغرق تعادلی،  $\alpha$  ضریب تجربی است که Priestley و Taylor (1972) مقادیر آن را بین ۱/۰۸ و ۱/۳۴ با مقدار متوسط ۱/۲۶ به دست آوردند. در این تحقیق مقدار متوسط ۱/۲۶ برای  $\alpha$  استفاده شده است. به منظور یافتن دقت الگوریتم سبال، نتایج به دست آمده با داده‌های تبخیرتغرق لایسیمتر و روش Priestley و Taylor (1972) با استفاده از روش‌های آماری مقایسه شدند. برای این منظور از پارامترهای تفاضل مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب رابطه (۱۶) و (۱۷) استفاده شدند:

$$MAE = \sum |ET_0 - ET_e| / n \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(ET_0 - ET_e)^2}{n}} \quad (17)$$

برای محاسبه تبخیرتغرق با استفاده از الگوریتم سبال نیاز به محاسبه‌ی پیکسل‌های سرد و گرم با استفاده از باندهای حرارتی است. اما ماهواره سنتینل دو دارای باندهای حرارتی نمی‌باشد ولی دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی است و از نظر زمانی هر پنج روز عکس‌برداری را انجام می‌دهد. با توجه به این مزایا نسبت به ماهواره لندست ۸ در این پژوهش برای محاسبه شاخص‌های مدنظر موجود در الگوریتم سبال از تصاویر ماهواره سنتینل دو استفاده شد و فقط برای محاسبه پیکسل‌های سرد و گرم از باند حرارتی ماهواره لندست ۸ استفاده شد.

که بین مقدار  $(G/R_n)$  و پارامترهایی چون NDVI، دمای سطح  $(T_s)$  و آلبیدو رابطه‌ای وجود دارد (Bastiaanssen, 2000).

مهم‌ترین و مشکل‌ترین قسمت در الگوریتم سبال محاسبه شار گرمای محسوس ( $H$ ) براساس انتقال گرما است که مقدار آن از رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید:

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (12)$$

که در آن  $\rho$  چگالی هوا ( $\text{Kg/m}^3$ )،  $C_p$  گرمای ویژه هوا ( $\text{J/Kg}^\circ\text{K}$ )،  $dT$  اختلاف دما ( $\text{K}^\circ$ ) بین دو ارتفاع و  $r_{ah}$  مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما است.

چگالی هوا با توجه به نقشه ارتفاعی و دمای سطحی برای هر پیکسل محاسبه می‌گردد. این محاسبات تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد می‌باشند. با این وجود حل رابطه (۱۲) به دلیل دو عامل ناشناخته  $dT$  و  $r_{ah}$  مشکل است. در الگوریتم سبال برای برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شود یکی از پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود مربوط به منطقه‌ای است که به طور کامل پوشیده از گیاهان آبیاری شده است و دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هوا می‌باشد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نامیده می‌شود که زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می‌باشد که تبخیرتغرق در آن صفر فرض می‌شود. در این تحقیق از NDVI و دمای سطحی تصحیح‌شده برای تعیین پیکسل سرد و گرم استفاده شد، به طوری که در پیکسل گرم NDVI حداقل دمای سطحی حداکثر بوده و در پیکسل سرد NDVI حداکثر و دما حداقل بودند (Bastiaanssen et al., 1998). تبخیرتغرق براساس بیلان انرژی در لحظه گذر ماهواره محاسبه می‌شود. این مقدار باید به تبخیرتغرق روزانه تبدیل گردد. برای این منظور جز تبخیری ( $ET_{rf}$ ) برای هر پیکسل تصویر از رابطه‌ی (۱۳) محاسبه می‌شود (Bastiaanssen et al., 2002):

$$ET_{rf} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (13)$$

که در آن  $ET_{inst}$  تبخیرتغرق لحظه‌ای ( $\text{mm/hr}$ ) و  $ET_r$  تبخیرتغرق گیاه مرجع است.

### روش پریسلی-تیلور

در روش پیشنهادی Priestley و Taylor (1972) تبخیرتغرق گیاه مرجع با استفاده از ضریب  $\alpha$  به تبخیرتغرق تعادلی ارتباط داده می‌شود. هنگامی که هوا در تماس با یک سطح مرطوب گسترده باشد، در صورت عدم وجود جریان افقی، ممکن است به حالت اشباع رسیده باشد و قدرت تبخیری هوا از بین برود. در این

## نتایج و بحث

سبال اختلاف قابل توجهی ندارد. به طور کلی می‌توان بیان نمود که در روش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل دو می‌توان میزان تبخیر تعرق گیاه نیشکر را با مقدار خطای کمی محاسبه نمود. نتایج تبخیر تعرق واقعی روزانه در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر با استفاده از روش لایسیمتر و مقادیر تخمین زده شده به وسیله الگوریتم سبال ارائه شده است. با توجه به این که لایسیمتر مقدار واقعی تبخیر تعرق را می‌دهد، با مقایسه مقادیر تبخیر تعرق محاسبه شده توسط الگوریتم سبال و مقادیر ارائه شده توسط لایسیمتر، میزان شاخص‌های برآورد خطا مقادیر کمتری را نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به جداول (۱) و (۲) الگوریتم سبال روش مناسبی برای برآورد مقدار تبخیر تعرق گیاه نیشکر است.

به منظور تحلیل آماری نتایج از شاخص‌های تفاضل مطلق و تفاضل نسبی استفاده شده است. برای برآورد تبخیر تعرق لازم بود مقادیر تابش خالص و شار گرمای خاک برای پیکسل‌های سرد و گرم به دست آید. نتایج به تفکیک روش برآورد تبخیر تعرق و تاریخ تصاویر ارائه شده است (جداول ۱ و ۲). نتایج تبخیر تعرق پتانسیل با استفاده از روش Priestley و Taylor (1972) و حداکثر مقادیر تخمین زده شده به وسیله الگوریتم سبال برای کشت و صنعت امیرکبیر ارائه شده است (جدول ۱). مطابق جدول (۱) با توجه به شاخص‌های محاسبه شده میزان تبخیر تعرق محاسبه شده با استفاده از روش Priestley و Taylor (1972) با تبخیر تعرق محاسبه شده توسط الگوریتم

جدول ۱- تبخیر تعرق پتانسیل با استفاده از روش پریسلی تیلور و حداکثر مقادیر تخمین زده شده به وسیله الگوریتم سبال برای کشت و صنعت امیرکبیر

Table 1- Potential evapotranspiration by Priestly-Taylor and maximum estimated evapotranspiration by SEBAL for Amir Kabir plantation and industry

Date	Priestly-Taylor	SEBAL algorithm(mm/day)	MAE(mm/day)	RMSE(%)	Mean absolute difference (mm/day)
5/18/2017	4.51	4.78	0.21	5.1	0.175
5/26/2017	3.83	3.95	0.18	6.53	
6/27/2017	2.65	2.83	0.27	3.12	
7/29/2017	2.53	2.66	0.12	5.8	
8/30/2017	3.56	3.65	0.16	9.87	
10/09/2017	3.93	3.98	0.11	11.1	
5/18/2018	5.93	5.98	0.09	7.82	
5/26/2018	5.58	5.71	0.3	4.12	
6/27/2018	4.55	4.86	0.25	6.32	
7/29/2018	3.18	3.24	0.14	9.56	
8/30/2018	4.91	4.98	0.1	2.33	0.171
9/22/2018	5.23	5.33	0.15	3.53	

جدول ۲- تبخیر تعرق واقعی روزانه در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر با استفاده از روش لایسیمتر و مقادیر تخمین زده شده به وسیله الگوریتم سبال

Table 2- Potential evapotranspiration by lysimeter and maximum estimated evapotranspiration by SEBAL for Amir Kabir plantation and industry

Date	Lysimeter	SEBAL algorithm(mm/day)	MAE(mm/day)	RMSE(%)	Mean absolute difference (mm/day)
5/18/2017	4.56	4.78	0.18	13.34	0.185
5/26/2017	3.89	3.95	0.12	5.87	
6/27/2017	2.76	2.83	0.24	9.98	
7/29/2017	2.63	2.66	0.16	15.45	
8/30/2017	3.66	3.65	0.1	6.85	
10/09/2017	3.98	3.98	0.31	2.96	
5/18/2018	5.96	5.98	0.22	4.36	
5/26/2018	5.65	5.71	0.19	4.87	
6/27/2018	4.82	4.86	0.27	8.95	
7/29/2018	3.23	3.24	0.23	12.66	
8/30/2018	4.98	4.98	0.34	3.23	0.236
9/22/2018	5.36	5.33	0.17	5.12	



حداکثر و حداقل تبخیرتغرق برابر  $7/2$  و  $2/6$  میلی‌متر در روز می‌باشد. شکل (۴) نیز میزان تبخیرتغرق واقعی محاسبه شده توسط الگوریتم سبال برای ماه مرداد را نشان می‌دهد که میزان حداکثر و حداقل میزان تبخیرتغرق در این ماه به ترتیب  $12$  و  $0/3$  میلی‌متر در روز بوده است. شکل (۵) میزان تبخیرتغرق واقعی ماه مهر را نشان می‌دهد که میزان حداکثر و حداقل تبخیرتغرق به ترتیب برابر  $10$  و  $2/1$  است.

شکل (۳) و (۴) به ترتیب مقایسه مقدار تبخیرتغرق با روش Priestley و Taylor (1972) و تبخیرتغرق با مدل سبال و مقایسه تبخیرتغرق واقعی با روش لایسیمتر و تبخیرتغرق با مدل سبال را نشان می‌دهند.

شکل (۲) مقادیر تبخیرتغرق محصول نیشکر با استفاده از الگوریتم سبال با استفاده از تصاویر لندست ۸ و سنتینل دو را نشان می‌دهند. بررسی پارامترها و شاخص‌های مهم قابل استخراج از تصاویر ماهواره‌های تبخیرتغرق واقعی روزانه برحسب میلی‌متر بر روز با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست ۸ و سنتینل دو (شکل ۲) نشان می‌دهد که تبخیرتغرق واقعی حاصل از تصاویر لندست ۸، سنتینل دو و الگوریتم سبال دارای حداقل و حداکثر مقدار تبخیرتغرق صفر و  $6/98$  میلی‌متر در روز در ماه اردیبهشت می‌باشد. هم‌چنین در شکل (۲) تبخیرتغرق واقعی حاصل از تصاویر لندست ۸، سنتینل دو و الگوریتم سبال نشان می‌دهد که حداقل و حداکثر مقدار تبخیرتغرق در  $2/6$  و  $7/2$  میلی‌متر در روز در ماه خرداد می‌باشد. شکل (۳) میزان تبخیرتغرق گیاه نیشکر برای ماه تیر را نشان می‌دهد که میزان

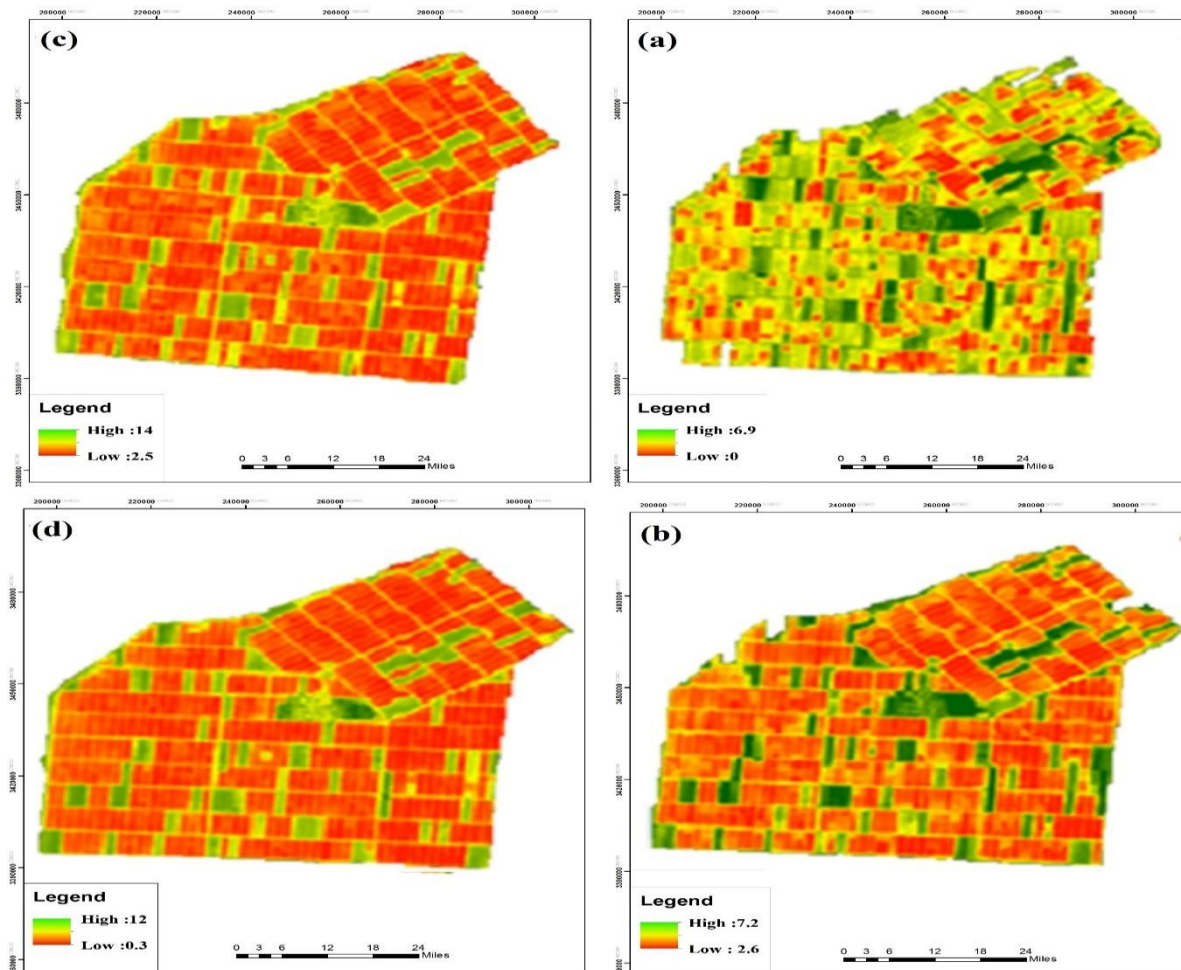


Fig. 2- Calculated evapotranspiration by SEBAL : (a) 18 May 2018; (b) 26 May 2018; (c) 27 June 2018; (d) 29 July 2018

شکل ۲- تبخیرتغرق محاسبه شده با استفاده از الگوریتم سبال برای ماه‌های مختلف: (a) ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۷؛ (b) ۵ خرداد ۱۳۹۷؛ (c) ۶ تیر ۱۳۹۷؛ (d) ۷ مرداد ۱۳۹۷

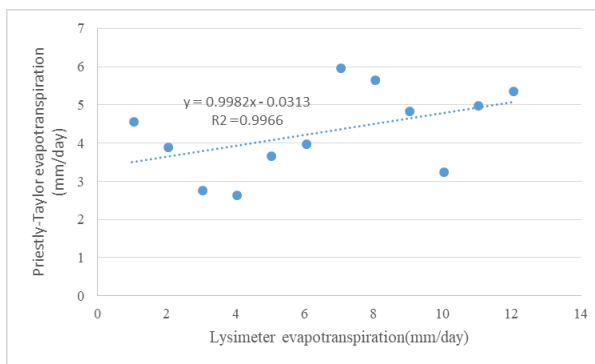


Fig. 3- Comparing evapotranspiration by Priestly-Taylor and SEBAL algorithm

شکل ۳- مقایسه مقدار تبخیر تعرق با روش پریسلی تیلور و تبخیر تعرق با پریسلی تیلور

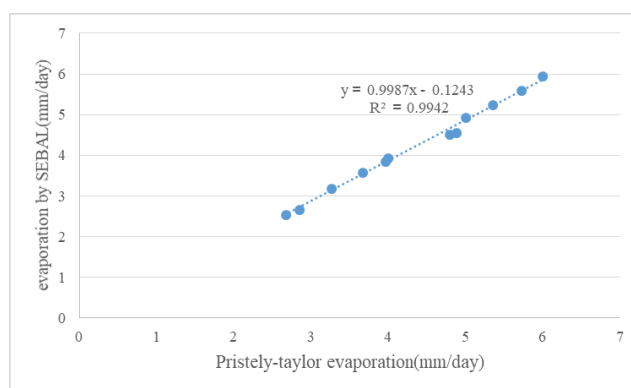


Fig. 4- Comparing evapotranspiration by Lysimeter and SEBAL algorithm

شکل ۴- مقایسه تبخیر تعرق واقعی با روش لایسیمتر و تبخیر تعرق با مدل سبال

۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌متر در ساعت می‌باشد. برای ارزیابی دقت نهایی روش، از تحلیل میانگین مربع خطا RMSE و داده‌های سینوپتیک منطقه با مقدار متوسط ۰/۸ استفاده شد. نتایج نهایی حاصل شده حکایت از قابلیت خوب کاربرد تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در تعیین تبخیر تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه دارد.

نتایج نشان دادند که علی‌رغم این که ماهواره سنتینل دو دارای باندهای حرارتی نمی‌باشد اما با تلفیق تصاویر این ماهواره با ماهواره لندست ۸ می‌توان میزان تبخیر تعرق واقعی را با استفاده از الگوریتم سبال محاسبه نمود. همچنین تصاویر ماهواره لندست به لحاظ زمانی جهت برآورد نیاز آبی چالش برانگیز هستند اما با توجه به شاخص‌های محاسبه شده تفاوت چندانی با داده‌های لایسیمتری نشان نمی‌دهد و دارای دقت مناسبی است.

### نتیجه گیری

الگوریتم سبال معادله کامل بیلان انرژی را به منظور محاسبه تبخیر تعرق واقعی گیاه، حل می‌کند و پارامترهای محاسبه شده در آن از جمله دمای سطحی، NDVI در محدوده خاصی تعریف شده‌اند و قابل قبول هستند. محاسبات نشان داد که نتایج حاصل از الگوریتم

با توجه به شکل (۳) و (۴) محاسبه تبخیر تعرق با روش سبال همبستگی بالاتری با روش محاسبه شده به روش لایسیمتر نسبت به روش Priestley و Taylor (1972) دارد. در روش Priestley و Taylor وجود برخی فرضیه‌ها و متغیرها باعث ایجاد خطا و بروز همبستگی کمتر نسبت به روش لایسیمتر می‌شود.

Simaie et al (2013) در تحقیق خود کارایی مدل SEBAL در برآورد میزان تبخیر تعرق حوضه آبخیز زنگان رود را بررسی کردند و آن‌ها در تحقیق خود از ماهواره‌های MODIS و LANDSAT-5 برای کشت گندم آبی و دیم استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که دقت تصاویر سنجنده TM دو و نیم برابر بیشتر از تصاویر MODIS می‌باشد و به این نتیجه رسیدند تصاویر سنجنده TM دقت بیشتری برای تخمین تبخیر تعرق نسبت به سنجنده MODIS دارند.

Mokhtari و Moslemzadeh (2015) کارایی کاربرد تصاویر ماهواره لندست برای تخمین تبخیر تعرق دشت سگزی را بررسی کردند. پس از تعیین مقدار شار گرمای محسوس، تبخیر تعرق محاسبه گردید. نتایج به دست آمده ناشی از خروجی‌های تحلیل‌های مکانی نشان داد که تبخیر تعرق واقعی به دست آمده در محدوده بین

ماهواره‌ای، را مد نظر داشت و تبخیرتعرق گیاه را برای دشت‌های مختلف در مقیاس وسیع و هم‌چنین مقیاس نقطه‌ای محاسبه نمود. واضح است که با استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی مناسب با وسعت و همگنی مزارع منطقه و در فواصل زمانی مناسب، می‌توان اقدام به ترسیم نقشه‌های تبخیرتعرق واقعی گیاه برای هر منطقه، در طول فصل رشد نمود.

### تقدیر و تشکر

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WH.1398.801 صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تقدیر می‌شود.

سبال با روش Priestley و Taylor (1972) مطابقت داشته است و میانگین تفاضل مطلق بین روش الگوریتم سبال و Priestley و Taylor (1972) برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به ترتیب برابر ۰/۱۷۵ و ۰/۱۷۱ میلی‌متر بر روز به دست آمد که نشان می‌دهد مقدار خطا نیز بسیار کم بوده است. میانگین تفاضل مطلق بین روش الگوریتم سبال و لایسیمتر برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به ترتیب برابر ۰/۱۸۵ و ۰/۲۳۶ به دست آمد در نتیجه با مقایسه‌ی میزان خطا بین الگوریتم سبال و لایسیمتر نیز در حد قابل قبول بوده است. برآورد تبخیرتعرق به روش‌های معمول خطای بسیاری دارد که شامل خطاهای موجود در جمع‌آوری داده‌های آب و هوایی از جمله سرعت باد، دمای هوا، تشعشع خورشیدی، طول روز، رطوبت هوا و هم‌چنین عدم کالیبره کردن ضرایبی مانند ضریب تشتک تبخیر است که برای کاهش خطا می‌توان روش‌های نوینی همانند استفاده تصاویر

### References

- 1- Alizade, A. and Kamali, G., 2007. *Water requirement of plants in Iran*. Emam Reza University Publications. Mashhad.
- 2- Allen, R.G., Tasumi, M. and Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), pp. 380-394. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380). Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).
- 3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. *FAO Irrigation and Drainage, Paper No 56*. Doi: 10.3178/jjshwr.16.589.
- 4- Bagheriharooni, M.H., Arshad, S., Majnooni, A. and Morid, S., 2013. Comparing one source and two source remote sensing models for real evapotranspiration in Iran. *Journal of Remote Sensing and GIS in Iran*, 1(4), pp. 81-96.
- 5- Bastiaanssen, W., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. *Journal of Hydrology*, 229(1), pp. 87-100. Doi: 10.1016/S0022-1694(99)00202-4.
- 6- Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D. and Chemin, Y., 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resource Research*, 38(12), pp. 1-9. Doi: 10.1029/2001WR000386.
- 7- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P. and Allen, R.G., 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), pp. 55-93. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)
- 8- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R. and Holtslag, A., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 213, pp. 198-212. Doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
- 9- Chihda, Wu., Cheng, C., Lo, H. and Chen, Y., 2010. Study on estimating the evapotranspiration cover coefficient for stream flow simulation through remote sensing techniques. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(4), pp. 225-232. Doi: 10.1016/j.jag.2010.03.001.

- 10-Ezatabadipur, H., 2016. Introducing Sentinel2 Satellite. *Third International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning*.Iran.
- 11-Li, H., Li, Z., Yuping, L., Chunqiang, L., Zhijun, L. and Shengwei, Z., 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in north china plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management*.95(11), pp. 1271-1278. Doi: 10.1016/j.agwat.2008.05.003.
- 12- Moslemzadeh, N. and Mokhtari, A., 2015. Estimating daily evapotranspiration by using SEBAL algorithm and Landsat8 satellite. 1<sup>st</sup> international conference of water, *environment and sustainable development*. *Civil Engineering Group*. Tehran. Iran.
- 13-Ogunjobi, K.O., Daramola, M.T. and Akinsanola, A.A., 2018. Estimation of surface energy fluxes from remotely sensed data over Akure, Nigeria. *Spatial Information Resources*. 26(1), p.p.77–89.
- 14-Priestley, C.H.B. and Taylor R.J., 1972. On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, pp. 81-92. Doi: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.
- 15-Purmohammadi, S. and Rahimiyan, M.H., 2010. Suppling water requirement for natural and agricultural ecosystem balance by using Sebal algorithm (Azadegan plain). In *6th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering and 4th National Congress of Fertilizers and Sediments*. *Department of Watershed Management, Faculty of Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University*.
- 16-Sanchez, J., Kustas, W., Caselles, V. and Anderson, M., 2008. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), pp. 1130-1143. Doi: 10.1016/j.rse.2007.07.018.
- 17-Su, Z., 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(1), pp. 85-100
- 18-Simaie, E., Homae, M. and Norouzi, A.A., 2013. Evaluating SEBAL model to estimate evapotranspiration using MODIS and TM sensors data. *Water and Soil Resources Conservation Journal*, 4(2), 29-40.
- 19-Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D. and Bos, M.G., 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3), pp. 462-476. Doi: 10.1016/j.agrformet.2008.09.016.
- 20-Yang, W., Shabanov, N.V., Huang, D., Wang, W., Dickinson, R.E., Nemani, R.R., Knvazikin, Y., and Myneni, R.B., 2006. Analysis of leaf area index products from combination of MODIS Terra and Aqua data. *Remote Sensing of Environment*, 104, pp. 297-312. Doi: 10.1016/j.rse.2006.04.016.

**EXTENDED ABSTRACT**

## Investigation the Effective Parameters on the Drag Coefficient in Rigid and Flexible Vegetation

S. Salmanzadeh<sup>1</sup>, M. Fathi-Moghadam<sup>2\*</sup>, J. Ahadiyan<sup>3</sup> and S. M. Sajadi<sup>4</sup>

1- Ph.D. candidate, Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2\*- Corresponding Author, Professor, Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. ([mfathi@scu.ac.ir](mailto:mfathi@scu.ac.ir))

3- Professor, Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

4- Associated Professor, Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 6 August 2022

Revised: 27 October 2022

Accepted: 29 October 2022

### TO CITE THIS ARTICLE:

Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M. (2024). 'Investigation the Effective Parameters on the Drag Coefficient in Rigid and Flexible Vegetation', *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 15-31. doi: 10.22055/jise.2022.41559.2035

*Keywords:*

Density Index, Flow Resistance,  
Relative Depth, Non- Submerged.

### Introduction

Rivers are known as the main sources of surface water in the world, which experience seasonal fluctuations in water level. These resources have severe damage to human societies and nature in flood conditions and have irreparable consequences in the drought seasons. Optimal utilization of these resources with maintaining the environmental conditions of the waterway and minimizing flood damage is considered one of the river engineering goals. Since the conventional methods of river management are imposed serious environmental threats on waterways and wetlands, consideration to these water resources requires attention to issues related to plant ecosystems, solving challenges of coastal bed erosion and predict the condition and management of the river in the future (Callow, 2012; Dawson and Haslam, 1983; Fan et al., 2013; Rose et al., 2010; Rowinski et al., 2018). One of the strategies that cause loss of flow energy in the river improves the hydrological system and river ecosystem is the presence of vegetation in the river banks and floodplains. Native vegetation in floodplains and coastal forests plays an important role in conserving waterway ecosystems, flood management, coastal protection in urban lands and agriculture adjacent to the river (Fathi-Moghadam, 1996). Vegetation will also control the width of the river and increase the stability of the shores by absorbing and settling suspended sediments in river banks. The plant species along rivers and waterways are composed of various vegetative components, mainly affected by the environmental conditions of their habitat, including the distance from the waterway bed, hydrological characteristics of the river, climatic and soil conditions. Obviously, the effect of each plant species in the ecosystem cycle varies and for each section of the river, a specific combination of plants will create optimal conditions.

## Methodology

In this paper, effective parameters have been identified to investigate the effect of vegetation properties on drag force and the final functional relationship between dimensionless parameters for estimation of resistance to flow and drag coefficient in vegetated rivers will be:

$$C_D = f\left(\frac{y_n}{H}, DI, \frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}\right) \quad (1)$$

Where  $C_D$  is the drag coefficient,  $\frac{y_n}{H}$  is the relative depth, DI is the vegetation density index and last parameter is the dimensionless number of the ratio of the flow velocity to the bending stiffness, which is used to investigate the effect of the vegetation flexibility. The experiments were conducted in an 8.30×0.80×0.55m flume with Plexiglas sidewalls and metal structure located in the Water and Environmental Engineering Faculty at Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. The knife-edge part of the flume, which can move freely in a limited range, was used to measure the exerted force to the moveable part of the flume (which supports the vegetated model) by means of a dynamic load cell installed between the movable and fixed parts of the flume. the artificial vegetation models used in this study were similar to the natural sample of trees. Galvanized and polyethylene sheets have been used to make rigid and flexible artificial specimens with the same geometric shape and form to allow more accurate comparisons.

## Results and Discussion

In this section, with the aim of practical use of the results, the independent variables are defined as dimensionless numbers based on the drag coefficient. Investigating the effect of the vegetation density index, the results showed that in both rigid and flexible models, increase of the vegetation density index leads to a decrease in the drag coefficient. By increasing the vegetation density index in the flexible model at  $\frac{y_n}{H} = 1$ , the drag coefficient decreased by 19.8%, which is the highest rate of decrease in the drag coefficient. Also, the lowest rate for reduction of the drag coefficient with increase of the vegetation density index occurred in the rigid model and at  $\frac{y_n}{H} = 0.6$ , which is equivalent to 10.3%. In fact, in the case of the maximum decrease in the drag coefficient, for an 80% increase in the vegetation density index, the drag force increased by 43.8%, and in the case of the minimum decrease in the drag coefficient, the drag force increased by 66.5%. By comparing the effect of flexibility of vegetation in rigid and flexible models, the results showed that in both cases, the drag coefficient decreases with increasing in velocity. In the flexible models, the slope of the drag coefficient curve has a decreasing trend faster than the rigid case. For the effect of the relative depth of the flow, the results showed that the drag coefficient in both models decreases with the increase in the relative depth, so that in the rigid and flexible models, with the increase in the relative depth from 0.6 to 0.8 and from 0.8 to 1, the drag coefficient decreases by 12.81% and 10.43%, respectively. Correlating the results, following relationships were obtained for the estimation of the drag coefficient for the rigid and flexible models, respectively:

$$C_D = 3.26\left(\frac{y_n}{H}\right)^{0.13} - 2.65(DI)^{0.12} + 0.28\left(\frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}\right)^{-0.29} \quad R^2 = 0.87 \quad (2)$$

$$C_D = \left(\frac{y_n}{H}\right)^{1.2} + (DI)^{0.16} - 0.32\left(\frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}\right)^{0.21} \quad R^2 = 0.89 \quad (3)$$

## Conclusions

In the present study, the drag force absorption rate and the resistance coefficient were investigated and equations were correlated to estimate the drag coefficient. All experiments were performed in steady, uniform and turbulent flow. Rigid and flexible models were tested by different hydraulic parameters according to the flow conditions. A new index is produced to account for the effect of vegetation density on the drag coefficient. Investigating the effect of the vegetation density index showed that the increase in this index has a significant effect on reducing the drag coefficient, so that at the maximum increase of the density index, a decrease of 19.8% in the drag coefficient was measured. The results showed an increase in drag force absorption as a result of increase in vegetation density index and relative depth. In general, the increase in vegetation density index ranges  $0.4 < DI \leq 0.8$ ,  $0.8 < DI \leq 1.1$ ,  $1.1 < DI \leq 2.2$  and  $2.2 < DI \leq 3.8$  in comparison to the range of  $0.2 \leq DI \leq 0.4$ ; the drag force absorbed increases by 1.63, 2.46, 4.12 and 6.33 times, respectively. Also, increase of the relative depth from 0.6 to 0.8 and 1, the drag force increased by 49.7% and 46.9%, respectively. The index introduced in this study can be a reference index for monitoring the types of vegetation in floodplains and aquatic plants. The results of this study can be used in the numerical modeling for estimation water level during flood events and river engineering management.

## Acknowledgments

We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran for financial support (GN:SCU.EC99.000).

## References

- 1- Callow, J. 2012. Potential for vegetation-based river management in dryland, saline catchments. *River Research and Applications* 28(8), 1072-1092.
- 2- Dawson, F.H. and Haslam, S. 1983. The management of river vegetation with particular reference to shading effects of marginal vegetation. *Landscape planning* 10(2), 147-169.
- 3- Fan, S., Ren, H., Wang, R., Pan, C., Huang, G., Chen, Y., Zhan, P., Yang, J., Luo, H. and Jian, S. 2013. Vegetation Restoration and Conservation Plans for Integrated Coastal Management in Hengqin, China. *Journal of Coastal Research* 29(6), 1297-1308.
- 4- Fathi-Moghadam, M. 1996. Momentum Absorption in Non-rigid, Non-submerged, Tall Vegetation Along Rivers, Thesis, *University of Waterloo*.
- 5- Rose, P., Specht, A., Whelan, M. and Stubbs, B. 2010. Riparian vegetation change on the Clarence River floodplain. *Australasian Journal of Environmental Management* 17(4), 223-234.
- 6- Rowinski, P., Västilä, K., Aberle, J., Järvelä, J. and Kalinowska, M. 2018. How vegetation can aid in coping with river management challenges: a brief review. *Ecohydrol Hydrobiol* 18 (4): 345–354



## بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر ضریب درگ در پوشش گیاهی صلب و انعطاف پذیر

سمیرا سلمان زاده<sup>۱</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>۲\*</sup>، جواد احدیان<sup>۳</sup> و سید محسن سجادی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- نویسنده مسئول، استاد، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
mfathi@scu.ac.ir

۳- استاد، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- دانشیار، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۵

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

### چکیده

مسأله‌ی مقاومت در مقابل جریان در مجاری روباز دارای پوشش گیاهی در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. حضور پوشش گیاهی در مناطق مستعد سیلاب و حاشیه‌ی رودخانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر پراکنش انرژی و کاهش خسارات دارد. در این مقاله به منظور بررسی اثر پوشش گیاهی در آبراهه‌ها، پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر با نمونه‌های مصنوعی مدل‌سازی شد. در شرایط آزمایشگاهی، نیروی درگ اعمال شده بر مدل پوشش گیاهی غیر مستغرق به صورت مستقیم با استفاده از حسگر نیرو در بخش متحرک فلوم اندازه‌گیری شد. در این مقاله، شاخص جدیدی با عنوان "شاخص تراکم" پوشش گیاهی معرفی شده است. این شاخص به سطح مقابل جریان هر واحد پوشش گیاهی و مجموع تعداد واحدهای پوشش گیاهی در محدوده مورد مطالعه بستگی دارد. نتایج نشان داد در هر دو مدل صلب و انعطاف‌پذیر، با افزایش شاخص تراکم پوشش گیاهی و عمق نسبی، میزان جذب نیروی درگ افزایش می‌یابد. بررسی اثر شاخص تراکم پوشش گیاهی نشان داد افزایش این شاخص تأثیر به‌سزایی در کاهش ضریب درگ دارد؛ به طوری که در بیشترین میزان افزایش شاخص تراکم، کاهش ۱۹/۸ درصد در ضریب درگ مشاهده گردید. افزایش عمق نسبی جریان تا رسیدن به مرحله‌ای که پوشش گیاهی در آستانه‌ی استغراق قرار گیرد، به ترتیب در دو مدل صلب و انعطاف‌پذیر موجب کاهش ۱۲/۸۱ درصد و ۱۰/۴۳ درصد ضریب درگ می‌شود. در نهایت دو مدل ریاضی با ضریب رگرسیون ۰/۸۷ و ۰/۸۹ به ترتیب به منظور تخمین ضریب درگ پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن پارامترهای بدون بعد مؤثر ارائه گردید.

**کلید واژه‌ها:** شاخص تراکم، مقاومت جریان، عمق نسبی، غیر مستغرق.

### مقدمه

and Mostaghimi, 2006, Afzalimehr and Subhasish, 2009, Nepf, 2012, Krzeminska et al., 2019). پوشش گیاهی در سیلاب دشت و ساحل رودخانه نقش مهمی در حفظ اکوسیستم طبیعی، مدیریت سیلاب، حفاظت سواحل، زمین‌های شهری و کشاورزی مجاور رودخانه بازی می‌کند (Fathi-Moghadam, 1996). گیاهان بومی متناسب با شرایط جغرافیایی هر منطقه به صورت انواع جنگل‌های ساحلی با ترکیبات متراکم و یا پراکنده‌ای از انواع درختان و بوته‌ها در امتداد آبراهه‌ها و سیلاب دشت رودخانه‌ها دیده می‌شود. انواع پوشش گیاهی با توجه به خواص مکانیکی، حرکتی و عکس العمل در مقابل جریان، به دو دسته‌ی صلب و انعطاف‌پذیر طبقه‌بندی می‌شوند. علاوه بر این، اگر مستغرق و یا غیر مستغرق باشند، رفتار بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. تأثیر پوشش گیاهی بر دینامیک جریان عمدتاً توسط مقاومت ناشی از گیاه تعیین می‌شود. نیروهای کششی ناشی از پوشش گیاهی با افزایش مقاومت، سرعت‌های متوسط جریان را کاهش می‌دهند و فرآیندهای

با توجه به اقلیم و شرایط جغرافیایی منطقه، انواع پوشش گیاهی در حاشیه‌ی رودخانه‌ها و حوضه‌های آبریز طبیعی با گونه‌ها و وارته‌های مختلف به شکل گسترده‌ای رشد می‌کند. نقش عمده‌ی پوشش گیاهی در ساماندهی و احیای رودخانه‌ها، حفظ زیستگاه‌های طبیعی آبریان، انتقال رسوب و پخش آلاینده‌ها موجب شده است که همواره مورد توجه هیدرولوژیست‌ها و مهندسين رودخانه قرار گیرد (Aberle and Järvelä, 2013, Bennett and Simon, 2004, Kothiyari et al., 2009, Vargas-Luna et al., 2016, D'Ippolito et al., 2018, D'Ippolito et al., 2021). حفاظت بیولوژیکی سواحل و حاشیه‌ی رودخانه‌ها به عنوان یک گزینه اقتصادی، تنها روشی است که به طور طبیعی قابلیت تجدید حیات و بازسازی دارد. گیاهان آبریز و پوشش گیاهی بومی در حاشیه‌ی رودخانه به دلیل داشتن ریشه‌های درهم تنیده، خاک را به طور مکانیکی تقویت می‌کند و بر پایداری ساحل و هیدرولیک رودخانه اثرگذار است (Wynn



به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش عمق نسبی باعث افزایش سطح جاذب مومنتوم و افزایش نیروی درگ می‌شود. نتایج نشان داد تأثیر درخت صنوبر در نیروی کششی تقریباً دو برابر سرو بوده و در شرایط یکسان هیدرولیکی، ضریب زبری درخت صنوبر  $1/5-1$  برابر درخت سرو می‌باشد. Ghanbari-Adivi و Fathi-Maghadam (2015) به منظور ارزیابی تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش اثرات مخرب امواج دریا، از ساقه‌های پلاستیکی صلب در شرایط غیر مستغرق استفاده کردند. نتیجه‌ی این تحقیق نشان داد کمربند سبز ساحلی در کاهش اثرات مخرب تأثیر به‌سزایی دارد. Caroppi و Järvelä (2022) با شبیه‌سازی شرایط موجود در محیط‌های ساحلی از نظر ساختار پوشش گیاهی، لایه‌ی برشی روی پوشش گیاهی موجود در سیلاب دشت را مورد بررسی قرار دادند. Afzalimehr و Setayesh (2018) به بررسی اثر پوشش گیاهی نی بر نیم رخ سرعت جریان و اعتبار قانون‌های لگاریتمی و کولز پرداختند. نتایج نشان داد که قانون لگاریتمی در بخش داخلی لایه‌ی مرزی در نزدیکی بستر اعتبار دارد. Cheng (2013) یک رابطه ریاضی بین ضریب درگ و عدد رینولدز پیشنهاد داد که در آن با افزایش عدد رینولدز از یک تا  $1 \times 10^4$ ، ضریب درگ کاهش می‌یابد و برای استوانه‌های صلب در شرایط جریان یکنواخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ساده‌سازی که شامل برخورد جریان با استوانه‌های صلب به‌عنوان پوشش گیاهی است، ناحیه‌ی پیش‌بینی‌شده‌ی مقابل جریان با تغییرات سرعت متوسط جریان ثابت است. این در حالی است که در پوشش گیاهی طبیعی آبی به دلیل مورفولوژی و انعطاف‌پذیری پیچیده‌ای که دارد، سطح جاذب نیرو تابعی از سرعت جریان می‌باشد و پیش‌بینی ضریب درگ را دشوارتر می‌نماید (Gosselin and De Langre, 2011). از این رو، یک مدل کاربردی‌تر به‌منظور توصیف درگ ناشی از پوشش گیاهی آبی انعطاف‌پذیر مورد نیاز است. Fathi-Moghadam et al. (2011) در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از پوشش‌های گیاهی پلاستیکی مصنوعی به بررسی تأثیر پوشش گیاهی در حالت چمنی و شاخه‌ای بر اندازه زبری پرداختند. آن‌ها با توجه به میزان تراکم پوشش گیاهی به روابطی برای محاسبه اندازه زبری دست یافتند. همچنین به‌منظور ارزیابی ضرایب زبری محاسبه شده، روابط به‌دست آمده در قالب یک الگوریتم توسط مدل هیدرودینامیکی فستر (FASTER) صحت‌سنجی شد. تخمین سطح آب و دبی توسط این مدل بسیار نسبت به مقدار محاسبه شده توسط فستر (FASTER) با استفاده از یک مقدار ثابت برای ضریب مانینگ به مطالعات میدانی نزدیک‌تر بود. نتایج حاصل از مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی نشان داد که مدل از دقت بالایی برای پیش‌بینی خصوصیات هیدرودینامیکی برخوردار است. Ozan (2018) ساختار جریان را در پایین دست یک ردیف از درختان غیر مستغرق در امتداد سیلاب دشت در یک کانال باز مرکب با استفاده از پوشش گیاهی طبیعی درخت سرو تجزیه و تحلیل کرد. Li et al. (2020) دینامیک

اختلاط و انتقال را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Nepf, 2012, Aberle and Järvelä, 2015). در مناطق دارای پوشش گیاهی با کاهش سرعت جریان و افزایش شدت تلاطم، زمان انجام فعل و انفعالات بیوشیمیایی یا هیدرولوژیکی دستخوش تغییر می‌شود (Caroppi et al., 2019, Finnigan, 2000) و بر کیفیت شیمیایی آب اثرگذار است (Findlay, 1995). بسیاری از اهداف مدیریت رودخانه مانند پیش‌بینی تغییرات سطح آب، هندسه‌ی کانال و ریخت‌شناسی رودخانه، نیازمند برآورد دقیق مقاومت جریان ناشی از وجود پوشش گیاهی در مسیر جریان می‌باشد (Gurnell, 2014). به‌منظور بررسی پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی جریان در مسیره‌های دارای پوشش گیاهی، توصیف گیاهان طبیعی با پارامترهای رویشی مناسب موضوعی مهم تلقی می‌شود. در راستای ارزیابی اثرات زیست محیطی آبراهه‌ها، بسیاری از مدل‌های هیدرولیکی جریان نیازمند بررسی تغییرات شرایط محیطی و آب و هوایی منطقه می‌باشند. اطلاعات مورد نیاز برای این مدل‌ها شامل ویژگی‌های پوشش گیاهی و پارامترهایی است که تأثیر پوشش گیاهی بر جریان آرام و تلاطم را توصیف می‌کند. از دیدگاه مدیریت رودخانه، به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب محیط زیستی مرتبط با شیوه‌های متداول و حفاظت سازه‌های سواحل، استفاده از روش‌های سازگار با محیط زیست با رویکردهای طبیعی مبتنی بر استفاده از پوشش گیاهی بومی توصیه می‌شود (Bączyk et al., 2018, De Vriend, 2018, Rowiński et al., 2015, et al.). درک بهتر تعامل بین جریان و پوشش گیاهی در صورتی امکان‌پذیر است که مفهوم نیروهای درگ ناشی از عناصر صلب و انعطاف‌پذیر مورد مطالعه قرار گیرد (Nepf, 1999). محققان ادعا کرده‌اند که تفاوت قابل توجهی در سرعت و توزیع تنش‌های رینولدزی برای پوشش گیاهی مستغرق و غیر مستغرق وجود دارد (Duan et al., 2006). معمولاً از ضریب درگ به‌عنوان یک پارامتر کمی به‌منظور نشان دادن نیروی درگ اعمال شده توسط پوشش گیاهی آبی استفاده می‌شود (Marjoribanks et al., 2014). عناصر پوشش گیاهی اغلب به‌صورت استوانه‌های صلب براساس شرایط جریان یکنواخت و ماندگار به‌منظور ارزیابی ضریب درگ در نظر گرفته می‌شوند (Chen et al., 2013, Liu and Zeng, 2019, Wang et al., 2017, Shi et al., 2019, Tang et al., 2014). با بررسی ضریب درگ ساقه‌های مستغرق در کانال روباز، یک فرمول تجربی برای سه ضریب درگ شامل ضریب درگ برای یک استوانه ایزوله، ضریب درگ آرایه‌ای از سیلندرها و ضریب درگ محلی پیشنهاد دادند. در بررسی اثر پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر و غیر مستغرق Fathi-Maghadam و Kouwen (1997) نهال‌ها و شاخه‌های طبیعی سرو و صنوبر را در فلومی به طول ۱۳ متر و در اعماق استغراق مختلف مورد بررسی قرار دادند و مدل ریاضی برای محاسبه‌ی ضریب مقاومت ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد نیروی درگ با سرعت جریان

یکنواخت،  $y_n$  عمق نرمال جریان،  $H$  ارتفاع پوشش گیاهی،  $E$  مدول الاستیسیته که به جنس گیاه و  $I$  ممان اینرسی خمشی است که به شکل هندسی پوشش گیاهی بستگی دارد،  $(D\%)$  توزیع فضایی پوشش گیاهی است که در این تحقیق با عکس برداری از بالای محدوده‌ی پوشیده از گیاه به دست آمده است و به گونه‌ای تعریف می‌شود که در توزیع فضایی ۱۰۰ درصد مدل که تمام سطح پوشیده از گیاه است تعداد ۱۰۰ عدد نمونه پوشش گیاهی با سطح مقطع  $0.1$  متر مربع در واحد سطح یک متر مربع قرار گرفته است. به منظور دستیابی به توزیع‌های فضایی کمتر، با نسبت مورد نظر از تعداد نمونه‌های موجود در سطح پوشیده از گیاه کاسته شد.  $\rho$  جرم واحد حجم سیال،  $\mu$  لزجت دینامیکی و  $g$  شتاب گرانش است. با تحلیل ابعادی و بر اساس روش پی باکینگهام و در نظر گرفتن  $V$ ،  $y_n$ ،  $\rho$  به عنوان متغیرهای تکراری و در نهایت ترکیب پارامترهای بدون بعد، رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) بازنویسی گردید.

$$f\left(C_D, \frac{y_n}{H}, \frac{A_F}{A_B}, D\%, \frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}, \frac{V}{\sqrt{g y_n}}, \frac{\rho V y_n}{\mu}\right) = 0 \quad (2)$$

$C_D$  ضریب درگ جریان است.  $\frac{y_n}{H}$  عمق نسبی،  $\frac{A_F}{A_B}$  تراکم فردی یک واحد پوشش گیاهی تعریف می‌شود که در واقع ناحیه نسیبی جذب مومنتوم است،  $D$  درصد توزیع فضایی پوشش گیاهی و  $\frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}$  عدد بدون بعد نسبت سرعت جریان به صلبیت خمشی پوشش گیاهی است که به منظور بررسی اثر قابلیت ارتجاع پوشش گیاهی بر جذب نیروی درگ در نظر گرفته شده است.  $\frac{V}{\sqrt{g y_n}}$  عدد فرود و  $\frac{\rho V y_n}{\mu}$  عدد رینالدز جریان می‌باشند.

Fathi-Moghadam و Kouwen (1997) به نقل از Davidian و Koloseus (1996) نشان داده‌اند که در بررسی پوشش گیاهی در جریان‌های پایدار زمانی که عدد فرود کمتر از  $1/6$  باشد ضرایب اصطکاک مستقل از اثرات گرانشی است؛ از این رو اثر جاذبه نادیده گرفته می‌شود. محدوده‌ی عدد رینالدز مطالعه حاضر ۱۵۶۷۱-۸۱۶۱۸ می‌باشد و از آنجائی که جریان عبوری از میان پوشش گیاهی غیر مستغرق در ناحیه کاملاً متلاطم است؛ از این رو تحلیل‌ها مستقل از عدد رینالدز در نظر گرفته شده‌اند. رابطه‌ی نهایی پارامترهای بدون بعد مؤثر در این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

$$C_D = f\left(\frac{y_n}{H}, DI, \frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}\right) \quad (3)$$

$$DI = \frac{A_F}{A_B} D\% \quad (4)$$

جریان و ساختارهای متلاطم را در کانال‌هایی با یک ردیف پوشش گیاهی متخلخل که در امتداد دیواره‌های جانبی کانال توزیع شده بودند، مورد بررسی قرار دادند. در مدل‌های فوق، کشش جریان روی پوشش گیاهی وجود دارد و تابعی از ضریب درگ در نظر گرفته می‌شود. این ضریب بسته به اینکه آیا پوشش گیاهی، صلب یا انعطاف‌پذیر است و همچنین با توجه به اینکه آیا فقط تنه یا تاج درختان تحت تأثیر قرار می‌گیرند، مقادیر بسیار متفاوتی را شامل می‌شود. Zhang et al. (2022) اتلاف انرژی توسط گیاهان ساحلی را با هدف حفاظت از سواحل مورد بررسی قرار دادند. مدل ساخته شده قادر به پیش‌بینی ضریب درگ و اندازه‌گیری میزان میرایی موج می‌باشد.

بررسی پیشینه‌ی مطالعه‌های انجام شده در زمینه‌ی تأثیر پوشش گیاهی بر مقاومت جریان نشان داد که در انتخاب روش حفاظت غیرسازه‌ای و بیولوژیکی سواحل و سیلاب دشت رودخانه‌ها، پارامترهای مرتبط با نوع و گونه‌ی پوشش گیاهی همواره مورد توجه محققین بوده است. ساماندهی رودخانه‌ها، حفاظت از اراضی ارزشمند موجود در حاشیه رودخانه و کاهش اثرات مخرب ناشی از سیلاب نیز با انتخاب پوشش گیاهی متناسب با شرایط امکان‌پذیر می‌باشد. با این هدف، در این تحقیق از دو نمونه‌ی مصنوعی پوشش گیاهی (صلب و انعطاف‌پذیر) استفاده شده است و ارتباط ضریب درگ به عنوان پارامتر مقاومت جریان با ویژگی‌های شاخص مرتبط با گونه‌ی گیاهی شامل انعطاف‌پذیری، ارتفاع و تراکم پوشش گیاهی بررسی می‌شود. در این مقاله شاخص جدیدی با عنوان "شاخص تراکم" (Density Index) پوشش گیاهی معرفی شده است. این شاخص، پوشش گیاهی موجود در مسیرهای عبور جریان آب و یا سیلاب دشت رودخانه‌ها را به صورت جزئی از طریق تراکم انفرادی یک واحد از پوشش گیاهی (یک بوته، درخت، درختچه و...) و به صورت کلی در سطح منطقه با استفاده از توزیع فضایی (Spatial Distribution) گیاهان گسترش یافته (مجموعه‌ی از پوشش‌های گیاهی در سطح منطقه) بررسی می‌نماید و به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر مقاومت جریان در نظر گرفته می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر به منظور بررسی اثر خصوصیات پوشش گیاهی بر نیروی درگ ناشی از جریان به صورت زیر می‌باشد:

$$f(F_D, A_F, A_B, V, y_n, H, E, I, D\%, \rho, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $F_D$  نیروی درگ،  $A_F$  سطح مقابل جریان برای یک واحد از پوشش گیاهی (منطقه جذب مومنتوم)،  $A_B$  مساحت بستر پوشیده شده از گیاه،  $V$  سرعت متوسط جریان ماندگار و

### نیروی درگ

نیروی درگ، نیروی مکانیکی است که در اثر تعامل و حرکت سیال از میان جسم جامد به وجود می‌آید. هنگامی که جسمی در مقابل جریان قرار می‌گیرد نیرویی به آن وارد می‌شود. نیروی هم راستای اعمال شده از طرف جریان به جسم جامد را نیروی درگ می‌گویند که با توان دو سرعت رابطه دارد و به صورت زیر می‌باشد:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_F V^2 \quad (5)$$

که در آن  $F_D$  نیروی درگ،  $C_D$  ضریب درگ،  $\rho$  دانسیته سیال،  $A_F$  سطح مقابل جریان،  $V$  سرعت متوسط جریان می‌باشد.

### تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور درک بهتر موضوع و لزوم انجام مطالعه‌های پیرامون پوشش‌های گیاهی در بستر و حاشیه‌ی آبراهه‌ها، رودخانه کارون در اهواز، خوزستان، ایران به عنوان نمونه‌ای از رودخانه‌های دارای پوشش گیاهی در شکل (۲) نشان داده شده‌است. با هدف بررسی این موضوع، سری آزمایش‌های تجربی به منظور بررسی دقیق‌تر پارامترهای مرتبط با پوشش گیاهی و اندازه‌گیری مستقیم نیروی درگ جذب شده توسط پوشش گیاهی تعریف شده‌است. آزمایش‌های این مقاله در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، در فلومی با ساختار فلزی به طول ۸/۳ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۵۵ متر با دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس انجام شد. در شکل (۳) نمای فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات اندازه‌گیری و در شکل (۴) موقعیت نصب حس گر نیرو در بخش لبه چاقویی فلوم نشان داده شده‌است.

در رابطه (۴)،  $DI$  به عنوان شاخص تراکم پوشش گیاهی تعریف می‌شود که از حاصلضرب تراکم فردی نمونه گیاهی ( $\frac{A_F}{A_B}$ ) و توزیع فضایی پوشش گیاهی ( $D\%$ ) به دست می‌آید. شاخص تراکم فردی گیاهی به گونه و درجه‌ی بلوغ گیاه بستگی دارد. بدلیل برخورد جریان با گیاه و اثری که عمق برخورد در میزان سطح مقابل جریان ( $A_F$ ) و در نهایت تراکم فردی دارد، پارامتر جزء متغیرهای مؤثر بر مقاومت جریان در نظر گرفته شده‌است و اعماق نسبی در شرایطی که حداکثر و همچنین نیمه‌ای از ارتفاع گیاه را دربرگیرد در این مقاله تعریف شده‌است. علاوه بر این، توزیع فضایی پوشش گیاهی، نحوه‌ی پراکنش نمونه‌های گیاهی در مسیر آبراهه را نشان می‌دهد و به اجتماع گونه‌ی گیاهان منطقه‌ی مورد بررسی بستگی دارد. پارامترهای مرتبط با شاخص تراکم پوشش گیاهی در شکل (۱) ارائه شده‌است. در شکل (۱a)، سطح مقابل جریان ( $A_F$ ) برای مدل پوشش گیاهی نشان داده شده‌است. نسبت این سطح ( $A_F$ ) به سطح بستر ( $A_B$ )، تراکم فردی گیاه ( $\frac{A_F}{A_B}$ ) می‌باشد که برای هر گونه‌ی گیاهی با توجه به درجه‌ی بلوغ گیاه، مقداری منحصر به فرد است. با فرض اینکه هر گیاه، فضایی متناسب با ابعاد و شکل هندسی‌اش را دربرگیرد (مکعب مستطیل نشان داده شده در شکل (۱a))؛ در این صورت پارامتر مربوط به توزیع فضایی پوشش گیاهی ( $D\%$ ) در کل سطح منطقه، مجموع فضاهایی است که تعداد کل گیاهان منطقه احاطه می‌کنند. شکل (۱b) تراکم ۵۰ درصد پوشش گیاهی را با لحاظ نمودن فضای خالی بین واحدهای پوشش گیاهی نشان می‌دهد. این حجم فضایی متناسب با شکل هندسی گیاه شکل (۱a)، به صورت فرضی می‌باشد که به منظور نشان دادن توزیع فضایی استفاده شده‌است.

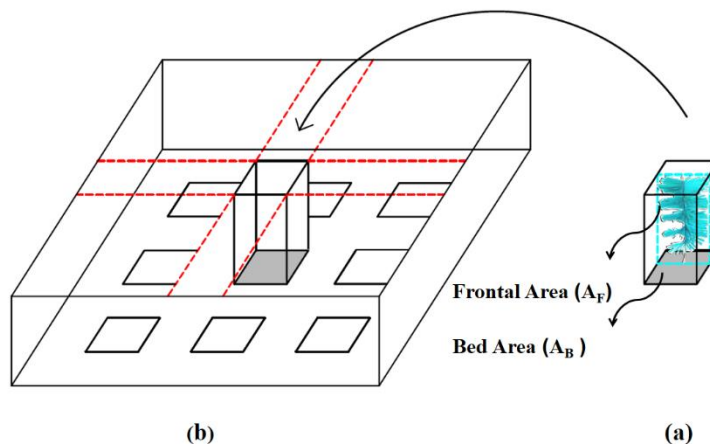


Fig. 1- Parameters related to vegetation density index

شکل ۱- پارامترهای مرتبط با شاخص تراکم پوشش گیاهی



Fig. 2- A view of the Karun river with vegetation in shore and bed  
شکل ۲- نمایی از رودخانه کارون به همراه پوشش گیاهی در حاشیه و بستر

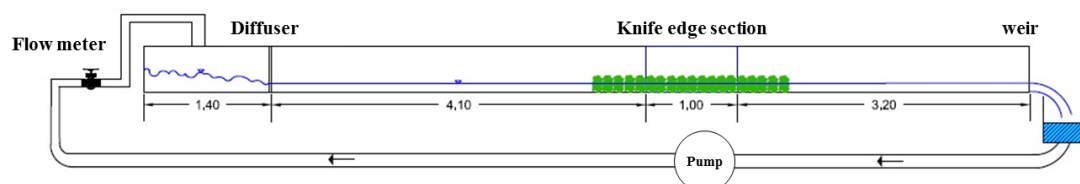


Fig. 3-Schematic view of laboratory flume, with dimensions (meter)  
شکل ۳- نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی، با ابعاد (متر)

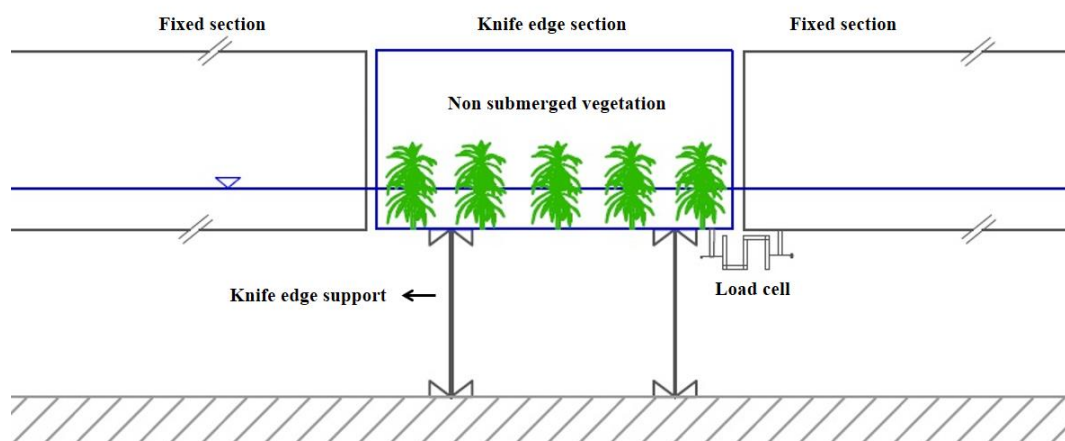


Fig. 4- The installation position of the force sensor in the knife edge section of the flume  
شکل ۴- موقعیت نصب حسگر نیرو در بخش لبه چاقویی فلوم

نشان می‌دهد. به منظور ثبت نوسانات نیرو، طی چندین مرحله آزمون و خطا، زمان ۱۰ دقیقه برای برداشت داده مشخص گردید. در طول آزمایش‌ها، دبی جریان توسط سیستم گردش آب آزمایشگاه شامل استخر آب، سیستم پمپاژ، مخزن تامین بار ثابت و شبکه لوله کشی تامین شد و به وسیله دبی سنج التراسونیک قرائت گردید. به منظور اندازه‌گیری عمق متوسط جریان از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. در ابتدای فلوم، صفحه‌ای مشبک با عرضی معادل با عرض فلوم به منظور آرام نمودن جریان و از

این فلوم اولین بار توسط Lashkar-Ara و Fathi و Moghadam (2010) با هدف اندازه‌گیری نیروهای برشی در دیواره و بستر کانال‌های روباز ساخته شد. در طولی به اندازه یک متر در میانه‌ی فلوم از بالادست و پایین دست آن جدا شده و بخش متحرکی تحت عنوان " لبه چاقویی " برای اندازه‌گیری نیروی وارده بر بخش گیاهی تعبیه شده است. حسگر نیرو نصب شده در قسمت لبه چاقویی و متحرک فلوم به یک نمایشگر الکترونیکی متصل بوده و عکس العمل نیروی درگ بر قسمت متحرک فلوم را

ساخت نمونه‌های مصنوعی صلب و انعطاف‌پذیر با فرم و شکل هندسی یکسان استفاده شده‌است تا امکان مقایسه‌ی دقیق‌تر فراهم شود. در مطالعه‌های Fathi-Maghadam et al. (2018) و Fathi-Maghadam و Kouwen (1997) از روش عکس‌برداری از نمونه‌ها برای محاسبه سطح مقابل جریان استفاده شده‌است که این روش نیازمند دقت و صرف زمان زیادی می‌باشد. در این مقاله با مشخص بودن ابعاد ورق‌ها و ساخت نمونه‌ها، سطح مقابل جریان قابل محاسبه می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات مواد مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها ارائه شده‌است. مدل الاستیسیته (E) واقعی پوشش گیاهی از طریق تست کشش در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده‌ی فنی و مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز اندازه‌گیری شد و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۶) تست کشش نمونه‌ی آزمایشگاهی نشان داده شده است.

بین بردن اغتشاشات و در انتهای فلوم از دریچه‌های متحرک به‌منظور کنترل عمق جریان استفاده گردید. در بخش لبه چاقویی فلوم که محل اندازه‌گیری نیروی درگ می‌باشد، نمونه‌های مصنوعی پوشش گیاهی روی صفحه‌ی نصب شده در کف فلوم چیده شدند. با هدف برقراری جریان توسعه یافته و پایدار، در بالای بخش لبه چاقویی و در طولی به اندازه‌ی یک متر، نمونه‌های مصنوعی پوشش گیاهی نصب گردید. همچنین به‌منظور جلوگیری از افت ناگهانی پروفیل سطح آب در پایین دست بخش لبه چاقویی، این چیدمان با طول مشابه صورت پذیرفت. شکل (۵) مدل مصنوعی پوشش گیاهی و نمایی از فلوم آزمایشگاهی را حین انجام آزمایش نشان می‌دهد.

در این مقاله سعی شده‌است تا با ساخت نمونه‌های مصنوعی، پوشش گیاهی مورد استفاده بیشترین شباهت را به نمونه‌ی طبیعی درختان داشته باشد. از ورق‌های گالوانیزه و پلی‌اتیلن به‌ترتیب برای

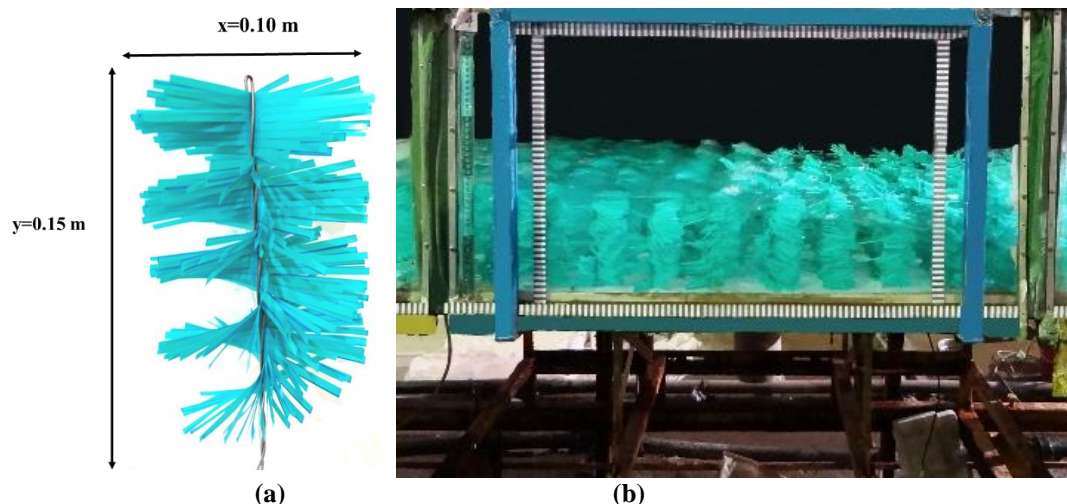


Fig. 5- Artificial vegetation model (a); a view of the knife edge section of the flume during test and force recording (b)

شکل ۵- مدل مصنوعی پوشش گیاهی (a)؛ نمایی از بخش لبه چاقویی فلوم در حین انجام آزمایش و ثبت نیرو (b)

جدول ۱- مشخصات مواد مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌های مصنوعی پوشش گیاهی

Table 1- Characteristics of materials used to make artificial vegetation samples

Material	Elastic Modulus, E (GPa)	Dimensions of vegetation model (m) (y×x)	Thickness* (mm)	Bending Moment of Inertia, I
Polyethylene	0.238	0.15×0.1	0.3	$1.3 \times 10^{-3}$
Galvanized	69	0.15×0.1	0.3	$1.3 \times 10^{-3}$

\* The thickness of the initial sheet to make vegetation model

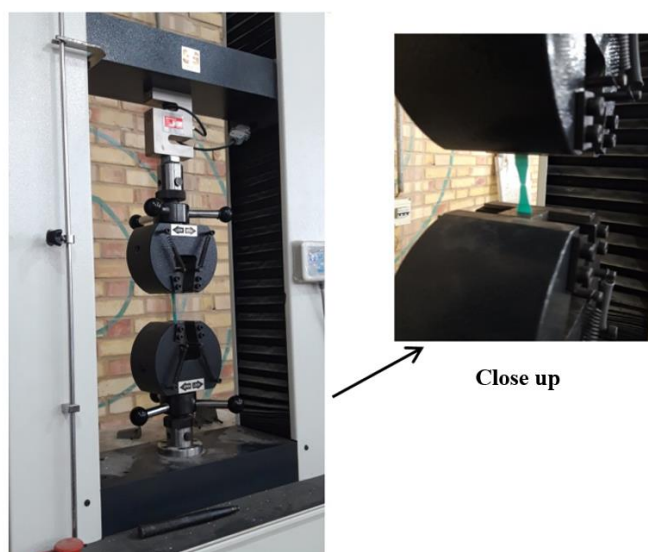


Fig. 6- Tensile test of initial materials to make vegetation model

شکل ۶- تست کشش مواد اولیه به منظور ساخت مدل پوشش گیاهی

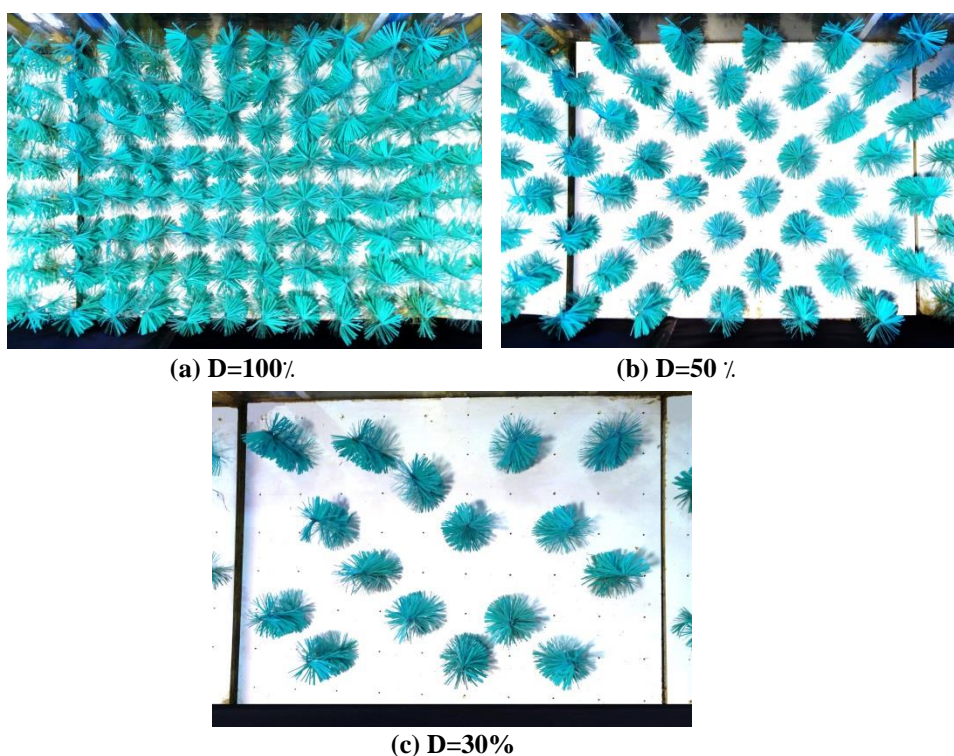


Fig. 7- View of vegetation spatial distribution in the knife edge section of the flume (view from above)

شکل ۷- نمایی از توزیع فضایی پوشش گیاهی در بخش لبه چاقویی فلوم (دید از بالا)

خاصی پیروی نمی کند؛ از این رو احتمال اینکه چیدمان پوشش های گیاهی طبیعی تا حدودی شبیه به آرایش زیگزاگی باشد بیشتر است. با توجه به این موضوع و در نظر گرفتن این که نتایج این مقاله در عمل و به صورت کاربردی مورد استفاده قرار می گیرد لذا سعی شده است در چیدمان مدل های پوشش گیاهی در انجام آزمایش ها، این نکته در نظر گرفته شود. در تراکم های کمتر، این چیدمان بیشتر قابل رویت می باشد.

به منظور نصب نمونه ها در کف فلوم از صفحه ی پی وی سی با ضخامت یک سانتی متر استفاده شد و سوراخ های دو میلی متری برای کاشت نمونه ها روی آن ایجاد گردید؛ سپس نمونه های پوشش گیاهی با آرایش زیگزاگی روی صفحه چیده شدند. در شکل (۷) نمونه هایی از توزیع فضایی ۳۰ درصد، ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد نشان داده شده است. نحوه ی پراکنش پوشش های گیاهی در رودخانه و در شرایط طبیعی به صورت تصادفی می باشد و از نظم

تراکم پوشش گیاهی از جزء به کل و از تراکم فردی به توزیع فضایی تعمیم می‌یابد. در توزیع فضایی، بخش گسترده‌ای از پوشش گیاهی منطقه تحت پوشش قرار می‌گیرد که توسط عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای ارزیابی می‌شود. طبق نتایج آنالیز ابعادی، عمق نسبی به‌عنوان یکی از پارامترهای متغیر در انجام آزمایش‌ها معرفی شد. سطح مقابل جریان ( $A_F$ ) متناسب با هر عمق نسبی تغییر کرده و مقادیر مشخصی را در برمی‌گیرد؛ از این رو سه تراکم فردی متناسب با در نظر گرفتن سه عمق نسبی تعریف شده‌است. این نکته قابل ذکر است که در تراکم فردی، بیشترین و کمترین مقدار به‌ترتیب مربوط به حداکثر و حداقل عمق نسبی می‌باشد. در این مقاله با توجه به اختصاص دادن پنج توزیع فضایی، سه عمق نسبی و سه نسبت  $\frac{A_F}{A_B}$ ، پنج بازه‌ی شاخص تراکم پوشش گیاهی تعریف شده‌است. در جدول (۲) بازه‌ی مربوط به پارامترهای معرفی شده در سناریوهای آزمایش ارائه شده‌است.

شکل (۸) تغییرات ضریب درگ با شاخص تراکم پوشش گیاهی را در اعماق نسبی  $0/6$ ،  $0/8$  و  $1$  نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در هر دو مدل صلب و انعطاف‌پذیر، افزایش شاخص تراکم پوشش گیاهی منجر به کاهش ضریب درگ می‌شود. افزایش شاخص تراکم به معنی افزایش تعداد نمونه‌های پوشش گیاهی و افزایش سطح مقابل جریان است. قابل ذکر است میزان تغییرات در نتایج به ازای پارامترهای متغیر، با استفاده از رابطه‌ی ریاضی مربوط به درصد تغییرات حاصل شده‌است. با افزایش شاخص تراکم پوشش گیاهی در مدل انعطاف‌پذیر و در  $\frac{y_n}{H} = 1$ ، ضریب درگ  $19/8$  درصد کاهش یافت که طبق نتایج، بیشترین نرخ کاهش ضریب درگ می‌باشد. همچنین کم‌ترین نرخ کاهش ضریب درگ به ازای افزایش شاخص تراکم پوشش گیاهی، در مدل صلب و در  $\frac{y_n}{H} = 0.6$  اتفاق افتاد که عددی معادل  $10/3$  درصد می‌باشد. در واقع در حالت بیشترین کاهش ضریب درگ، به ازای افزایش  $80$  درصد شاخص تراکم پوشش گیاهی، میزان افزایش نیرو  $43/8$  درصد و در حالت کم‌ترین کاهش ضریب درگ میزان افزایش نیرو  $66/5$  درصد حاصل شد. Fathi-Moghadam et al. (2018) با هدف بررسی اثر تراکم پوشش گیاهی بر جذب انرژی امواج ساحلی نشان دادند با کاهش تراکم پوشش گیاهی از  $100$  درصد به  $50$  درصد و سپس  $30$  درصد، میزان ضریب نیروی درگ به‌طور متوسط  $15$  درصد افزایش می‌یابد.

## نتایج و بحث

خصوصیات مکانیکی گیاهان حاشیه‌ی رودخانه‌ها با توجه به گونه‌ی گیاهی، اقلیم و شرایط خاص منطقه، الگوی رشد فصلی، طول عمر و دوره بلوغ گیاه متفاوت است. از این رو بررسی پوشش‌های گیاهی رودخانه‌ای طی این مراحل و پیش‌بینی میزان نیروی درگ جذب شده توسط پوشش گیاهی در حاشیه‌ی رودخانه و مسأله‌ی حفاظت سواحل و خسارت‌های ناشی از سیلاب‌های فصلی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. تجزیه و تحلیل داده‌ها در این مقاله بر اساس نیروی درگی است که به‌صورت مستقیم از طریق آزمایش‌های تجربی به‌دست آمده که مجموع نیروهای منفرد بر هر نمونه پوشش گیاهی در مدل آزمایشگاهی می‌باشد. در تمام آزمایش‌ها نوسانات نیرو طی دوره‌ی  $10$  دقیقه‌ای برداشت شد و میانگین نیروی جذب شده به‌عنوان معیار سنجش در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

### ضریب درگ

در این بخش متغیرهای مستقل براساس پارامتر بدون بعد ضریب درگ تعریف شده‌اند و نمودارها به‌صورت بدون بعد و با هدف استفاده‌ی کاربردی ترسیم شده‌اند. ضریب درگ به‌عنوان مهمترین شاخص مقاومت مقابل جریان در رودخانه‌های دارای پوشش گیاهی در نظر گرفته می‌شود که از جنبه‌های مختلف حائز اهمیت است. در این مقاله با قرار دادن مدل پوشش گیاهی صلب و انعطاف‌پذیر در فلوم آزمایشگاهی و اندازه‌گیری نیرو به روش مستقیم با استفاده از حسگر نیرو، ضریب درگ بر اساس فرمول کلاسیک نیروی درگ رابطه (۵) برآورد گردید. در این بخش ارتباط هر یک از اعداد بدون بعد مانند نسبت سرعت جریان به صلیبیت خمشی، شاخص تراکم پوشش گیاهی و عمق نسبی با ضریب درگ بررسی می‌شود.

### اثر شاخص تراکم پوشش گیاهی

جامعه‌ی گیاهان بومی در مسیر گذرگاه‌های آبی یک منطقه جغرافیایی، مجموعه‌ای از انواع گونه‌های گیاهانی است که تحت تأثیر نوع خاک، توپوگرافی و شرایط آب و هوایی منطقه قرار دارند. در بررسی تراکم جامعه‌ی گیاهی در مقیاس کوچک‌تر، مسأله‌ی تراکم یک واحد از گونه‌ی پوشش گیاهی مطرح می‌شود و با توجه به مرحله‌ی تکمیل دوره‌ی رشد هر گونه‌ی گیاهی قابل اندازه‌گیری و تخمین است که تراکم فردی گونه‌ی گیاهی می‌باشد. از طرفی در یک اکوسیستم و اجتماع بزرگ‌تر، مسأله‌ی

جدول ۲- بازه‌ی مقادیر سرعت جریان، تراکم فردی، توزیع فضایی و شاخص تراکم

Table 2- Range of flow velocity, individual density, spatial distribution and density index values

Density Index (DI)	Spatial Distribution (D %)	Individual Density ( $\frac{A_F}{A_B}$ )	Relative Depth ( $\frac{y_n}{H}$ )	Flow Velocity (m/s)
$0.2 \leq DI \leq 0.4$				
$0.4 < DI \leq 0.8$				
$0.8 < DI \leq 1.1$	100, 50, 30, 20, 10	0.04-0.03-0.02	1-0.8-0.6	0.15-0.46
$1.1 < DI \leq 2.2$				
$2.2 < DI \leq 3.8$				

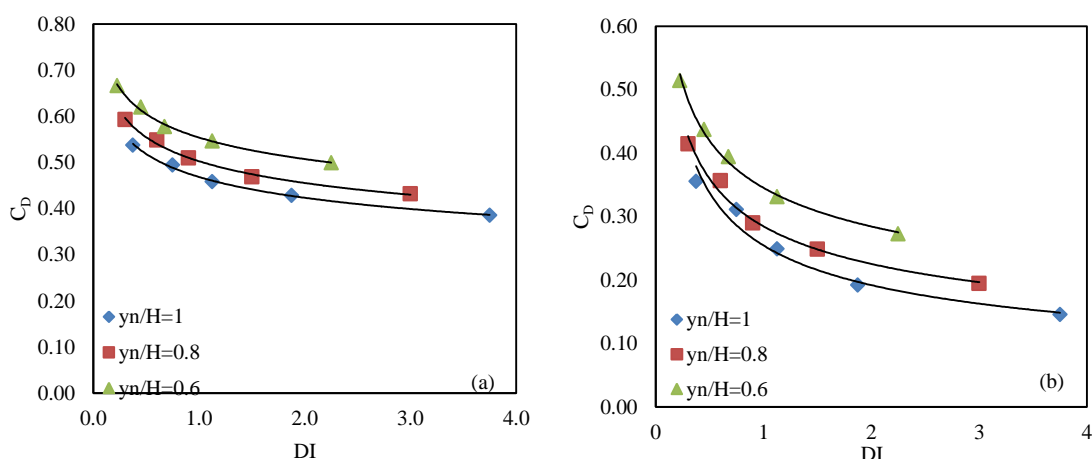


Fig. 8- Variations of drag coefficient with vegetation density index at different relative depths: (a) Rigid model; (b) Flexible model

شکل ۸- تغییرات ضریب درگ با شاخص تراکم پوشش گیاهی در اعماق نسبی مختلف: (a) مدل صلب; (b) مدل انعطاف پذیر

در این مورد به دست آمده است. در مدل صلب پوشش گیاهی شکل (۹a) کاهش ضریب درگ با شیب ملایم نسبت به افزایش پارامتر بدون بعد سرعت جریان به صلبیت خمشی وابستگی کمتر ضریب درگ به این پارامتر را نشان می‌دهد در حالیکه در مدل انعطاف پذیر شکل (۹b) شیب تند کاهش ضریب درگ با پارامتر بدون بعد صلبیت خمشی بیان کننده این موضوع است که نمونه انعطاف پذیر پوشش گیاهی به دلیل هم‌سویی با جریان، نسبت به تغییرات سرعت از درجه حساسیت بیشتری برخوردار است.

#### اثر قابلیت ارتجاع پوشش گیاهی

در شکل (۹) ضریب درگ در مقابل عدد بدون بعد نسبت سرعت جریان به صلبیت خمشی مدل پوشش گیاه صلب و انعطاف پذیر در شاخص‌های تراکم مختلف رسم شده است. با توجه به ثابت بودن اثر قابلیت ارتجاع که در واقع معیاری برای نمایش مقاومت مدل پوشش گیاهی صلب و انعطاف پذیر در مقابل جریان است، شکل (۹) نشان دهنده تغییرات ضریب درگ در مقابل سرعت جریان است. کاهش ضریب درگ با افزایش سرعت متوسط جریان مطابق با فرمول کلاسیک نیروی درگ است که صحت نتایج به دست آمده در این مقاله را نشان می‌دهد. در مطالعات Fathi-Moghadam et al. (2018) نتایج مشابهی



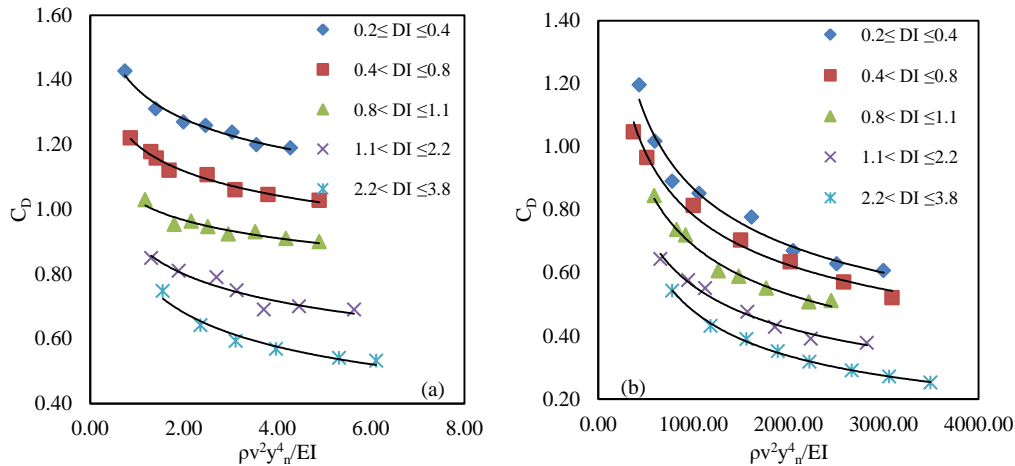


Fig 9- Variations of the drag coefficient compared to dimensionless number of the flow velocity ratio to the bending rigidity: (a) rigid model; (b) Flexible model

شکل ۹- تغییرات ضریب درگ نسبت به پارامتر بدون بعد نسبت سرعت جریان به صلبیت خمشی پوشش گیاهی: (a) مدل صلب; (b) مدل انعطاف پذیر

پذیر با شیب بیشتری در شرایط افزایش عمق نسبی جریان نسبت به مدل صلب رشد کرده و ضریب مقاومت در شرایط یکسان، در مدل انعطاف پذیر مقادیر کمتری را به خود اختصاص می‌دهد. به‌طور میانگین در دو مدل صلب و انعطاف‌پذیر با افزایش عمق نسبی از  $0/6$  به  $0/8$  و از  $0/8$  به  $1$  ضریب درگ به ترتیب  $12/81$  و  $10/43$  درصد کاهش می‌یابد. با توجه به اهمیت اثر تراز سطح آب و ارتفاع پوشش گیاهی در مطالعه‌های مربوط به حضور پوشش‌های گیاهی در سواحل دریا و اثرات آن‌ها بر امواج ساحلی و همچنین سیلاب دشت رودخانه‌ها، Fathi-Moghadam et al. (2018) اثر ارتفاع نسبی امواج شکنا بر ضریب درگ در جنگل‌های ساحلی را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق انجام شده افزایش ارتفاع نسبی موج که همراه با افزایش انرژی موج بوده باعث شده امواج زودتر شکسته شوند و در نتیجه موجب افزایش سطح جاذب نیرو و کاهش ضریب درگ شده‌است. افزایش سطح جاذب نیرو به ازای افزایش ارتفاع نسبی امواج شکنا در تحقیق Fathi-Moghadam et al. (2018) و همچنین افزایش عمق نسبی جریان در تحقیق حاضر و عملکرد مشابه این پارامتر بر ضریب درگ در شرایط موج و جریان، اهمیت این پارامتر را نشان می‌دهد.

#### اثر عمق نسبی جریان

تخمین تراز سطح آب در پیش‌بینی خسارات احتمالی ناشی از طغیان رودخانه در مواقع سیلابی حائز اهمیت است. افزایش تراز سطح آب موجب آب‌گرفتگی سیلاب دشت و اراضی مجاور رودخانه می‌شود. علاوه بر این در مناطق دارای پوشش گیاهی، بررسی اثر ارتفاع و میزان استغراق پوشش گیاهی بر ضریب مقاومت جریان اطلاعات ارزشمندی را در زمینه مدیریت رودخانه و ارزیابی ریسک سیلاب در منطقه فراهم می‌آورد. با در نظر گرفتن چنین رویکردی، در این مقاله عمق نرمال جریان ( $y_n$ ) و ارتفاع مدل پوشش گیاهی ( $H$ )، دو پارامتر در تعیین عمق نسبی ( $\frac{y_n}{H}$ ) در نظر گرفته شده‌اند. با ثابت بودن ارتفاع پوشش گیاهی، عمق نسبی با افزایش عمق نرمال جریان افزایش می‌یابد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که ضریب درگ در هر دو مدل پوشش گیاهی با افزایش عمق نسبی کاهش یافته‌است. به دنبال افزایش عمق نرمال جریان در محدوده‌ی پوشش گیاهی، سطح مقابل جریان افزایش می‌یابد و به علت تأثیر بیشتر سطح مقابل جریان، مطابق با فرمول کلاسیک نیروی درگ، ضریب درگ کاهش می‌یابد. تأثیر پذیری نسبت به افزایش عمق نسبی جریان در مدل انعطاف‌پذیر پوشش گیاهی در مقایسه با مدل صلب به وضوح در نمودارهای رسم شده در شکل (۱۰) دیده می‌شود. نمودارهای مربوط به پوشش گیاهی انعطاف

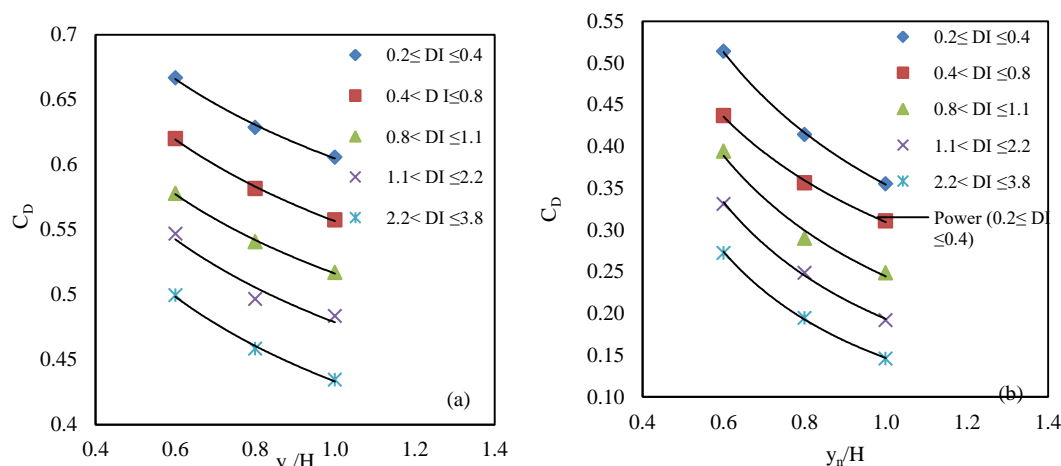


Fig. 10- Variations of drag coefficient with relative depth: (a) rigid model; (b) Flexible model

شکل ۱۰- تغییرات ضریب درگ با عمق نسبی جریان: (a) مدل صلب؛ (b) مدل انعطاف پذیر

### جدول ۳-دقت مدل های آماری

Table 3-Accuracy of statistical models

Error (%)	Accuracy (%)	MSE	RMSE	KGE	NSE	
15.11	84.89	0.01	0.12	0.96	0.94	Eq. 6
14.9	85.1	0.01	0.1	0.93	0.92	Eq. 7

$$C_D = \left(\frac{y_n}{H}\right)^{1.2} + (DI)^{0.16} - 0.32 \left(\frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}\right)^{0.21} \quad R^2 = 0.89 \quad (7)$$

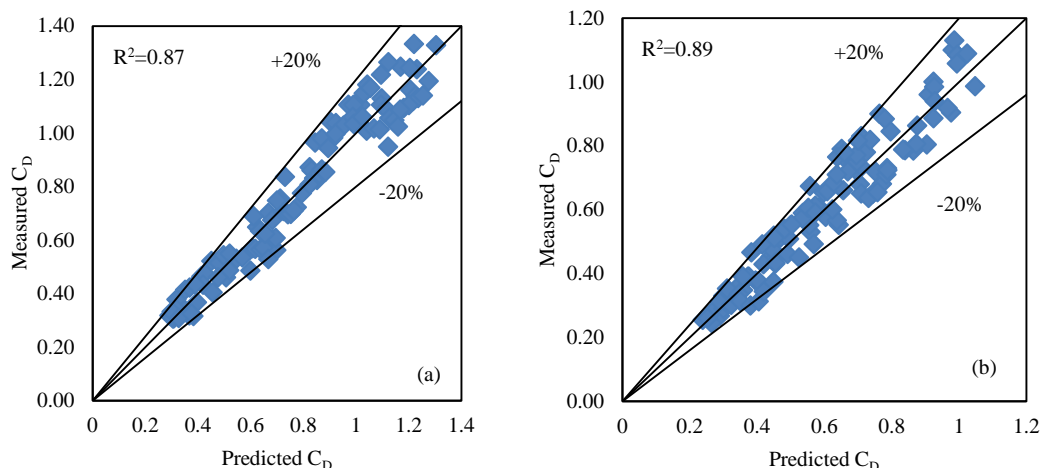
با توجه به این که ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) به تنهایی معیار مناسبی برای دقت مربوط به معادله‌ها نمی‌باشد، از سه روش ریشه متوسط مجذورات مجموع خطاها (RMSE)، ضریب ناس-ساتکلیف (NSE) و معیار کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده شده است. جدول (۳) برای هریک از معادله‌ها نتیجه‌گیری شده دقت مربوطه را که بر اساس ۲۰ درصد داده‌هایی که در استخراج مدل آماری نقشی نداشته‌اند را نشان می‌دهد.

شکل (۱۱) مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی هریک از پارامترهای فوق را در مقابل مقادیر متناظر محاسباتی برای کلیه‌ی آزمایش‌های انجام شده (داده‌های مربوط به استخراج و صحت سنجی) نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مدل آماری با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی ضریب نیروی درگ بوده و همان‌طور که مشاهده می‌شود اکثر داده‌های آزمایشگاهی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده در نزدیکی خط ۴۵ درجه واقع شده‌اند.

### تخمین ضریب درگ

با توجه به نتایج آنالیز ابعادی، به منظور مشخص نمودن ارتباط بین پارامترهای بدون بعد مؤثر بر جذب نیروی درگ و ضریب مقاومت جریان، از نرم‌افزار SPSS-16 بهره گرفته شد؛ به گونه‌ای که روش‌های مختلف خطی و غیرخطی مورد آزمون آماری با پارامترهای وابسته قرار گرفت. بهترین ضرایب با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS-16 به روش رگرسیون خطی برای ۸۰ درصد داده‌ها که به صورت تصادفی انتخاب شدند، استخراج گردید و مابقی داده‌ها برای برآورد دقت و صحت‌سنجی روابط مورد استفاده قرار گرفتند. روابط (۶) و (۷) تأثیر پارامترهای بدون بعد بر ضریب درگ را به ترتیب برای نمونه‌های پوشش گیاهی صلب و انعطاف پذیر نشان می‌دهد.

$$C_D = 3.26 \left(\frac{y_n}{H}\right)^{0.13} - 2.65 (DI)^{0.12} + 0.28 \left(\frac{\rho V^2 y_n^4}{EI}\right)^{-0.29} \quad R^2 = 0.87 \quad (6)$$



**Fig. 11- Measured and predicted values: (a) Rigid model; (b) Flexible model**  
**شکل ۱۱- مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده: (a) مدل صلب; (b) مدل انعطاف‌پذیر**

ضریب درگ به ترتیب ۱۲/۸۱ درصد و ۱۰/۴۳ درصد کاهش می‌یابد. شاخص معرفی شده که نوآوری این مقاله به‌شمار می‌آید می‌تواند مرجعی در زمینه پایش انواع پوشش‌های گیاهی در سواحل و گیاهان آبی به‌منظور حفظ و یا کاشت انواع گونه‌های گیاهی در مجاور رودخانه‌ها و گذرگاه‌های آبی باشد. نتایج حاصل از این تحقیق به‌عنوان راهنمای مناسبی در زمینه‌ی مدل‌سازی عددی و نرم‌افزاری زبری بستر و سیلاب دشت رودخانه‌ها، مدیریت سیلاب در پروژه‌های مهندسی رودخانه و انتخاب نوع پوشش گیاهی مناسب برای حفاظت سواحل در حاشیه‌ی رودخانه‌ها در مناطق شهری کاربرد دارد.

### تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN:SCU.EC99.000) در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

### نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با توجه به اهمیت مطالعه‌ی جریان در کانال‌ها و رودخانه‌های حاوی پوشش گیاهی به خصوص در زمینه‌ی ساماندهی رودخانه‌ها انجام شده‌است. میزان جذب نیروی درگ توسط نمونه‌های مصنوعی پوشش گیاهی، به‌صورت مستقیم و با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. بررسی اثر شاخص تراکم پوشش گیاهی نشان داد افزایش این شاخص تأثیر به‌سزایی در کاهش ضریب درگ دارد؛ بطوریکه در بیشترین میزان افزایش شاخص تراکم، کاهش ۱۹/۸ درصد در ضریب درگ مشاهده گردید. انعطاف‌پذیری پوشش گیاهی یکی از مسائل مهم و مورد توجه در این مقاله بوده‌است که بررسی اثر این پارامتر بر ضریب درگ نشان داد در مدل انعطاف‌پذیر نسبت به مدل صلب، با افزایش سرعت متوسط جریان ماندگار و یکنواخت، ضریب درگ با شیب تندتری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق نسبی جریان از ۰/۶ به ۰/۸ و ۱ در هر دو مدل صلب و انعطاف‌پذیر،

### References

- 1- Aberle, J. and Järvelä, J. 2013. Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 51, 33-45.
- 2- Aberle, J. and Järvelä, J. 2015. *Rivers—physical, fluvial and environmental processes* Hydrodynamics of vegetated channels. Springer.
- 3- Afzalimehr, H. and Setayesh, P. 2013. Investigation on Logarithmic and Coles Laws under Different Emergent Vegetation Patches. *Journal of Hydraulics*, 13(1), 47-62.
- 4- Afzalimehr, H. and Subhasish, D. 2009. Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions. *International Journal of Sediment Research*, 24, 236-246.
- 5- Bączyk, A., Wagner, M., Okruszko, T. and Grygoruk, M. 2018. Influence of technical maintenance measures on ecological status of agricultural lowland rivers—Systematic review and implications for river management. *Science of the Total Environment*, 627, 189-199.

- 6- Bennett, S. J. and Simon, A. 2004. *Riparian vegetation and fluvial geomorphology*, American Geophysical Union.
- 7- Caroppi, G. and Järvelä, J. 2022. Shear layer over floodplain vegetation with a view on bending and streamlining effects. *Environmental Fluid Mechanics*, 1-32.
- 8- Caroppi, G., Västilä, K., Järvelä, J., Rowiński, P. M. and Giugni, M. 2019. Turbulence at water-vegetation interface in open channel flow: Experiments with natural-like plants. *Advances in Water Resources*, 127, 180-191.
- 9- Chen, Z., Jiang, C. and Nepf, H. 2013. Flow adjustment at the leading edge of a submerged aquatic canopy. *Water Resources Research*, 49, 5537-5551.
- 10- Cheng, N.-S. 2013. Calculation of drag coefficient for arrays of emergent circular cylinders with pseudofluid model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 602-611.
- 11- D'ippolito, A., Calomino, F., Alfonsi, G. and Lauria, A. 2021. Flow Resistance in Open Channel Due to Vegetation at Reach Scale: A Review. *Water*, 13(2), 116.
- 12- D'ippolito, A., Lauria, A., Alfonsi, G. and Calomino, F. 2018. Flow resistance in open channel with rigid emergent vegetation. *Proceedings of the 5th IAHR Europe Congress—new challenges in hydraulic research and engineering Trento, Italy*.
- 13- De vriend, H. J., Van koningsveld, M., Aarninkhof, S. G., De vries, M. B. and Baptist, M. J. 2015. Sustainable hydraulic engineering through building with nature. *Journal of Hydro-environment research*, 9(2), 159-171.
- 14- Duan, J. G., Barkdoll, B. and French, R. 2006. Lodging velocity for an emergent aquatic plant in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1015-1020.
- 15- Fathi-Moghadam, M. and Kouwen, N. 1997. Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(1), 51-57.
- 16- Fathi-Moghadam, M. 1996. *Momentum Absorption in Non-rigid, Non-submerged, Tall Vegetation Along Rivers [microform]*, Thesis (Ph.D.), University of Waterloo.
- 17- Fathi-Moghadam, M., Davoudi, L. and Motamedi-Nezhad, A. 2018. Modeling of solitary breaking wave force absorption by coastal trees. *Ocean Engineering*, 169, 87-98.
- 18- Fathi-Moghadam, M., Kashefipour, M., Ebrahimi, N. and Emamgholizadeh, S. 2011. Physical and numerical modeling of submerged vegetation roughness in rivers and flood plains. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(11), 858-864.
- 19- Findlay, S. 1995. Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystems: The hyporheic zone. *Limnology and oceanography*, 40(1), 159-164.
- 20- Finnigan, J. 2000. Turbulence in plant canopies. *Annual review of fluid mechanics*, 32(1), 519-571.
- 21- Ghanbari-Adivi, E and Fathi-Maghadam, M. 2015. Vegetation impact on the drag coefficient and resistance of trees against shore waves. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 28(2), 103-112 (in persian)
- 22- Gosselin, F. P. and De langre, E. 2011. Drag reduction by reconfiguration of a proelastic system. *Journal of Fluids and Structures*, 27(7), 1111-1123 ,
- 23- Gurnell, A. 2014. Plants as river system engineers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1), 4-25.

- 24-Koloseus, H.J. and Davidian, J. 1996. *Free-surface instability correlations and roughness-concentration effects on flow over hydrodynamically rough surfaces.*
- 25-Kothyari, U. C., Hayashi, K. and Hashimoto, H. 2009. Drag coefficient of unsubmerged rigid vegetation stems in open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 47(6), 691-699.
- 26-Krzeminska, D., Kerkhof, T., Skaalsveen, K. and Stolte, J. 2019. Effect of riparian vegetation on stream bank stability in small agricultural catchments. *Catena*, 172, 87-96.
- 27-Lashkar-Ara, B. and Fathi-Moghadam, M. 2010. Wall and bed shear forces in open channels. *Research Journal of Physics*, 4(1), 1-10.
- 28-Li, D., Huai, W.-X. and Liu, M.-Y. 2020. Investigation of the flow characteristics with one-line emergent canopy patches in open channel. *Journal of Hydrology*, 590, 125248 .
- 29-Liu, X. and Zeng, Y. 2017. Drag coefficient for rigid vegetation in subcritical open-channel flow. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(5), 1035.1050-
- 30-Marjoribanks, T. I., Hardy, R. J. and Lane, S. N. 2014. The hydraulic description of vegetated river channels: the weaknesses of existing formulations and emerging alternatives. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(6), 549-560.
- 31-Nepf, H. M. 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water resources research*, 35(2), 479-489.
- 32-Nepf, H. M. 2012. Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, 50(30), 262-279.
- 33-Ozan, A. Y. 2018. Flow structure at the downstream of a one-line riparian emergent tree along the floodplain edge in a compound open-channel flow. *Journal of Hydrodynamics*, 30(3), 470-480.
- 34-Rowiński, P. M., Västilä, K., Aberle, J., Järvelä, J. and Kalinowska, M. B. 2018. How vegetation can aid in coping with river management challenges: A brief review. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 18(4), 345-354.
- 35-Shi, H., Liang, X., Huai, W. and Wang, Y. 2019. Predicting the bulk average velocity of open-channel flow with submerged rigid vegetation. *Journal of Hydrology*, 572, 213-2.25
- 36-Tang, H., Tian, Z., Yan, J. and Yuan, S. 2014. Determining drag coefficients and their application in modelling of turbulent flow with submerged vegetation. *Advances in Water Resources*, 69, 134-145.
- 37-Vargas-luna, A., Crosato, A., Calvani, G. and Uijtewaal ,W. S. 2016. Representing plants as rigid cylinders in experiments and models. *Advances in water resources*, 93, 205-222.
- 38-Wang, W.-J., Peng, W.-Q., Huai, W.-X., Katul, G. G., Liu, X.-B., Qu, X.-D. and Dong, F. 2019. Friction factor for turbulent open channel flow covered by vegetation. *Scientific reports*, 9(1), 1-16.
- 39-Wynn, T. and Mostaghimi, S. 2006. The effects of vegetation and soil type on streambank erosion, southwestern virginia, usa 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(1), 69-82.
- 40-Zhang, X., Lin, P. and Nepf, H. 2022. A wave damping model for flexible marsh plants with leaves considering linear to weakly nonlinear wave conditions. *Coastal Engineering*, 175, 10412



**EXTENDED ABSTRACT**

**Determination of contribution of flow network components around drain tubes in paddy field drainage**

M. Jafari-Talukolae<sup>1</sup> A. Shahnazari<sup>2\*</sup> and H. Ritzema<sup>3</sup>

1- Ph.D. of Water Engineering, river engineering expert in Mazandaran Regional Water Company, Iran.

2\*- Corresponding Author, Professor of Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran; (aliponh@yahoo.com).

3- Associate Professor of Water Resources Management Group, Wageningen University, Wageningen 6700-6709, The Netherlands.

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 24 August 2021

Revised: 7 March 2022

Accepted: 9 March 2022

**TO CITE THIS ARTICLE :**

Jafari, M., Shahnazari, A., Ritzema, H. (2024). 'Determination of contribution of flow network components around drain tubes in paddy field drainage', Irrigation Sciences and Engineering, 47(1), pp. 33-52. doi: 10.22055/jise.2022.38338.1987.

*Keywords:*

vertical, loads, horizontal loads, radial loads, drain discharge, Water table.

**Introduction**

Many theories are found for subsurface drainage system design (Kumar et al., 2013). These were formulated by some of the soil characteristics that are important in designing and operating drainage systems. Most of these formulas have simplified and just involved flow parameters or assumed soil media as a maximum of two layers. In paddy fields, used equations for water table depth prediction have no accordance with field condition. Due to specific flow situations in these fields, much difference was observed in results (Darzi-Naftchali et al., 2013). The differences were because of special layered soil in paddy fields and soil hydraulic characteristics, hardpan layer existence formed in long cultivation and tillage, its effect on flow, and of course, lack of a suitable formula for these fields. So, designing rules for subsurface drainage in paddy fields needs investigation and implementation of new relations to predict the flow pattern suitably. Determination of design criteria and suitable formulas needed to predict flow network around drain tubes. Jafari-Talukolae et al. (2017) reported in predicting water table profile between bilevel subsurface drainage in paddy fields due to the existence of resistance in vertical flow direction based on soil layers, and field results have no suitable agreement with analytical solution. Darzi-Naftchali et al. (2013), analyzing the effect of subsurface drainage systems on water balance and water table in paddy fields for a successive rice and canola cultivation season, obtained that shallow drainage systems were more influenced than deep drainage systems in water table control. The flow pattern of water towards the drain tube and the components of the flow network are the basis of the drainage system design. By determining the flow path towards the drains and the water table profile variation, the distance and depth of the drains in paddy fields can be determined with greater accuracy.

**Methodology**

This research was carried out in a drainage pilot of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University located in Sari town of Iran during the autumn and winter of 2018-19. The latitude and longitude of the region are 36.39° N and 53.04° E, respectively, and its height above sea

level is -15 m. According to 10-year meteorological data, the average rainfall in the region is 643 mm, pan evaporation is 1222 mm and the average air temperature is 17.6 °C. The studied drainage system has a depth of 0.90 m and a spacing of 30 m. The length of the drainage line is 100 m, and the material of the pipes is a corrugated pipe with a diameter of 100 mm, which was installed with a slope of 0.2%. Mineral sand with specific granulation was used as cover. The field's soil texture up to a depth of 1.5 meters is silty-Clay with a clay content between 55-42%. Below the 1.5 m, the layer is a clay texture. Water table and drain discharge were measured daily, and horizontal and vertical hydraulic conductivity were measured. Discharges values, hydraulic conductivity of different layers, water table, and measured piezometric level were used to calculate vertical, horizontal, and radial loads. The procedure was that the vertical load was compared with formula (1).

$$h_v = \frac{q \times D_v}{k} \quad (1)$$

The horizontal flow load was compared with formula (2). This equation, in which the flow to the drain is assumed to be completely horizontal, is known as the Donnan equation.

$$h_h = \frac{qL_h^2}{8kD_h} \quad (2)$$

The radial load of the flow ( $h_r$ ) was calculated by the formula (3).

$$h_r = q \times \left( \frac{L}{\pi k} \right) \times \ln \frac{aD_r}{u} \quad (3)$$

The hydraulic conductivity was the same as the average hydraulic conductivity measured in the field ( $\text{m day}^{-1}$ ), and the flow rate was equal to the outlet flow rate ( $\text{mm day}^{-1}$ ). The value of  $D_v$  was considered equal to the water table to the drain level (m) and  $D_h = D + 0.5h$ . The values of  $L$  were the same as the drainage distance (m), and  $L_h$  was equal to the difference between the drainage distance and the radial flow range ( $1.4 \times D$ ). In radial flow, the value of  $aD_r$  is a parameter that depends on the geometric dimensions of the flow zone and the position of the drainage pipe relative to the impermeable layer. In some cases, the value of this parameter is considered equal to  $D$ . The amount of wetting medium of the inlet flow to the pipe ( $u$ ), because in this study, the pipe was placed inside the trench with a mineral coating with a thickness of 10 cm on each side was equal to the wetting environment of the trench. By calculating the values of the flow components, their sums were matched with the values of the actual water table using the formula  $h = h_v + h_h + h_r$ . The difference between the measured and calculated values was evaluated and compared using statistical indicators (paired t-test). The statistical indices were RMSE (mean square error),  $R^2$  (correlation coefficient), and  $I_a$  (agreement index).

## Results and Discussion

The results showed that the water table profile was horizontal and only dropped near the drainage. Hydraulic conductivity measurements showed that the soil included different layers, where a low permeability layer was observed at a depth of 30-60 cm, reducing vertical permeability and increased horizontal movement of water towards the drains. This condition has led to the leveling of the water table. Field soil stratification studies showed that the soil texture in the surface layer of the experimental field is lighter than the deeper layers. The average value of hydraulic conductivity above the drain (ground level to a depth of 0.9 m) is  $0.23 \text{ m day}^{-1}$ , and the average value of hydraulic conductivity between the depth of the drain (0.9 m) to the impermeable layer (2 m) is equal to  $0.15 \text{ m day}^{-1}$  was achieved. Also, in the 30 to 60 cm layer, a layer with less hydraulic conductivity was observed than the surface layer, the same as the hardened layer. In a study of Vietnam paddy fields, a



layer with a hydraulic conductivity of fewer than  $0.09 \text{ m day}^{-1}$  was observed beneath the surface layer at a depth of 60 to 70 cm (Nguyen, 2007).

The depth curve of the water table measured at different distances from the drain showed that the drop of the water table occurred at a short distance from the drains, and at farther distances, the water table was horizontal. At a distance of one meter, about 90% of the water table has fallen, but at a distance of 3 meters, only 30% of the water table has fallen. The soil's multi-layered nature changes the flow lines' pattern to the drains, where the horizontal flow is more affected by the layers with high hydraulic conductivity and the vertical flow is affected by the layers with low hydraulic conductivity. Take (Oosterbaan and Nijaland, 1994). The values measured by piezometers are very different from the calculated vertical load values in the vertical flow discussion. The difference between the calculated and measured values and the low value of the calculated vertical load is due to the low discharge output from the drains. However, the high value of the measured difference between the piezometer of the surface layer and the level of the drainage base is due to the presence of the hardened layer and the slow penetration of water into the lower layer. There is a good and positive correlation between the measured values of piezometers and the calculated horizontal load. The calculated values of horizontal load and its measurement are somewhat close and show the high share of horizontal flow in paddy soils. The regression relationship between the values of radial load and the measured values shows the same trend. However, the difference between these two values in the radial current was greater than the horizontal current.

According to the results, the contribution of horizontal flow was significantly higher than the other two components. The contribution of the vertical components is small and, in most cases, less than one percent. The radial component, which had a larger contribution than the vertical contribution, had a relatively significant effect of about 11%. Hamzeh et al., 2013, in their study of water table profiles between two bilevel drains in lands with layered soils, interpreted the large difference between the results of analytical solution and field measurements as follows; Since the soil of the experimental farm is composed of three layers with different permeability coefficients, this changes the pattern of flow lines to the drains. In particular, the limiting layer prevents vertical infiltration of water. Due to the increase of soil resistance against the water flow path, causes the flow lines to deviate from the radial state and be horizontal.

### **Conclusion**

Calculating the flow components showed that when the water table was at a higher level, the total load was overestimated. Conversely, the total load was underestimated when the water table was at a greater depth. This condition is due to the discharge from the drains; when the water table is close to the ground, most of the water reaches the drainage trench and pipe by moving horizontally from above the hardened layer and has a high discharge. However, with the water table drop, the discharge enters the drain from the hardened layer or below it, mainly by radial movement, and less discharge comes out of the drain. Due to the presence of different layers in the soil and a layer with low hydraulic conductivity below the surface layer, the measured values of the flow components were very different from the calculated values.

### **Acknowledgment**

The study project "Determining the contribution of the flow network components around the subsurface drainage in paddy fields" has been implemented following contract No. 589 of the Center for International Scientific Studies and Cooperation. Therefore, the authors of this article would like to thank the mentioned Center for its financial support.

**References**

- 1- Darzi-Naftchali, A., Mirlatifi, S.M., Shahnazari, A., Ejlali, F. and Mahdian, M.H. 2013. Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields. *Agricultural Water Management*. 130: 61-68.
- 2- Hamzeh, S., Naseri, A.A., Kashkuli, H.A. 2013. Variations of Water Table Profile and Outflow of Bi-level Drains in a Layered Soil. *Journal of Water and Soil*. 27(1): 1-13. (In Persian)
- 3- Jafari Talukolaee M., A. Shahnazari, M.Z. Ahmadi, D. Kalantari. 2017. Prediction of water table dynamics between bi-level subsurface drains in paddy fields. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 6(10): 837-848. (In Persian)
- 4- Kumar, R., Bhakar, S.R., Singh, P.K. 2013. Evaluation of hydraulics characteristics and management strategies of subsurface drainage system in Indira Gandhi Canal Command. *Agriculture Engineering International: CIGR Journal*. 15(2): 1-9.
- 5- Nguyen, D.B. 2007. Irrigation of Paddy Fields in Mekong Delta. Materials, reports, and documents of Department of Water Resources, Hanoi Agriculture University, Hanoi, Vietnam.
- 6- Oosterbaan, R.J. and Nijland, H.J. 1994. Determining the Saturated Hydraulic Conductivity. Chapter 12 in: H.P.Ritzema (Ed.), *Drainage Principles and Applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 16, second revised edition, 1994, Wageningen, The Netherlands.



© 2024 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 سهم اجزای شبکه جریان در اطراف زهکش زیرزمینی در یک مزرعه شالیزاری

 مهدی جعفری تلوکلایی<sup>۱</sup>، علی شاهنظری<sup>۲\*</sup> و هنک ریتزما<sup>۳</sup>

- ۱- دانش آموخته دکتری مهندسی آب، کارشناس مهندسی رودخانه‌ها و سواحل شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران .  
 ۲- نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری a.shahnazari@sanru.ac.ir  
 ۳- دانشیار گروه مدیریت منابع آب، دانشگاه وختینگن هلند.

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

## چکیده

الگوی جریان آب به سمت زهکش و اجزای شبکه جریان، اساس روابط طراحی سیستم زهکشی و تعیین کننده فاصله و عمق زهکش‌ها می‌باشند. این تحقیق، با هدف ارزیابی سهم اجزای جریان در اطراف زهکش زیرزمینی در مزرعه آزمایشی زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری طی سال ۱۳۹۷ انجام شد. مقادیر سطح ایستابی و دبی زهکش‌ها به صورت روزانه در طول فصل کشت کلزا اندازه‌گیری شده و هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی لایه‌های مختلف نیز به روش چاهک تعیین شدند. بار اجزای جریان نیز با فرمول‌های موجود محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای مقایسه شد. نتایج نشان داد منحنی سطح ایستابی در فاصله بین دو زهکش، حالت افقی داشته و تنها در نزدیکی زهکش، افت زیادی مشاهده شد. وجود یک لایه با نفوذپذیری کم در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری موجب کاهش نفوذ عمودی و افزایش حرکت افقی آب به سمت زهکش شده است. هم‌چنین مقادیر اجزای جریان نشان داد که بار جریان افقی بخش اعظمی از جریان را تشکیل داده و همبستگی مناسبی بین مقادیر محاسباتی بار افقی و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود داشت اما، سهم جز عمودی جریان کم برآورد شد و با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مطابقت نداشت. مقدار کل بار جریان برآورد شده نیز با مقدار سطح ایستابی اندازه‌گیری شده اختلاف زیادی داشت. در مجموع، جریان افقی و شعاعی در محاسبه بار جریان در مزرعه شالیزاری سهم زیادی داشته و به دلیل کم بودن نفوذپذیری لایه کفه سخت و مقاومت در برابر جریان عمودی، اختلاف زیادی در مقدار بار کل جریان با مقدار اندازه‌گیری شده وجود داشت.

کلید واژه‌ها: بار افقی، بار شعاعی، بار عمودی، دبی زهکش، سطح ایستابی.

## مقدمه

دوم سال و حساسیت اکثر گیاهان به غرقابی، این مهم به اندازه کافی تحقق نیافته است (Jafari Talukolaee et al., 2013). برای جلوگیری از تغییر کاربری اراضی، نصب سیستم‌های زهکشی زیرزمینی یک راه‌حل ضروری می‌باشد که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور کلی، هدف اصلی از احداث زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری، بهبود شرایط تهویه برای رشد گیاه است (Ogino and Murashima, 1992). اثرات مستقیم زهکشی در اراضی تحت کشت، جلوگیری از غرقابی Chan و Cheong (2001)، افزایش محصول Okamoto (1997)، بهبود کیفیت برنج، افزایش کاربری و استفاده چند منظوره از زمین و اثرات غیرمستقیم آن، بهبود قابلیت کار ماشین‌آلات Ogino و Murashima (1992) و خشک کردن زمین در میان فصل با هدف افزایش محصول Matsushima (1970) می‌باشد. در مناطق مرطوبی چون شمال ایران، که زهکشی اقدامی ضروری برای بهبود شرایط خاک برای رشد گیاه و تردد ماشین-آلات مزرعه می‌باشد (Ahmadi, 1991) بارندگی‌های متناوب در

کل اراضی شالیزاری ایران ۴۶۰ هزار هکتار است (FAO, 2014) که بیش از ۶۵ درصد آن در استان‌های شمالی مازندران و گیلان واقع شده است (Jihad-Agriculture Ministry, 2019). در سال‌های اخیر، طرح‌های تجهیز و نوسازی در سطح وسیعی از اراضی شالیزاری، برای بهبود بهره‌وری از منابع محدود آب و خاک اجرا شده است. با وجود احداث زهکش‌های سطحی، هنوز سطح ایستابی بالا بوده و نفوذپذیری کم خاک سطحی و نامناسب بودن سیستم زهکشی باعث شده است تا اکثر این اراضی تجهیز شده تنها در کمتر از دو فصل از سال تحت کشت قرار گرفته و در باقی‌مانده از سال غیرقابل بهره‌برداری و کشت باشند (Darzi et al., 2007; Darzi et al., 2013)، که از نظر اقتصادی برای کشاورزان مقرون به‌صرفه نیست. کشت زمستانه در اراضی شالیزاری شمال کشور، یکی از راهکارهای استفاده بهینه از زمین، تقویت اقتصاد خانوارهای کشاورز و تأمین دانه‌های روغنی است. اما به دلیل بارندگی زیاد و حالت غرقابی شالیزارها در نیمه

لایه‌ها موقتی بوده و به تدریج آب موجود در آن‌ها به اعماق نفوذ کرده و یا از طریق جریان‌های جانبی خارج می‌شود. بنابراین، الگوی جریان در اراضی شالیزاری نامشخص بوده و سهم جریان-های عمودی، افقی و شعاعی نیاز به بررسی دارد که تاکنون در تحقیقی مشاهده نشده است.

تئوری‌های زیادی برای طراحی سیستم‌های زهکشی زیرزمینی موجود هستند (Kumar et al., 2013). این تئوری‌ها با استفاده از خصوصیات مهم خاک که در طراحی و عملکرد زهکش‌ها مؤثر هستند فرموله شدند. اکثر معادله‌های موجود با به‌کارگیری فرضیه دپوی-فورشهپایمر، از مؤلفه عمودی یا شعاعی جریان صرف‌نظر می‌کنند (Dumm, 1954). Donnan (1946) و Kraijenhoff (1958) یا اکثر فرمول‌های حاصل شده مانند هوخهات، دونان، لوتین، حماد و گلوردام دارای ساده‌سازی‌هایی

می‌باشند که تنها پارامترهای مؤثر بر جریان را در نظر گرفته و یا مانند فرمول ارنست، خاک را حداکثر دو لایه‌ای فرض کرده‌اند (Ritzema, 1994; Torabi, 2014).

Dagan (1965)، Toksoz و Kirkham (1971) و Dieleman (1974) به‌ترتیب یک حل تقریبی، یک حل تحلیلی و شکل‌های خطی از معادله‌ها را برای حالت ماندگار زهکشی خاک‌های دو و سه لایه‌ای به‌دست آوردند. در شرایط غیرماندگار نیز، تحقیقی توسط Singh et al. (1999) برای خاک‌های لایه‌ای انجام شد. این مطالعه نشان داد که سطح ایستابی تحت تأثیر محل برخورد لایه‌ها قرار دارد. در مطالعه‌ای، یک فرمول تعیین فاصله زهکشی با لحاظ کردن تغییرات در جریان شعاعی و منطقه جریان بالای تراز زهکش‌ها در محدوده جریان شعاعی ارائه شد. نتایج نشان داد که فرمول جدید توانست فاصله زهکش را با دقت قابل قبولی تعیین کند (Mishra and Singh, 2007). Hamzeh et al. (2013) در بررسی پروفیل سطح ایستابی بین دو زهکش دو عمقی در اراضی دارای خاک‌های لایه‌ای، اختلاف زیادی بین نتایج حل تحلیلی و اندازه‌گیری مزرعه‌ای مشاهده کردند. آن‌ها این عدم همبستگی را این‌گونه تفسیر کردند: از آنجایی که خاک مزرعه آزمایشی مورد نظر از سه لایه با ضرایب آبگذری مختلف تشکیل شده است، این مسأله باعث تغییر الگوی مسیر خطوط جریان به سمت زهکش‌ها می‌گردد.

Jafari-Talukolae et al. (2017) در پیش‌بینی منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش زیرزمینی دو عمقی در اراضی شالیزاری با استفاده از معادله‌های تحلیلی گزارش کردند که به‌دلیل وجود مقاومت در مقابل جریان عمودی بر اثر لایه‌بندی خاک، نتایج مزرعه‌ای با نتایج حل تحلیلی هم‌خوانی مناسبی نداشت. در مقایسه معادله‌های زهکشی ماندگار و غیرماندگار برای تعیین فاصله زهکش‌های زیرزمینی در اراضی شالیزاری شمال ایران، روابط مختلفی چون هوخهات، کرکهام، داگان، ارنست و ارنست-هوخهات به‌عنوان معادله‌های ماندگار و روابط گلوردام،

پاییز و زمستان موجب افت و خیز سطح ایستابی می‌شود. هرگاه شدت بارندگی از مقدار شدت تخلیه تجاوز کند و یا حتی با آن برابر گردد، هیچ سیستم زهکشی قادر به جلوگیری از خیزش سطح ایستابی و ایجاد حالت استغراق در سطح خاک نخواهد بود. به این ترتیب، سیستم زهکشی باید در یک زمان مناسب، آن‌چنان سطح آب را پایین‌اندازد که خاک در حد نیاز خشک شود (Behbahani and Rahimi khob, 2002). به‌طور کلی، سطح ایستابی و نوسانات آن در مناطق مرطوب، معیار اساسی برای طراحی زهکشی زیرزمینی و هم‌چنین مهم‌ترین پارامتر برای تعیین وجود شرایط مطلوب برای رشد گیاه است (Bouarfa and Zimmer, 2000).

در اراضی شالیزاری، روابط مورد استفاده برای پیش‌بینی‌های عمق سطح ایستابی نوعاً با شرایط واقعی مزرعه مطابقت نداشته و به‌دلیل شرایط خاص جریان در این اراضی، تفاوت زیادی بین نتایج مشاهده شده است (Darzi et al., 2013; Jafari-Talukolae et al., 2017). این تفاوت‌ها در نتایج ناشی از لایه‌بندی منحصر به فرد اراضی شالیزاری و خصوصیات هیدرولیکی خاک، وجود لایه کفه سخت و تأثیر آن بر مسیر جریان است که بر اثر کشت و کار در طولانی‌مدت شکل گرفته و نبود فرمول‌های متناسب با ماهیت جریان در این اراضی می‌باشد. بنابراین معیارهای طراحی برای زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری نیازمند بررسی و تدوین روابطی جدید می‌باشد که الگوی مناسب جریان را شبیه‌سازی کند. تدوین معیارهای طراحی و فرمول‌های مناسب، اساساً به پیش‌بینی شبکه جریان به سمت زهکش نیاز دارد.

به‌طور کلی، در بین دو لوله زهکش موازی، نفوذ آب از سطح زمین و حرکت آن در لایه غیراشباع تا سطح ایستابی به‌صورت عمودی و رو به پایین است. پس از آنکه وارد منطقه اشباع شد ابتدا کم و بیش در همان جهت عمودی و رو به پایین به حرکت خود ادامه می‌دهد، ولی به زودی مسیر خود را تغییر داده و به‌طور افقی به سمت زهکش‌ها جریان پیدا می‌کند. در حوالی زهکش‌ها، جریان حالت دایره‌ای به خود گرفته و وارد زهکش می‌شود. لذا الگوی جریان آب شامل سه قسمت جریان عمودی، جریان افقی و جریان شعاعی است (Alizadeh, 2006). دامنه عمل این سه نوع جریان در خاک‌های مختلف و انواع سیستم زهکشی، متفاوت بوده و در اراضی شالیزاری نیز به‌دلیل منحصر به‌فرد بودن لایه‌بندی خاک، شرایط خاصی را دنبال می‌کند.

در اراضی شالیزاری به‌دلیل عمق کم لایه سطحی و کشت و کار در آن، امکان کارگذاری زهکش در لایه کفه شخم میسر نمی‌باشد و باید زهکش را در عمق‌های پایین‌تر نصب کرد. بنابراین کارایی زهکش‌ها در تخلیه زه‌آب دستخوش تغییراتی می‌شود که کفایت یا عدم کفایت آن نیاز به بررسی مستدل دارد. از طرف دیگر، چنانچه نفوذ عمقی آب به وسیله کفه‌های سخت و نفوذناپذیر سد شده باشد لایه‌های آبدار معلق ایجاد می‌شود. این

جاده دریا در شهرستان ساری در استان مازندران طی پاییز و زمستان ۱۳۹۷ انجام شد. عرض و طول جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳۶/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰۴ درجه شرقی بوده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵- متر می‌باشد. طبق آمار هواشناسی ۱۰ ساله، متوسط بارندگی منطقه ۶۴۳ میلی‌متر، تبخیر از تشتک ۱۲۲۲ میلی‌متر و متوسط دمای هوا ۱۷/۶ درجه سانتی‌گراد است. در سال ۱۳۹۷، مجموع بارندگی ۷۵۳ میلی‌متر بود که در مقایسه با میانگین ۱۰ ساله، ۱۱۰ میلی‌متر بیشتر بود. در فصول مرطوب سال ۱۳۹۷، حداکثر بارندگی ماهانه در اسفند با ۱۷۲ میلی‌متر اتفاق افتاد و بیشترین بارندگی روزانه به مقدار ۸۸ میلی‌متر در اسفند ماه مشاهده شد. مجموع بارندگی ماهانه، مجموع تبخیر از تشتک، حداقل، حداکثر و میانگین دمای ماهانه در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان بارندگی طی این مدت در اکثر اوقات بیشتر از تبخیر بوده است.

منطقه مورد مطالعه از اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده می‌باشد که تا قبل از احداث سیستم زهکشی زیرزمینی، از ماندابی در فصول سرد سال رنج می‌برده‌اند. در سال ۱۳۹۰، اقدام به احداث زهکش‌های زیرزمینی شد. هدف اصلی از نصب زهکش‌های زیرزمینی در این اراضی، برطرف کردن شرایط ماندابی برای برقراری کشت دوم و هدف تحقیقاتی، بررسی عملکرد سیستم‌های زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری بود. مشخصات سیستم مورد مطالعه عبارت است از: سیستم زهکشی با عمق ۰/۹۰ متر و فاصله زهکشی ۳۰ متر (شکل ۲). به‌طور کلی، از این سیستم زهکشی سه خط زهکش وجود دارند که طول هر خط زهکش، ۱۰۰ متر و جنس لوله‌ها پی‌وی‌سی موج‌دار ماریچی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند که با شیب ۰/۲ درصد نصب شدند. در جدار هر لوله ۴۰۰ سوراخ به مساحت ۸۰۰ میلی‌متر مربع در هر متر طول برای ورود آب وجود دارد. از شن و ماسه با دانه‌بندی مشخص به‌عنوان پوشش معدنی استفاده شد که به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در اطراف لوله و ۳۰ سانتی‌متر روی لوله ریخته شد. از معیار USBR برای تعیین دانه‌بندی شن و ماسه و ممانعت از شسته شدن ذرات خاک به داخل مواد صافی استفاده شد. جزییات بیشتر در مقاله Jafari-Talukolaee et al. (2013) قابل مشاهده است.

بافت خاک لایه‌های مختلف در جدول (۱) ارائه شده است. بافت خاک مزرعه تا عمق ۱/۵ متری، سیلتی‌رس با مقدار رس بین ۴۲-۵۵ درصد است. در زیر لایه ۱/۵ متری، بافت خاک رسی می‌باشد.

وان شیل‌فگارد و دوزو-هلینگا به‌عنوان معادله‌های غیرماندگار به کار برده شدند. نتایج نشان داد که حداقل و حداکثر فاصله زهکشی به‌دست آمده ۲۶ متر و ۶۳ متر بودند. همچنین متوسط عمق سطح ایستابی از صفر تا ۰/۶۳ متر محاسبه شد (Darzi et al., 2014). بازه زیاد فاصله زهکش‌ها و همچنین عدم دخیل کردن شرایط لایه‌بندی خاک شالیزار توانست همبستگی دقیقی با شرایط مزرعه‌ای داشته باشد. Darzi و Shahnazari (2015) در بررسی روند تغییرات سطح ایستابی با استفاده از معادله‌های ماندگار و غیرماندگار برای سیستم‌های زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری، مشاهده کردند که تغییرات زیادی بین مقادیر واقعی و برآورد شده سطح ایستابی در سیستم‌های زهکشی با فاصله ۳۰ متر و عمق‌های ۰/۹۰ و ۰/۶۵ متر وجود داشت.

قابلیت شالیزار در حفظ آب روی سطح زمین در شرایط کشت برنج و به‌خصوص زمان عملیات گل‌خزایی روی آن، یکی از مهمترین تفاوت‌های اراضی شالیزاری و خشکه‌زاری است. همچنین، در خاک‌های سنگین، بخشی از آب که در منطقه توسعه ریشه‌ها و روی لایه‌های غیرقابل نفوذ تجمع پیدا کرده‌اند از طریق جریان‌های جانبی زیربستری به سمت زهکش‌ها هدایت می‌شوند. نتایج تحقیقات قبلی در اراضی شالیزاری به متفاوت بودن روند تغییرات سطح ایستابی نسبت به زهکش‌ها و خاک‌های مربوط به اراضی غیرشالیزاری منتج شده‌اند. بنابراین یافتن دلیل منطقی برای استدلال نتایج به‌دست آمده نیازمند بررسی نحوه حرکت آب به سمت زهکش‌ها و الگوی جریان است. در مجموع، با وجود نواقص ذکر شده در معادله‌ها و از طرف دیگر به علت طبیعت سنگین بافت خاک اراضی شالیزاری و وجود لایه نیمه نفوذپذیر، میزان کلیه مقاومت‌های عمودی، افقی، شعاعی و ورودی به سمت لوله‌های زهکش افزایش می‌یابد، که این امر باعث افزایش خطاها در برآورد سهم اجزای جریان، بالاخص در نزدیکی لوله‌های زهکش می‌گردد (Hamzeh et al., 2013). لذا تعیین اجزای مختلف شبکه جریان می‌تواند نگرش مناسبی در استفاده از معادله‌های زهکشی در اراضی شالیزاری ارائه دهد و یا به تدوین معادله‌ای جدید برای طراحی سیستم زهکشی در این اراضی منجر شود. طراحی مناسب فاصله و عمق زهکش‌ها باعث افزایش کارایی سیستم زهکشی و به حداقل رساندن هزینه و اثرات منفی زه‌آب‌ها خواهد شد. بنابراین سهم هر یک از اجزای شبکه جریان و مسیر حرکت آب در خاک به سمت زهکش‌ها نیاز به بررسی جداگانه دارد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در مزرعه آزمایشی زهکشی اراضی شالیزاری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری واقع در کیلومتر نه

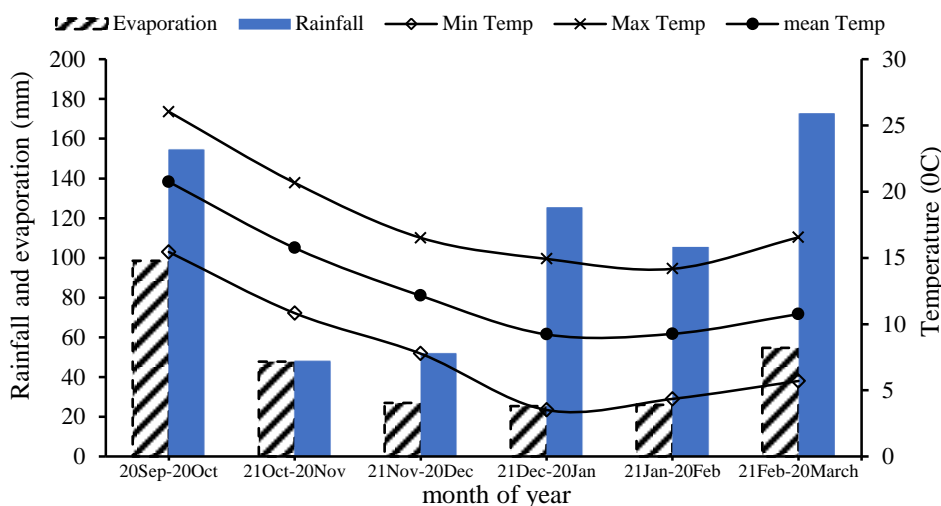


Fig. 1- Total monthly rainfall and evaporation and monthly minimum, maximum and average of temperature in the study area from October to March 2016

شکل ۱- مجموع بارندگی و تبخیر ماهانه و حداقل و میانگین دمای ماهانه در منطقه مورد پژوهش از مهر تا اسفند ۱۳۹۷

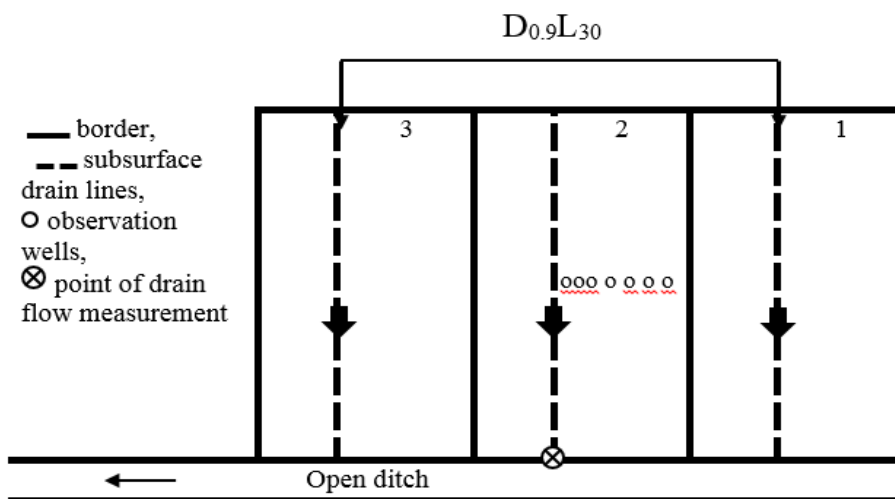


Fig. 2- Layout of the subsurface drainage systems in the study field

شکل ۲- شماتیک سیستم‌های زهکشی نصب شده در مزرعه آزمایشی مورد مطالعه (مرز کرت، - - خطوط لوله زهکش، ° چاهک‌های اندازه‌گیری سطح ایستابی و ⊗ محل اندازه‌گیری دبی زهکش‌ها)

جدول ۱- درصد اجزای تشکیل دهنده بافت خاک

Table 1- Textural class of the soil of the experimental site

Soil depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Soil texture
0-30	49	44	7	Silty clay
30-60	55	42	3	Silty clay
60-90	46	46	8	Silty clay
90-120	42	52	6	Silty clay
120-150	52	42	6	Silty clay
150-200	59	35	6	Clay
200-300	61	34	5	Clay

جدول ۲- داده‌های روزانه بارندگی (میلی‌متر) در طول دوره تحقیق در مزرعه آزمایشی زهکشی

Table 2- Daily rainfall during the study period in the experimental site (mm)

Date	Rainfall	Date	Rainfall	Date	Rainfall	Date	Rainfall
24 Sep	10.6	23 Nov	5.4	28 Dec	22.3	11 Feb	24.8
5 Oct	87.1	25 Nov	4.9	3 Jan	9.3	12 Feb	7.3
6 Oct	21	26 Nov	4.8	9 Jan	6.2	1 March	3.2
12 Oct	26.8	2 Dec	7.5	17 Jan	67.2	8 March	11.1
15 Oct	8.3	6 Dec	3.0	18 Jan	14.3	9 March	3.5
27 Oct	38	7 Dec	3.6	29 Jan	16.8	17 March	88.2
1 Nov	3.1	18 Dec	3.1	2 Feb	3.9	18 March	52.4
6 Nov	2.9	21 Dec	17.8	3 Feb	45.6	20 March	11
18 Nov	3.2	22 Dec	2.9	4 Feb	3.6		

## روش انجام طرح و اندازه‌گیری‌ها

وجود دارد. یکی از پیژومترها در وسط فاصله دو زهکش (۱۵ متری)، دیگری در فاصله ۰/۶ متر نسبت به زهکش (0.7D) برای تشخیص محدوده جریان افقی و شعاعی نصب شد. همچنین پیژومتر مربوط به عمق سطح ایستابی بعد از چند بار اندازه‌گیری سطح ایستابی به وسیله چاهک و مشخص شدن عمق سطح ایستابی دارای تکرار زیاد نصب شد. از آنجایی که در اکثر موارد، بارندگی سنگین باعث پر کردن خاک از آب می‌شود و هدف از تحقیق تعیین اجزای جریان در اطراف زهکش در روزهای اول بعد از بارندگی است لذا پیژومتر اولی در عمق ۲۰ سانتی‌متری نصب شد.

برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی از روش چاهک به ترتیب در حالت‌های سوراخ‌دار در جداره و بدون سوراخ استفاده می‌شود که این چاهک‌ها در عمق‌های ۰/۳، ۰/۵، ۰/۸، ۱/۱ و ۱/۵ متر نصب شدند. اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در حالت‌های اشباع خاک و طی چندین مرحله انجام شدند. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی، ابتدا آب داخل چاهک یا پیژومتر تخلیه شده و سپس به حال خود رها شد تا خیز سطح آب و زمان مربوط به آن یادداشت شود. اندازه‌گیری‌ها، فوراً بعد از تخلیه آغاز شد و تا رسیدن به تعادل ادامه پیدا کرد. برای قرائت تراز سطح آب داخل چاهک‌ها و پیژومترها از متر استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در اواسط فصل کشت کلزا انجام شد. هدایت هیدرولیکی اشباع در چاهک‌ها به روش ارنست روابط (۱) و (۲) تعیین شد.

$$K = \frac{4000 r^2}{(H+20r) \times (2 - \frac{y}{H}) \times y} \times \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{K(H_1+H_2) - K_1 H_1}{H_2} \quad (2)$$

که در آن، K هدایت هیدرولیکی اشباع (متر در روز)، r شعاع چاهک (سانتی‌متر)، H عمق چاهک زیر سطح ایستابی (سانتی‌متر)، y متوسط عمق آب در چاهک در مدت آزمایش (سانتی‌متر)، Δt فاصله زمانی، Δy میزان اختلاف سطح آب در چاهک در مدت آزمایش (سانتی‌متر)، K<sub>1</sub> و K<sub>2</sub> هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به ترتیب در لایه‌های بالایی و پایینی (متر در روز)، H<sub>1</sub> و H<sub>2</sub>

برای بررسی روند تغییرات پروفیل سطح ایستابی در مزرعه مورد تحقیق، چاهک‌های مشاهده‌ای با لوله مشبک به قطر هشت سانتی‌متر، به تعداد هشت چاهک که یکی روی زهکش و بقیه در فواصل ۰/۳، ۰/۶، یک، سه، شش، ۱۰ و ۱۵ متر تا عمق ۰/۹ متر (تراز خط زهکش) در وسط طول زهکش، بعد از برداشت برنج نصب شدند. چاهک روی زهکش برای مشخص کردن گرفتگی لوله زهکش، چاهک ۰/۳ متر برای مشخص کردن گرفتگی در جداره ترانشه زهکش (گرفتگی پوشش) و چاهک ۰/۶ متر برای مشخص کردن محدوده جریان شعاعی و بقیه چاهک‌ها برای مشخص کردن پروفیل سطح ایستابی حفر شدند. بعد از مشخص شدن الگوی جریان به سمت زهکش و شکل منحنی سطح ایستابی، دو چاهک دیگر برای تشخیص دقیق محدوده جریان شعاعی نصب شدند. نصب و تجهیز چاهک‌ها براساس استانداردهای موجود (Iran Water Resources Management CO, 1996) انجام شد. پس از تجهیز چاهک‌ها و امکان قرائت سطح ایستابی، نوسانات سطح ایستابی و دبی آب خروجی از لوله زهکش به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. برای قرائت سطح آب درون چاهک‌ها از متر با دقت یک میلی‌متر؛ و اندازه‌گیری دبی خروجی از زهکش‌ها از روش حجمی با ظرف مدرج با دقت ۱۰ میلی‌لیتر و زمان سنج استفاده شد. اولین اندازه‌گیری، یک روز بعد از بارندگی انجام شد و تا اکت کامل سطح ایستابی ادامه داشت. با توجه به اینکه بارندگی با مقدار کمتر از پنج میلی‌متر، خیز قابل ملاحظه‌ای در سطح ایستابی ایجاد نکرد، در کل، دوره بارندگی مناسب وجود داشت که جمعاً به تعداد ۷۰ روز داده‌برداری انجام شد (جدول ۲). کلیه اندازه‌گیری‌ها مربوط به فصل کشت کلزا می‌باشند که زهکشی به صورت آزاد بوده است.

برای مشخص کردن مسیر جریان و تعیین سهم اجزای آن، پیژومترهایی در عمق زهکش (۰/۹ متر) و در سطح ایستابی نصب شدند. در این پژوهش، پیژومتر از یک لوله فولادی ساده با قطر خارجی چهار سانتی‌متر تشکیل شده که انتهای لوله مسدود می‌باشد. حدود پنج تا ۱۰ سانتی‌متری انتهای لوله در جدار سوراخ‌دار شده است. به طوری که ۱۲ حفره به قطر ۱۰ میلی‌متر

## آنالیز بار جریان

مقادیر دبی، هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف، سطح ایستابی و بار پیژومتری اندازه‌گیری شده برای محاسبه بار عمودی، افقی و شعاعی مورد استفاده قرار گرفت. روند کار به این صورت بود که بار عمودی با فرمول (۵) مقایسه شد.

$$h_v = \frac{q \times D_v}{k} \quad (5)$$

افت انرژی در منطقه جریان افقی با فرمول (۶) مقایسه شد. این معادله که در آن فرض شده است جریان به طرف زهکش به-طور کامل به صورت افقی صورت می‌گیرد به نام معادله دونان معروف است.

$$h_h = \frac{q L h^2}{8 k D_h} \quad (6)$$

افت انرژی در بخش شعاعی جریان ( $h_r$ ) با فرمول (۷) محاسبه شد.

$$h_r = q \times \left( \frac{L}{\pi k} \right) \times \ln \frac{aDr}{u} \quad (7)$$

مقدار هدایت هیدرولیکی همان متوسط هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در مزرعه (متر بر روز) و دبی جریان برابر با دبی خروجی از زهکش (میلی‌متر بر روز) لحاظ شد. مقدار  $D_v$  معادل با سطح ایستابی تا تراز مبنای زهکش (متر) و  $D_h = D + \frac{1}{2}h$  در نظر گرفته شدند. مقدار  $L$  همان فاصله زهکش (متر) و  $L_h$  مساوی اختلاف فاصله زهکش و محدوده جریان شعاعی ( $1.4 \times D$ ) لحاظ شدند. در جریان شعاعی مقدار  $aDr$  پارامتری است که به ابعاد هندسی منطقه جریان و موقعیت لوله زهکش نسبت به لایه نفوذناپذیر بستگی دارد. زمانی که در عمق مشخصی در زیر زهکش، لایه نفوذناپذیر واقع شده است مقدار این پارامتر برابر با  $D$  در نظر گرفته می‌شود. مقدار محیط خیس شده جریان ورودی به لوله ( $u$ )، به دلیل آنکه در این تحقیق لوله در داخل ترانشه و با پوشش معدنی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در هر سمت کار گذاشته شده برابر با محیط خیس شده ترانشه در نظر گرفته شد (جدول ۳). براساس مقادیر متفاوت دبی و سطح ایستابی در روزهای مختلف، مقادیر بار جریان عمودی، شعاعی و افقی متفاوتی برآورد شد. مقادیر محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده بار اجزای مختلف جریان مقایسه شد.

مقدار کل سطح ایستابی برابر است با مجموع افت بار در اثر جریان عمودی ( $h_v$ )، افت بار در اثر جریان افقی ( $h_h$ )، افت بار در اثر جریان شعاعی ( $h_r$ ) و مقدار تلفاتی که در هنگام ورود جریان از سوراخ‌ها و درز و شکاف به داخل لوله صورت می‌گیرد. از آنجایی که مقدار تلفات جریان در هنگام ورود به لوله زهکش ناچیز بوده، صفر در نظر گرفته شد. مقادیر بار جریان عمودی، افقی و شعاعی به ازای مقادیر سطح ایستابی و دبی اندازه‌گیری شده در روزهای مختلف محاسبه شد.

اعماق چاهک به ترتیب در لایه‌های بالایی و پایینی (سانتی‌متر) می‌باشند.

هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی در پیژومترها به روش کرکهام تعیین شد. کرکهام با حل معادله لاپلاس و پذیرفتن فرضیه‌هایی که برای روش چاهک در نظر گرفته شده، معادله (۳) را برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع ارایه کرد (Alizadeh, 2006):

$$K = \frac{864 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right)}{A \Delta t} \quad (3)$$

که در آن:

$D$  = قطر حفره زیر لوله (سانتی‌متر)،  $K$  = هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)،  $y_1$  = فاصله بین سطح آب در پیژومتر تا سطح ایستابی متعادل (سانتی‌متر) در لحظه  $t_1$  (ثانیه)،  $y_2$  = فاصله بین سطح آب در پیژومتر تا سطح ایستابی متعادل (سانتی‌متر) در لحظه  $t_2$  (ثانیه) و  $A$  = ضریب شکل (سانتی‌متر) می‌باشند.

برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در لایه ۳۰-۰ سانتی‌متر از روش چاهک معکوس استفاده شد. با توجه به آنکه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه سطحی خاک به روش پیژومتر به دلیل اشباع نبودن خاک امکان‌پذیر نبود از روش چاهک معکوس برای اندازه‌گیری آن استفاده شد. در این روش با مته نمونه‌برداری خاک (اوگر)، چاهکی به قطر پنج سانتی‌متر در زمین حفر شد به طوری که کاملاً در لایه مورد اندازه‌گیری (۳۰-۰) فرو رفته بود. سپس چاهک تا ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از آب پر شد. افت سطح آب در زمان‌های مختلف یادداشت شد. قرائت سطح آب زمانی انجام شد که آب به اندازه کافی در دیواره چاهک نفوذ کرده و خاک را کاملاً اشباع کرد. برای افزایش دقت اندازه‌گیری، آزمایش در سه نقطه و در هر نقطه، حداقل سه بار تکرار شد. در هر تکرار آزمایش به مدت ۶۰ دقیقه طول کشید. برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع از معادله (۴) استفاده شد (Iran Water Resources Management CO, 2005):

$$k = \frac{1.15 \cdot r \cdot [\log(h_0 + \frac{r}{2}) - \log(h_t + \frac{r}{2})]}{t} \quad (4)$$

که در آن  $h_t$  تراز آب در زمان  $t$  (سانتی‌متر)،  $r$  شعاع چاهک (سانتی‌متر)،  $t$  زمان (ثانیه) و  $h_0$  تراز اولیه سطح آب در زمان صفر (سانتی‌متر) و  $K$  هدایت هیدرولیکی خاک (سانتی‌متر بر ثانیه) می‌باشد. در این روش، جریان بیشتر افقی است.

با استفاده از مقادیر هدایت هیدرولیکی، ضخامت و لایه‌بندی خاک مشخص شد. با اندازه‌گیری افت و خیز ایجاد شده در چاهک‌های مشاهده‌ای و پیژومترهای نصب شده و ارتباط دادن آن‌ها به هم، می‌توان رفتار لایه‌های خاک را در خصوص اشباع شدن و زهکشی شناسایی کرد. با این کار می‌توان سرعت افت سطح ایستابی در لایه‌های مختلف را تعیین کرد.



هدایت هیدرولیکی بین ۰/۱ تا ۰/۴ متر بر روز می‌باشد ( Alizadeh, 2006).

میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی برای کرت دارای سیستم زهکشی  $D_{0.9}L_{30}$ ، ۰/۳۰ متر بر روز به دست آمد. همچنین میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی بالای زهکش (سطح زمین تا عمق ۰/۹ متر) برابر ۰/۲۳ متر بر روز و مقدار میانگین هدایت هیدرولیکی بین عمق زهکش (۰/۹ متر) تا لایه نفوذناپذیر (دو متر) برابر ۰/۱۵ متر بر روز بدست آمد. به طور کلی، میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی افقی در شرایط مختلف بیشتر از میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی عمودی بود.

مطالعه‌های لایه‌بندی خاک مزرعه مورد مطالعه در جدول (۴) نشان داد که بافت خاک در لایه سطحی مزرعه آزمایشی سبک‌تر از لایه‌های عمیق‌تر است. همچنین در لایه ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر نیز یک لایه با هدایت هیدرولیکی کمتر نسبت به لایه سطحی مشاهده شد که همان لایه کفه سخت می‌باشد. در تحقیقی در اراضی شالیزاری ویتنام، یک لایه با هدایت هیدرولیکی کمتر از ۰/۰۹ متر بر روز در زیر لایه سطحی نفوذپذیر و در عمق ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متری مشاهده شد (Nguyen, 2007). در تحقیقی در خصوص هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر در اراضی شالیزاری Aimrun et al. (2004) بیان کردند که لایه سطحی به دلیل فعالیت ریشه‌های گیاهان و خشک و مرطوب شدن، دارای نفوذپذیری بالایی می‌باشد. لایه دوم به دلیل تجمع رس و فعالیت‌های انسانی، فشرده می‌شود که در اصطلاح کفه سخت نامیده شده و هدایت هیدرولیکی کمی دارد. لایه زیرین نیز که کمتر دستخوش تغییرات می‌شود هدایت هیدرولیکی تقریباً بالایی دارد.

### پروفیل سطح ایستابی

در شکل (۳) نوسانات سطح ایستابی در وسط فاصله بین دو زهکش با فاصله ۳۰ متر و عمق ۰/۹ متر نشان داده شد. با هر بارندگی، سطح ایستابی بالا آمده و بعد از توقف آن، افت سطح ایستابی شروع شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، بارندگی‌های با بیشتر از پنج میلی‌متر باعث خیز سطح ایستابی شده‌اند در سیستم زهکشی نصب شده در این مزرعه آزمایشی، به‌طور متوسط، حداقل عمق سطح ایستابی در چهارمین روز پس از توقف بارندگی، با ۱۲ سانتی‌متر افت، از عمق هشت سانتی‌متری به عمقی معادل ۲۰ سانتی‌متر رسید. رفتار سطح ایستابی بعد از بارندگی‌ها روند نزولی داشته است. در ۱۳ آذر، به دلیل آنکه چند روز پی در پی با بارندگی کم در اراضی بارید، امکان دارد که تاخیر در نفوذ آب باعث تأخیر در خیز سطح ایستابی شده باشد. بارندگی‌های ۲۷ دی و ۱۴ مهر به دلیل شدت زیاد موجب خیز سطح ایستابی و همچنین آبگرفتگی مزرعه شدند.

با محاسبه مقادیر اجزای جریان، مجموع آن‌ها با مقدار سطح ایستابی واقعی مطابقت داده شد. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده با استفاده از شاخص‌های آماری (آزمون  $t$  جفت شده) بررسی و مقایسه شد. شاخص‌های آماری  $RMSE$  (میانگین مربعات خطا)،  $R^2$  (ضریب همبستگی) و  $I_a$  (شاخص توافق) بودند. برای ارزیابی همبستگی بین پیش‌بینی‌ها و داده‌های مشاهداتی و برای ارزیابی این که آیا مدل خوب کار کرده است یا نه، از سه شاخص عملکرد استفاده شده است که عبارتند از میانگین جذر مربعات خطا، شاخص توافق و شاخص تبیین.

مقدار میانگین جذر مربعات خطا ( $RMSE$ ) که دقت پیش‌بینی و انحراف شبیه‌سازی از واقعی را اندازه‌گیری می‌کند حتی‌الامکان باید کوچک باشد (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

شاخص توافق ( $I_a$ ) که درجه دقت شبیه‌سازی را نسبت به داده‌های مزرعه‌ای بررسی می‌کند مقادیر بین صفر تا یک را اختیار می‌کند و هرچه به یک نزدیکتر باشد توافق مناسب‌تری از پیش‌بینی را ارائه می‌کند. این شاخص به صورت معادله (۹) می‌باشد.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

که  $O_i$  مقادیر مشاهده شده در زمان  $i$  و  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده در همان زمان می‌باشد.  $\bar{O}$  میانگین مشاهدات در طول یک دوره و  $\bar{P}$  میانگین پیش‌بینی شده‌ها در همان دوره و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد. همچنین، شاخص تبیین ( $R^2$ ) نیز از رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بدست آمد (Jing et al., 2010).

### نتایج و بحث

مقادیر هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف خاک در جدول (۴) ارائه شد. خاک مزرعه تا عمق دو متر از شش لایه با مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی تشکیل شده است که در عمق دو تا سه متری یک لایه نفوذناپذیر مشاهده شد. هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف از ۰/۰۲ تا ۰/۵ متر بر روز متغیر بودند. هدایت هیدرولیکی خاک‌های با بافت لومرسی و رس با ساختمان ضعیف تا رس دارای ساختمان مناسب بین ۰/۰۰۲ تا ۲ متر بر روز گزارش شده است (Smedema and Rycroft, 1983). همچنین برای خاک‌های تقریباً ریز بافت،

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مختلف استفاده شده در محاسبه اجزای جریان

Table 3- Field parameters of the drainage site at SANRU

Parameter	Amount	Unit
Hydraulic conductivity (k)	0.23	m day <sup>-1</sup>
Impervious layer depth to drain level (D)	1.1	M
Drain spacing (L)	30	M
Horizontal flow criteria (L <sub>h</sub> )	28.46	M
Radial flow criteria (aD <sub>r</sub> )	1.1	M
Wet perimeter (u)	0.45	M
Drain depth (d)	0.9	M

جدول ۴- هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های مختلف در مزرعه آزمایشی مورد مطالعه

Table 4- saturated hydraulic conductivity (k<sub>s</sub>) of the soil in the experimental site

Soil depth (cm)	Hydraulic conductivity (m day <sup>-1</sup> )	
	Horizontal	Vertical
0-30	0.30	0.40
30-60	0.11	0.07
60-90	0.29	0.08
90-120	0.16	0.50
120-150	0.12	0.40
150-200	0.08	0.13
200-300	0.02	0.04
Hydraulic conductivity average to impervious layer	0.17	0.14
Hydraulic conductivity average to drain level	0.23	0.10
Hydraulic conductivity average from drain level to impervious layer	0.15	0.38

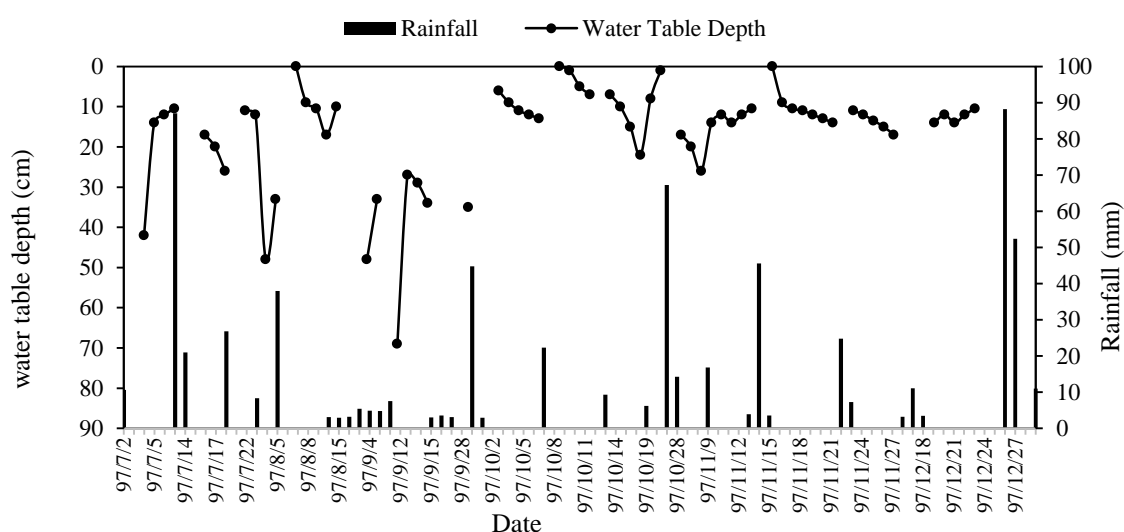


Fig. 3- Water table fluctuation of mid-spacing after each rainfall in drainage system

شکل ۳- نوسانات سطح ایستابی در وسط فاصله بین دو زهکش و بارندگی روزانه طی مدت مطالعه

سطح ایستابی اتفاق افتاده است. در خاک‌های سنگین به دلیل حرکت کند و افقی آب به سمت زهکش‌ها، سطح ایستابی به صورت افقی شکل می‌گیرد. همچنین چند لایه‌ای بودن خاک، باعث تغییر الگوی مسیر خطوط جریان به سمت زهکش‌ها می‌گردد، که جریان افقی بیشتر تحت تأثیر لایه‌های دارای هدایت هیدرولیکی زیاد و جریان عمودی تحت تأثیر لایه‌های با هدایت هیدرولیکی کم قرار می‌گیرند ( Oosterbaan and Nijaland, )

در شکل (۴) منحنی عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در فاصله‌های مختلف از زهکش، برای چهار روز متوالی بعد از یک بارندگی ۴۵ میلی‌متری نشان داده شد. در این سیستم زهکشی، افت سطح ایستابی در فاصله کمی از زهکش‌ها اتفاق افتاده و در فاصله‌های دورتر، سطح ایستابی به صورت افقی بوده است. به طوری که در فاصله یک متری، نزدیک به ۹۰ درصد از سطح ایستابی افت کرده، اما در فاصله سه متری تنها ۳۰ درصد از افت

بالتر از عمق دو متر کمتر از عمق‌های پایین‌تر از دو متر بوده است که نشان می‌دهد که به دلیل بار هیدرولیکی حرکت آب به لایه‌های پایین‌تر در جریان است.

برای مشاهده بار عمودی کافی است تا دو پیزومتر، یکی در سطح ایستابی و دیگری در عمق زهکش‌ها نصب شود. وقتی که اختلاف بار پیزومتریک دو لایه بالایی و پایینی مثبت باشد یعنی زهکشی در حال انجام است و جریان عمودی رو به پایین برقرار است (Ahmadi, 1999). در شکل (۶) عمق آب در پیزومترهای نصب شده در اعماق مختلف برای روز اول بعد از بارندگی در مزرعه مورد مطالعه نشان داده شد. اختلاف بین پیزومترها در لایه بالایی و لایه هم‌تراز زهکش‌ها قابل ملاحظه است و ارتفاع آب در پیزومتر واقع در عمق ۰/۴ متر زیاد می‌باشد. این را می‌توان ناشی از مقاومت در مقابل جریان عمودی دانست که باعث تأخیر در افت سطح ایستابی می‌شود. اما مقدار عمق آب در پیزومترها در لایه زهکش و لایه‌های زیر آن، نشان از روند طبیعی جریان آب دارد. اختلاف بین عمق آب پیزومتر واقع در عمق ۰/۲ متر و عمق ۰/۹ متر (تراز زهکش‌ها) زیاد می‌باشد که براساس فرمول‌ها و قواعد بیانگر بار عمودی جریان خواهد بود. اما در عمل، با بررسی پیزومتر واقع در عمق ۰/۴ متر و همچنین عمق ۰/۶۵ متر می‌توان دریافت که بخشی از جریان در بالای لایه ۰/۴ متر دارای بار پیزومتری بیشتری از لایه‌های زیرین است که به دلیل وجود لایه کفه سخت و عدم نفوذ سریع آب به لایه‌های پایین‌تر می‌باشد. همچنین عمق آب در پیزومتر ۳۰۰ سانتی‌متر به دلیل فشار بالاتر آب در زیر لایه نفوذناپذیر، بالاتر از پیزومتر با عمق ۲۰۰ سانتی‌متر قرار گرفته است.

1994). در اراضی شالیزاری، لایه کفه سخت مانع نفوذ عمودی آب می‌شود و به دلیل افزایش مقاومت خاک در برابر مسیر جریان آب، وضعیت خطوط جریان از حالت شعاعی خارج شده و به صورت افقی می‌باشد (Singh et al., 1999). پروفیل‌های مشابه از سطح ایستابی در تحقیقات دیگر برای زهکش‌های با فاصله ۱۵ و ۷/۵ متر (Skaggs et al 1973) و همچنین برای زهکش‌های زیرزمینی در خاک‌های رسی با لایه‌بندی زیاد مشاهده شد (Grismer and Tod, 1991).

نقطه حداقل عمق سطح ایستابی در زمان‌های اولیه، سریعاً افت نمی‌کند، بلکه دارای یک زمان تأخیر می‌باشد. علت اصلی این تأخیر می‌تواند بافت سنگین خاک مزرعه و هدایت هیدرولیکی پایین آن باشد. شرایط خاص اراضی شالیزاری از لحاظ بافت خاک و وجود لایه کفه ضخیم در لایه‌های بالایی خاک (زیر لایه سطحی و در عمق زیر ۳۰ سانتی‌متری تأثیر زیادی در روند افت سطح ایستابی در این مزارع دارد. (Ebrahimian and Noory, 2015)، چون، لایه کفه سخت در اراضی شالیزاری از میزان نشست عمودی آب می‌کاهد (Liang et al., 2007). با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده، رقوم سطح آب در محل زهکش و در چاهک نصب شده در جداره زهکش (فاصله ۰/۳ متری) هم‌تراز موقعیت زهکش است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت یا گرفتگی در مقابل ورود آب به داخل زهکش و یا درون زهکش‌ها وجود نداشت.

#### الگوی جریان به سمت زهکش

شکل (۵)، میانگین عمق آب در پیزومترهای واقع در عمق‌های مختلف نصب شده در وسط فاصله بین دو زهکش در مزرعه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. عمق آب در پیزومترهای

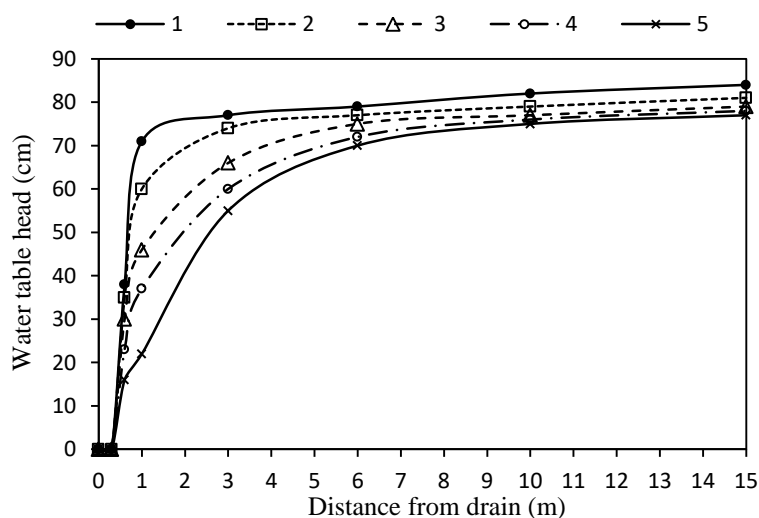


Fig. 4- Water table profile for days after rainfall in drainage system

شکل ۴- منحنی سطح ایستابی در روزهای مختلف بعد از بارندگی

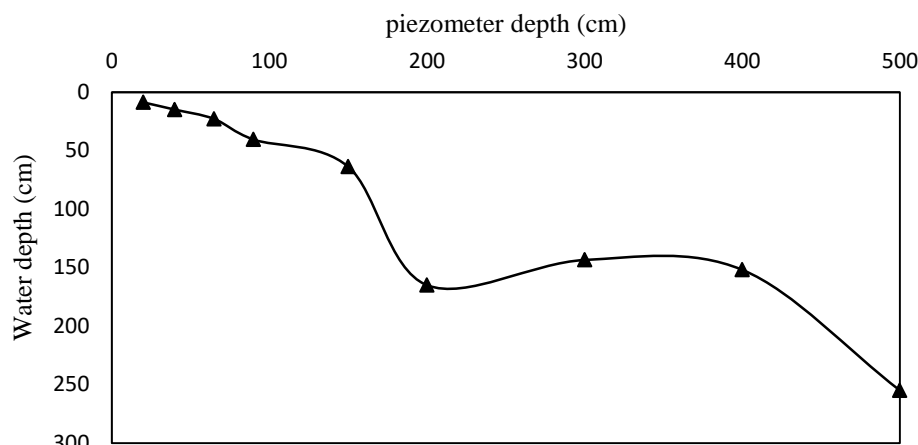


Fig. 5- Water table depth from piezometer observations in different depths  
شکل ۵- میانگین عمق آب در پیزومترهای واقع در عمق‌های مختلف

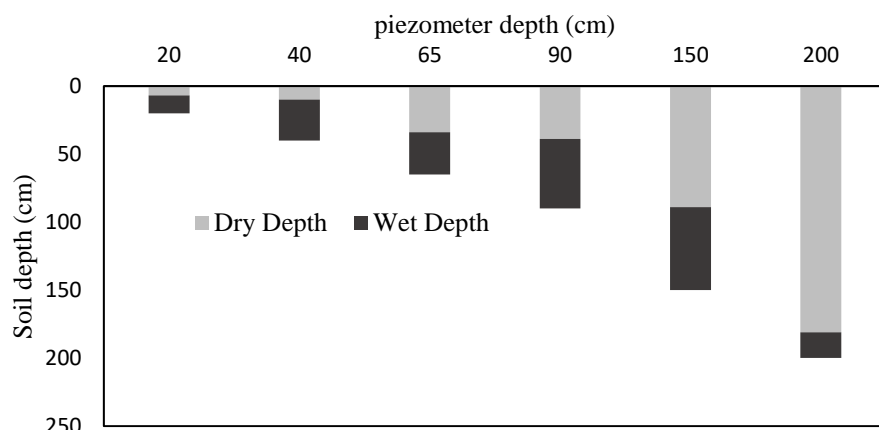


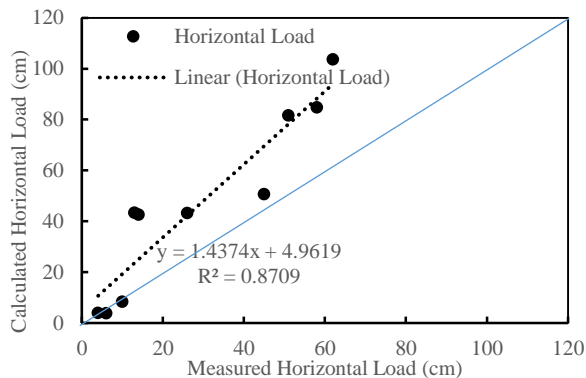
Fig. 6- Water depth from piezometer observations in different depths  
شکل ۶- عمق سطح ایستایی در پیزومترهای نصب شده در عمق‌های مختلف

$I_a$  به ترتیب ۱۹/۳ و ۰/۷۵ به دست آمدند. از طرف دیگر،  $h_v$  تنها زمانی قابل توجه خواهد بود که قابلیت نفوذ خاک بسیار کم باشد مانند وضعیتی که در خاک‌های رسی حاکم است (Alizadeh, 2006).

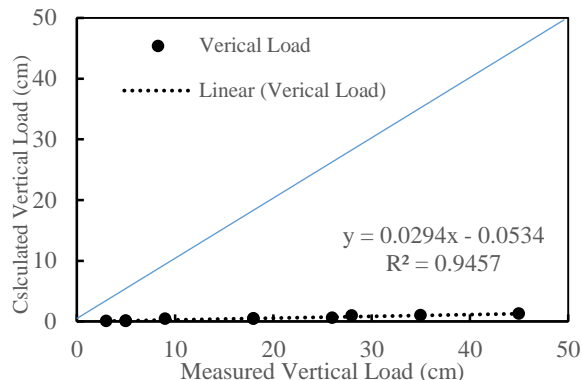
با توجه به ضریب همبستگی و معادله خط آن، بین مقادیر اندازه‌گیری شده از پیزومترها و بار افقی محاسبه شده همبستگی مناسب و مثبتی وجود دارد. مقادیر محاسبه شده بار افقی و اندازه‌گیری شده آن تا حدودی نزدیک به هم بوده و نشان از سهم زیاد جریان افقی در خاک‌های اراضی شالیزاری می‌دهد. رابطه رگرسیونی بین مقادیر بار شعاعی و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز همین روند را نشان می‌دهد هرچند اختلاف بین این دو مقدار در جریان شعاعی بیشتر از جریان افقی بوده است. اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده مؤلفه شعاعی جریان می‌تواند ناشی از کم در نظر گرفتن محدوده جریان شعاعی (0.7D) باشد. در تحقیقی، منطقه جریان شعاعی با استفاده از بیلان جرمی تعیین شد و بیشتر از مقدار فرض شده توسط هوخهات بدست آمد (Mishra and Singh, 2007).

#### سهم جریان افقی، عمودی و شعاعی

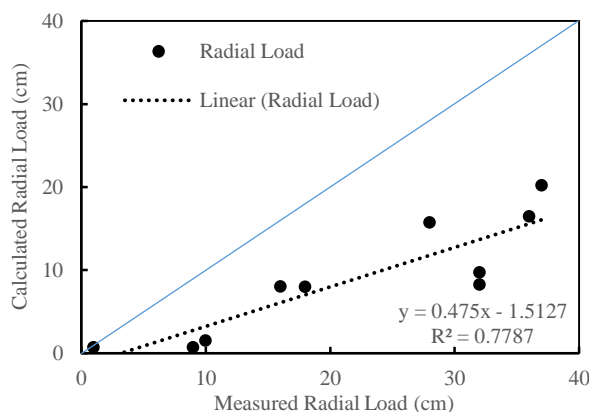
در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) رابطه همبستگی بین مقادیر محاسبه شده اجزای جریان و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط پیزومترها نشان داده شد. در بحث جریان عمودی، هر چند همبستگی بین مقادیر بالا می‌باشد اما شیب خط همبستگی و همچنین مقادیر محورها نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده از پیزومترها تفاوت زیادی با مقادیر بار عمودی محاسبه شده دارد. اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده و پایین بودن مقدار بار عمودی محاسبه شده به دلیل کم بودن دبی خروجی از زهکش‌ها می‌باشد و زیاد بودن مقدار اندازه‌گیری شده یا همان اختلاف بین پیزومتر لایه سطحی و تراز مبنای زهکش به وجود لایه کفه سخت و نفوذ کند آب به لایه پایین‌تر برمی‌گردد. Jafari Talukolaee et al. (2017) در پیش‌بینی منحنی سطح ایستایی بین دو زهکش زیرزمینی دو عمقی با استفاده از معادله‌های تحلیلی گزارش کردند که به دلیل وجود مقاومت در مقابل جریان عمودی بر اثر لایه‌بندی اراضی شالیزاری، نتایج مزرعه‌ای با نتایج حل تحلیلی همخوانی مناسبی نداشت و مقادیر RMSE و



**Fig. 8 - Relationship between the horizontal component of the flow and the measured value**  
شکل ۸- رابطه بین جز افقی جریان و مقدار اندازه‌گیری شده



**Fig. 7 - Relationship between the vertical component of the flow and the measured value**  
شکل ۷- رابطه بین جز عمودی جریان و مقدار اندازه‌گیری شده



**Fig. 9 - Relationship between the radial component of the flow and the measured value**  
شکل ۹- رابطه بین جز شعاعی جریان و مقدار اندازه‌گیری شده

خاک روند خاصی را دنبال می‌کند و سطح ایستابی با رسیدن به این لایه‌ها، سرعت افت متفاوتی خواهد داشت. اراضی شالیزاری دارای لایه‌بندی خاصی از خاک می‌باشند که در زیر لایه سطحی با نفوذپذیری مناسب، یک لایه کفه سخت (هاردپین) وجود دارد که نیمه‌نفوذپذیر است و در زیر آن دوباره لایه‌ای با نفوذپذیری تقریباً مناسب قرار دارد. به‌طور کلی، لایه کفه شخم، الگوی جریان و مسیر آن را در اراضی شالیزاری کنترل می‌کند (Garg et al., 2009).

مقادیر شاخص‌های آماری برای مقایسه بار کل جریان و سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده بار جریان اختلاف زیادی داشته است و مقادیر  $I_a$  و  $R^2$  به حد مناسب خود یعنی یک نزدیک نبوده‌اند. مقادیر شاخص توافق نشان می‌دهد که روند تغییر هر دو مقدار در یک سو بوده و با افت سطح ایستابی، بار محاسبه شده کل جریان نیز کم شده است.

در شکل (۱۰) مقادیر بار کل جریان و سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بین مقادیر دو پارامتر اختلاف قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. در زمان‌هایی که سطح ایستابی در ارتفاع بیشتری قرار داشت (یعنی به سطح زمین نزدیکتر بود) مقدار بار کل بیشتر برآورد شد و برعکس هرگاه سطح ایستابی در عمق بیشتری قرار داشت بار کل جریان کم برآورد شد. در تحقیقی بیان شد که الگوی جریان با افت سطح ایستابی تغییر می‌کند (Kacimov, 2000). این شرایط به دلیل دبی خروجی از زهکش‌ها می‌باشد چون در زمانی که سطح ایستابی در نزدیکی زمین است بخش عمده‌ای از آب با حرکت افقی از روی لایه کفه سخت به ترانشه زهکش و لوله‌های زهکشی رسیده و دبی بالایی دارد. اما با افت سطح ایستابی دبی از لایه کفه سخت و یا از زیر آن عمدتاً با حرکت شعاعی وارد زهکش می‌شود که دبی کمتری از زهکش خارج می‌شود. به‌طور کلی، در اراضی شالیزاری، لایه‌بندی

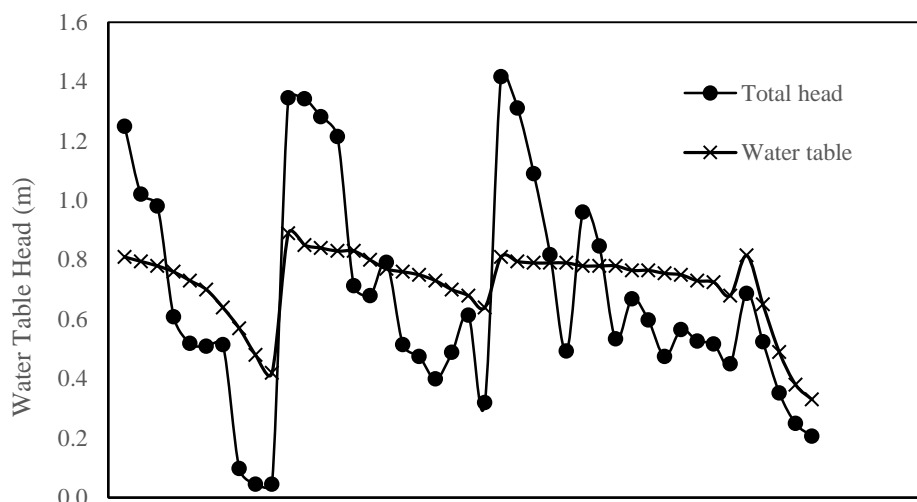


Fig. 10- Measured load values of total flow and water table  
شکل ۱۰- مقادیر بار کل جریان و سطح ایستایی اندازه‌گیری شده

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری مقایسه بار کل جریان و سطح ایستایی اندازه‌گیری شده

Table 5- The Values of RMSE,  $R^2$  and  $I_a$  between the total flow load and water level measured

Statistical Index	amount
RMSE	0.283
$I_a$	0.17
$R^2$	0.75

جدول ۶- درصد سهم اجزای جریان از کل بار جریان

Table 6- Percentage share of flow components in total flow load

Flow component	Min	Ave	Max
Vertical flow	0.35	0.87	1.12
Horizontal flow	82.40	83.38	85.62
Radial flow	14.02	15.75	16.48

نظر از سه لایه با ضرایب آبگذری مختلف تشکیل شده است، این مسأله باعث تغییر الگوی مسیر خطوط جریان به سمت زهکش‌ها می‌گردد. مخصوصاً لایه محدود کننده مانع نفوذ عمودی آب می‌گردد و به دلیل افزایش مقاومت خاک در برابر مسیر جریان آب، باعث می‌شود وضعیت خطوط جریان از حالت شعاعی خارج شده و به صورت افقی باشد.

براساس نتایج جدول (۶)، به نظر می‌رسد می‌توان از مؤلفه عمودی جریان صرف‌نظر کرد. اما نتایج شکل (۱۰) بیان می‌کند که مقاومتی در مقابل بار عمودی جریان وجود دارد و مقادیر اندازه‌گیری شده مؤلفه عمودی جریان بیشتر از مقدار محاسبه شده است. لذا برای دقت بیشتر در طراحی سیستم زهکشی و برآورد فاصله زهکش‌ها، لحاظ کردن مقاومت در مقابل جریان عمودی می‌تواند مثمر ثمر باشد.

### نتیجه‌گیری

با هدف ارزیابی سطح ایستایی بین یک سیستم زهکشی در اراضی شالیزاری، تحقیقی در سال ۱۳۹۷ در مزرعه آزمایشی

در جدول (۶) درصد سهم اجزای جریان ارایه شده است. براساس نتایج سهم جریان افقی از دو جز دیگر به‌طور قابل ملاحظه بیشتر بوده است. (Pali et al (2014) بیان کرد که اگر فاصله زهکش در مقایسه با عمق زهکش تا لایه نفوذناپذیر و سطح ایستایی بزرگ باشد ( $L=10-20 D$  و  $L=50-100 h$ ) جریان عمدتاً افقی خواهد بود. در این تحقیق، فاصله بین دو زهکش ( $L$ ) حدود ۲۷ برابر فاصله بین عمق زهکش تا عمق لایه نفوذناپذیر ( $D$ ) و حدود ۳۵ تا ۱۰۰ برابر سطح ایستایی ( $h$ ) بود. لذا براساس بزرگ بودن فاصله بین زهکش‌ها، جریان عمدتاً افقی است.

سهم جریان عمودی ناچیز بوده و در اکثر موارد، کمتر از یک درصد شده است. جریان شعاعی که سهم بیشتری نسبت به جریان عمودی داشته تاثیر نسبتاً قابل ملاحظه‌ای در حدود ۱۱ درصد داشت. Hamzeh et al. (2013) در بررسی پروفیل سطح ایستایی بین دو زهکش دو عمقی در اراضی دارای خاک‌های لایه‌ای، اختلاف زیاد بین نتایج حل تحلیلی و اندازه‌گیری مزرعه‌ای را اینگونه تفسیر کردند؛ از آنجایی که خاک مزرعه آزمایشی مورد

سطح ایستابی دبی از لایه کفه سخت و یا از زیر آن عمدتاً با حرکت شعاعی وارد زهکش می‌شود که دبی کمتری از زهکش خارج می‌شود. درصد سهم اجزای جریان نشان داد که سهم جریان افقی از دو جز دیگر به طور قابل ملاحظه بیشتر بوده است. سهم جریان عمودی ناچیز بوده و در اکثر موارد، کمتر از یک درصد شده است. جریان شعاعی که سهم بیشتری نسبت به جریان عمودی داشته تاثیر نسبتاً قابل ملاحظه‌ای در حدود ۱۱ درصد داشت. به دلیل وجود لایه‌های متفاوت در خاک و لایه‌ای با هدایت هیدرولیکی کم در زیر لایه سطحی، مقادیر اندازه‌گیری شده اجزای جریان با مقادیر محاسبه شده آن تفاوت زیادی داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شرایط جریان در اراضی شالیزاری از روند خاصی پیروی کرده و نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر در زمان طراحی دارد.

### تقدیر و تشکر

پروژه مطالعاتی «تعیین سهم اجزای شبکه جریان در اطراف زهکش زیرزمینی در اراضی شالیزاری» پیرو قرارداد شماره ۵۸۹ مورخ ۹۷/۴/۱۳ مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی اجرا شده است. لذا نویسندگان این مقاله کمال تشکر و قدردانی را از مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی برای حمایت‌های مالی و معنوی دارند.

زهکشی اراضی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. مقادیر سطح ایستابی، دبی روزانه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شد. اجزای جریان به سمت زهکش با استفاده از پیزومترهای نصب شده در نقاط مختلف با فاصله مشخص از زهکش اندازه‌گیری و محاسبه شد. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که بافت خاک در لایه سطحی مزرعه آزمایشی سبک‌تر از لایه‌های عمیق‌تر است. همچنین در لایه ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری نیز یک لایه با هدایت هیدرولیکی کمتر نسبت به لایه سطحی مشاهده شد. نتایج نشان داد که در این سیستم زهکشی، افت سطح ایستابی در فاصله کمی از زهکش‌ها اتفاق افتاده و تغییرات سطح ایستابی در فاصله دورتر از زهکش، کم می‌باشد. در اراضی شالیزاری، لایه کفه سخت مانع نفوذ عمودی آب می‌شود و به دلیل افزایش مقاومت خاک در برابر مسیر جریان آب، وضعیت خطوط جریان از حالت شعاعی خارج شده و به صورت افقی می‌باشد.

نتایج محاسبه اجزای جریان نشان داد، در زمان‌هایی که سطح ایستابی در ارتفاع بیشتری قرار داشت (یعنی به سطح زمین نزدیکتر بود) مقدار بار کل جریان بیشتر برآورد شد و برعکس هرگاه سطح ایستابی در عمق بیشتری قرار داشت بار کل جریان کم برآورد شد. این شرایط به دلیل دبی خروجی از زهکش‌ها می‌باشد که در زمانی که سطح ایستابی در نزدیکی زمین است بخش عمده‌ای از آب با حرکت افقی از روی لایه کفه سخت به ترانشه زهکش و لوله‌های زهکشی رسیده و دبی بالایی دارد. اما با افت

### References

- 1- Ahmadi, M.Z. 1991. Field estimation of the spacing of parallel drainage ditches. *Agricultural Water Management*. 20, pp. 203-207. Doi: 10.1016/0378-3774(91)90017-D.
- 2- Ahmadi, M.Z. 1999. Use of piezometers to find the depth to impermeable layer in the design of drainage systems. *Hydrological Sciences Journal*. 44(1), pp. 25-31. Doi: 10.1080/02626669909492200.
- 3- Aimrun, M., Amin, M.S.M. and Eltaib, S.M. 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*. 121, pp. 197-203. Doi: 10.1016/j.geoderma.2003.11.010.
- 4- Alizadeh, A. 2006. New drainage (planning, design and management of drainage systems)/ by L. Smedema and W. Voltman, and D. Rycroft. Translated in Persian. *Imam Reza Publication. Publication 2. 496 p.*
- 5- Behbahani, S.M.R. and Rahimi khob, A. 2002. Simulation of two-dimensional transient flow to drainage ditches. *Journal of Agriculture Sciences and Natural Resources*. 9(1), pp. 161-167. (In Persian)
- 6- Bouarfa, S. and Zimmer, D. 2000. Water table shapes and drain flow rates in shallow drainage systems. *Journal of Hydrology*. 235, pp. 264-275. Doi: 10.1016/S0022-1694(00)00280-8.
- 7- Chan, C.S. and Cheong, A.W. 2001. Subsurface drainage effect on soil and rice crop. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*. 29(2), pp. 177-187.
- 8- Dagan, G. 1965. Steady drainage of two layered soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Div. ASCE 91, pp. 51-64. Doi: 10.1061/JRCEA4.0000372.

- 9- Darzi, A., Ejlali, F., Ahmadi, M.Z. and Najafi, Gh. 2007. The suitability of controlled drainage and sub irrigation in paddy fields. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 10(3), pp. 492–497. Doi: 10.3923/pjbs.2007.492.497.
- 10- Darzi-Naftchali, A., Mirlatifi, S.M., Shahnazari, A., Ejlali, F. and Mahdian, M.H. 2013. Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields. *Agricultural Water Management*. 130, pp. 61-68. Doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.017.
- 11- Darzi-Naftchally, A., Mirlatifi, S.M. and Asgari, A. 2014. Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields: a case study in Northern Iran. *Paddy Water Environment*. 12, pp. 103–111.
- 12- Darzi-Naftchali, A., Shahnazari, A. 2015. Assessment of Unsteady- State Drainage Equations to Determine the Spacing of Subsurface Drains in Paddy Fields. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 3(9), pp. 419-429. (In Persian)
- 13- Dieleman, P.J. 1974. Deriving soil hydrological constants from field drainage tests. In: *Drainage Principle and Application*, vol. III, Survey and Investigations, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Wageningen, the Netherlands pp. 329-350.
- 14- Donnan, W.W. 1946. Model tests of a tile-spacing formula. *Proc, Soil Science Society of America*, 11, pp. 131-136.
- 15- Dumm, L. 1954. Drain spacing formula. *Agricultural Engineering*. 35, pp. 726-730.
- 16- Ebrahimian, H. and Noory, H. 2015. Modeling paddy field subsurface drainage using HYDRUS-2D. *Journal of Paddy and Water Environment*. 13(4), pp. 477-485.
- 17- FAO. 2014. FAO Statistical Year Book. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, 195 pp.
- 18- Garg, K.K., Das, B.S., Safeeq, M. and Bhadoria, P.B.S. 2009. Measurement and modeling of soil water regime in a lowland paddy field showing preferential transport. *Agricultural Water Management*. 96, pp. 1705–1714. Doi: 10.1016/j.agwat.2009.06.018.
- 19- Grismer, M.E. and Tod, I.C. 1991. Drainage of clay overlaying artesian aquifer. I: Hydrologic assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division*, American Society of Civil Engineers. 117 (2), pp. 255-270. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:2(255).
- 20- Hamzeh, S., Naseri, A.A., Kashkuli. H.A. 2013. Variations of Water Table Profile and Outflow of Bi-level Drains in a Layered Soil. *Journal of Water and Soil*. 27(1), pp. 1-13. Doi: 10.22067/JSW.V0I0.22195. (In Persian)
- 21- Iran Water Resources Management CO. 1996. Manual of Casing and Establishment of Observation Wells. Publication No. 154. 29 p. (In Persian)
- 22- Iran Water Resources Management CO. 2005. Soil Hydraulic Conductivity Test Manual. Publication No. 322. 127 p. (In Persian)
- 23- Jafari Talukolae, M., A. Shahnazari, M.Kh. Ziatabar-Ahmadi. 2013. An Investigation of the Effect of Two Drainage Envelope Types on Subsurface Drainage Flow Rates in Paddy Fields of Mazandaran Province. *Journal of Water and Soil*. 27(1), pp. 123-130. (In Persian)
- 24- Jafari Talukolae M., A. Shahnazari, M.Z. Ahmadi, D. Kalantari. 2017. Prediction of water table dynamics between bi-level subsurface drains in paddy fields. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 6(10), pp. 837-848. (In Persian)



- 25- Jihad-Agriculture Ministry. 2019. Iran's Agriculture Statistical Year Book. 1<sup>st</sup> part, agronomy statistics. 95 pp. (In Persian)
- 26- Jing, Q., van Keulen, H. and Hengsdijk, H. 2010. Modeling biomass, nitrogen and water dynamics in rice-wheat rotations. *Agricultural Systems*. 103, pp. 433-443. Doi: 10.1016/j.agsy.2010.04.001.
- 27- Kacimov, A.R. 2000. Comment on the paper "An analytical solution for design of bi-level drainage systems" by A.K. Verma, S.K. Gupta, K.K. Singh, and H.S. Chauhan. *Agricultural Water Management*. 46, pp. 193-200.
- 28- Kraijenhoff Van De Leur, D.A. 1958. A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir coefficient. *De Ingenieur*, 40, pp. 87-94.
- 29- Kumar, R., Bhakar, S.R., Singh, P.K. 2013. Evaluation of hydraulics characteristics and management strategies of subsurface drainage system in Indira Gandhi Canal Command. *Agriculture Engineering International: CIGR Journal*. 15(2), pp. 1-9.
- 30- Liang, X.Q., Chen, Y.X., Li, H., Tian, G.M., Ni, W.Z., He, M.M. and Zhang, Z.J. 2007. Modeling transport and fate of nitrogen from urea applied to a near-trench paddy field. *Environmental Pollution Journal*. 150, pp. 313-320. Doi: 10.1016/j.envpol.2007.02.003.
- 31- Matsushima, S. 1970. Crop Science in Rice: Theory of yield determination and its application. Tokyo: Fuji Publishing Co. Ltd.
- 32- Mishra, G.C. and Singh, V. 2007. A new drain spacing formula. *Journal of Hydrological Science*. 52, pp. 338-351. Doi: 10.1623/hysj.52.2.338.
- 33- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models-Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10, pp. 282-290. Doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- 34- Nguyen, D.B. 2007. Irrigation of Paddy Fields in Mekong Delta. Materials, reports and documents of Department of Water Resources, Hanoi Agriculture University, Hanoi, Vietnam.
- 35- Ogino, Y. and Murashima, K. 1992. Planning and design of subsurface drainage for paddies in Japan. Paper presented at 5<sup>th</sup> International Drainage workshop. Feb. 8-15, Lahore, Pakistan. Organizer: ICID.
- 36- Okamoto, M. 1997. Drainage in Japan. Country report in the 7<sup>th</sup> Int. Drainage Workshop. Drainage for the 21<sup>st</sup> Century. 17-21 Nov. Pulau Pinang, Malaysia. Organizer: MANCID.
- 37- Oosterbaan, R.J. and Nijland, H.J. 1994. Determining the Saturated Hydraulic Conductivity. Chapter 12 in: H.P.Ritzema (Ed.), *Drainage Principles and Applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 16, second revised edition, 1994, Wageningen, The Netherlands.
- 38- Pali, A.K., Katre, P. and Khalkho, D. 2014. An Unsteady Subsurface Drainage Equation Incorporating Variability of Soil Drainage Properties. *Water Resource Management*. 28, pp. 2639 - 2653.
- 39- Ritzema, H.P. 1994. *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication 16, Second Edition (Completely Revised). The Netherlands. Chapter 8. pp. 263-304.
- 40- Skaggs, R.W., Kriz, G.J. and Bernal, R. 1973. Field Evaluation of Transient Drain Spacing Equations. *Transactions of ASAE*. pp. 590-595.
- 41- Singh, P.K., Singh, O.P., Jaiswal, C.S., Chauhan, H.S. 1999. Subsurface drainage of a three layered soil with slowly permeable top layer. *Agricultural Water Management*. 42, pp. 97-109.

- 42- Smedema, L.K. and Rycroft, D.W. 1983. Land drainage: planning and design of Agricultural Drainage Systems. Batsford, London, 376 p.
- 43- Toksoz, S. and Kirkham, D. 1971. Steady drainage of layered soils. Part I. Theory. *Journal of Irrigation and Drain. Div.*, ASCE 97(1), pp. 1-18. Doi: 10.1061/JRCEA4.0000768.
- 44- Torabi, M. 2014. Field Evaluation of Drain Spacing Equations for Roodasht Region of Esfahan. *Journal of Water Research in Agriculture*. 28(3), pp. 635-644. (In Persian).

**EXTENDED ABSTRACT**

**Investigation of mechanical properties of concrete lining of water conveyance channels containing bamboo nanoparticles**

J. Abedi-Koupai<sup>1\*</sup>, A. Gohari<sup>2</sup>, S. Eslamian<sup>3</sup> and A. Motamedi<sup>4</sup>

*1\**- Corresponding author, Professor, Isfahan University of Technology, College of Agriculture, Water Science and Engineering Department, ([koupai@cc.iut.ac.ir](mailto:koupai@cc.iut.ac.ir)).

*2*- Associate Professor, Isfahan University of Technology, College of Agriculture, Water Science and Engineering Department.

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

*4*- Former MSc Student, Isfahan University of Technology, College of Agriculture, Water Science and Engineering Department.

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 17 October 2021

Revised: 11 February 2023

Accepted: 15 February 2023

*Keywords:*

Elasticity, Compressive and tensile strength, Concrete, Pozzolan.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Abedi Koupai, J., Gohari, A., Eslamian, S., Motamedi, A. (2024). 'Investigation of mechanical properties of concrete lining of water conveyance channels containing bamboo nanoparticles', *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 53-66. doi: 10.22055/jise.2023.38891.1996

**Introduction**

The use of practical methods for increasing water conveyance efficiency and optimal use of limited water resources is vital, especially in the world's arid regions, where water scarcity is always a concern. In that respect, efforts to reduce the cost of irrigation canals while maintaining the characteristics, technical standards, prevent damage to the structure, prevent leakage and loss of water at different stages of water transfer and distribution are of great interest to researchers (Abbasi, 2011). One of the solutions is to use pozzolanic materials, which replace a part of cement as cheap materials and thus reduce the finished price of cement. Changes in concrete fluidity and plastic behavior and hydration of cement are the most important physical changes that a pozzolan creates in concrete. Moreover, it can improve the strength and permeability of hardened concrete, resistance to thermal cracks, sulfates, and expansion (Luhar et al., 2019). Regarding using pozzolans to strengthen concrete, one of the most widely used plants in this field is bamboo. Bamboo is a plant that grows in tropical, subtropical and even temperate regions and any favourable regions in terms of ecological factors. On average, 20 million tons of this plant are produced annually in Asian and Latin American countries, which indicates its availability (Frías et al., 2012). Based on observations, Bamboo fibers increase the water absorption ratio (Xie et al., 2015). Furthermore, with the increase in the percentage of bamboo fiber, porosity is also growing (Da Costa Correia et al., 2014). However, Xie et al. (2015) stated that more than 25 to 35% of fiber use reduces stiffness (Xie et al., 2015). Taking these features into consideration, this study aimed to evaluate improvements in compressive strength, tensile strength, durability and elasticity of concrete with bamboo pozzolans.

## Methodology

Bamboo straw was used for this research. The required bamboo plant was obtained from the farms of Guilan province, Rudsar city. In order to use it in concrete mixing design, it must be pulverized. Five Samples (control, 20% of bamboo particles, 30% of bamboo particles, 20% of bamboo nanoparticles and 30% of bamboo nanoparticles) were tested to investigate the mechanical characteristics of samples. One hundred fourteen samples were prepared for this purpose. Compressive and tensile strength, durability, elastic modulus and strain of different samples were measured in the 7<sup>th</sup>, 28<sup>th</sup>, 60<sup>th</sup> and 128<sup>th</sup> days.

## Results and Discussion

The compressive and tensile strength of the control concrete in the period of 128 days were 289.11 and 33.97 kg/cm<sup>3</sup>, respectively. The strength in mentioned parameters grew through time in all samples, but the one with 20% of bamboo nanoparticles performed similarly to the control concrete. Having measured the durability, we realized that all samples containing pozzolan outperformed the control concrete in a sulphate environment, which means they had greater durability. Elasticity modulus was also measured. The modulus of elasticity in the samples containing bamboo particles was at least 38.6% lower than the control sample. Thus elasticity in all pozzolanic samples decreased considerably. Turning to strain results, samples with 20% and 30% of bamboo nanoparticles had a strain ratio of 146.58 and 122.74 compared to control concrete. The study reveals that the use of nano-scale bamboo particles made desirable changes in the elastic properties of the produced concrete.

## Conclusions

Based on the results, it can be claimed that the sample containing 20% of bamboo nanoparticles has the potential to be used in the concrete industry. This pozzolan improved the compressive strength, tensile strength, durability and elasticity of concrete to an acceptable level. As a result, they can be beneficial, especially as a filler for expansion joints and contraction of concrete water transfer channels, which requires sufficient elasticity to prevent cracks during the expansion and contraction of concrete.

## Acknowledgments

The authors would like to thank Isfahan University of Technology for its support of this research, and also all those who cooperated in conducting this research.

## References

- 1- Abbasi, N., 2011. The role of anions in the dispersion potential of clayey soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12(3), pp.15-30. (In Persian)
- 2- Da Costa Correia, V., Santos, S. F., Mármol, G., Da Silva Curvelo, A. A. and Savastano Jr, H., 2014. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber–cement materials. *Construction and Building Materials*, 72, pp.65-71.
- 3- Frías, M., Savastano, H., Villar, E., De Rojas, M. I. S. and Santos, S., 2012. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. *Cement and Concrete Composites*, 34, pp.1019-1023.
- 4- Luhar, S., Cheng, T.-W. and Luhar, I., 2019. Incorporation of natural waste from agricultural and aquacultural farming as supplementary materials with green concrete: A review. *Engineering*, 175, pp.107076.

- 5- Xie, X., Zhou, Z., Jiang, M., Xu, X., Wang, Z. and Hui, D., 2015. Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties. *Engineering*, 78, pp.153-161.



© 2024 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 ویژگی‌های مکانیکی پوشش بتنی کانال‌های انتقال آب حاوی نانوذرات بامبو

جهانگیر عابدی کوپایی<sup>۱\*</sup>، علیرضا گوهری<sup>۱</sup>، سعید اسلامیان<sup>۳</sup> و آرمینا معتمدی<sup>۴</sup>

<sup>۱\*</sup> - نویسنده مسئول، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، koupai@cc.iut.ac.ir

<sup>۲</sup> - دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب.

<sup>۳</sup> - استاد دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب.

<sup>۴</sup> - دانش آموخته ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب.

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵

### چکیده

تلاش به منظور کاهش هزینه اجرای کانال‌های آبیاری ضمن حفظ خصوصیات، معیارهای فنی، جلوگیری از صدمات وارد بر این سازه، جلوگیری از نشست و هدر رفت آب در مراحل مختلف انتقال و توزیع آب بسیار مورد توجه پژوهشگران است. استفاده از مواد پوزولانی که به عنوان موادی ارزان قیمت جایگزین بخشی از سیمان شده و بنابراین موجب کاهش قیمت تمام شده سیمان می‌گردد، یکی از راهکارها می‌باشد. یکی از گیاهان پرکاربرد در این زمینه، بامبو است. به همین دلیل، در این پژوهش، مقادیر ۲۰ و ۳۰ درصد ذرات بامبو در دو شکل طبیعی و در مقیاس نانو به جای سیمان جایگزین شد و ویژگی‌های بتن حاصله از جهت مقاومت فشاری، کششی، دوام در محیط سولفاته و مدول الاستیسیته بررسی شد. مقاومت فشاری و کششی بتن کنترل در دوره ۱۲۸ روزه، به ترتیب ۲۸۹/۱۱، ۳۳/۹۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب بود و در همه نمونه‌ها با افزایش سن بتن افزایش یافت. اما تنها نمونه حاوی ۲۰ درصد از نانو ذرات بامبو، عملکردی مشابه بتن کنترل داشت. در محیط سولفاته بتن کنترل بیشترین کاهش وزن را با ۴/۴۳ درصد داشت که بیانگر دوام بهتر نمونه‌های ساخته شده با پوزولان بامبو است. مدول الاستیسیته نیز در نمونه‌های حاوی ذرات بامبو حداقل ۳۸/۶ درصد کمتر از نمونه کنترل بود. در نهایت می‌توان ادعا نمود که نمونه حاوی ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو پتانسیل استفاده به عنوان مواد پرکننده درزهای انبساط و انقباض کانال‌های بتنی انتقال آب را دارا می‌باشد، زیرا مقاومت فشاری، کششی، دوام و الاستیسیته بتن را بهبود بخشید.

**کلید واژه‌ها:** الاستیسیته، بتن، پوزولان، مقاومت فشاری و کششی، بامبو.

### مقدمه

ایجاد پوشش مناسب برای کانال‌های آبیاری به منظور جلوگیری از تلفات نشت آب، ایجاد بستر مقاوم در برابر فرسایش و افزایش سرعت و ظرفیت انتقال آب، از روش‌های عملی افزایش راندمان انتقال و استفاده بهینه از منابع محدود آب است که در نیم قرن اخیر مورد توجه خاص بهره‌برداران و متولیان صنعت آب در مناطق خشک جهان و به ویژه ایران بوده است. در ایران پوشش بتنی بیش از سایر پوشش‌ها رواج دارد که غالباً با هزینه‌های بسیار زیادی نیز همراه است (Abbasi, 2011). علی‌رغم اختصاص سرمایه‌های کلان به توسعه منابع آب، عملکرد شبکه‌های آبیاری در طولانی مدت کمتر از حد انتظار است. این مطلب کلیت دارد و در مورد کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته صدق می‌کند. بنابراین از یک طرف، توجه به پوشش کانال‌ها با هدف افزایش مقاومت دیواره‌های خاکی آن‌ها در مقابل آب شستگی و نفوذ آب و تلفات دیگر آب به منظور افزایش راندمان انتقال یک امر ضروری است. از طرفی

دیگر، تلاش به منظور کاهش هزینه اجرای کانال‌های آبیاری ضمن حفظ خصوصیات و معیارهای فنی و جلوگیری از صدمات وارد بر این سازه و جلوگیری از نشست و هدر رفت آب در مراحل مختلف انتقال و توزیع آب نیز از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

بتن مخلوطی از دو جزء اصلی مصالح ریزدانه و خمیر چسبانده می‌باشد. امروزه استفاده از مواد پوزولانی به عنوان مصالحی دارای خاصیت سیمانی و جایگزین شونده در قسمتی از سیمان پرتلند مخلوط‌های بتنی مورد توجه می‌باشد. پوزولان‌ها به عنوان موادی ارزان قیمت جایگزین بخشی از سیمان شده و بنابراین موجب کاهش قیمت تمام شده سیمان می‌گردد. استفاده از پوزولان‌ها نیازمند عملیات حرارتی پرهزینه مورد نیاز برای پخت کلینکر سیمان پرتلند، نمی‌باشد. آسیاب پوزولان به دلیل سختی کمتر آن بسیار ساده تر از آسیاب کلینکر سیمان می‌باشد (Pekmezci and Akyüz, 2004).

تغییر در روانی بتن و تحول در الاستیسیته و هیدراتاسیون سیمان از مهمترین تغییرات فیزیکی است که یک پوزولان در بتن

حاصل، سیلیکون دی اکسید است و بیش از ۸۰ درصد مواد تشکیل دهنده خاکستر را تشکیل می‌دهد و نمایانگر پتانسیل زیاد استفاده از این گیاه به‌عنوان پوزولان طبیعی می‌باشد. لازم به ذکر است که سیلیکون دی‌اکسید باعث بهبود ویژگی‌های بتن می‌گردد. بجز خاکستر برگ بامبو از فیبرهای بامبو نیز می‌توان در این راستا استفاده نمود، که در طی مشاهدات انجام شده، با استفاده از این ماده نسبت جذب آب افزایش یافت (Xie et al., 2015). این امر با زیاد کردن درصد فیبر بامبو و در نتیجه افزایش تخلخل، بیشتر هم شد (Da Costa Correia et al., 2014). اگرچه مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کاهش داشت، اما سختی بتن ساخته شده با فیبر بامبو به مقدار چشم‌گیری با افزودن به درصد فیبر، افزایش یافت (Da Costa Correia et al., 2014). Xie et al. (2015) اظهار داشتند که بیش از ۲۵ تا ۳۵ درصد استفاده از فیبر، سختی را کاهش می‌دهد.

با توجه به مطالب ذکر شده، در این تحقیق سعی بر آن است تا استفاده از مواد طبیعی نانو مقیاس در طرح اختلاط بتن مورد آزمایش قرار گیرد و عملکرد آن‌ها با نمونه‌های حاوی ذرات با اندازه بزرگتر مقایسه گردد. فناوری نانو امکان ایجاد تغییر در فرآیند ساخت را حداقل به دو روش فراهم می‌سازد: ۱- کاهش مصرف مواد اولیه و انرژی ۲- افزایش بازده فرآیند ساخت با استفاده از نانو مواد به‌عنوان کاتالیزور و جداکننده (Abedi-Koupai, 2007). با توجه به اینکه فرآیند تولید ذرات نانو پیچیده‌تر و زمان‌بر تر از ذرات با اندازه معمول هست، لازم است در این پژوهش مقاومت فشاری، کششی، دوام و الاستیسیته بتن کنترل با بتن تهیه شده با پوزولان بامبو در مقیاس نانو و بزرگتر در سنین ۷، ۲۸، ۶۰ و ۱۸۰ روزه مقایسه و بررسی شود.

### مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق از ساقه گیاه بامبو (نی بامبو) استفاده شده است. گیاه بامبوی موردنیاز از مزارع استان گیلان شهرستان رودسر تهیه شد. به منظور استفاده از آن در طرح اختلاط بتن بایستی آن را به‌صورت پودر درآورد. در مرحله اول نی بامبو توسط دستگاه چاپر موجود در سوله ماشین‌های کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان به قطعات کوچکتر تبدیل گردید. سپس، مواد خرد شده توسط چاپر به‌وسیله نوعی آسیاب شکن به‌صورت پودر درآورده شد. در این مرحله مواد آسیاب شده از الک ۲۵۰ میکرومتر عبور داده شده و مواد به دو دسته بزرگتر از ۲۵۰ میکرومتر و کوچکتر از ۲۵۰ میکرومتر تقسیم گردید (شکل ۱). با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی موجود در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، اقدام به آنالیز ذرات مربوط به دسته کوچکتر از ۲۵۰ میکرومتر تولید شده در مرحله قبل گردید. پس از تهیه مصالح و تعیین مشخصات موردنیاز، طرح اختلاط بتن را به روش آیین‌نامه ACI 211 و با در نظر گرفتن ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زهکشی به‌دست آورده و براساس طرح اختلاط موردنظر

به‌وجود می‌آورد همچنین مقاومت و نفوذپذیری بتن‌های سخت شده، مقاومت در مقابل ترک‌های حرارتی، مقاومت در مقابل اثر سولفات‌ها و انبساط در اثر پدیده ترکیب اکسیدهای قلیایی و مواد سنگی از جمله خواصی است که در یک بتن ساخته شده از سیمان‌های پوزولانی غالباً مشاهده می‌گردد (Luhar et al., 2019).

پوزولان‌ها بر اساس منشاء و بر مبنای تولیدشان به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف- پوزولان‌های مصنوعی یا صنعتی، که منبع اصلی آن‌ها تأسیسات تولید انرژی، که از ذغال سنگ به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند، می‌باشد.

ب- پوزولان‌های طبیعی، شامل خاکسترهای آتشفشانی و حتی بقایای گیاهی.

بقایا و برگ بسیاری از گیاهان جمله گندم، نخل، زیتون، موز، و ذرت به صورت وسیعی بررسی شده‌اند (Luhar et al., 2019). به‌طور مثال با به‌کارگیری ۲۰ درصد از پوزولان گندم، می‌توان مقاومت فشاری را تا ۲۵ درصد افزایش داد (Ataie and Riding, 2013). ویژگی‌های بتن‌های ساخته شده از پوزولان ذرت پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد در دوره‌های نگهداری هفت، ۱۴ و ۲۸ روزه اندازه‌گیری شد. در روز ۲۸ ام مقاومت فشاری و خمشی نمونه پنج درصدی بیشتر از سایر گزینه‌ها بود و با افزایش درصد استفاده از پوزولان، این مقدار کاهش یافت. بر همین اساس، توصیه شد که از پوزولان ذرت بیش از ۱۰ درصد استفاده نشود (Augustine and Michael, 2016). بر اساس یافته‌های Eisa (2014) نیز جایگزینی ۳۰ درصدی پوزولان هسته زیتون، مقاومت فشاری را در بتن ۲۸ روزه به‌میزان ۷۵ درصد و درجه اسلامپ را تا ۲۰۰ درصد نسبت به بتن کنترل کاهش می‌دهد. (Eisa, 2014).

یکی از گیاهانی که بسیار در این زمینه مورد توجه قرار گرفته است، بامبو می‌باشد. بامبوها از خانواده علفه (گراس یا گرامینه و یا گندمیان) هستند که در زیر خانواده Bambusoideae قرار دارند. گیاه بامبو در اندازه‌ها و اشکال متفاوت از کوچک‌گلدانی و حتی به‌صورت چمن و تعداد زیادی از گونه‌های آن بلند، قطور و دارای خصوصیات درخت و درختچه وجود دارند. ساقه‌ی آن‌ها گاهی پیچیده و گاهی مستقیم و بلند است. بامبو گیاهی است که در مناطق حاره‌ای، نیمه حاره‌ای و حتی معتدل و هر منطقه‌ای که عوامل اکولوژیک مساعد باشد، می‌روید. به‌طور متوسط در کشورهای آسیایی و آمریکای لاتین سالانه ۲۰ میلیون تن از این گیاه تولید می‌شود که نشان از در دسترس بودن آن می‌باشد (Frías et al., 2012). به‌همین دلیل امروزه استفاده از بامبو برای استحکام بخشیدن به بتن توجه بسیاری را معطوف خود ساخته است. خاکستر بامبو را می‌توان با سوزاندن برگ‌های خشک شده آن در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد طی دو ساعت به‌دست آورد (Villar-Cociña et al., 2011). ماده طوسی رنگ

مدول الاستیسیته به صورت خاص استفاده می‌شود. روش ASTM-C469، یکی از روش‌های اندازه‌گیری مدول الاستیسیته بتن است. در این پژوهش از روش موسوم به دو پیچه در استاندارد ASTM-C469 استفاده شد (شکل ۲). در این روش بعد از آنکه نمونه داخل یقه قرار گرفت و برای اثرات خزش، چندین بار بارگذاری و باربرداری انجام شد، بارگذاری اصلی آغاز گردیده و در حین افزایش میزان بار، بار اعمالی و کرنش طولی در دو حالت زیر قرائت می‌گردد:

$$\text{الف- کرنش معادل } \epsilon_1 \times 10^{-6}$$

$$\text{ب- کرنش معادل } \epsilon_2 \text{ درصد بار نهایی}$$

یادآور می‌گردد که تنش از نسبت بار نهایی به سطح مقطع و کرنش از نسبت مقدار تغییر شکل بر طول موثر نمونه تحت آزمایش مطابق فرمول (۲) به دست می‌آید.

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (2)$$

که در آن:

E: مدول الاستیسیته

S<sub>2</sub>: تنش متناظر با ۴۰ درصد بار نهایی

S<sub>1</sub>: تنش متناظر با کرنش طولی معادل با  $\epsilon_1$  معادل با ۰/۰۰۰۰۰۵۰

$\epsilon_2$ : کرنش متناظر با تنش

نمونه استاندارد مورد استفاده در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۳۰×۱۵ سانتی‌متر می‌باشند.

تعداد ۳۶ نمونه بتنی ساخته شده در داخل محلول چهار درصد سولفات منیزیم قرار گرفت. باقی‌مانده نمونه‌ها داخل آب نگهداری گردید و آزمایش‌های لازم برای کلیه نمونه‌ها در سنین هفت، ۲۸، ۶۰ و ۱۸۰ روزه انجام گردید.

نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد. برای بررسی خصوصیات مکانیکی نمونه‌های آزمایشگاهی، پنج نمونه بتن مورد آزمایش قرار گرفت. بتن یکی از نمونه‌ها بدون پوزولان، به عنوان بتن کنترل و بتن دو نمونه بعدی با تقلیل حجم سیمان به مقدار ۷۰ درصد و ۸۰ درصد حجم سیمان بتن کنترل و جایگزین کردن پوزولان به میزان درصدهای سیمان حذف شده در دو اندازه ذرات، به شرح جدول (۱) ساخته شد.

در هر کدام از نمونه‌ها سه تکرار به مرحله اجرا درآمد. پوزولان‌های مورد استفاده در این تحقیق بامبو می‌باشد. برای بررسی مقاومت فشاری، کششی و افت وزن نمونه‌های آزمایشگاهی نگهداری شده در داخل آب و محلول سولفات، تعداد ۱۱۴ نمونه با استفاده از قالب‌های مکعبی به ابعاد هفت سانتی‌متر و ۱۰ سانتی‌متر و سه نوع قالب استوانه‌ای با اندازه‌هایی به قطر ۵/۰۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰/۱۶ سانتی‌متر، قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در شرایط آزمایشگاهی ساخته شد. مقاومت فشاری توسط جک بتن شکن شکل (۲) و مقاومت کششی با آزمایش شکاف (تست برزیلی) شکل (۲) با استفاده از فرمول ذیل محاسبه شد:

$$T = 2P / (\pi LD) \quad (1)$$

که در آن:

T: مقاومت کششی بر حسب پوند بر اینچ مربع (کیلوپاسکال)

P: بیشترین بار اعمال شده بر حسب پوند (کیلونیوتن)

L: طول نمونه بر حسب اینچ (متر)

D: قطر نمونه بر حسب اینچ (متر)

برای معرفی رفتار مصالح از لحاظ عکس‌العمل تغییر شکلی آن‌ها در مقابل بارهای وارده، از پارامتری بنام مدول یانگ به صورت عام و



Fig. 1- Standard sieves

شکل ۱- الک‌های استاندارد



جدول ۱- مقدار پوزولان استفاده شده در هر نمونه

Table 1- Amount of pozzolan used in each Sample

Sample	A	B1	B2	B3	B4
Amount of particles of bamboo (%)	0	20	30	0	0
Amount of nano particles of bamboo (%)	0	0	0	20	30



Fig. 2- From right to left, Machines for measuring compressive strength, tensile strength and elasticity

شکل ۲- از راست به چپ، دستگاه تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی نمونه‌های بتنی و اندازه‌گیری مدول الاستیسیته

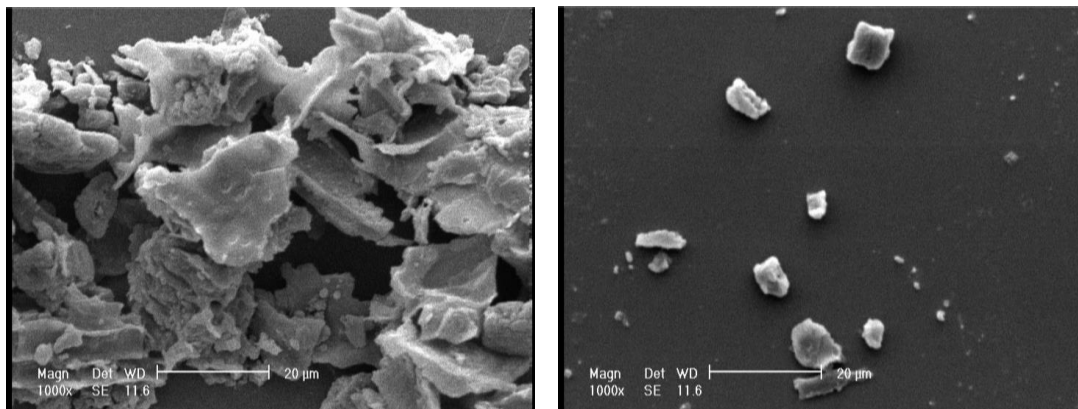


Fig. 3- Result of electron microscope analysis

شکل ۳- نتایج آنالیز دستگاه میکروسکوپ الکترونی

ذرات دارای اندازه کوچکتر از یک میکرومتر می‌باشند و سطح مخصوص مناسبی دارند.

## ۲- نتایج آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با درصدها و اندازه ذرات مختلف پوزولان بامبو، تمامی نمونه‌ها در سنین هفت، ۲۸ و ۶۰ و ۱۸۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. با نرم‌افزار SAS، تجزیه و تحلیل‌های آماری با توجه به اینکه اثر متقابل نمونه و زمان معنی‌دار بود، انجام گرفت. نتایج آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در جدول (۲) آمده است. براساس این آزمون، نمونه‌هایی که در یک حرف مشترک هستند، در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. همچنین تاثیر زمان بر رشد مقاومت فشاری بتن ساخته با پوزولان‌های مختلف نیز در جدول (۲) آورده شده است.

## نتایج و بحث

### ۱- نتایج مربوط به تهیه پودر بامبوی مورد استفاده در این تحقیق

در این مرحله با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی موجود در دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان اقدام به آنالیز ذرات مربوط به دسته کوچکتر از ۲۵۰ میکرومتر تولید شد. از آنجایی که در این تحقیق بایستی اقدام به ریزتر نمودن ذرات و افزایش سطح مخصوص ذرات نمود، از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای استفاده شد. مواد تهیه شده وارد دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای شده و برای مدت ۳۰ ساعت با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ گردید. مواد حاصله توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است که نتیجه در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه شکل (۳) و مقیاس آن، واضح است که بخشی از

جدول ۲- مقایسه میانگین مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) نمونه‌های مختلف  
 Table 2- Comparison means of compressive strength (Kg/cm<sup>2</sup>) in different Samples

Sample	7 <sup>th</sup> day	28 <sup>th</sup> day	60 <sup>th</sup> day	180 <sup>th</sup> day
A	195.24 <sup>a</sup>	248.29 <sup>a</sup>	276.87 <sup>a</sup>	289.11 <sup>a</sup>
B1	7.48 <sup>d</sup>	35.37 <sup>e</sup>	123.81 <sup>d</sup>	148.98 <sup>d</sup>
B2	17.00 <sup>c</sup>	68.03 <sup>d</sup>	143.54 <sup>c</sup>	166.67 <sup>c</sup>
B3	44.22 <sup>b</sup>	166.67 <sup>b</sup>	242.86 <sup>b</sup>	292.51 <sup>a</sup>
B4	7.48 <sup>d</sup>	105.44 <sup>c</sup>	146.26 <sup>c</sup>	176.87 <sup>b</sup>

نتیجه حاصل شد که استفاده از پوزولان بامبو بیش از ۳۰ درصد، مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد (Silva et al., 2021). همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان دهنده عملکرد بهتر ریز ذرات بامبو نسبت به ذرات با اندازه بزرگتر بود، مطالعه دیگری توسط (Yusra et al., 2020) نیز که از فیبر بامبو با درصدهای ۵٪، یک و ۱/۵ استفاده کرد، به این نتیجه دست یافت که با جایگزینی درصد بیشتری از فیبر، مقاومت فشاری تا ۱۲ درصد کاهش می‌یابد (Yusra et al., 2020). Dhinakaran و Gangava (2016) نیز در دو سن هفت و ۲۸ روزه، آزمایش مقاومت فشاری را روی بتن‌های ساخته شده با درصدهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰، انجام دادند که در نهایت مقاومت فشاری بتن کنترل از همه بیشتر بوده و کاهش مقاومت فشاری در هر دو زمان، با افزایش درصد فیبر مشاهده شد (Dhinakaran and Gangava, 2016). در نهایت می‌توان جمع بندی نمود که واکنش‌های پوزولانی در نمونه‌ای که از ذرات با مقیاس نانو استفاده کرده بیشتر بوده و همین موضوع باعث افزایش مقاومت فشاری در این نمونه شده. طبق دستورالعمل مشخصات فنی عمومی سامانه‌های آبیاری و زهکشی و با توجه به حداقل مقاومت مشخصه تعیین شده، می‌توان از نمونه B3، در شرایطی که بتن در معرض یخ زدن و آب شدن در شرایط مرطوب و تر خشک شدن مکرر یا مواد شیمیایی یخ زدا می‌باشد، استفاده کرد (Vice presidency for strategic planning and supervision., 2013).

### ۳- نتایج آزمایش‌های تعیین مقاومت کششی

در این قسمت نیز تمامی نمونه‌ها در سنین هفت، ۲۸ و ۶۰ و ۱۸۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. با نرم‌افزار SAS، تجزیه و تحلیل‌های آماری با توجه به اینکه اثر متقابل نمونه و زمان معنی‌دار بود، انجام گرفت. نتایج آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در جدول (۳) آمده است. براساس این آزمون، نمونه‌هایی که در یک حرف مشترک هستند، در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. همچنین تاثیر زمان بر رشد مقاومت فشاری بتن ساخته با پوزولان‌های مختلف در شکل (۴) آورده شده است.

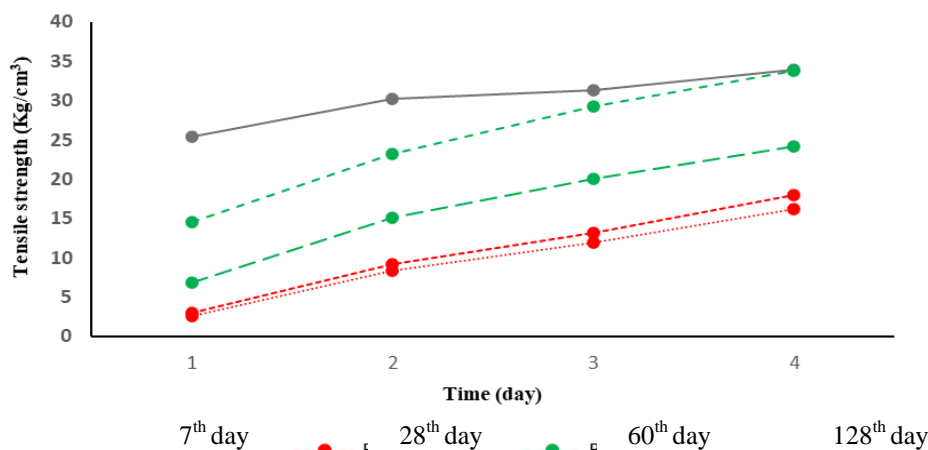
با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (۲) و شکل (۲) مشاهده می‌گردد که در تمام موارد مقاومت فشاری بتن با سن آن افزایش می‌یابد. با توجه به بیشتر بودن نسبت آب به سیمان در بتن‌های حاوی پوزولان به غیر از نمونه B3 (بتن با ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو) نسبت به بتن کنترل، مقاومت این نمونه‌ها در تمام سنین کمتر از بتن کنترل می‌باشد. اما با این وجود نتایج به‌دست آمده نشان دهنده فعالیت پوزولانی در بتن‌های حاوی پوزولان با گذشت زمان می‌باشد. در نمونه B3 (بتن با ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو) در ابتدا و سنین کم میزان مقاومت فشاری بتن ۴۴/۲۲ و بتن کنترل ۱۹۵/۲۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بود. اما در سنین بیشتر با افزایش روند کسب مقاومت در مقایسه با سایر نمونه‌ها، میزان مقاومت فشاری به بتن کنترل نزدیک شده و نهایتاً در سن ۱۸۰ روزه به میزان حدودی یک درصد بیشتر از بتن کنترل شد. علت این امر را می‌توان استفاده از ذرات نانو بامبو عنوان کرد که عملکرد مقاومت فشاری بسیار بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌های مورد مطالعه دارا می‌باشد. در نمونه بامبو مقدار ۲۰ و ۳۰ درصد پوزولان به ترتیب باعث افزایش ۹۴/۹ و ۸۹/۹ درصدی مقاومت شد. درحالی که، این مقادیر برای نانو ذرات بامبو ۸۴/۸ و ۹۵/۷۷ درصد بود. صرف نظر از میزان افزایش، بیشترین مقاومت فشاری نهایی مربوط به نمونه‌های B3، A، B2، B4 و B1 بود. بدین معنا که در بین نمونه‌های حاوی ذرات بامبو نمونه حاوی ۳۰ درصد ذرات و در نمونه نانو ذرات بامبو، مقدار ۲۰ درصد پوزولان بهترین عملکرد را داشته است.

نتایج این پژوهش در راستا و تایید کننده دستاوردهای دیگر محققین است. طی بررسی‌های انجام شده روی تغییرات مقاومت فشاری در بتن ساخته شده با ریز ذرات پوزولان بامبو، Umoh and Odesola (2015) مشاهده کردند که طی زمان مقاومت فشاری همه نمونه‌ها تقویت شده و همچنین به افزایش مقاومت فشاری در بتن ۲۸ روزه در پنج و ۱۰ درصد استفاده از پوزولان دست یافتند. همچنین تخلخل و جذب آب نیز نسبت به بتن کنترل بهبود یافته بود (Umoh and Odesola, 2015). در یکی از به روزترین پژوهش‌ها، Silva et al. (2021) درصدهای مختلف پوزولان را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ بررسی کردند و در نهایت این

### جدول ۳- مقایسه میانگین مقاومت کششی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) در نمونه‌های مختلف

**Table 3- Comparison means of tensile strength (Kg/cm<sup>2</sup>) in different Samples**

Sample	7 <sup>th</sup> day	28 <sup>th</sup> day	60 <sup>th</sup> day	180 <sup>th</sup> day
A	25.47 <sup>a</sup>	30.19 <sup>a</sup>	31.32 <sup>a</sup>	33.97 <sup>a</sup>
B1	3.01 <sup>d</sup>	9.24 <sup>de</sup>	13.21 <sup>e</sup>	17.92 <sup>c</sup>
B2	2.64 <sup>d</sup>	8.30 <sup>e</sup>	11.89 <sup>fg</sup>	16.23 <sup>d</sup>
B3	14.53 <sup>b</sup>	23.21 <sup>b</sup>	29.25 <sup>b</sup>	33.78 <sup>a</sup>
B4	6.79 <sup>c</sup>	15.09 <sup>c</sup>	20.00 <sup>c</sup>	24.15 <sup>b</sup>

**Fig. 4- Tensile strength of different Samples through time**

شکل ۴- مقاومت کششی نمونه‌های مختلف طی زمان

این پارامتر در نمونه‌های ۵ و ۱۰ درصدی چشم‌گیرتر بوده و در نهایت نمونه ۱۰ درصدی را به عنوان نمونه بهینه معرفی کردند. البته لازم به ذکر است که در مواردی هم کاهش مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی ذرات نانو بامبو گزارش شده است (Ikumapayi and Akingbonmire, 2017).

#### ۴- نتایج تعیین تغییرات وزنی نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات

برای تعیین تغییرات وزنی نمونه‌های ساخته شده با درصدها و اندازه مختلف ذرات در پوزولان‌های بامبو، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز به منظور عمل‌آوری در داخل حوضچه آب با دمای  $20 \pm 2$  نگهداری گردید. پس از ۱۴ روز بلافاصله بعد از خارج کردن نمونه‌ها از داخل آب، سفیدک و جرم‌های سطح رویی تمامی نمونه‌ها به دقت تمیز گردید و سپس توسط ترازوی دقیق آزمایشگاهی، تک‌تک نمونه‌ها توزین و سپس به داخل محلول‌های چهار درصد سولفات منیزیم قرار داده شدند و در سنین مختلف بلافاصله بعد از خارج کردن از محلول‌های سولفات، دوباره سفیدک و جرم سطحی نمونه‌ها را تمیز کرده و سپس وزن گردید. نتایج حاصل از این آزمایش برای هر بتن در سن ۱۸۰ روزه در جدول (۴) آورده شده است که هر کدام میانگین سه نمونه می‌باشند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (۳) و شکل (۴) مشاهده می‌گردد که در تمام موارد مقاومت کششی بتن نیز همانند مقاومت فشاری با سن آن افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت کششی نهایی مربوط به نمونه‌های A, B3, B4, B1 و B2 بود. اگرچه نمونه‌های حاوی نانوذرات بامبو مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی ذرات بامبو داشتند، اما بیشترین شباهت به بتن کنترل را نمونه B3 داشته است. مقاومت کششی این نمونه در سن ۱۸۰ روزه، با اختلاف کمتر از ۰/۵ درصد مشابه نمونه کنترل گشته است. دو نمونه‌ای که به‌وسیله ذرات بزرگتر بامبو ساخته شده، با مقاومت کششی ۱۷/۹۲ و ۱۶/۲۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ۴۷/۲ و ۵۲/۲ درصد مقدار کمتری نسبت به بتن کنترل داشته‌اند. که مطابق با نتایج اعلام شده توسط دیگر محققین از جمله Kumarasamy et al. (2020) است. آن‌ها نیز اعلام کردند با افزایش سن بتن، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در نمونه حاوی دو درصد فیبر بامبو، پس از گذشت ۲۸ روز، نمونه حاوی ذرات فیبر بامبو، حدود ۳۰ درصد افزایش در مقاومت کششی داشته‌اند. اما با این حال، بتن‌های ساخته شده با فیبر بامبو را شکننده توصیف نموده‌اند (Kumarasamy et al., 2020). Shitote et al. (2019) نیز افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی خاکستر برگ بامبو را گزارش کرده‌اند. آن‌ها با بررسی درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ از پوزولان خاکستر برگ بامبو و اندازه‌گیری مقاومت کششی در آن‌ها، مشاهده کردند که افزایش

#### جدول ۴- آنالیز دوام نمونه‌های مختلف

**Table 4- Durability analysis of different Samples**

Sample	Weight	loss (Kg)	The proportion of remained weight	Percentage of weight loss
A	30.5		95.56	4.43
B1	24.65		96.05	3.94
B2	22.43		96.41	3.58
B3	16.77		97.31	2.68
B4	17.11		97.26	2.73

جدول ۵- مقایسه میانگین الاستیسیته (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) در نمونه‌های مختلف  
Table 5- Comparison means of elasticity (Kg/cm<sup>2</sup>) in different Samples

Sample	Percentage of weight loss	Elastic modulus
A	37.23 <sup>a</sup>	321048 <sup>a</sup>
B1	28.17 <sup>b</sup>	196923 <sup>b</sup>
B2	24.17 <sup>cd</sup>	196923 <sup>b</sup>
B3	20.17 <sup>f</sup>	186732 <sup>b</sup>
B4	22.33 <sup>e</sup>	152188 <sup>c</sup>

با بررسی مقادیر مدول الاستیسیته در جدول (۵)، مشاهده می‌گردد که نمونه کنترل دارای بیشترین مقدار مدول الاستیسیته می‌باشد. البته مقادیر مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی پوزولان کاهش چشم‌گیری نسبت به بتن کنترل داشته است. در این تحقیق با استفاده از پوزولان‌های بامبو در تمام نمونه‌ها مقادیر مدول الاستیسیته کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. همان‌طور که دیگر محققین نیز طی پژوهش‌های خود به نتیجه‌ای مشابه دست یافتند. (Da Costa Correia et al., 2014) ویژگی‌های بتن ساخته شده با پوزولان بامبو با درصد‌های شش ۸، ۱۰ و ۱۲ را بررسی کرد و مشاهده کرد که با افزایش درصد، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد (Da Costa Correia et al., 2014).

با توجه به اینکه قابلیت الاستیک بودن مواد پرکننده درزهای انبساط و انقباض کانال‌های بتنی انتقال آب از اهمیت زیادی برخوردار است و با توجه به کاهش مقادیر مقاومت نمونه‌های تهیه شده نمی‌توان با داشتن مقادیر مدول الاستیسیته با قاطعیت در مورد قابلیت الاستیک بودن این مواد نظر داد. از آنجایی که با داشتن مقادیر مدول الاستیسیته مربوط به هر نمونه و داشتن مقاومت فشاری می‌توان مقادیر کرنش مربوط به هر نمونه را به دست آورد، به همین منظور در این تحقیق از مقادیر مقاومت فشاری نهایی ۱۸۰ روزه مربوط به هر نمونه استفاده نمود و مقادیر تنش معادل هر یک را به دست آورده و اقدام به برآورد مقدار کرنش می‌گردد. مقادیر کرنش به دست آمده برای هر نمونه در جدول (۶) آورده شده است.

Ademola و Buri (2014) بیان کردند که نمونه‌های حاوی پوزولان بامبو در محیط سولفات منیزیم مقاوم‌تر هستند، آن‌ها پس از قرار دادن بتن کنترل، بتن با پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد پوزولان بامبو در این ماده، مقاومت فشاری آن را اندازه گرفتند. در بتن کنترل، مقاومت فشاری به مقدار قابل توجهی کاهش یافت اما در بقیه نمونه‌ها افزایش داشت. قابل ذکر است که میزان بهبود مقاومت فشاری در نمونه ۱۰ درصدی بیش از بقیه بود. او این امر را ناشی از واکنش میان سولفات منیزیم، گچ موجود در ملات سیمان و آب (CaSO<sub>4</sub> - 32H<sub>2</sub>O) و اتریکنات دانست (3CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 3CaSO<sub>4</sub> - 32H<sub>2</sub>O) Gangava و Dhinakaran (2016) نیز با بررسی دوام سیمان‌های حاوی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ درصد و کنترل، نمونه ۱۵ درصدی را نمونه‌ای با بهترین دوام معرفی کردند.

#### ۵- نتایج تعیین مدول الاستیسیته بتن

برای تعیین مدول الاستیسیته بتن‌های ساخته شده با پوزولان‌های مختلف بامبو، تمامی نمونه‌ها در سن ۱۸۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. با انجام تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار SAS و تشکیل جدول تجزیه واریانس خصوصیات کاهش وزن و مدول الاستیسیته، با توجه به اینکه اثر متقابل نمونه بر میزان دوام و مدول الاستیسیته معنی‌دار است. مقایسه نمونه‌های مختلف از نظر دوام و مدول الاستیسیته در جدول (۵) آورده شده است.

با توجه جدول (۵) مشخص می‌گردد که مقدار کاهش وزن در نمونه کنترل (بتن کنترل) حداکثر و در نمونه B3، حداقل بوده است.

جدول ۶- مقادیر کرنش مربوط به هر نمونه  
Table 6- Strain in different Samples

Sample	Strain	Ratio of strain to the control concrete
A	0.0017	100
B1	0.001135	66.98
B2	0.00107	63.04
B3	0.0025	146.58
B4	0.0021	122.74

نمونه‌های مختلف بامبو مشخص می‌گردد که نمونه با ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو در سن ۱۸۰ روزه با مقاومت کششی ۳۳/۷۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب، نسبت به سایر نمونه‌های پوزولان بامبو دارای مقدار بیشتری می‌باشد.

- با بررسی مقادیر کاهش وزن نمونه‌های حاوی پوزولان بامبو در سن ۱۸۰ روزه مشخص می‌گردد که بتن‌های حاوی نانو ذرات بامبو دارای کمترین مقادیر کاهش وزن و بتن کنترل دارای بیشترین مقادیر کاهش وزن می‌باشند. نتایج آزمایش دوام بتن-های حاوی پوزولان بامبو به‌خوبی مزیت استفاده از بامبو را به-عنوان پوزولان در بتن آشکار می‌سازد. به‌طوری که نتایج نشان می‌دهند در محیط سولفات منیزیم مورد آزمایش، مقادیر کاهش وزن بتن کنترل در سن ۱۸۰ روزه ۳۰/۵ کیلوگرم بوده که حداقل ۱۹/۱۸ درصد بیشتر از مقادیر کاهش وزن بتن‌های حاوی پوزولان‌های بامبو می‌باشد.

- با بررسی مقادیر مدول الاستیسیته مشاهده می‌گردد که نمونه کنترل (بتن کنترل) دارای بیشترین مقدار مدول الاستیسیته می‌باشد. البته مقادیر مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی پوزولان کاهش چشم‌گیری نسبت به بتن کنترل (۳۲۱۰۴۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)، داشته است اما نمونه حاوی نانو ذرات بامبو ۳۰ درصد، دارای کمترین مقدار مدول الاستیسیته (۱۵۲۱۸۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) بوده است اما دارای مقادیر قابلیت تغییرشکل قابل ملاحظه ای می‌باشد.

در نهایت می‌توان ادعا نمود که نمونه حاوی ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو پتانسیل استفاده در صنعت بتن را داراست به‌ویژه به عنوان مواد پرکننده درزهای انبساط و انقباض کانال‌های بتنی انتقال آب که لازم است قابلیت الاستیک به اندازه کافی به‌منظور جلوگیری از ایجاد ترک در مواقع انبساط و انقباض بتن داشته-باشد. زیرا مقاومت فشاری، کششی، دوام و الاستیسیته بتن را تا حد قابل قبولی بهبود بخشید.

### تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت دانشگاه صنعتی اصفهان و کلیه عزیزانی که به‌نحوی در انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

با توجه به جدول (۶) مشخص است که نمونه‌های با ۲۰ درصد ذرات بامبو و ۳۰ درصد ذرات بامبو الاستیسیته بسیار کمتری نسبت به بتن کنترل دارند. نمونه ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو با داشتن نسبت کرنش ۱۴۶/۵۸ نسبت به بتن کنترل و نمونه ۳۰ درصد نانو ذرات بامبو با داشتن نسبت کرنش ۱۲۲/۷۴ نسبت به بتن کنترل دارای قابلیت تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.

با توجه به این که یکی از مهم‌ترین خصوصیات مواد پرکننده درزهای انبساط و انقباض کانال‌های بتنی انتقال آب الاستیسیته کافی به‌منظور جلوگیری از ایجاد ترک در مواقع انبساط و انقباض بتن است، بنابراین استفاده از ذرات بامبو در مقیاس نانو منجر به تغییر خواص الاستیسیته بتن تولیدی در جهت مطلوب گردیده است. به‌طوری که نمونه‌های ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو و ۳۰ درصد نانو ذرات بامبو با داشتن نسبت کرنش ۱۴۶/۵۸ و ۱۲۲/۷۴ نسبت به بتن کنترل، دارای مقادیر قابلیت تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای می‌باشند، که استفاده از این مواد را به‌عنوان ماده پرکننده برای درزهای انبساط و انقباض مناسب می‌سازد.

### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از ذرات بامبو در دو اندازه نانو و بزرگ‌تر، با جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصدی از این مواد به‌جای سیمان، بتن ساخته شد و ویژگی‌های این بتن اعم از مقاومت فشاری، کششی، دوام در محیط سولفات و الاستیسیته در مقابل بتن کنترل، بررسی شد. نتایج حاصل را می‌توان در چند بند زیر خلاصه نمود:

- روند افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی در بتن حاوی ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو در سنین بالا، نسبت به بتن کنترل بیشتر می‌باشد. به‌طوری که بتن حاوی ۲۰ درصد نانو ذرات بامبو با وجود مقاومت فشاری ۷۷/۳ درصدی کمتر نسبت به بتن کنترل در سنین پائین، در سن ۱۸۰ روزه به مقاومت فشاری تقریباً معادل (با اختلاف حدودی ۱ درصد) بتن کنترل دست می‌یابد.

- مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی پوزولان بامبو در تمام سنین از مقاومت فشاری بتن کنترل (۳۳/۹۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب) کمتر می‌باشد. با مقایسه مقادیر مقاومت کششی بین

### References

- 1- Abbasi, N., 2011. The role of anions in the dispersion potential of clayey soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12(3), pp.15-30. (In Persian)

- 2- Abedi-Koupai, J., 2007. The application of nano technology in environment. In *the 1st Conference on the Application of Nano-technology in Environment, Isfahan University of Technology, Iran.* (In Persian)
- 3- Ademola, S. and Buari, T., 2014. Behaviour of bamboo leaf ash blended cement concrete in sulphate environment. *IOSR Journal of Engineering*, 4(6), pp.1-8.
- 4- Ataie, F. F. and Riding, K. A., 2013. Thermochemical preSamples for agricultural residue ash production for concrete. *Journal of Materials in Civil Engineerin*, 25, pp.1703-1711. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000072.
- 5- Augustine, A. and Michael, T., 2016. Partial Replacement of cement with corn cob ash. *International Journal for Innovative Research in Multidisciplinary Field*, 2, pp.159-166.
- 6- Da Costa Correia, V., Santos, S. F., Mármol, G., Da Silva Curvelo, A. A. and Savastano Jr, H., 2014. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber–cement materials. *Construction and Building Materials*, 72, pp.65-71. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.005.
- 7- Dhinakaran, G. and Gangava, H. C., 2016. Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 10(3), pp.279-289.
- 8- Eisa, A., 2014. Properties of concrete incorporating recycled post-consumer environmental wastes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8, pp.251-258.
- 9- Frías, M., Savastano, H., Villar, E., De Rojas, M. I. S. and Santos, S., 2012. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. *Cement and Concrete Composites*, 34, pp.1019-1023. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.05.005.
- 10- Ikumapayi, C. M. and Akingbonmire, S. L., 2017. Effects of Elevated Temperature on Splitting Tensile Strength of OPC and BLA Pozzolanic Concrete and Mortar. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 2(1), pp.124-128.
- 11- Kumarasamy, K., Shyamala, G. and Gebreyowhanse, H., 2020. Strength Properties of Bamboo Fiber Reinforced Concrete. In *International Conference on Recent Advancements in Engineering and Management, Warangal, India.*
- 12- Luhar, S., Cheng, T.-W. and Luhar, I., 2019. Incorporation of natural waste from agricultural and aquacultural farming as supplementary materials with green concrete: A review. *Engineering*, 175, pp.107076. Doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107076.
- 13- Pekmezci, B. and Akyüz, S., 2004. Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, pp.2175-2179. Doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.008.
- 14- Shitote, S., Onikeku, O., Mwero, J. and Adedeji, A., 2019. Evaluation of Characteristics of Concrete Mixed with Bamboo Leaf Ash. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 13, pp.67-80.
- 15- Silva, L. H. P., Tamashiro, J. R., De Paiva, F. F. G., Dos Santos, L. F., Teixeira, S. R., Kinoshita, A. and Antunes, P. A., 2021. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. *Journal of Building Engineering*, 42, pp.102769. Doi: 10.1016/j.job.2021.102769.
- 16- Vice presidency for strategic planning and supervision., 2013. Review of General Technical Specification for Irrigation and Drainage Systems In, Report n. 108. (In Persian)
- 17- Umoh, A. A. and Odesola, I. A., 2015. Characteristics of bamboo leaf ash blended cement paste and mortar. *Civil Engineering Dimension*, 17, pp.22-28.

- 
- 18- Villar-Cociña, E., Morales, E. V., Santos, S. F., Savastano Jr, H. and Frías, M., 2011. Pozzolan behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. *Cement and Concrete Composites*, 33, pp.68-73. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.09.003.
  - 19- Xie, X., Zhou, Z., Jiang, M., Xu, X., Wang, Z. and Hui, D., 2015. Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties. *Engineering*, 78, pp.153-161. Doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.086.
  - 20- Yusra, A., Triwulan, T., Safriani, M. and Ikhsan, M., 2020. Use of bamboo fiber on the relationship between compressive strength and split tensile strength of high strength concrete. In *the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Banda, Indonesia*.





**EXTENDED ABSTRACT**

**The MODIS daily produces snow cover modification based on cloudy effects analysis (case study: northwest of Iran)**

R. Ebrahimi<sup>1</sup>, S. Marofi<sup>2\*</sup> and H. Torabzadeh Khorasani<sup>3</sup>

1- PhD candidate in Water Resources Engineering, Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2\* - Corresponding Author, Professor, Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran. ([marofi@basu.ac.ir](mailto:marofi@basu.ac.ir))

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran.

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 4 March 2022

Revised: 15 August 2022

Accepted: 20 August 2022

*Keywords:*

Snow Metering, Local Stations, linear Regression, Satellite Image Correction, Spatio-Temporal Discontinuity.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Ebrahimi, R., Marofi, S., Torabzadeh Khorasani, H. (2024). 'The MODIS daily produces snow cover modification based on cloudy effects analysis (case study: northwest of Iran)', Irrigation Sciences and Engineering, 47(1), pp. 67-81. doi: 10.22055/jise.2022.40100.2015.

**Abstract**

Remote sensing is a fast and cost-effective solution in preparing and presenting this data to climate models due to the difficulty of preparing snow meteorological data in the field. The presence of clouds is one of the problems of satellite images that cause temporal-spatial fragmentation of snow data and increase its resolution efficiency. This study aims to provide a suitable framework for removing the effect of clouds on satellite images and generating the satellite snow metering data without disturbing cloud effects. For this purpose, first, daily MOD10A1 images of the MODIS sensor products were refined (temporally and spatially) using local snow depth data, average temperature, and daily rainfall of the Lake Urmia catchment and western part of the Caspian Sea basin. A multivariate linear regression model application showed that the normalized snow differential index (NDSI) values correlate with existing snow metering station data ( $r= 0.85$  and  $RMSE= 0.047$ ). Accordingly, the cloud-covered areas in the MODIS images were replaced with the values obtained from the model. Then, new NDSI values were calculated using geostatistical methods and the location of each pixel's location. By examining the relationship between the NDSI and the cumulative snowfall from January to March 2016, it was found that replacing the primary satellite images with corrected images can increase the  $R^2$  from 0.63 to 0.81. Therefore the proposed methodology could improve the accuracy of satellite snow metering.

**Introduction**

In many arid and semi-arid regions of the world including Iran, snow accumulated in snow pits creates a significant supply of water resources as snow-equivalent water in the mountainous areas of the basin (Tabari et al., 2010). The reservoir also plays an essential role in providing the base discharge of permanent rivers and under special conditions in controlling the flood regime of the

rivers downstream because the snow remains in the basin for a long time before it becomes runoff in the form of solid and cold masses. Knowing the level of snow cover and its storage volume is one of the most basic needs of water resources managers (Marofi et al., 2009). An integrated evaluation of cloud pixel reduction and correction methods shows that although these methods are instrumental in reducing cloud opacity, they are associated with uncertainty and lead to a reduced spatial or temporal resolution to varying degrees (Gao et al., 2010). The primary purpose of this study was to provide a suitable method for estimating cloud pixels of daily snow cover images of Modi's sensor according to digital elevation map, average daily temperature data, daily precipitation, ground-recorded snow depth data, and also determining the Spatio-temporal distribution of snow to Especially in the problematic areas. It has been without statistics and with many clouds. In this study, first, the relationship between NDSI values with snow depth, average temperature, precipitation, and altitude of ground stations has been investigated. This connection is then used to remove the opacity of the cloud cover of pixels without NDSI data, and a new image is created that lacks cloud data. More confidence and accuracy in estimating the snow-covered surface are provided using reconstructed images.

### Methodology

In this study, the Iranian Meteorological Organization prepared data on average daily temperature and daily precipitation in the study period. In addition, two types of local and satellite data have been used to evaluate the relationship between snow metering at local stations and NDSI data to enable model validation. In this area, the received images of the quarter have been processed from the first of December to the end of March 2019. In the local data preparation stage, using digital maps of the area, the height of basin stations and their location were reset, and the database of these stations was prepared in GIS format. Then all data and parameters measured at local stations, including average daily temperature, precipitation, and altitude, were normalized to minimize the effect of scale change in subsequent comparisons. In the first stage of processing, the dates at which the ground snow depth data were collected at each station and the image of that area was also cloudless were identified. The MATLAB software used the linear multivariate regression method for statistical relationship investigation between the data of the selected stations (Al-Hosseini et al., 2016). In regression calculation, the NDSI value was considered a dependent variable, and other parameters including snow depth, average daily temperature, precipitation, and station height were considered independent variables. The regression relationship of healthy and cloudless pixels in images was used to model NDSI cloud pixels. Thus, NDSI modeled images are produced daily, even on days when ground snow metering is incomplete. In the second data processing stage, spatial coherence in the images can be achieved according to each point and neighborhood.

### Results and discussion

Satellite and terrestrial snow meteorological observations are highly correlated concerning climatic parameters (temperature and precipitation) and topography, and the possibility of reconstructing satellite observations in cloudy weather based on terrestrial observations is confirmed. In other words, having the snow depth at the stations makes it possible to calculate the NDSI accurately. Snow depth has the most significant impact on the amount of NDSI. At the same time, climatic parameters have the most negligible effect. By observing the NDSI values during the study time in snow metering stations, the performance of the proposed method can be evaluated. After performing two-stage cloud effect corrections, the statistical relationship between the cumulative amount of NDSI corrected and the cumulative amount of total snowfall was assessed. In this case, while increasing the coefficient of explanation from  $R^2 = 0.63$  to  $R^2 = 0.81$ , the value of RMSE also decreased by 0.17. These values confirm the efficiency of the proposed method and the effect of temporal-spatial corrections on more accurate snowfall estimation in the study area.

## Conclusions

By examining the relationship between NDSI and the cumulative snowfall from January to March 2019, it was found that replacing primary satellite images with corrected images has increased the coefficient of determination ( $R^2$ ) from 0.63 to 0.81. This indicates an improvement in the accuracy of satellite snow metering using the present method. According to the acceptable results of the present study, the above method can be used as a quick and reliable supplement for field snow measurement in areas where depth measurement may not be performed completely and accurately. Because in some parts of Iran, due to equipment or operator error technical defects, ground depth measurement is not recorded correctly, satellite images with two-phase cloud correction will reduce mistakes in upstream models, such as climate forecasting models.

## Acknowledgment

The authors thank the support and assistance of Bu-Ali Sina University and the National Meteorological Organization.

## References

- 1- Al-Hosseini Al-Madrasi, A., Hatami, J., Sarkargar, A., 2016. Calculation of physical characteristics of snow using differential radar interferometric technique and TerraSAR-X and MODIS sensor images. *Remote sensing and geographic information system in natural resources*. Volume 7, Number 2, Summer 2016, pp. 59-76. (In Persian).
- 2- Gao, Y., Xie, H., Yao, T. and Xue, C. 2010. Integrated assessment on multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of MODIS snow cover products of the Pacific Northwest USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1662-1675. Doi: 10.1016/j.rse.2010.02.017.
- 3- Tabari, H., Marofi, S., Zare Abiane, H., Amiri Chayjan, R., Sharifi, M., & Akhondali, A. M. 2010. Comparison of Non-Linear Regression and Computational Intelligence Methods in Estimating Spatial Distribution of Snow Water Equivalent in Karoon Upstream. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 13(50), 29-40. Dor: 20.1001.1.24763594.1388.13.50.3.7. (In Persian).
- 4- Marofi. S., Tabari. H., Zare Abyaneh. H., Sharifi. M. R. and Akhondali. A.. 2009. Zoning of snow water equivalent in an mountain subbasin of Karun using GIS, Case study, Samsami basin. *Agricultural Sciences & Natural Resources*, 16(3), 1-11. (In Persian).



## اصلاح اثرات ابرناکی بر محصول پوشش برف روزانه سنجنده مودیس (مطالعه موردی: شمال غرب ایران)

راضیه ابراهیمی<sup>۱</sup>، صفر معروفی<sup>۲\*</sup> و حسین ترابزاده خراسانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

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

۳-استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

## چکیده

با توجه به دشواری تهیه داده‌های برف‌سنجی به صورت میدانی، سنسور از دور به عنوان یک راه‌حل سریع و مقرون به صرفه در تهیه این داده‌ها و ارائه آن‌ها به مدل‌های اقلیمی شناخته شده است. یکی از مشکلات استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در برف‌سنجی، وجود ابر در این تصاویر است که موجب گسستگی زمانی-مکانی داده‌ها، و در نتیجه کاهش کارایی آن‌ها می‌شود. هدف از این تحقیق، ارائه چارچوب مناسبی برای حذف اثر ابر در تصاویر ماهواره‌ای و تولید داده‌های برف‌سنجی ماهواره‌ای بدون مزاحمت ابر است. بدین منظور با کمک داده‌های زمینی عمق برف، متوسط دما و بارش روزانه در ایستگاه‌های زمینی برف‌سنجی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و بخش غربی حوضه دریای مازندران، تصاویر روزانه MOD10A1 سنجنده مودیس در دو مرحله به صورت زمانی-مکانی مورد پردازش قرار گرفتند. نتایج مدل رگرسیون خطی چند متغیره نشان داد که مقادیر شاخص تفاضلی نرمال شده برف (NDSI) با داده‌های زمینی ایستگاه‌های برف‌سنجی موجود همبستگی بالا ( $r=0.85$  و  $RMSE=0.47$ ) دارد. بر همین اساس مناطق پوشیده شده با ابر در تصاویر مودیس با مقادیر حاصل از مدل جایگزین شدند. در مرحله دوم، با کمک روش‌های زمین آماری و با لحاظ کردن موقعیت مکانی هر پیکسل، مقادیر جدید NDSI محاسبه شد. با بررسی رابطه بین NDSI و میزان بارش تجمعی برف در بازه زمانی دی تا اسفند ماه سال ۱۳۹۷، مشخص شد که جایگزینی تصاویر ماهواره‌ای اولیه با تصاویر تصحیح شده موجب افزایش ضریب تبیین ( $R^2$ ) از ۰/۶۳ به ۰/۸۱ شده است. این امر نشان‌دهنده بهبود دقت در برف‌سنجی ماهواره‌ای با استفاده از روش حاضر است.

کلید واژه‌ها: برف‌سنجی، ایستگاه‌های زمینی، رگرسیون خطی، تصحیح تصاویر ماهواره‌ای، گسستگی مکانی-زمانی.

## مقدمه

آب‌های زیرزمینی کشور از ذوب برف تأمین می‌شود (Al-Hosseini et al., 2016). سالانه مقادیر زیادی از نواحی شمالی، شمال غرب و غرب ایران زیر پوشش برف قرار می‌گیرد که منطقه مورد مطالعه یکی از این نواحی است (Gerland et al., 1999; Adeli, 2005). بیشتر مناطق برف‌گیر ایران در ارتفاعات کوهستانی قرار دارند که در این مناطق شبکه ایستگاه‌های دیده‌بانی و اندازه‌گیری برف توسعه نیافته است، در نتیجه انباشت و ذوب برف در این مناطق به طور دقیق و گسترده اندازه‌گیری نمی‌شود. نبود اطلاعات کافی و صحیح از ذخایر برفی موجب می‌شود که نه تنها از آب حاصل از ذوب برف استفاده بهینه نشود، بلکه خسارت‌های جبران‌ناپذیری به دلیل ایجاد سیل در پی داشته باشد. بنابراین پایش مکانی و زمانی سطوح پوشیده شده از برف از اهمیت زیادی برخوردار است.

محصولات پوشش برف سنجنده نوری مودیس، با تکنولوژی تصویری با وضوح متوسط، به‌طور گسترده‌ای در پایش منطقه‌ای

در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک جهان، از جمله ایران، برف انباشته شده در برف‌چال‌ها، ذخیره قابل توجهی از منابع آب را تحت عنوان آب معادل برف در سطوح کوهستانی حوضه ایجاد می‌کند (Tabari et al., 2010). ذخیره یادشده در تأمین دبی پایه رودخانه‌های دائمی و تحت شرایط خاص نیز در کنترل رژیم سیلابی رودخانه‌ها در پایین دست نقش مهمی ایفا می‌نماید، زیرا برف قبل از تبدیل شدن به رواناب به شکل توده‌ای جامد و سرد تا مدت‌ها در حوضه باقی می‌ماند. همچنین به دلیل اینکه در بسیاری از موارد، آب قابل دسترس برای مصارف کشاورزی و صنعتی از مناطق کوهستانی، که دارای بارش بیشتری هستند، تأمین می‌گردد، آگاهی از میزان سطح پوشش برف و حجم ذخیره آن از اساسی‌ترین نیازهای مدیران منابع آب به شمار می‌آید (Marofi et al., 2009). طبق بررسی‌های انجام شده، حدود ۶۰ درصد آب‌های سطحی و ۵۷ درصد

بودن منطقه در طول دوره برفی بوده است. Hall et al. (2010) یک روش جدید به منظور اصلاح (پر کردن) فضاها و اختلال‌های ابری CGF (Cloud-gap-filled) ارائه کرده است که ماندگاری ابر را از روز جاری تا روزهای گذشته ردیابی می‌کند و از نزدیکترین اطلاعات در یک دوره برای اصلاح شکاف‌های ابری در تصویر استفاده می‌کند. این روش روی محصول مدل شبکه‌ای پوشش برف روزانه MOD10C1 سنجنده مودیس در آمریکای شمالی آزمایش شد. نتایج نشان داد، زمانی که روزهای قبلی در نظر گرفته می‌شود، درصد سلول‌های شبکه قابل مشاهده و بدون تیرگی ابر، به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

Gao et al. (2011) به یک روش جدید برای کاهش موثر تاریکی ناشی از ابر با استفاده از نزدیکترین مشاهده پیکسل بدون ابر در فاصله زمانی سه تا پنج روز گذشته هر پیکسل استفاده کردند و دریافته‌اند اگر این فاصله زمانی را بیشتر کنند، این روش می‌تواند ۳۰ تا ۳۷ درصد دقت پر کردن پیکسل‌های ابری را بالا ببرد. Li et al. (2017) از محصول پوشش برف روزانه مودیس برای تجزیه و تحلیل وضعیت کوهستان هندوان استفاده کردند. آن‌ها از یک روش وزن‌دهی هم‌زمان مکانی- زمانی برای حل ناپیوستگی ناشی از ابرها استفاده و با دقت ۹۳ درصد پوشش ابری را حذف کردند. Jing et al. (2019) یک چهارچوب دو مرحله‌ای زمانی- مکانی برای حذف محصولات برفی MODISC6 در دو ماهواره ترا و آکوا ارائه دادند و دریافته‌اند که تغییرات عمدتاً توسط دما کنترل می‌شوند. نتایج حاصل از حذف ابر دارای دقت کلی ۹۱/۴۸ درصد و میزان خطای ۳/۸۸ بود.

محصولات برف در حالت معمول، با مشخص کردن کد مخصوص برف میزان خطاهای استخراج پوشش برف را به حداقل رسانده و امکان استخراج دقیق مساحت نواحی پوشیده از برف در طی دوره‌های مورد مطالعه را فراهم می‌نمایند. اما وجود ابر در برخی از روزها موجب دشواری در تشخیص وجود و یا عدم وجود برف در سطح زمین می‌شود و این موضوع مورد توجه این پژوهش می‌باشد.

هدف اصلی از این پژوهش، ارائه روش مناسب در برآورد پیکسل‌های ابری تصاویر روزانه پوشش برف سنجنده مودیس، با توجه به نقشه رقومی ارتفاعی، داده‌های متوسط دمای روزانه، بارش روزانه، داده‌های ثبت شده زمینی عمق برف و همچنین تعیین توزیع مکانی- زمانی برف به ویژه در مناطق صعب‌العبور بدون آمار و توام با ابرناکی می‌باشد. با استفاده از تصاویر بازسازی شده، اطمینان و دقت بیشتری در برآورد سطح پوشیده شده از برف تأمین می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، ناحیه وسیع حوضه آبریز دریاچه ارومیه و بخش غربی حوضه دریای مازندران به عنوان منطقه مورد مطالعه در شکل

پوشش برف، مدل‌سازی چرخه هیدرولوژیکی عمومی، کالیبراسیون، اعتبارسنجی و ارزیابی داده‌ها استفاده شده است (Lopez et al., 2008; Pu et al., 2007; Rodell; Brown et al., 2007). یکی از موانع اصلی در تشخیص برف توسط سنجنش از دور نوری، ابرناکی تصاویر است. وجود ابر در زمان تصویربرداری مانع رسیدن نور خورشید به سطح زمین شده و هیچ اطلاعاتی از سطح زمین در طول موج‌های کوتاه به سنجنده نخواهد رسید. مجموعه‌ای از روش‌ها برای کاهش تیرگی ابر در محصولات پوشش برف مودیس، مانند تغییر ماسک ابر (Hall et al., 2002)، جدا کردن پیکسل‌های پوشیده از ابر (Gao et al., 2010)، استفاده از فیلتر مکانی یا زمانی (Blöschl و Parajka, 2006)، ترکیب محصولات چند روزه ثابت یا انعطاف‌پذیر (Houborg et al., 2007)، استفاده از اطلاعات چند حس‌گر ارائه شده است (Liang et al., 2008). ارزیابی یکپارچه‌ای که در زمینه روش‌های کاهش و تصحیح پیکسل‌های ابری انجام شده، نشان می‌دهد که اگرچه همه این روش‌ها به‌ویژه در کاهش تیرگی ابر بسیار مفید هستند، ولی با عدم اطمینان همراه بوده و منجر به کاهش وضوح مکانی یا زمانی به درجات مختلف می‌شوند (Gao et al., 2010).

Ghanbarpour et al. (2005) تغییرات زمانی و مکانی سطح پوشش برف در حوضه کارون را با استفاده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و روش هواشناسی مورد بررسی قرار دادند و با رتبه‌بندی سطوح حوضه بر اساس اطلاعات مکانی حاصل از مقدار سهم ذوب برف در رواناب و سطوح، فراوانی و پتانسیل انباشت و ماندگاری سطح برف را انجام دادند.

Azizi et al. (2017) تغییرات زمانی- مکانی پوشش برف دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که از نظر ارتفاعی پوشش برف در حال پسروی می‌باشد. همچنین مقایسه وضعیت پوشش برف با شرایط دما و بارش نشان داد در بیشتر مواقع، ناهنجاری‌های منفی پوشش برف با ناهنجاری‌های مثبت دما و منفی بارش تطابق دارد.

Lee et al. (2005) نقشه‌های برف حاصل از سنجنده مودیس را با نقشه‌های تهیه شده توسط مرکز سنجنش از دور هیدرولوژیکی ملی آمریکا (National Operational Hydrologic Remote Sensing Center) در بالادست آبگیر ریوگراند (Rio Grand) مورد مقایسه قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که هر دو این نقشه‌ها از شرایط ابری متأثر شده و خطای اصلی در هر دو مورد، وجود ابر بوده است و اشاره داشتند که نقشه‌های تهیه شده از مودیس دقت بهتری دارند. Tekeli et al. (2005) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در حوضه آبخیز کراسو (Karasu) ترکیه، نقشه سطح پوشیده شده از برف را با نقشه‌های حاصل از برداشت زمینی مقایسه نموده و عنوان کردند که علت اصلی اختلافات، ابری

تبریز متفاوت است (Adelzadeh, 2015). افزایش تقاضا برای آب به دلیل افزایش جمعیت و بروز خشکسالی‌های متوالی ایجاب می‌کند که به مدیریت صحیح منابع آبی این منطقه بیش از پیش توجه شود (Mirabassi and Din Pajoh, 2013).

در این تحقیق، ابتدا به بیان ارتباط بین مقادیر NDSI با عمق برف، دمای متوسط، میزان بارش و ارتفاع ایستگاه‌های زمینی پرداخته شده است. سپس از این ارتباط، برای از بین بردن تیرگی حاصل از پوشش ابری پیکسل‌های فاقد داده‌ی NDSI بهره گرفته شده و تصویر جدیدی ایجاد می‌گردد که فاقد داده‌ی ابری است.

#### داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، داده‌های دمای متوسط روزانه و بارش روزانه در بازه زمانی مورد مطالعه (دی تا اسفند ماه سال ۱۳۹۷) از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. به‌علاوه، از دو نوع داده میدانی و ماهواره‌ای استفاده شده است تا ضمن ارزیابی ارتباط بین برف‌سنجی در ایستگاه‌های زمینی با داده‌های NDSI، امکان اعتبارسنجی مدل نیز فراهم شود.

(۱) در نظر گرفته شد. این محدوده شامل استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، اردبیل، زنجان و قسمت شمالی استان کردستان می‌باشد. از جمله ویژگی‌های این محدوده می‌توان به کوهستانی بودن، بارش زیاد برف و همچنین وجود تعداد ایستگاه‌های برف‌سنجی متراکم‌تر (۲۲ ایستگاه) نسبت به دیگر نقاط کشور اشاره کرد. این منطقه در مختصات جغرافیایی  $38^{\circ}59'43''$  تا  $39^{\circ}14'28''$  طول شرقی و  $48^{\circ}48'43''$  تا  $49^{\circ}44'10''$  عرض شمالی قرار دارد، که از شمال با کشورهای آذربایجان و ارمنستان و از غرب با کشورهای ترکیه و عراق دارای مرز مشترک است. ارتفاعات و ناهمواری‌های این منطقه به دو دسته کوه‌های نسبتاً کم ارتفاع و کوه‌های مرتفع تقسیم می‌شود (Asakereh and Seifipour, 2012).

منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک مدیترانه‌ای است و از نظر کشاورزی و تولیدات گیاهی نقش مهمی در اقتصاد و امنیت غذایی کشور دارد. بارش سالانه در منطقه مورد مطالعه از ۲۱۴ میلی‌متر (جلفا) تا ۴۲۸ میلی‌متر (مهاباد) متغیر است (Mirabassi and Din Pajoh, 2013). متوسط دمای سالانه در این منطقه از ۱۱ درجه سانتی‌گراد در شهرستان سقز تا ۱۲/۸ درجه سانتیگراد در

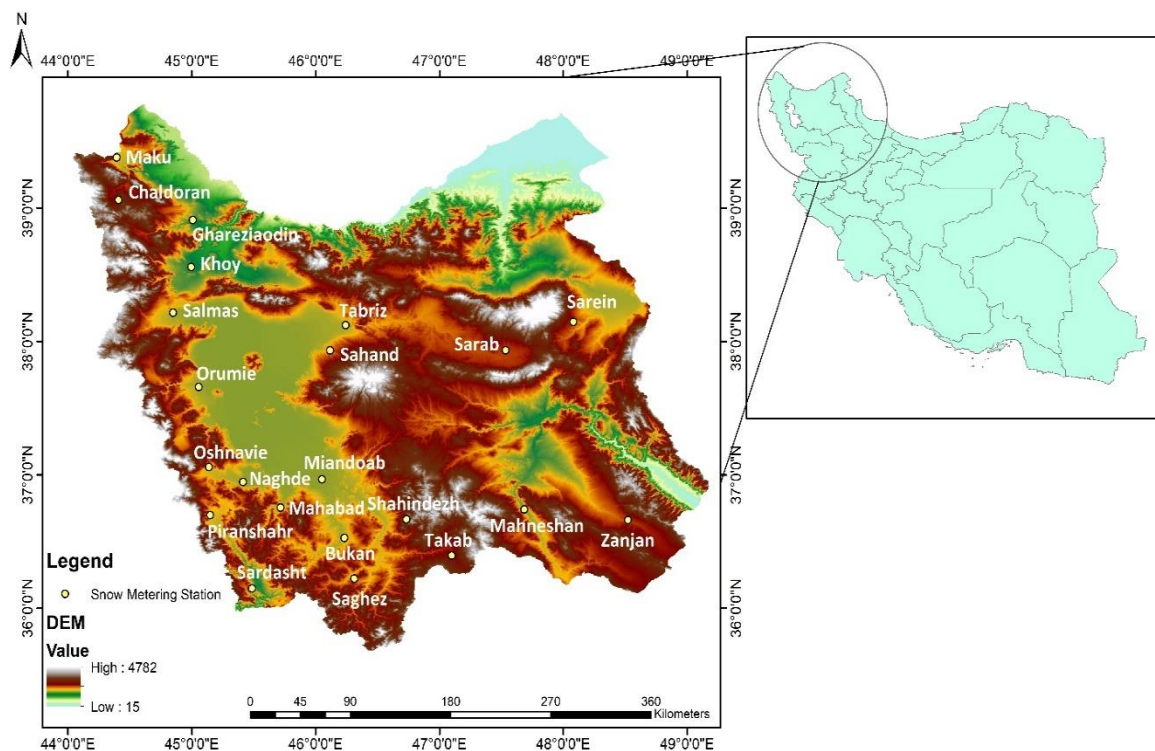


Fig. 1- The study area  
شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

**داده‌های زمینی برف‌سنجی**

داده‌های مشاهداتی از ۲۲ ایستگاه برف‌سنجی در منطقه که عمق برف (میلی‌متر)، دمای متوسط (درجه سلسیوس) و بارش (میلی‌متر) را به صورت روزانه در بازه زمانی اول دی تا انتهای اسفند ماه سال ۱۳۹۷ از سازمان هواشناسی کشور برداشت کرده‌اند، در جدول (۱) تهیه شده است. توزیع مکانی این ایستگاه‌ها ارزیابی شده است و انتظار می‌رود تغییرات میزان بارش برف را در نقاط مختلف منطقه نشان دهد (Ansari and Marofi, 2017).

**داده‌های اقلیمی**

در این مطالعه به منظور ارزیابی تصاویر و از بین بردن پوشش ابری از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی که خلاصه‌ای از آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است، استفاده گردید. همچنین با توجه به روند موجود در داده‌های بلند مدت متوسط دما روزانه، بارش روزانه و عمق برف روزانه، عمق برف در ایستگاه‌های برف‌سنجی با ارتفاع رابطه مستقیم و با دما ارتباط عکس دارد (Ebrahimi et al., 2016).

**تصاویر سطح پوشش برف سنجنده مودیس**

سنجنده مودیس یکی از پنج سنجنده مستقر روی ماهواره ترا می‌باشد که در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ به فضا پرتاب گردید. این سنجنده دارای قدرت تفکیک زمانی بالا (یک تا دو روز) و قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر است. این سنجنده به صورت نواری، منطقه‌ای به عرض ۲۳۳۰ کیلومتر را از شمال به جنوب تصویربرداری می‌کند. تصاویر این سنجنده در ۳۶ باند طیفی از طول موج ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرون ثبت می‌شوند. بنابراین مودیس دارای خصوصیات مناسب برای مطالعه‌های برف‌سنجی می‌باشد (Wang et al., 2008). منحنی بازتاب طیفی برف نشان‌گر انعکاس بالای برف در محدوده مرئی و انعکاس پایین در محدوده مادون قرمز نزدیک می‌باشد. بنابراین با توجه به جدایی طیفی ابر و برف شکل (۲)، اولین بار Hall et al. (1995) شاخص تفاضلی نرمال شده برف (NDSI) را به منظور تعیین سطح برف در تصاویر ماهواره‌ای ارائه نمودند. بر همین اساس، سازمان فضایی ایالات متحده (NASA) مبادرت به تولید نقشه‌های این شاخص در بازه‌های زمانی مختلف و در قالب محصولات مختلف می‌نماید.

**جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های زمینی برف‌سنجی****Table 1- Specifications of snow gauge stations**

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Ghareziaodin	45.00	38.91	1170.9	Bukan	46.23	36.52	1386.1
Sahand	46.11	37.93	1641	Chaldoran	44.40	39.06	1888.5
Salmas	44.84	38.21	1339.3	Khoy	44.99	38.55	1103.4
Saghez	46.31	36.22	1522.8	Mahabad	45.71	36.75	1351.8
Sarab	47.53	37.93	1682	Mahnesan	47.68	36.74	1284.5
Sardasht	45.48	36.14	1556.8	Maku	44.39	39.37	1411.2
Sarein	48.08	38.14	1658.3	Miandoab	46.05	36.96	1300
Shahindezh	46.73	36.66	1395	Naghde	45.41	36.96	1307
Tabriz	46.24	38.12	1361	Orumie	45.05	37.65	1328
Takab	47.09	36.39	1817.2	Oshnavie	45.13	37.05	1415.9
Zanjan	48.52	36.66	1659.4	Piranshahr	45.14	36.69	1443.5

**جدول ۲- مقادیر بارش، عمق برف و دمای متوسط ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه سال ۱۳۹۷****Table 2- Mean precipitation, snow depth and average temperature of the meteorological stations in 2019**

Average temperature (°C)			Snow depth (mm)			Precipitation (mm)		
January	February	March	January	February	March	January	February	March
2.69	2.72	2.79	2202.86	2161.94	2155.12	2519.35	2482.31	2466.87

داده‌های برف و یخ ناسا (National Snow and Ice Data Center) NSIDC استخراج شده‌اند. با توجه به اینکه قسمت اعظم بارش برف در استان‌های مورد مطالعه، در اوایل دی تا اواخر اسفند اتفاق می‌افتد و همچنین به دلیل ماندگاری پوشش برف این ناحیه، تصاویر دریافتی مربوط به بازه زمانی سه‌ماهه (از اول دی‌ماه تا آخر اسفندماه سال ۱۳۹۷) مورد پردازش قرار گرفته است. برای انجام آنالیزهای مربوطه در محیط GIS، اولین گام یکسان‌سازی مرجع جغرافیایی داده‌ها می‌باشد، تا بتوان آن‌ها را با هم مقایسه نمود. بنابراین سیستم تصویر سنجنده مودیس مورد استفاده قرار گرفت (Rayegani et al., 2008).

از آنجا که موقعیت ابرها به سرعت تغییر می‌کنند و معمولاً هر روز جابه‌جا می‌شوند، از تصاویر و داده‌های روزانه برای برآورد سطح پوشش برف استفاده می‌شود. در این پژوهش از محصول ( Terra MOD10A1 (Level-3 daily snow cover product MODIS نسخه پنجم، از سری محصولات سطح سوم سنجنده مودیس، استفاده شده است. این محصول حاوی اطلاعات استاندارد پوشش برف سنجنده مودیس است که بیشترین تقاضا و درخواست‌ها را دارد (Hall et al., 2010). پیکسل‌های موجود در تصاویر MOD10A1 با اعداد بین صفر تا ۲۵۵ و بر اساس جدول (۳) برچسب‌گذاری شده‌اند. محصولات سنجنده مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و با فرمت HDF (Hierarchical Data Format) از پایگاه ملی

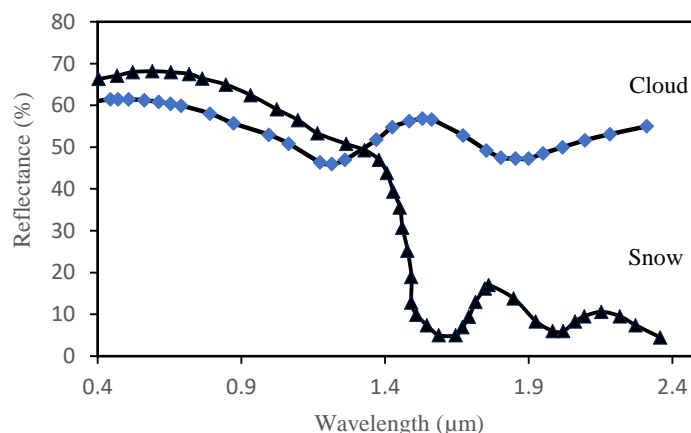


Fig. 2- Snow and cloud spectral reflection curves (Johnson, 2000)  
شکل ۲- منحنی انعکاس طیفی برف و ابر (Jensen et al., 2004)

جدول ۳- راهنمای کدهای موجود در تصاویر NDSI مودیس (محصول MOD10A1)  
Table 3- Code guide in the MODIS NDSI images (MOD10A1 product)

Definition	Code
Percentage of snow cover	0-100
Defective data	200
Uncategorized	201
Night	211
Landlocked waters	237
Ocean	239
Cloud	250
Other complications	255



## روش تحقیق

درجه تطابق بین داده‌های ماهواره‌ای (NDSI) و ایستگاه‌ها، می‌تواند برای اصلاح و پر کردن پیکسل‌های ابری مورد استفاده قرار گیرد (Azizi et al., 2017 و Parajka and Blöschl, 2006). برای استخراج پوشش برف منطقه مورد مطالعه، کد عددی سطوح برفی، ابری و نواحی بدون برف مشخص شده و از یکدیگر تفکیک شد.

روش تحقیق شامل دو مرحله آماده‌سازی داده‌ها و پردازش اصلی در شکل (۳) آورده شده است. در مرحله آماده‌سازی داده‌های زمینی، تمامی داده‌ها و پارامترهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی، شامل دمای متوسط روزانه، میزان بارش روزانه و ارتفاع از سطح دریا، نرمال‌سازی شدند تا اثر تغییر مقیاس در مقایسات بعدی به حداقل برسد. این نرمال‌سازی برای پارامترهای فوق با استفاده از حداقل و حداکثر داده‌های روزانه بارش و متوسط دما در دوره زمانی مورد مطالعه و برای داده‌های ارتفاع، حداقل و حداکثر ارتفاع از سطح دریا در منطقه انجام پذیرفت. نمونه‌ای از تصویر خام سنجنده مودیس در شکل (۴) آمده است. برای آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای، ابتدا با ایجاد یک ماسک از منطقه، پیکسل‌های اضافی حذف شد. پس از طبقه‌بندی تصاویر، با کمک جدول (۳)، هرگونه داده غیر برف نیز کنار گذاشته شد. بدین ترتیب NDSI روزانه در مناطق فاقد ابر به صورت تصاویر جداگانه آماده شد. همچنین ماسکی از مناطق ابری در هر روز ایجاد شد که در مراحل بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. به دلیل اینکه داده‌های عمق برف، دما و بارش به صورت نقطه‌ای و تنها روی ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری و ثبت شده است، از روش درونیایی Kriging برای داده‌های بارش و عمق برف و روش IDW برای داده دمایی در محیط GIS استفاده شد. Ghosjvand et al. (2012) تا اطلاعات لازم برای تمامی پیکسل‌های منطقه (۹۸۴×۱۲۳۴) فراهم گردد. بدین ترتیب ۲۶۷ نقشه (۸۹ نقشه دمای متوسط روزانه، ۸۹ نقشه میزان بارش روزانه، ۸۹ نقشه عمق برف روزانه) در فاصله زمانی ۹۷/۱۰/۰۱ تا ۹۷/۱۲/۲۹ تهیه گردید.

در مرحله اول پردازش، تاریخ‌هایی که داده‌های زمینی عمق برف در هر ایستگاه برداشت شده و تصویر آن منطقه نیز فاقد ابر بوده است مشخص شد که این مجموعه شامل ۱۹۴۰۴ رکورد اطلاعات از ۲۲ ایستگاه در تاریخ‌های مختلف است. به منظور بررسی ارتباط آماری

داده‌ها در ایستگاه‌های منتخب، از روش رگرسیون چند متغیره خطی Kuter et al. (2018) در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. در محاسبه رگرسیون، مقدار NDSI به عنوان متغیر وابسته و سایر پارامترها شامل عمق برف، دمای متوسط روزانه، میزان بارش و ارتفاع ایستگاه، به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. همچنین ۳۰ درصد از داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل کنار گذاشته شد. دو معیار ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) برای کنترل میزان صحت رابطه رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفتند. در صورت عدم تأیید اعتبارسنجی، ایستگاه‌های منتخب دوباره پالایش شده و رگرسیون جدید محاسبه می‌شود. بدین منظور در هر مرحله شرایط پذیرش ایستگاه‌های منتخب سخت‌گیرانه‌تر می‌شود و به دلیل نقایص موجود در داده‌های برف‌سنجی تنها از ایستگاه‌هایی با قابلیت اطمینان بالا و زمان‌هایی که اندازه‌گیری زمینی انجام شده است، در این مرحله استفاده می‌شود. پس از تأیید اعتبارسنجی، رابطه رگرسیونی حاصل از پیکسل‌های سالم و بدون ابر در تصاویر، برای مدل‌سازی NDSI پیکسل‌های ابری به کار گرفته شد. بدین ترتیب تصاویر مدل‌سازی شده NDSI به صورت روزانه، حتی در روزهایی که برف‌سنجی زمینی ناقص بوده، تولید شده‌اند.

اگر چه فرایند مرحله قبل موجب تکمیل داده‌های برف‌سنجی و پیوستگی در بعد زمان می‌شود، اما اختلاف NDSI مدل شده و ثبت شده منجر به عدم یکنواختی در داده‌های جدید می‌شود. برای رفع این مشکل، مرحله دوم پردازش داده‌ها انجام می‌شود تا با توجه به موقعیت مکانی هر نقطه و همسایگی‌های آن، به پیوستگی مکانی در تصاویر نیز دست یافت. در این مرحله که با کدنویسی در محیط MATLAB صورت گرفت، از روش میانگین متحرک وزن‌دار (Weighted Moving Average - WMA) در قالب یک فرایند تکراری با ۲۴ پیکسل مجاور در همسایگی استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا با کمک ماسک ابر، پیکسل‌های روی مرز ابر شناسایی شده و مقدار NDSI مدل شده آن‌ها بر اساس فاصله از همسایگان اطرافشان که فاقد ابر هستند تعدیل شد. سپس مرز ابر به سمت داخل حرکت کرده و پیکسل‌های جدید نیز به روال مشروح تعدیل می‌شوند. بدین ترتیب و پس از چند تکرار، تعدیل مکانی مناسب روی تمامی پیکسل‌هایی که قبلاً ابر بوده‌اند، اعمال می‌شود.

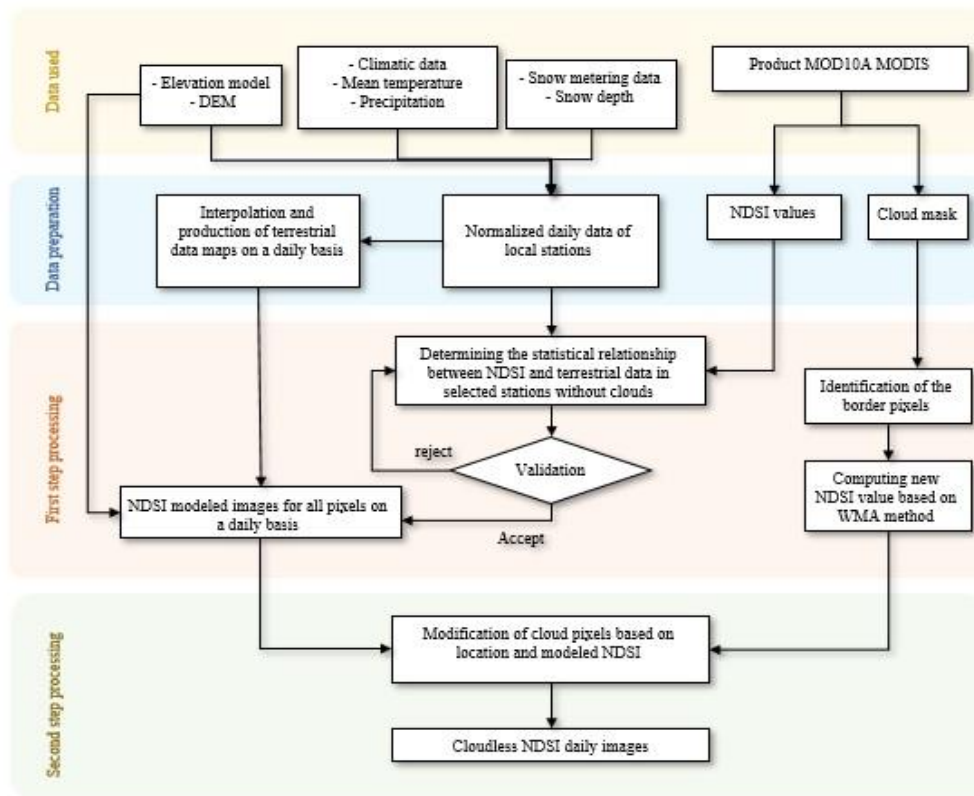


Fig. 3- General flowchart of the research method

شکل ۳- فلوچارت کلی از روش انجام تحقیق

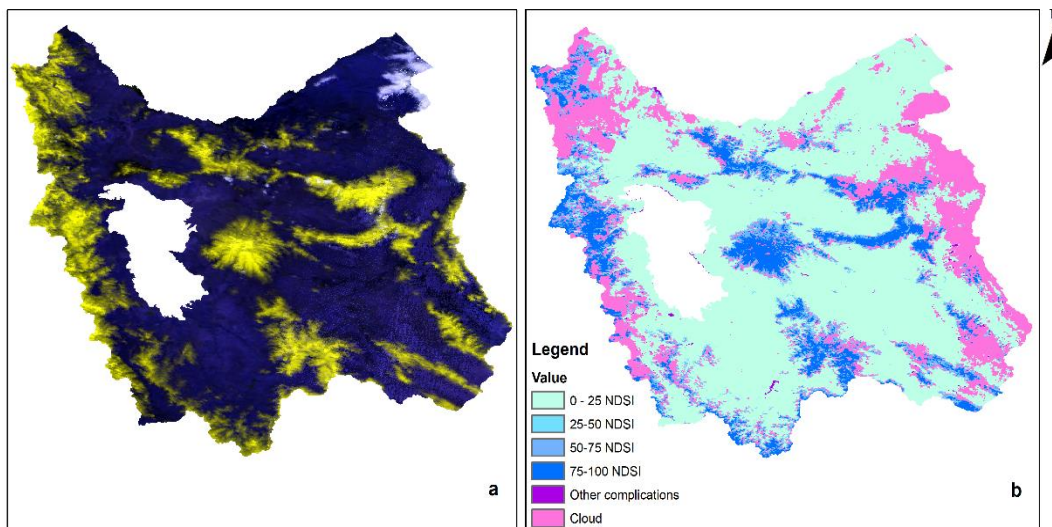


Fig. 4- (a) False color combination of 4-1-6 bands of the MODIS sensor on 2019/02/08, (b) MODIS snow product using the NDSI index

شکل ۴- (الف)- ترکیب رنگی کاذب باندهای ۱ و ۶ سنجنده مودیس در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۱۹، (ب)- محصول برف مودیس با استفاده از شاخص NDSI.

عمق برف در ایستگاه‌ها امکان محاسبه دقیق NDSI فراهم می‌شود. همانطور که انتظار می‌رفت، رابطه (۱) نشان می‌دهد که عمق برف بیشترین تأثیر را بر مقدار NDSI دارد. ضمن اینکه پارامترهای اقلیمی کمترین اثر را دارد.

نمونه‌ای از تصویر تصحیح شده بر مبنای رابطه (۱) در تاریخ ۹۷/۱۱/۱۹، در شکل شماره (۵-الف) ملاحظه می‌شود.

در مرحله دوم پردازش موقعیت هر پیکسل نیز در نظر گرفته شده است. این مسئله از آنجا نشأت می‌گیرد که پدیده بارش برف در بعد مکان به صورت پیوسته حادث می‌شود و احتمال حضور برف در پیکسل‌های مجاور تقریباً مشابه است. بنابراین، به منظور جلوگیری از گسستگی در تصاویر شبیه‌سازی شده برف، مقادیر حاصل شده از قبل با مقادیر پیکسل‌های اطراف خود تعدیل می‌شوند. نمونه‌ای از نتایج این مرحله در شکل (۵-ب) آمده است. طبیعی است که بیشترین تأثیر تصحیح مکانی مقدار NDSI در لبه‌های ابر مشاهده شود. به صورت کلی این تصحیحات بسیار کم است، اما موجب هماهنگی بیشتر مقادیر و پیوستگی منطقی‌تر داده‌ها می‌شود.

با مشاهده مقادیر NDSI طی زمان مورد مطالعه در ایستگاه‌های برف‌سنجی، می‌توان عملکرد روش پیشنهادی را ارزیابی نمود. به‌عنوان مثال در شکل (۶) وضعیت برف در ایستگاه سراب نشان داده شده است.

## نتایج و بحث

بررسی ارتباط آماری بین NDSI با مشاهدات ایستگاه‌های زمینی که به روش رگرسیون چندمتغیره خطی انجام شد، یک فرآیند تکراری است. متأسفانه برخی از داده‌های برف‌سنجی زمینی از دقت کافی برخوردار نیستند که دلیل آن را باید در شرایط سخت اندازه‌گیری، کمبود پرسنل و تجهیزات فنی، عدم آموزش کافی پرسنل و نبود مکانیسم نظارتی مطلوب جستجو کرد. از این رو دقت حاصل از اعتبار سنجی رابطه فوق در ابتدا قابل پذیرش نبود. پس از حذف ۵۶ داده مشکوک و تکرار مدل‌سازی، در مطلوب‌ترین حالت، رابطه (۱) به‌دست آمد:

$$NDSI = 1.11d_s - 0.02t + 0.02p + 0.04h \quad (1)$$

که در آن  $d_s$  عمق برف،  $t$  دمای متوسط روزانه،  $p$  میزان بارش و  $h$  ارتفاع ایستگاه می‌باشد. برای این مدل، ضریب همبستگی  $r=0.85$  و میزان خطا  $RMSE=0.047$  حاصل شد. این مقادیر نشان می‌دهند که مشاهدات برف‌سنجی ماهواره‌ای و زمینی با در نظر گرفتن پارامترهای اقلیمی (دما و بارش) و توپوگرافی، همبستگی بالایی دارند و امکان بازسازی مشاهدات ماهواره‌ای در زمان ابرناکی بر مبنای مشاهدات زمینی تأیید می‌گردد. به عبارت دیگر، با داشتن

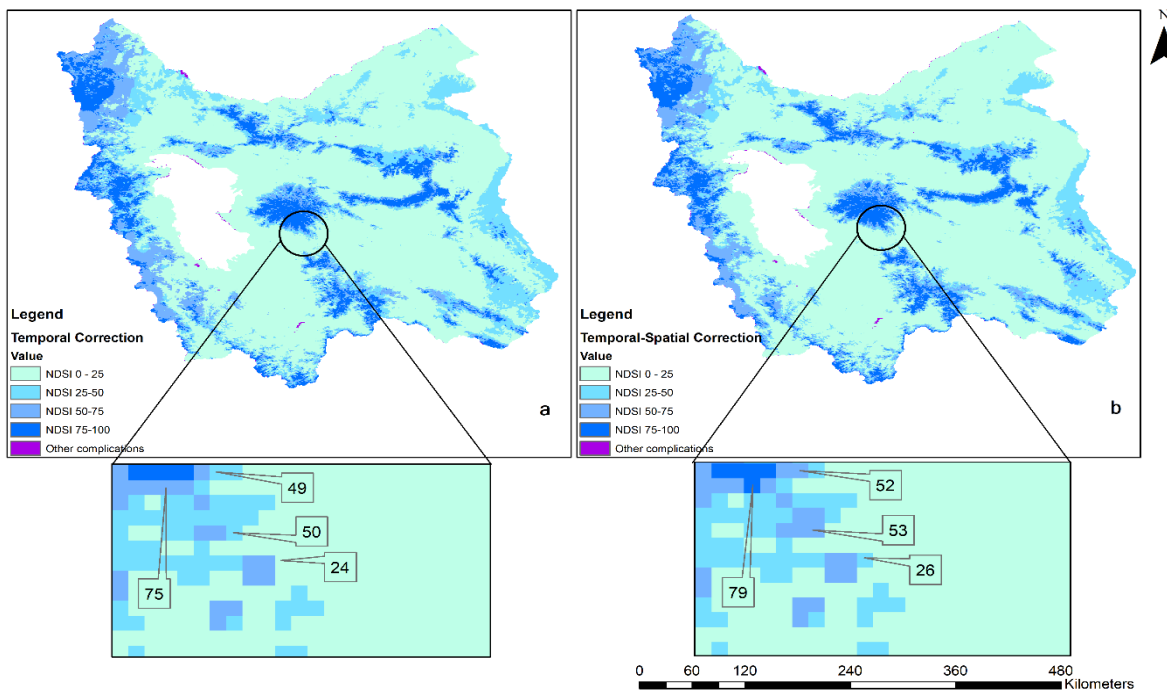
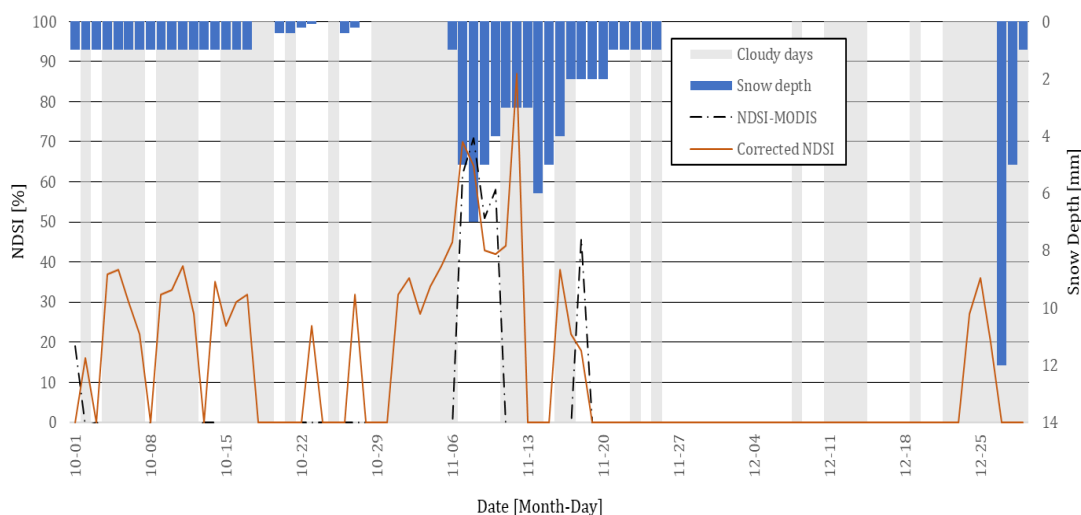


Fig. 5- (a) Comparison of correction results on 2019/02/08 in the first stage, (b) the second stage

شکل ۵- (الف) - مقایسه نتایج تصحیح در تاریخ ۹۷/۱۱/۱۹ در مرحله اول، (ب) - مرحله دوم



**Fig. 6- Comparison of changes in the MODIS NDSI in Sarab station before and after two-stage correction in the study period**

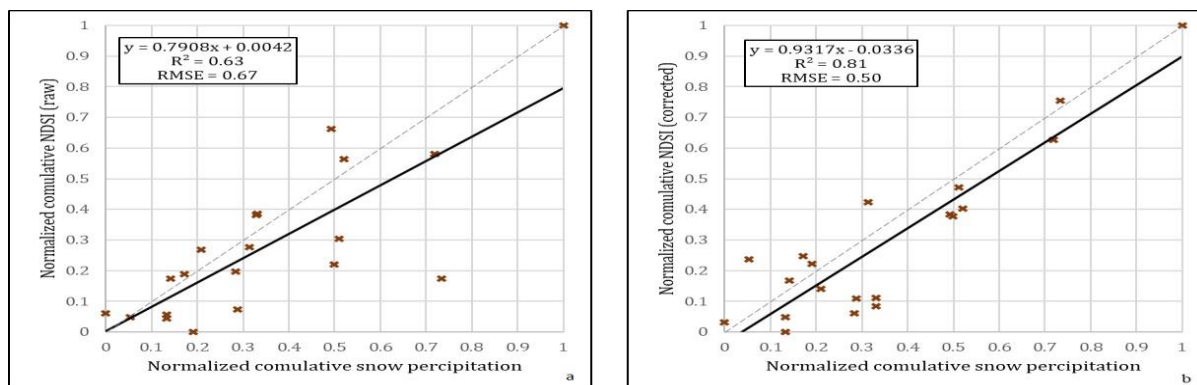
**شکل ۶- مقایسه تغییرات میزان NDSI مودیس در ایستگاه سراب قبل و بعد از تصحیح دو مرحله‌ای در بازه زمانی مورد مطالعه**

محاسبه و پس از نرمال‌سازی (بین صفر و یک) با مقدار تجمعی NDSI مقایسه شد. همان‌طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، در صورت استفاده مستقیم از محصول MOD10A1 مودیس، ارتباط سطح برف و بارش کلی به صورت تجمعی با ضریب تبیین  $R^2=0/63$  و میزان خطای  $RMSE=0/67$  بیان می‌شود. این مقادیر اگرچه ممکن است که برای برآورد کلی برف در برخی حوضه‌ها و طرح‌های مطالعاتی کفایت کند، اما برای استفاده در مدل‌های دقیق هیدرولوژیکی و انجام پیش‌بینی‌های اقلیمی مطلوب نیستند.

پس از انجام تصحیحات دومرحله‌ای اثر ابر، ارتباط آماری بین مقدار تجمعی NDSI تصحیح شده و مقدار تجمعی بارش کلی برف ارزیابی شد که نتیجه آن در شکل (۷-ب) قابل ملاحظه است. در این حالت ضمن افزایش ضریب تبیین از  $R^2=0/63$  به  $R^2=0/81$ ، مقدار  $RMSE$  نیز به اندازه  $0/17$  کاهش یافت. این مقادیر موید کارایی روش ارائه شده و تاثیر تصحیحات زمانی - مکانی بر تخمین درست‌تر میزان بارش برف در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای نمونه در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۱۳ که برف‌سنجی در منطقه انجام پذیرفته است و وجود برف روی زمین ثبت شده است، علی‌رغم ابری بودن تصویر ماهواره‌ای، NDSI در حدود ۸۰ درصد برای ایستگاه سراب ارائه گردیده است. بنابراین در روزهایی که ابر مانع از ثبت NDSI در تصاویر مودیس شده است (که با رنگ خاکستری در نمودار مشخص هستند)، مقادیر تصحیح شده به خوبی جایگزین شده‌اند. اگرچه هماهنگی بین میزان عمق برف و NDSI تصحیح شده دیده می‌شود، اما باید به این نکته توجه داشت که مقدار NDSI به درصد پوشش برف در هر پیکسل اشاره می‌کند و مستقیماً عمق برف را ارائه نمی‌دهد.

میزان بارش کلی برف در منطقه باید رابطه منطقی با پوشش برف در طول فصل مورد مطالعه داشته باشد. از این‌رو، به‌منظور بررسی اثر تصحیحات انجام شده در این تحقیق، میزان بارش کلی برف در ایستگاه‌های هواشناسی فعال در منطقه به صورت تجمعی



**Fig. 7- (a) Statistical comparison of total snowfall in the stations during study period with cumulative NDSI, without corrections, (b) after two-stage cloud corrections**

شکل ۷- (الف) - مقایسه آماری میزان بارش کلی برف در ایستگاه‌های موجود در منطقه در بازه مورد مطالعه با NDSI تجمعی، بدون انجام تصحیحات، (ب) - پس از تصحیحات دو مرحله‌ای ابر

کشور ایران به دلیل نقص فنی تجهیزات یا خطای اپراتور، عمق‌سنجی زمینی به‌درستی ثبت نمی‌شود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با تصحیح دومرحله‌ای ابر موجب کاهش خطاها در مدل‌های بالادستی، نظیر مدل‌های پیش‌بینی اقلیم، خواهد شد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت و کمک دانشگاه بوعلی سینا و سازمان هواشناسی کشور تشکر می‌کنند.

با بررسی رابطه بین NDSI و میزان بارش تجمعی برف در بازه زمانی دی تا اسفند ماه سال ۱۳۹۷، مشخص شد که جایگزینی تصاویر ماهواره‌ای اولیه با تصاویر تصحیح شده موجب افزایش ضریب تبیین ( $R^2$ ) از ۰/۶۳ به ۰/۸۱ شده است. این امر نشان‌دهنده بهبود دقت در برف‌سنجی ماهواره‌ای با استفاده از روش حاضر است. با توجه به نتایج قابل قبول پژوهش حاضر، روش فوق می‌تواند به عنوان مکملی سریع و قابل اطمینان برای برف‌سنجی میدانی در مناطقی که عمق‌سنجی ممکن است بصورت کامل و دقیق انجام نشده باشد، مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که در برخی از مناطق

### References

- 1- Adeli. A.. 2005. Climatology of Snowfall in Northwest of Iran (*Doctoral dissertation, MSc Thesis, GIS Center and Remote Sensing, Tabriz University*). (In Persian).
- 2- Adelzadeh. A.. 2015. Diagnostic of the temperature in Northwest Iran and its relationship with geopotential height. *Journal of Applied Climatology*, 2(2), 17-32. (In Persian).
- 3- Al-Hosseini Al-Madrasi. A.. Hatami. J.. Sarkargar. A.. 2016. Calculation of physical characteristics of snow using differential radar interferometric technique and TerraSAR-X and MODIS sensor images. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*. Volume 7, Number 2, Summer 2016, pp. 59-76. (In Persian).
- 4- Ansari, H. and Marofi, S., 2017. Streamflow Estimation in the Snowmelt Season Using Meteorological Factors (A Case Study: Lighvan Basin). *Water and Soil Science*, 27(3), pp.173-186. (In Persian).
- 5- Asakereh. H. and Seifipour. Z.. 2012. Spatial modeling of annual rainfall in Iran. *Geography and Development*, 10 (29 consecutive), pp.15-30. (In Persian).
- 6- Azizi. G.. Rahimi. M.. Mohammadi. H. and Khoshakhlagh. F.. 2017. Spatio-temporal variations of snow cover in the southern slope of central Alborz. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(3), 381-393 . Doi: 10.22059/JPHGR.2017.217393.1006943. (In Persian).

- 7- Brown. R., Derksen. C. and Wang. L.. 2007. Assessment of spring snow cover duration variability over northern Canada from satellite datasets. *Remote Sensing of Environment*. 111, 367–381. Doi: 10.1016/j.rse.2006.09.035.
- 8- Ebrahimi. R., Hamzeh. S. and Marofi. S.. 2016. Modeling the snow cover and snowmelt runoff using a combination of SRM hydrological model and satellite imagery. *Irrigation and Water Engineering*, 6(3), 66-77. (In Persian).
- 9- Gao. Y., Xie. H., Yao. T. and Xue. C.. 2010. Integrated assessment on multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of MODIS snow cover products of the Pacific Northwest USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1662-1675. Doi: 10.1016/j.rse.2010.02.017.
- 10- Gao. Y., Lu. N. and Yao. T.. 2011. Evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow cover product over the Pacific Northwest USA. *Journal of Hydrology*, 404(3-4), 157-165. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.04.026.
- 11- Gerland. S., Winther. J.G., Orbak. J.B., Liston. G.E., Oritsland. N.E., Blanco. A. and Ivanov. B.. 1999. Physical and Optical Properties of Snow Covering Arctic Tundra on Svalbard and Its Impact on Biota. International Conference on Snow Hydrology, US Army Corps of Engineers, *Cold Regions Research & Engineering Laboratory*, 13(1999): pp.2331-2343. Doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199910)13:14/15<2331::AID-HYP855>3.0.CO;2-W.
- 12- Ghanbarpour. M. R., Mohseni. S. M., Abbaspour. K., Saghafian. B. and Ahmadi. H.. 2005. An evaluation of regions effective in accumulation and persistence of snow cover and snowmelt contribution in runoff. *Natural Resources of Iran*, 58 (3): pp. 503-515. (In Persian).
- 13- Ghojavand. K., Taheri. S. H., NasiriSaleh. F. and Habibi. N. M.. 2012. A new method for the forecasting of Spatial Distribution of Precipitation and Temperature in Gharehsoo River Watershed. (In Persian).
- 14- Hall. D.K., Riggs. G.A. and Salomonson. V.V.. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, *Remote Sensing Environment*, 54, 127-140. Doi: 10.1016/0034-4257(95)00137-P.
- 15- Hall. D.K., Riggs. G.A., Salomonson. V.V., DiGirolamo. N.E. and Bayr. K.J.. 2002. MODIS snow-cover products, *Remote Sensing of Environment*, 83: pp. 181-194. Doi: 10.1016/S0034-4257(02)00095-0.
- 16- Hall. D. K., Riggs. G. A., Foster. J. L. and Kumar. S. V.. 2010. Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product. *Remote sensing of Environment*, 114(3), 496-503. Doi: 10.1016/j.rse.2009.10.007.
- 17- Houborg. R., Soegaard. H. and Boegh. E.. 2007. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Remote Sensing of Environment*. 106 (1) 39–58. Doi: 10.1016/j.rse.2006.07.016.
- 18- Jensen. R., Gatrell. J., Boulton. J. and Harper. B.. 2004. Using remote sensing and geographic information systems to study urban quality of life and urban forest amenities. *Ecology and Society*, 9(5).
- 19- Jing. Y., Shen. H., Li. X. and Guan. X.. 2019. A two-stage fusion framework to generate a spatio-temporally continuous MODIS NDSI product over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 11(19), 2261. Doi: 10.3390/rs11192261.
- 20- Kuter. S., Akyurek. Z. and Weber. G.W.. 2018. Retrieval of fractional snow covered area from MODIS data by multivariate adaptive regression spline, *Remote Sensing of Environment* 205 (2018) pp.236-252. Doi: 10.1016/j.rse.2017.11.021.

- 21- Lee. S., Klein. A. G. and Over. T. M.. 2005. A comparison of MODIS and NOHRSC snow-cover products for simulating streamflow using the Snowmelt Runoff Model. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(15), 2951-2972.
- 22- Liang. T., Dong Huang. X., Wu. C., Liu. X., Long Li. W., Gang Guo. Z. and Ren. J.. 2008. An application of MODIS data to snow cover monitoring in a pastoral area: A case study in Northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment* 112 (2008). pp.1514–1526. Doi: 10.1016/j.rse.2007.06.001.
- 23- Li. X., Fu. W., Shen. H., Huang. C. and Zhang. L.. 2017. Monitoring snow cover variability (2000–2014) in the Hengduan Mountains based on cloud-removed MODIS products with an adaptive spatio-temporal weighted method. *Journal of hydrology*, 551, 314-327. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.049.
- 24- Lopez. P., Sirguey. P. and Arnaud. Y.. 2008. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006). *Global and Planetary Change* 61, pp. 103–116. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.07.005.
- 25- Marofi. S., Tabari. H., Zare Abyaneh. H., Sharifi. M. R. and Akhoondali. A.. 2009. Zoning of snow water equivalent in an mountain subbasin of Karun using GIS, Case study, Samsami basin. *Agricultural Sciences & Natural Resources*, 16(3), 1-11. (In Persian).
- 26- Mirabassi. R. and Dinpazhooh. Y.. 2013. Trend analysis of precipitation of NW of Iran over the past half of the century. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(4), 59-73. (In Persian).
- 27- Parajka. J. and Blöschl. G.. 2006. Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10 (5), pp.679-689.
- 28- Pu. Z.X., Xu. L. and Salomonson. V.. 2007. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters* 34, pp. 6706-1–6706-6.
- 29- Rayegani. B., Khajeddin. S. J., Soltani Kopaei. S. J. and Barati.. 2008. Calculation of changes in snow cover maps prepared from MODIS satellite images in periods without images. *Journal of Soil and Water Sciences*, 12(44), 315-332. (In Persian).
- 30- Rodell. M. and Houser. P.R.. 2004. Updating a land surface model with MODIS derived snow cover. *Journal of Hydrometeorology* 5, pp. 1064–1075.
- 31- Tabari. H., Marofi. S., Zare Abiane. H., Amiri Chayjan. R., Sharifi. M. and Akhondali. A. M.. 2010. Comparison of Non-Linear Regression and Computational Intelligence Methods in Estimating Spatial Distribution of Snow Water Equivalent in Karoon Upstream. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 13(50), 29-40. Dor: 20.1001.1.24763594.1388.13.50.3.7. (In Persian).
- 32- Tekeli. A. E., Akyürek. Z., Şorman. A. A., Şensoy. A. and Şorman. A. Ü.. 2005. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment*, 97(2), 216-230. Doi: 10.1016/j.rse.2005.03.013.
- 33- Wang. X., Xie. H. and Liang. T.. 2008. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in Northern Xinjiang, China. *Remote Sensing of Environment*. 112 (2008) 1497–1513. Doi: 10.1016/j.rse.2007.05.016.





## Evaluation of the Performance of CANFIS, MLPNN, MLR and M5 Models in the Simulation of Meteorological Drought Index (Case Study: Kermanshah Synoptic Station)

H. Mazandarani Zadeh<sup>1\*</sup> and F. Khodabakhshi<sup>2</sup>

*1\** - Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. ([mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir](mailto:mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir))

*2* - PhD Student, Department of Water Engineering and Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 11 November 2022

Revised: 22 June 2022

Accepted: 26 June 2022

#### Keywords:

drought index, drought prediction, fuzzy-neural model, decision tree.

### TO CITE THIS ARTICLE:

Mazandarani zadeh, H., Khodabakhshi, F. (2024). 'Evaluation of the Performance of CANFIS, MLPNN, MLR and M5 Models in the Simulation of Meteorological Drought Index (Case Study: Kermanshah Synoptic Station)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 83-98. doi: 10.22055/jise.2023.42231.2046.

### Introduction

Drought is one of the most destructive phenomena in the world, especially in Iran. The timely prediction of drought and its severity can make it easier to take the necessary measures to combat this phenomenon. Different methods have been proposed to predict droughts; however, what matters is which method can make the predictions more accurate. Many researchers have compared the CANFIS model with other models such as neural networks and linear regression Malik and Kumar (2020b); Malik et al(2020a); Malik et al (2019), but it has not been tested against the M5 tree model. In this study, CANFIS, M5, MLPNN and MLR models have been used to predict drought in Kermanshah synoptic station, to enhance the accuracy of drought prediction by using a variety of modeling methods in addition to the influential variables of the SPI index.

### Methodology

This study examined the performance of the CANFIS fuzzy-neural model against other models, such as MLPNN, MLR, and M5 decision tree model, in predicting the SPI drought index in timescales of 12, 9, 6, 3, 1, and 24 months, for 70 months. The SPI index was developed by McKee and his colleagues at Colorado State University in 1993 (McKee et al., 1993). A lack of rainfall can be calculated based on the probability of occurrence over a range of times from one month to 48 months utilizing this index. The optimal input was selected by using autocorrelation and partial autocorrelation analyses. In order to determine the relationship between the PACE charts and significant time delays for each index, MINITAB software was utilized to extract the PACE charts and calculate the significant time delays. In the context of different scenarios, the relationship between these variables is assessed using the CANFIS, MLR, MLPNN, and M5 tree models, ensuring that 70% of the data were used for training, 15% were checked for validation, and 15% were used for testing. CANFIS, MLR, MLPNN, and M5 tree models were evaluated by root mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), standard deviation (MAD), coefficient of determination (R<sup>2</sup>), and visual interpretation using scatter diagrams. In order to implement the CANFIS and MLPNN fuzzy neural models, the NeuroSolution software was used, and in order to

model the M5 and MLR decision tree algorithms, the Weka software prepared by researchers at Wikato University was used.

### Results and discussion

Kermanshah station receives an annual rainfall of 429.6 mm. The rainfall at Kermanshah meteorological station has been lower than the average level for three consecutive periods. The first period is from 1951 to 1956, the second period is from 1958 to 1961, and the third period is from 1988 to 2015. The highest amount of decrease in 2021 was recorded at Kermanshah station with about 299 mm compared to the average and the highest amount of increase was recorded in 1969 with about 355 mm compared to the average. The SPI index with a period of 1 month has a lower coefficient of determination in all models than other indices. This can be explained by the relatively poor performance of the models during this period. In general, the SPI index has less fluctuations when its time scale increases; on the other hand, droughts with longer periods may show greater severity. As an example, the value of this index will be greater at the end of a six-month period of low rainfall compared with the same time and on a three-month basis since in the six-month scale, the effect of the entire period of low rainfall is considered, while in the three-month scale, only the effect of the two penultimate months is considered. Based on the scatter diagram, it can be seen that the performance of the models in the time step of one, three and six months was not suitable in the limit values; however, from the time step of nine months onwards, the conditions have improved in all the models and accurately simulate the behavior of the model.

### Conclusion

M5 decision trees with coefficients of determination equal to 0.93 and mean square errors equal to 0.248 performed better than other models. Furthermore, the mean square error of the CANFIS, MLR, and MLPNN models was 0.307, 0.399, and 0.312, respectively, indicating that the CANFIS neural-fuzzy network model performed better in predicting the drought index as compared with MLPNN and MLR. Based on statistical calculations and network evaluation indices, it was found that the choice of time step has a significant impact on the results of the modeling process. In all models, the correlation between observed drought and calculated drought was more acceptable when time steps were of 9 months or more. According to the results, the M5 tree model was recognized as the best model among the four investigated models based on all evaluation criteria. Additionally, the M5 tree model demonstrated a relatively high level of predictive capability by providing practical and understandable linear relationships that are easy to interpret. According to CANFIS network, which is based on fuzzy sets, the drought of Kermanshah climatic region was successfully predicted with relatively high reliability.

### Acknowledgment

The authors would like to thank the staff of the National Meteorological Organization for their assistance in providing the data for this research.

### References

- 1- Malik A, Kumar A, Salih S.Q, Kim S, Kim N.W, Yaseen, Z.M. and Singh, VP., 2020a Drought index prediction using advanced fuzzy logic model: Regional case study over Kumaon in India. *Journal PLoS*, 15(5), pp. 256-271.
- 2- Malik A. and Kumar A., 2020b Meteorological drought prediction using heuristic approaches based on effective drought index: a case study in Uttarakhand. *Arabgeo* 13(2), pp. 27-39.
- 3- Malik A, Kumar A, and Singh R.P., 2019 Application of Heuristic Approaches for Prediction of Hydrological Drought Using Multi-scalar Streamflow Drought Index. *Water Resource Manage* 33(2), pp. 3985–4006.

- 4- McKee T. Doesken J, and Kleist, D., 1993 the relationship of drought frequency and duration to time scales. Proc. of the 8th Conference on Applied Climatology, *American Meteorological Society, Boston*, 12(4), pp.179-184.



© 2024 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 عملکرد مدل‌های CANFIS، MLPNN، MLR و M5، در شبیه‌سازی شاخص خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه)

حامد مازندرانی زاده<sup>۱\*</sup> و فریا خدابخشی<sup>۲</sup>

<sup>۱\*</sup> -نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین. mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

<sup>۲</sup> - دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

### چکیده

پیش‌بینی به‌موقع خشکسالی و شدت بروز آن، می‌تواند در اتخاذ تمهیدات لازم برای مقابله با این پدیده اثرگذار باشد. استان کرمانشاه در دهه اخیر به یکی از کانون‌های اصلی بحران خشکسالی در کشور تبدیل شده است. در این پژوهش به مقایسه مدل فازی-عصبی CANFIS با مدل‌های دیگر شامل MLPNN، MLR و مدل درخت تصمیم‌گیری M5 در پیش‌بینی شاخص خشکسالی SPI در مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه، به مدت ۷۰ سال پرداخته شده است. برای انتخاب بهینه ورودی از آنالیز خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی استفاده شد. نتایج بررسی نشان داد که درخت تصمیم‌گیری M5 با ضریب تعیین برابر با ۰/۹۳ و میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۲۴۸ نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشته است همچنین میانگین مربعات خطا در مدل‌های CANFIS، MLR و MLPNN به ترتیب ۰/۳۰۷، ۰/۳۹۹ و ۰/۳۱۲ مشخص کرد که مدل شبکه عصبی-فازی CANFIS در مقایسه با MLPNN و MLR عملکرد بهتری را در پیش‌بینی شاخص خشکسالی داشته است. بر اساس محاسبات آماری و شاخص‌های ارزیابی شبکه مشخص شد که انتخاب گام زمانی تأثیر زیادی در نتایج مدل‌سازی دارد به طوری که همبستگی با گام‌های زمانی نه ماهه و بیشتر در تمامی مدل‌ها نتایج قابل قبول تری بین خشکسالی مشاهده شده و خشکسالی محاسبه شده ارائه داد. در مجموع نتایج نشان داد در برآورد خشکسالی مدل درختی M5 مدلی کارآمد است که می‌توان برای تسهیل توسعه و پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریتی به منظور جلوگیری از ایجاد خشکسالی مفید است.

کلیدواژه‌ها: مدل فازی-عصبی، پیش‌بینی خشکسالی، شاخص خشکسالی، درخت تصمیم‌گیری.

### مقدمه

در دهه اخیر خشکسالی به یکی از ویژگی‌های زبان بار اقلیمی کشور تبدیل شده است. پایش و تحلیل آثار خشکسالی از نیازهای اساسی برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. از این رو توسعه و استفاده از مدلی که در عین سادگی بتواند خشکسالی آینده را به صورت کوتاه‌مدت و یا بلندمدت، پیش‌بینی کند کمک بزرگی به مدیران و برنامه‌ریزان خواهد بود.

به طور کلی اکوسیستم‌های طبیعی، همراه با پیچیدگی، پویایی و عدم قطعیت هستند. منطق فازی ابزاری توانمند در مواجهه با ابهام در پدیده‌ها است. منطق فازی با استفاده از مفاهیم ساده و انعطاف‌پذیر، می‌تواند در مدل‌سازی داده‌های مبهم و پیچیده کارساز واقع شود. منطق فازی در بسیاری از مباحث مرتبط با منابع آب و خاک هنوز به طور جدی مورد استفاده قرار نگرفته است. هرچند که استفاده از سیستم‌های مبتنی بر قوانین فازی به دلیل ذات تکرار شونده خشکسالی و وجود عدم قطعیت در داده‌ها رو به گسترش است. برخی محققین برای پیش‌بینی خشکسالی، دو روش رگرسیون آماری و فازی را مورد مقایسه قرار داده‌اند (Malik et al., 2020). نتایج مقایسه مدل CANFIS با مدل‌های MLR و MLPNN نشان داد که این مدل از توانایی

بیشتری در مقایسه با سایر مدل‌ها برخوردار است (Malik et al., 2020). در تحقیقی دیگر توانایی مدل CANFIS در پیش‌بینی شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از برتری این مدل نسبت به مدل رگرسیون آماری است (Malik et al., 2019). استفاده از مدل CANFIS برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق مرجع روزانه (ETO) با استفاده از پارامترهای جوی روزانه نشان داد این مدل به طور قابل توجهی بهتر از مدل‌های معمولی بوده و می‌تواند یک جایگزین بهبود یافته برای مدل‌های فعلی باشد (Aytek., 2009). همچنین از روش فازی برای بررسی تغییرات ویژگی‌های خشکسالی همچون درصد فراوانی، دوره‌های خشک و تر و روند تغییرات خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم استفاده شده است (Koochi et al., 2022).

با استفاده از مدل CANFIS، سری زمانی و نمایه‌های آماری اقلیمی در پیش‌بینی خشکسالی در ایستگاه سینوپتیک بیرجند نشان داد این شبکه با اعتبار نسبتاً خوب و تعداد ورودی‌های کمتر نسبت به مدل‌های آماری، با موفقیت در پیش‌بینی خشکسالی منطقه اقلیمی بیرجند قابل استفاده است (Rezaei and Memarian., 2016). در کنار CANFIS می‌توان از مدل‌های هوشمند دیگری برای پیش‌بینی خشکسالی

تأثیر شرایط حاکم به مقادیر شاخص خشکسالی می‌باشد. پیش‌بینی خشکسالی با روش‌های مختلفی انجام شده است. مدل CANFIS با مدل‌هایی مثل شبکه عصبی و رگرسیون خطی توسط پژوهشگران مختلف مقایسه شده است. از طرفی، در محدوده مورد مطالعه و بعضاً سایر مناطق، مقایسه‌ای بین CANFIS و M5 انجام نشده است از این رو در این پژوهش نیز سعی بر این است که مقایسه CANFIS با M5 به‌عنوان یک روش متداول، انجام گردید.

## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه در میانه ضلع غربی کشور بین ۳۳ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این استان از شمال به استان کردستان، از جنوب به استان‌های ایلام و لرستان، از شرق به استان همدان و از غرب به کشور عراق محدود شده است. همچنین ارتفاع متوسط استان از سطح دریای آزاد حدود ۱۲۰۰ متر است (شکل ۱). بر اساس روش دومارتن ۵۳/۶ درصد مساحت استان دارای اقلیم نیمه‌خشک و ۳۹/۹ درصد دارای اقلیم مدیترانه‌ای است. اقلیم نیمه مرطوب حدود ۳/۵ درصد، اقلیم خشک حدود دو درصد و در نهایت کمترین مساحت استان دارای اقلیم مرطوب (یک درصد) است. در این تحقیق از آمار و اطلاعات ایستگاه سینوپتیک شهر کرمانشاه استفاده شده است. این ایستگاه در سال ۱۹۵۰ تأسیس شده و در ارتفاع ۱۵۲۰ متری از سطح دریا و طول جغرافیایی ۴۷/۹ و عرض جغرافیایی ۳۴/۳ واقع شده است (Haghizadeh et al., 2019).

طول دوره آماری مورد استفاده ۱۹۵۱-۲۰۲۱ است. در این ایستگاه، ماه‌هایی وجود دارند که آماربرداری نشده‌اند. برای پر کردن خلأ آماری مزبور از همبستگی درون ایستگاهی و استفاده از نسبت موجود برای پارامترهای گرایش به مرکز نظیر میانه و میانگین استفاده شده است.

استفاده کرد. استفاده از مدل عصبی فازی تطبیقی در پیش‌بینی خشکسالی ایستگاه‌های دریاچه‌ای ارومیه نشان داد مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در تخمین خشکسالی در مقیاس طولانی‌مدت از عملکرد مطلوبی برخوردار است (Asadzadeh et al., 2016). در تحقیق دیگری خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی با استفاده از روش موجک مورد بررسی قرار گرفت. خروجی این تحقیق تعیین موجک مادر بهینه برای پیش‌بینی انواع خشکسالی بر مبنای روش تلفیقی موجک- شبکه‌ی عصبی بود (Mashayekhi and Zakeri Niri., 2020). روش‌ها و مدل‌های مختلفی در قالب داده‌کاوی وجود دارد که به جستجوی رابطه و الگوی پنهان بین داده‌ها می‌پردازند. یکسری از این روش‌ها مانند مدل درختی M5 روابط و معادله‌های ساده و صریحی را بیان و نتایج مطلوبی را ارائه می‌کنند. این روش‌ها در مقابل روش‌هایی مثل شبکه عصبی مصنوعی قرار می‌گیرند که معادله مشخصی را ارائه نمی‌کنند و در اصطلاح به مدل‌های جعبه سیاه شهرت دارند. تاکنون مطالعاتی در زمینه استفاده از مدل درختی M5 به‌منظور برآورد پارامترهای هیدرولوژیکی صورت پذیرفته است. به‌عنوان مثال برآورد پیش‌بینی بارش ماهانه و مقایسه مدل درختی M5 با مدل شبکه عصبی Sattari et al (2014)، برآورد تبخیر تعرق مرجع Moradi و Rahimikhoob (2013)، پیش‌بینی خشکسالی با مدل درختی M5 Sattari et al (2016)، مقایسه مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیکی و مدل درختی M5 در پیش‌بینی خشکسالی Komasi et al (2018)، مقایسه‌ی مدل‌های درختی M5 و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی K در پیش‌بینی بارش ماهانه (Poursalehi et al., 2020). به‌طور کلی مدل درختی M5 به لحاظ سادگی، قابل فهم بودن و ارائه روابط خطی ساده، توانسته است در سال‌های اخیر مدل قابل‌پذیرشی برای مدل‌سازی در زمینه پیش‌بینی باشد.

به‌طور کلی، یکی از چالش‌های پایش خشکسالی، تعیین شاخصی با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. عملکرد روش‌های مختلف شبیه‌سازی، در سری‌های زمانی شاخص خشکسالی، تحت

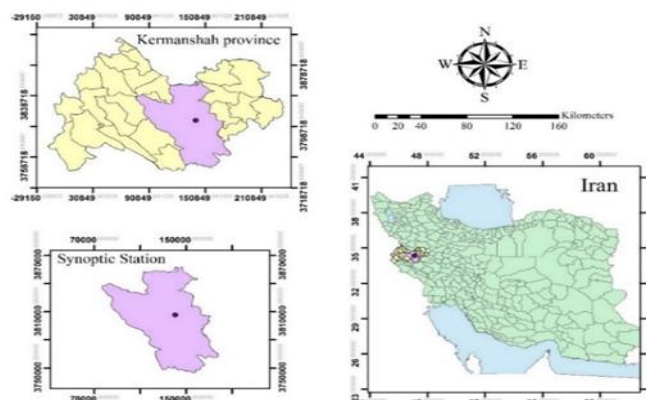


Fig.1- Map of the study area and geographical location of synoptic station.

شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه و محل ایستگاه سینوپتیک

جدول ۱- طبقه‌بندی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI  
Table 1- Classification of drought based on the SPI index

SPI category	SPI
Extremely wet	$SPI \geq +2.00$
Severely wet	$1.50 \leq SPI \leq 1.99$
Moderately wet	$1.00 \leq SPI \leq 1.49$
Mildly wet	$0.50 \leq SPI \leq 0.99$
Normal	$-0.49 \leq SPI \leq 0.49$
Mild drought	$-0.99 \leq SPI \leq 0.00$
Moderate drought	$-1.49 \leq SPI \leq -1.00$
Severe drought	$-1.99 \leq SPI \leq -1.5$
Extreme drought	$SPI \leq -2.00$

یادگیری معمولاً به‌وسیله الگوریتم‌های مختلف از جمله لونیگ-مارکوارت، گرادیان نزولی، گرادیان مزدوج و الگوریتم انتشار برگشتی انجام می‌شود.

#### مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR)

با روش MLR (Multiple Linear Regression) می‌توان هم‌زمان به تحلیل و بررسی چندین متغیر مختلف پرداخت. رگرسیون چندگانه در حقیقت، ارتباط بین یک سری از متغیرهای ورودی را با متغیر خروجی موردنظر بیان می‌کند. در این تحقیق مدل MLR به‌عنوان مدلی دیگر برای ارزیابی توانایی مدل CANFIS برای پیش‌بینی عملکرد SPI انتخاب شد. مدل MLR یک ماژول خطی بین یک متغیر هدف (وابسته) و دو یا چند متغیر مستقل است (Malik et al., 2017; Malik and Kumar., 2015). معادله رگرسیون مدل MLR را می‌توان به‌صورت رابطه (۳) نوشت:

$$SPI = W_0 + W_1SPI_{t-1} + w_2SPI_{t-2} + \dots + w_kSPI_{t-n} \quad (3)$$

که در آن،  $SPI_{t-1}$  شاخص خشکسالی با یک تأخیر زمانی،  $SPI_{t-2}$  شاخص خشکسالی با دو تأخیر زمانی و ...  $SPI_{t-n}$  شاخص خشکسالی با n تأخیر زمانی به‌عنوان پارامترهای ورودی هستند.  $W_0$  نقطه قطع معادله MLR است و  $W_k$  وزن‌های معادله MLR است.

#### مدل درختی M5

مدل درختی M5، نوعی مدل طبقه‌بندی و رگرسیونی است که با یک ساختار درختی وارونه که شامل یک گره ریشه در بالاترین قسمت درخت که به گره‌های دیگر و برگ‌ها منشعب می‌شود و به‌صورت نمایشی در قالب قوانین اگر - آنگاه نشان داده می‌شود. این مدل قادر به استخراج دانش به شکل روابط ریاضی از مجموعه داده‌ها است (Nourani and Molajou., 2017).

در ابتدا مدل درختی با تقسیم کردن فضای مسئله به‌صورت برگشتی یک درخت رگرسیونی می‌سازد. در این الگوریتم برای ایجاد شاخه در یک گره تقسیم از پارامتر انحراف معیار مقادیر

#### شاخص خشکسالی هواشناسی SPI

شاخص SPI (Standard Precipitation Index) توسط Mckee et al (1993) در دانشگاه ایالتی کلرادو معرفی شد. با استفاده از این شاخص می‌توان کمبود بارش را بر اساس احتمال رخداد برای دوره‌های زمانی مختلف از یک تا ۴۸ ماه برآورد نمود. مقدار SPI به‌عنوان یک متغیر نرمال شده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$SPI = z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

که در آن  $\mu$  و  $\sigma$  به‌ترتیب تخمین میانگین و انحراف از معیار جامعه می‌باشند. با داشتن مقدار SPI از معادله (۱) می‌توان وضعیت خشکسالی را از جدول (۱) برآورد نمود. مقادیر مثبت SPI معرف بارش بیشتر از میانگین و مقادیر منفی معرف بارش کمتر از میانگین است (McKee et al., 1993).

#### مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLPNN)

مدل MLPNN (Multiple-Layer Perceptron) یک مدل شبکه عصبی مصنوعی است که در آن سیستم با استفاده از ترکیب توابع ساده در لایه‌هایی با نورون‌ها (مشابه شبکه سلول مغزی) مدل می‌شود. داده‌های ورودی، وارد لایه ورودی شده و با استفاده از یک تابع مناسب پردازش می‌شوند و نتایج به لایه‌های پنهان و در نهایت به لایه خروجی منتقل می‌شوند. خروجی هر نورون با رابطه (۲) تعریف می‌شود (Talebkeikhah., 2020).

$$Y = f_k \times \left[ \sum_{j=1}^{N_j} W_{jk} \times f_i \left( \sum_{i=1}^{N_i} W_{ij} X_i + b_j \right) + b_k \right] \quad (2)$$

در رابطه فوق  $Y$  نورون خروجی،  $f_k$  تابع انتقال،  $W_{jk}$  وزن  $b_k$  بایاس  $N$  تعداد ورودی ر لایه را نشان می‌دهد. وزن‌ها و بایاس با استفاده از دسته داده‌های یادگیری و کمینه کردن خطای بین خروجی‌های واقعی و محاسبه‌شده قابل تعیین هستند. فرآیند

هر گره در لایه اول رتبه عضویتی است از یک مجموعه فازی  $(A_1, A_2, B_1, B_2)$  و تعیین کننده درجه عضویت متغیر ورودی به یکی از مجموعه‌های فازی است. مجموعه‌های فازی به وسیله توابع عضویت تعریف می‌شوند. خروجی‌های این لایه، مقادیر مقدم توابع عضویت، متناسب با ورودی‌های فازی سیستم هستند. لایه دوم دریافت کننده ورودی است به شکل ضرب جفت‌های خروجی از لایه اول است. لایه سوم دارای دو مؤلفه است، مؤلفه بالایی اعمال کننده توابع عضویت بر هریک از ورودی‌ها است درحالی که مؤلفه پایینی بیانی است از شبکه عصبی که برای هر خروجی جمع وزن‌ها را محاسبه می‌کند. در لایه چهارم، گره‌های موجود به صورت تطبیق پذیر درآمده و هر تابع موجود، یک مدل درجه اول با پارامترهای حاصله ارائه می‌دهد و لایه پنجم، لایه خروجی است (Aytek., 2009). نحوه آموزش شبکه عصبی در ساختار CANFIS به صورت یادگیری نظارتی است. از این رو، با آموزش شبکه، توابع ناشناخته ارائه شده توسط داده‌های آموزشی یاد گرفته شده و متناسب با ارزش پارامترهای ورودی، خروجی تعیین می‌شود. در طی فرآیند یادگیری شبکه در ساختار CANFIS، میزان فراگیری توسط شبکه به وسیله توابع هدف به طور مرتب سنجیده می‌شود و در نهایت شبکه‌ای با کمترین میزان خطا مورد پذیرش قرار می‌گیرد (Minasny and Mcbratney., 2002).

#### معرفی ورودی بهینه و توسعه مدل

انتخاب ورودی بهینه و توسعه مدل متغیرهای ورودی - خروجی مناسب برای مدل سازی فرایندهای غیرخطی هیدرولوژیکی بخش مهم مدل سازی به شمار می‌رود. در این تحقیق از داده‌های بارندگی ماهانه بلندمدت برای محاسبه SPI مقیاس چند زمانه شامل یک، سه، شش، نه، ۱۲ و ۲۴ ماهه، استفاده شد. آنالیز خودهمبستگی ACF (AutoCorrelation Function) و خودهمبستگی جزئی PACF (Partial AutoCorrelation Function) برای انتخاب ورودی‌های بهینه، برای پیش بینی شاخص خشکسالی انجام شد. تابع ACF روشی برای بیان وابستگی زمان در ساختار یک سری زمانی است. رابطه تابع ACF با تأخیر K به صورت رابطه (۷) است.

$$\rho_k = \frac{Cov(Z_t, Z_{t+k})}{\sqrt{Var(Z_t)} \times \sqrt{Var(Z_{t+k})}} \quad (7)$$

که در آن مقدار ضریب خودهمبستگی سری زمانی با تأخیر K و  $Z_t$  مقادیر متغیرها با داده‌های سری زمانی در مرحله زمانی t است. تابع PACF همبستگی بین  $Z_t$  و  $Z_{t+k}$  بعد از حذف وابستگی خطی مشترک متغیرهای  $Z_{t+1}, Z_{t+2}, \dots, Z_{t+k-1}$  به دست می‌آید. منظور از این همبستگی، همبستگی شرطی زیر است که

متغیر هدف به عنوان یک معیار اندازه گیری خطا در آن گره استفاده می‌شود و آزمون برای انجام عملیات تقسیم در گره مذکور انجام شده، سپس صفتی که موجب کاهش بیشتر انحراف معیار گردد به عنوان صفتی که روی آن شاخه زده شده، انتخاب می‌شود. فرمول محاسبه‌ی کاهش انحراف استاندارد SDR (Standard Deviation Ratio) به صورت رابطه (۴) است (Sattari et al., 2013).

$$SDR = Sd(T_i) - \sum_{i=1}^N \frac{|T_i|}{|T|} Sd(T_i) \quad (4)$$

در این روابط، T مجموعه‌ای از نمونه‌ها است که به هر گره وارد می‌شود،  $T_i$  نشان دهنده زیر مجموعه‌های از نمونه‌هاست که i امین نتیجه‌ی تست پتانسیلی را دارند، Sd بیانگر انحراف معیار و N تعداد داده‌ها را نشان می‌دهد.

#### شبکه فازی - عصبی CANFIS

این ساختار حاصل تلفیق شبکه تطبیقی عصبی با قوانین فازی است. CANFIS (CoActive Neuro-Fuzzy Inference System) می‌تواند به عنوان تخمین زننده کلی برای توابع غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد (Jang., 1993). در واقع با تسهیم ارزش‌های عضویت فازی، قوانین فازی در این نوع از شبکه‌ها به گونه‌ای ساخته می‌شوند که بتوانند همبستگی بین خروجی‌ها را نیز در شبیه سازی لحاظ کرده و برای تسریع دریافتن جواب صحیح از آن استفاده کنند (Hemachandra and Satyanarayana., 2013). این مدل یک سیستم فازی را در یک ساختار شبکه عصبی اجرا می‌کند و برای فرآیند آموزش، از ترکیبی از روش‌های آموزش پس انتشار خطا و حداقل مربعات خطا استفاده می‌کند. مدل CANFIS یک شبکه چند لایه پیش رونده بوده که از الگوریتم‌های یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی و استدلال‌های فازی برای پیش بینی متغیر خروجی بر اساس متغیر ورودی استفاده می‌کند (Firat and Gungor, 2007). مدل CANFIS انتخاب شده شامل پنج لایه است (شکل ۲). اختصاص توابع عضویت MF (Membership Functions) در شکل (2a) و ساختار کلی مدل CANFIS را با دو متغیر ورودی (x و y)، یک خروجی (c) در شکل (2b) نشان داده شده است. در روابط (۵) و (۶) مدل مرتبه اول تاکی - سوگو (Takagi Sugeno-Kang) TSK با قوانین اگر - آنگاه برای مدل CANFIS را نشان می‌دهد.

$$\text{Rule 1: IF } x \text{ is } A_1 \text{ any is } B_1 \text{ THEN } c_2 \quad (5) \\ = p_1x + q_1y + r_1$$

$$\text{Rule 2: IF } x \text{ is } A_2 \text{ an y is } B_2 \text{ THEN } c_2 \quad (6) \\ = p_2x + q_2y + r_2$$

$$MSE = \sum_{i=1}^N \frac{(SPI_{cal,i} - SPI_{per,i})^2}{N} \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (SPI_{cal,i} - SPI_{per,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{SPI}_{cal} - \overline{SPI}_{per})^2} \quad (12)$$

که در آن‌ها  $SPI_{cal,i}$  شاخص خشکسالی محاسبه شده،  $SPI_{pr,i}$  شاخص خشکسالی پیش‌بینی شده و  $N$  تعداد داده‌ها است. فاکتور RMSE دقت و اعتبار دسته داده‌های آموزش و آزمون را اندازه‌گیری کرده که هرچه قدر به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر خطای کمتر روش است.

### نتایج و بحث

مقدار بارش سالیانه ایستگاه کرمانشاه حدود ۴۲۹/۶ میلی‌متر در سال است، در مجموع سه دوره بارشی کمتر از میانگین در سطح ایستگاه هواشناسی کرمانشاه مشاهده می‌شود شکل (۳). اولین دوره از سال ۱۹۵۱ تا ۱۹۵۶، دومین دوره از ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۱ و سومین دوره از ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۵؛ که سومین دوره طولانی‌ترین است. بیشترین مقدار کاهشی در سال ۲۰۲۱ در سطح ایستگاه کرمانشاه با حدود ۲۹۹ میلی‌متر نسبت به میانگین و بالاترین مقدار افزایشی نسبت به میانگین در سال ۱۹۶۹ با حدود ۳۵۵ میلی‌متر رخ داده است.

معمولاً در تحلیل سری‌های زمانی، خودهمبستگی جزئی نامیده می‌شود.

$$Corr(Z_t, Z_{t+k}) I(Z_{t+1}, \dots, Z_{t+k-1}) \quad (8)$$

برای تشخیص یک مدل آزمایشی باید حداقل ۵۰ مشاهده از سری موردنظر در اختیار باشد (Khorrim and Boghroniya., 2006).

### شاخص‌های ارزیابی عملکرد

عملکرد مدل‌های MLPNN, MLR, CANFIS و مدل درختی M5 توسط ریشه میانگین مربعات خطا (Mean Squared Error) (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) (MAD)، انحراف معیار (Mean Square Error Coefficient of Determination) ( $R^2$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب تعیین (determination) و تفسیر بصری با استفاده از نمودار پراکنندگی ارزیابی می‌شوند. این آماره‌ها به ترتیب به صورت روابط (۹) الی (۱۲) ارائه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(SPI_{cal,i} - SPI_{per,i})^2}{N}} \quad (9)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^N |SPI_{cal,i} - SPI_{per,i}|}{N} \quad (10)$$

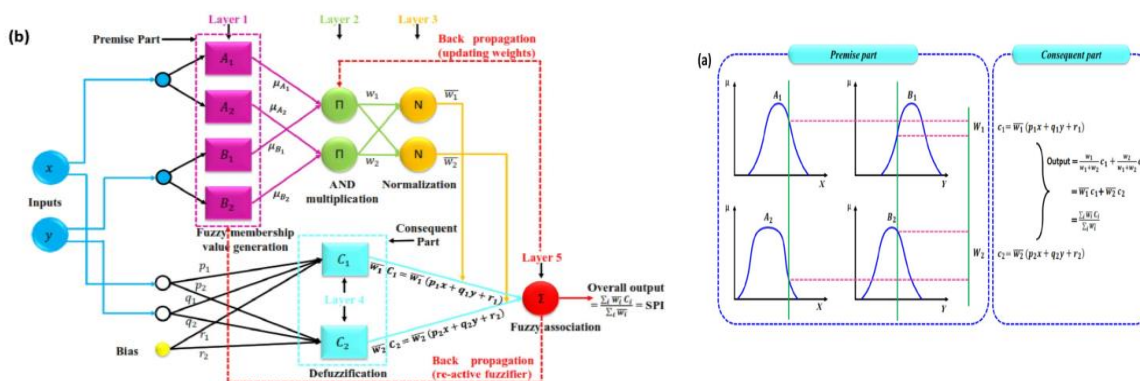
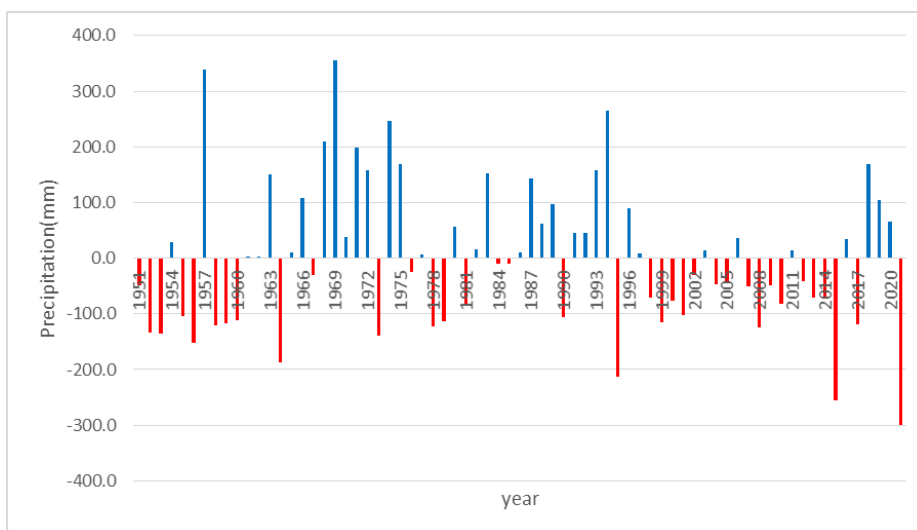


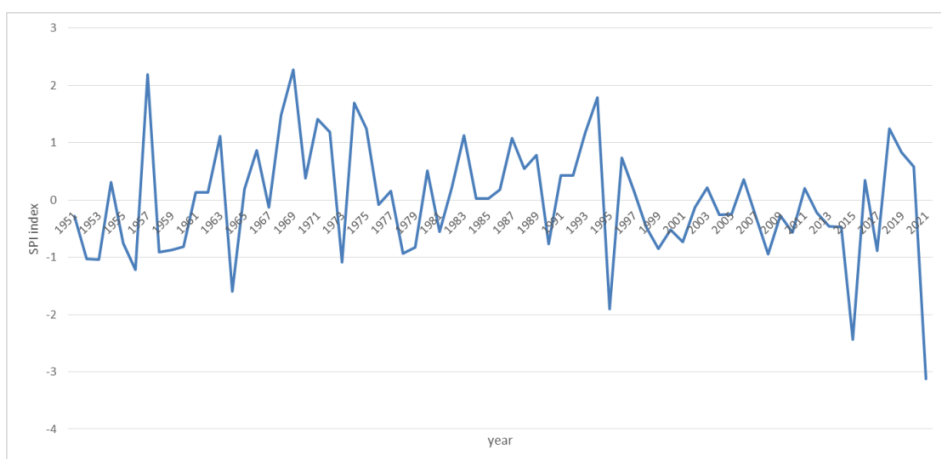
Fig. 2-a) MFs of two input variables in TSK model, and b) architecture of proposed CANFIS model. (Malik et al, 2019)

شکل ۲- a) توابع عضویت دو ورودی در مدل تاکی-سوگنو (b) ساختار کلی مدل CANFIS (Malik et al, 2019).





**Fig. 3-Time series of the annual rainfall compared to the average for Kermanshah station**  
 شکل ۳- سری زمانی بارش سالانه نسبت به میانگین در ایستگاه کرمانشاه



**Fig. 4- SPI annual drought indices for Kermanshah Station.**  
 شکل ۴- نمودار وضعیت شاخص خشکسالی SPI سالانه در ایستگاه کرمانشاه

در این پژوهش شاخص خشکسالی در مقیاس‌های یک، سه، شش، نه، ۱۲ و ۲۴ برآورد شده است. برای انتخاب ورودی‌های بهینه مدل، آنالیز خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF) با تأخیر زمانی ۱۲ ماهه با استفاده از نرم‌افزار MINITAB انجام شد که نمودارهای تابع خودهمبستگی جزئی (PACF) در شکل (۵) نشان داده شده است.

بررسی وضعیت خشکسالی و ترسالی در ایستگاه هواشناسی کرمانشاه شکل (۴) نشان‌دهنده آن است که سه دوره خشکسالی ضعیف تا شدید در این ایستگاه رخ داده است که بین سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۵ شدیدترین خشکسالی‌ها بوده است؛ اما از ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ نیز خشکسالی متوسط تا شدید به تناوب وجود داشته است. شدیدترین ترسالی در ایستگاه کرمانشاه بین سال‌های ۱۹۶۴ تا ۱۹۷۲ رخ داده است و بعدازاین دوره شرایط بارشی به سمت نرمال یا کاهشی بوده است.

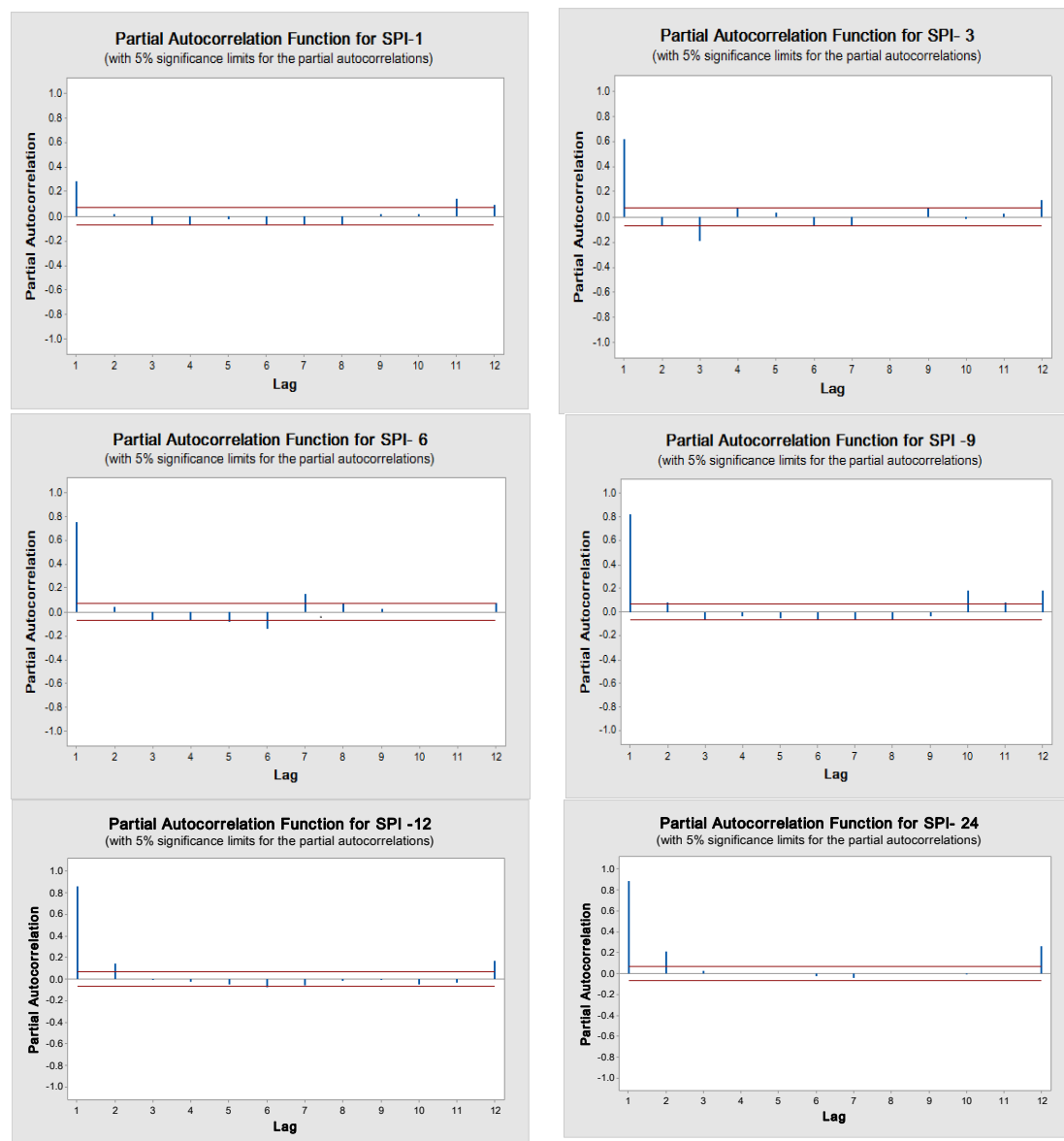


Fig. 5- The statistical calculation of the partial autocorrelation function PACF for SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, and SPI-24.

شکل ۵- نمودار PACF برای شاخص خشکسالی SPI در مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۹، ۶، ۳، ۱ و ۲۴ ماهه

مورد استفاده نیز، تابع سیگموئید (لجستیک) و همچنین از تابع گوسی در تخصیص تابع عضویت مدل استفاده شد است. بعد از مدل‌سازی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده معیارهای ارزیابی محاسبه شد جدول (۳).

همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده، در طی آزمون شبکه، میزان MSE و RMSE از ردیف اول تا ششم با افزایش گام زمانی شاخص خشکسالی کاهش می‌یابد به طوری که میزان MSE از ۰/۷۴۳ به ۰/۲۴۲ رسیده است که خود نشان‌دهنده کاهش حدود شش برابری میزان خطا است.

به منظور شبیه‌سازی با مدل شبکه عصبی یک رویکرد یادگیری نظارت‌شده که شامل سه لایه ورودی، پنهان و خروجی است، برای طراحی معماری مدل MLPNN استفاده شد. آموزش

پس از استخراج نمودارهای PACE و محاسبه تأخیرهای زمانی معنادار هر شاخص جدول (۲)، ارتباط این متغیرها با وضعیت خشکسالی سالانه در قالب سناریوهای مختلف به کمک مدل CANFIS، MLPNN، و مدل درختی M5 تحت شرایطی که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۱۵ درصد برای صحت سنجی و ۱۵ درصد در آزمون به کار گرفته شوند بررسی شدند.

برای اجرای مدل فازی-عصبی CANFIS از نرم‌افزار نروسولوشن (NeuroSolutions) استفاده شده است. دو نوع کلی از توابع عضویت فازی تابع بل و تابع گوسی در نرم‌افزار موجود است. در این مطالعه با توجه آزمون‌وخطاهای انجام‌شده، اندازه گام و نرخ گشتاور به ترتیب برابر با یک و ۰/۷ انتخاب شد. تابع انتقال

شاخص خشکسالی توسط رگرسیون خطی چندگانه نیز تخمین زده شد است جدول (۵). برای انجام این مدل سازی روش های مختلفی وجود دارد که در این تحقیق نرم افزار SPSS به کار گرفته شده است. با توجه به جدول (۵) می توان دریافت که ضریب تعیین از ۰/۳۵ به ۰/۹ رسیده که نشان از بهتر شدن نتایج در گام های زمانی بالاتر است همچنین نسبت به دو روش قبل در SPI24 ماهه ضریب تعیین بهتری دارد اما RMSE و MSE بیشتر شده است که این نشان دهنده این است که نسبت به دو روش قبلی ضعیف تر عمل کرده است.

مدل MLPNN با روش مونتیم و پس از رسیدن به ۱۰۰۰ تکرار با مقدار آستانه ۰/۰۰۱ پایان یافت جدول (۴). در جدول (۴) نتایج مدل سازی و آرایش شبکه عصبی مصنوعی آورده شده است، تعداد نرون ها با توجه آزمون و خطاهای متعدد برای هر گام های زمانی شاخص SPI به دست آمده و از الگوی خاصی پیروی نمی کنند، در بعضی از گام ها با افزایش نرون ها و گاهی نیز با کاهش نرون ها نتایج بهبود پیدا می کند. نتایج شبکه عصبی به مدل CANFIS نزدیک است در این مدل نیز با افزایش گام زمانی توانایی مدل نیز افزایش پیدا کرده است.

جدول ۲- متغیرهای ورودی و خروجی در مدل های پیش بینی خشکسالی  
Table 2- Input and output variables in drought prediction models.

Num	Output	Input variables
1	SPI-1	SPI-1(t-1),SPI-1(t-11),SPI-1(t-12)
2	SPI-3	SPI-1(t-1),SPI-1(t-3),SPI-1(t-12)
3	SPI-6	SPI-1(t-1),SPI-1(t-6),SPI-1(t-7)
4	SPI-9	SPI-1(t-1),SPI-1(t-10),SPI-1(t-12)
5	SPI-12	SPI-1(t-1),SPI-1(t-2),SPI-1(t-12)
6	SPI-24	SPI-1(t-1),SPI-1(t-2),SPI-1(t-12)

جدول ۳- نتایج RMSE, MSE, MAD و R<sup>2</sup> برای گام های زمانی SPI با مدل CANFIS  
Table 3- RMSE, MSE, MAD and R<sup>2</sup> values for multi-scalar SPI by CANFIS model.

Drought index	Model structure	Train				validate				Test			
		MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>
SPI1	Gauss-3	0.63	0.74	0.86	0.38	0.65	0.75	0.88	0.37	0.66	0.76	0.89	0.36
SPI3	Gauss-3	0.53	0.55	0.74	0.59	0.57	0.56	0.76	0.58	0.56	0.56	0.76	0.58
SPI6	Gauss-2	0.51	0.47	0.68	0.71	0.56	0.78	0.69	0.71	0.57	0.79	0.69	0.71
SPI9	Gauss-2	0.42	0.36	0.60	0.78	0.43	0.37	0.65	0.77	0.44	0.38	0.66	0.76
SPI12	Gauss-2	0.37	0.28	0.53	0.91	0.38	0.29	0.58	0.90	0.39	0.30	0.58	0.90
SPI24	Gauss-2	0.37	0.24	0.49	0.93	0.39	0.29	0.49	0.92	0.39	0.30	0.50	0.91

جدول ۴- نتایج RMSE, MSE, MAD و R<sup>2</sup> برای گام های زمانی SPI با مدل MLPNN  
Table 4- RMSE, MSE, MAD and R<sup>2</sup> values for multi-scalar SPI by MLPNN model.

Drought index	method	number of hidden layers	number of neurons	Train				validate				Test			
				MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>
SPI1	Momentum	1	10	0.651	0.751	0.866	0.37	0.687	0.768	0.921	0.35	0.689	0.772	0.926	0.35
SPI3	Momentum	1	13	0.552	0.585	0.765	0.57	0.557	0.592	0.812	0.53	0.564	0.594	0.824	0.53
SPI6	Momentum	1	9	0.517	0.479	0.692	0.71	0.524	0.483	0.801	0.70	0.532	0.494	0.811	0.69
SPI9	Momentum	1	7	0.422	0.354	0.595	0.79	0.435	0.369	0.621	0.76	0.446	0.401	0.634	0.75
SPI12	Momentum	1	10	0.387	0.303	0.551	0.86	0.392	0.326	0.603	0.85	0.395	0.338	0.614	0.85
SPI24	Momentum	1	11	0.37	0.274	0.497	0.88	0.389	0.301	0.512	0.87	0.394	0.312	0.521	0.87

جدول ۵- نتایج RMSE, MSE, MAD و R<sup>2</sup> برای گام‌های زمانی SPI با مدل MLR  
Table 5- RMSE, MSE, MAD and R<sup>2</sup> values for multi-scalar SPI by MLR model.

Drought index	Train				Validate				Test			
	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>
SPI1	0.757	0.85	0.922	0.35	0.823	0.940	1.085	0.34	0.813	0.96	1.019	0.34
SPI3	1.053	1.547	1.244	0.60	1.069	1.632	1.365	0.59	1.126	1.621	1.372	0.58
SPI6	0.782	0.922	0.96	0.77	0.798	1.09	1.08	0.75	0.832	1.110	1.091	0.74
SPI9	0.420	0.322	0.568	0.83	0.436	0.435	0.615	0.81	0.446	0.624	0.621	0.80
SPI12	0.402	0.273	0.522	0.89	0.424	0.289	0.584	0.89	0.436	0.592	0.598	0.88
SPI24	0.480	0.362	0.602	0.92	0.501	0.396	0.614	0.91	0.512	0.399	0.625	0.90

LM num: 1  
spi24-t =  
0.9906 \* i»spi24-t1  
- 0.1211 \* spi24-t2  
+ 0.0994 \* spi24-t12  
+ 0.0799

LM num: 2  
spi24-t =  
0.6448 \* i»spi24-t1  
+ 0.0416 \* spi24-t2  
+ 0.0563 \* spi24-t12  
- 0.0535



Fig. 6- Diagram of the M5 model tree with nine linear regression models at the leaves.

شکل ۶- نمودار درخت مدل M5 با ۹ مدل رگرسیون خطی در برگ‌ها

جدول ۶- نتایج RMSE, MSE, MAD و R<sup>2</sup> برای گام‌های زمانی SPI با مدل درختی M5  
Table 6- RMSE, MSE, MAD and R<sup>2</sup> values for multi-scalar SPI by M5 model tree.

Drought index	Number of rules	Train				Validate				Test			
		MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	MAD	MSE	RMSE	R <sup>2</sup>
SPI1	2	0.664	0.769	0.877	0.44	0.721	0.828	0.926	0.42	0.732	0.831	0.931	0.41
SPI3	2	0.568	0.556	0.746	0.59	0.621	0.563	0.813	0.57	0.635	0.569	0.823	0.56
SPI6	1	0.475	0.409	0.639	0.79	0.524	0.515	0.689	0.77	0.541	0.519	0.673	0.76
SPI9	1	0.406	0.303	0.55	0.87	0.489	0.420	0.639	0.85	0.491	0.426	0.642	0.84
SPI12	1	0.357	0.244	0.494	0.92	0.372	0.315	0.521	0.91	0.381	0.319	0.534	0.91
SPI24	1	0.322	0.181	0.425	0.94	0.390	0.241	0.536	0.93	0.225	0.248	0.539	0.93

$$LM1: SPI24 = 0.9906 \times SPI24_{T1} - 0.1211 \times SPI24_{T2} + 0.0994 \times SPI24_{T12} + 0.0799 \quad (۱۳)$$

که در آن، SPI<sub>T1</sub> شاخص SPI بیست چهارماهه با یک تأخیر زمانی، SPI<sub>T2</sub> شاخص SPI بیست و چهارماهه با دو تأخیر زمانی و SPI<sub>T12</sub> شاخص SPI بیست و چهارماهه با ۱۲ تأخیر زمانی به‌عنوان پارامترهای مستقل همچنین پارامتر SPI<sub>T24</sub> شاخص SPI بیست و چهارماهه به‌عنوان پارامتر وابسته است. از شکل (۶) می‌توان دریافت که مجموعه داده‌های پژوهش در نه بخش LM1, LM2, ..., LM9 قابل دسته‌بندی هستند که برای هر کدام از این دسته‌ها یک رابطه خطی مجزا پیشنهاد کرده است.

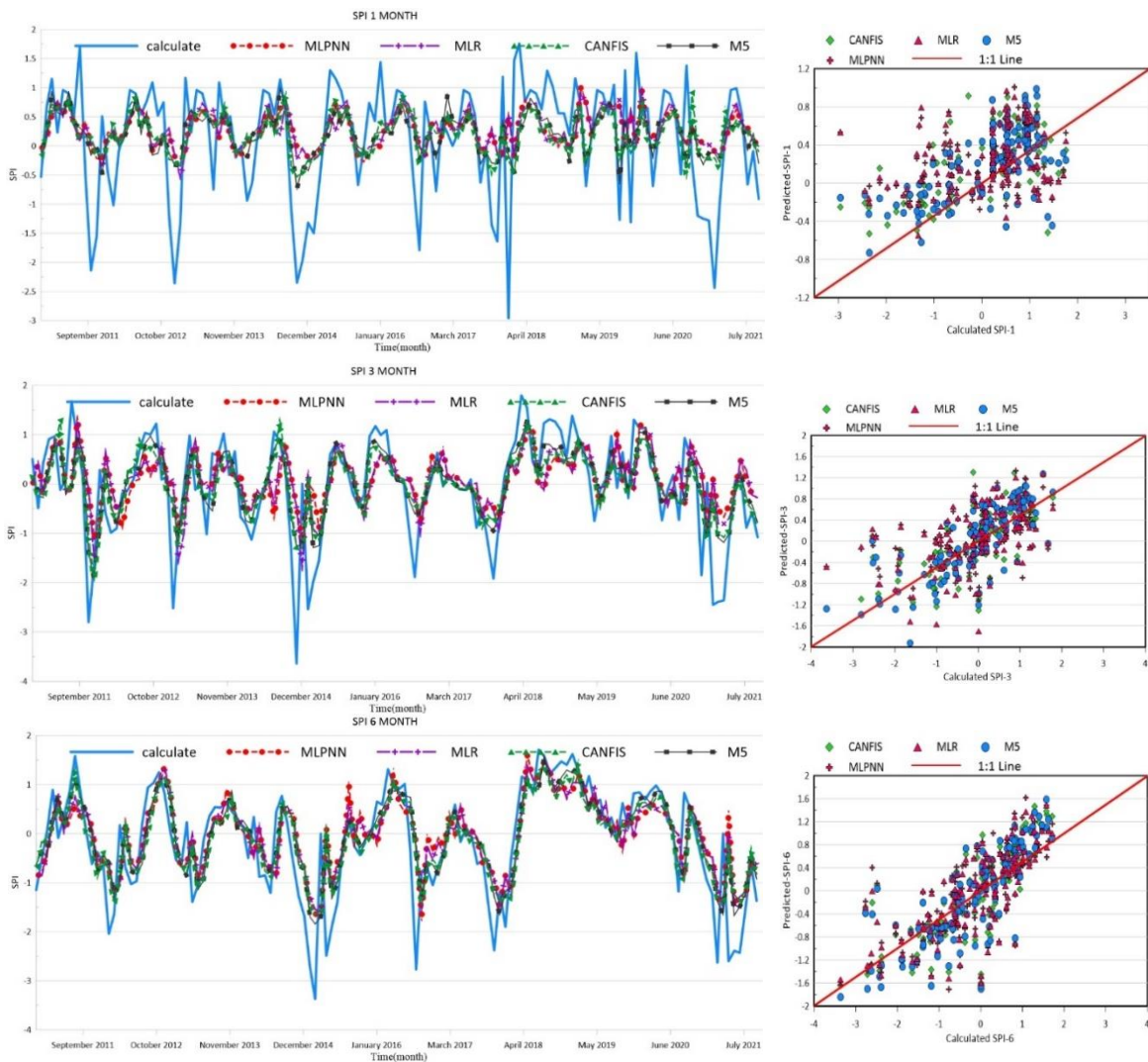
برای مدل‌سازی الگوریتم درخت تصمیم‌گیری M5 از نرم‌افزار وکا (WEKA) که توسط پژوهشگران دانشگاه ویکتوریا تهیه شده است استفاده گردیده است. بعد از اجرای الگوریتم، خروجی مدل شامل نمودار درختی است شکل (۶) که در هر برگ این درخت یک رابطه خطی برای شاخص خشکسالی برآورد شده است. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، در روابط مدل درختی M5، پارامتر LM نشان‌دهنده روابط خطی است، کادر قرمز رنگ در شکل، نشان‌دهنده یک برگ یا گره است. اعداد نشان داده شده در داخل پرانتز به‌عنوان مثال گره اول LM 1 (146/53.68%) / عدد ۱۴۶ تعداد و ۵۳/۶۸ درصد مربوط به تعداد مواردی از مجموعه داده است که در آن رابطه خطی LM1 صدق می‌کند و آن رابطه برای آن تعداد داده از مجموعه داده بکار برده می‌شود.

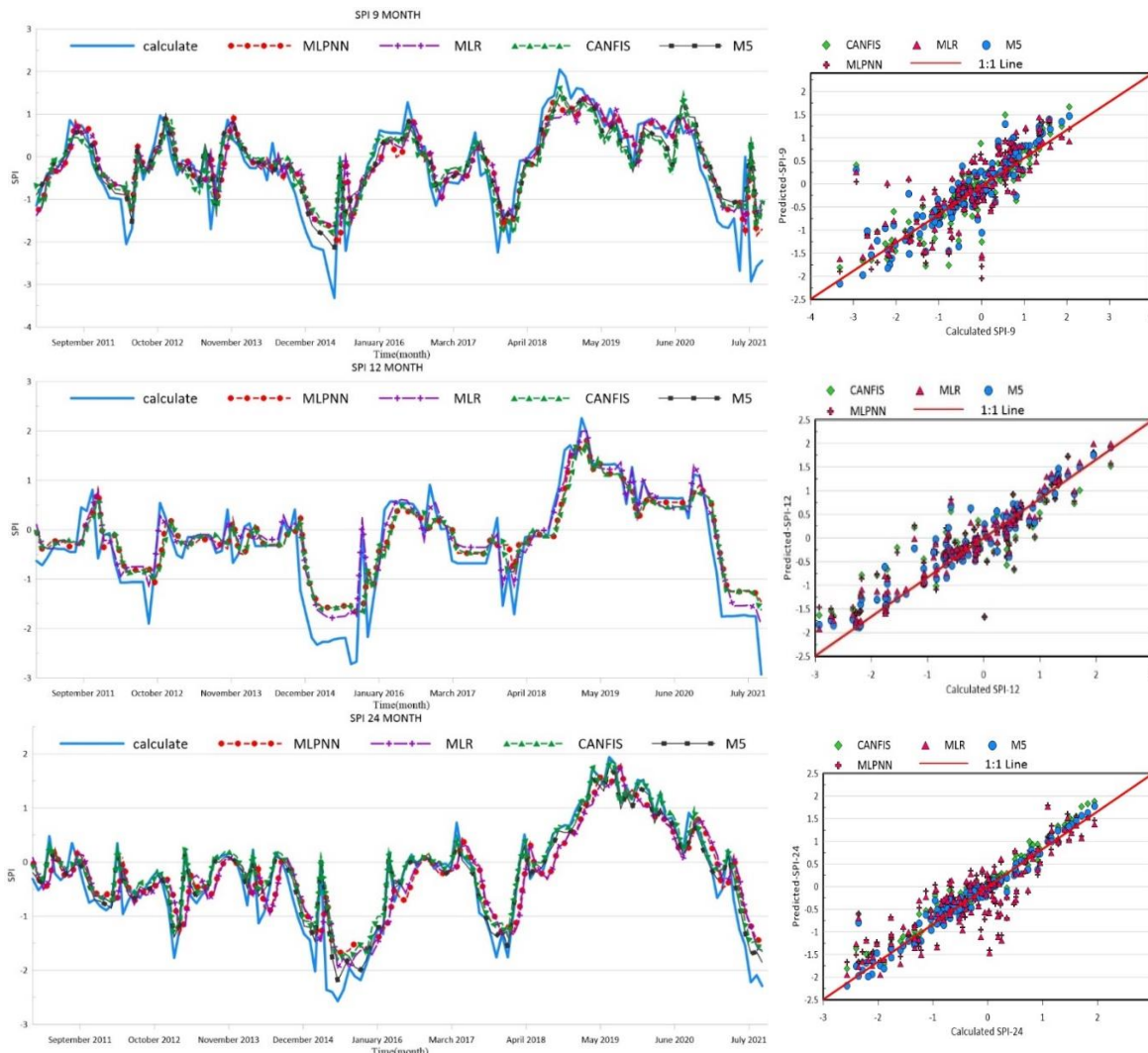
شش ماهه کمبود بارندگی، مقدار این شاخص در انتهای دوره‌ی کم بارش بیش از مقدار آن در زمان مشابه و در مقیاس سه‌ماهه خواهد بود. چراکه در مقیاس شش‌ماهه اثر تمام دوره‌ی کم بارش لحاظ ولی در مقیاس سه‌ماهه تنها اثر دو ماه ماقبل آخر در نظر گرفته می‌شود.

نمودار پراکندگی یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای بررسی همبستگی و ارتباط دو متغیر است. این نمودار، نوع و جهت رابطه را به‌طور بصری ارائه می‌دهد و می‌توان با مشاهده نمودار از نوع رابطه بین دو متغیر و جهت (خطی یا غیرخطی و مثبت یا منفی) و شدت رابطه آگاهی تقریبی یافت. از این نمودار به‌عنوان یکی از معیارهای ارزیابی استفاده شده است. داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های پیش‌بینی شده توسط هر مدل برای تمامی گام‌های زمانی در شکل (۷) نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده، مدل M5 توانسته است در طی آزمون شبکه، میزان MSE را از ۰/۷۶۹ در SPI یک‌ماهه به ۰/۱۸۱ در SPI بیست‌وچهار ماهه برساند که خود نشان‌دهنده کاهش حدود هشت برابر می‌تواند باشد؛ و همچنین میزان ضریب تعیین بالاتر و MSE پایین‌تری در تمامی گام‌های زمانی نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

با دقت در جدول‌های (۳) الی (۶) مشخص می‌شود که مقدار ضریب تعیین در شاخص SPI با بازه زمانی یک ماهه در تمامی مدل‌ها نسبت به سایر شاخص‌ها پایین‌تر است که علت این امر را می‌توان به آن مرتبط دانست که باعث عملکرد نسبتاً ضعیف‌تر مدل‌ها در این بازه زمانی می‌شود و به‌طور کلی با افزایش مقیاس زمانی در شاخص SPI از نوسانات آن کاسته شده و در مقابل در خشکسالی‌های با دوره‌های طولانی‌تر، شدت خشکسالی ممکن است بیشتر نشان داده شود. به‌عنوان مثال، در یک دوره‌ی





**Fig. 7- Scatter plots of predicted and calculated SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, and SPI-24 values by CANFIS, MLPNN, MLR and M5 model tree.**

**شکل ۷ - پراکندگی نمودارهای پیش‌بینی شده و محاسبه شده SPI در مدل‌های CANFIS, MLPNN, MLR و مدل درختی M5 برای مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۶، ۳، ۱ و ۲۴ ماهه.**

استان کرمانشاه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقیاس زمانی در شاخص SPI از نوسانات RMSE و MSE کاسته شده و در مقابل در خشکسالی‌های با دوره‌های طولانی‌تر، شدت خشکسالی بیشتر نشان داده شد. در بین چهار مدل مورد بررسی، مدل درختی M5 با تمامی معیارهای ارزیابی بهترین مدل شناخته شد؛ و مشخص گردید که مدل درختی M5 با استفاده از تقسیم‌بندی فضای داده‌ها و ارائه رابطه خطی متمایز برای هر گروه از داده‌ها، از توانایی نسبتاً بالای در پیش‌بینی خشکسالی برخوردار است.

در رتبه بعد شبکه CANFIS که از مجموعه‌های فازی استفاده می‌کند، توانست با اعتبار نسبتاً خوبی با موفقیت در پیش‌بینی خشکسالی منطقه اقلیمی کرمانشاه به کار گرفته شود. با توجه به اینکه مدل‌های هوش مصنوعی بر پایه روش داده‌کاوی استوار است، این مدل‌ها را می‌توان برای هر حوضه دلخواه مورد

بر اساس شکل (۷)، مشاهده می‌شود که عملکرد مدل‌ها در گام‌های زمانی یک، سه و شش ماهه در مقادیر حدی مناسب نبوده است ولی از گام زمانی نه ماهه به بعد در تمامی مدل‌ها شرایط بهتر شده و رفتار مدل را به خوبی شبیه‌سازی نموده است که این نتیجه با نتایج Malik et al (2020) و Kumar (2020) همخوانی دارد. در مجموع، با بررسی معیارهای ارزیابی (2020)، همخوانی دارد. در مجموع، با بررسی معیارهای ارزیابی شبکه و همچنین نمودارهای پراکندگی می‌توان مدل M5 را در تمامی گام‌های زمانی شاخص SPI با ضریب تعیین بالاتر و RMSE پایین‌تر به عنوان مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی خشکسالی در منطقه کرمانشاه معرفی کرد.

**نتیجه‌گیری**

در این تحقیق میزان کارایی مدل‌های CANFIS, MLR, MLPNN و مدل درختی M5 در پیش‌بینی خشکسالی‌های

### تقدیر و تشکر

بدین وسیله از سازمان هواشناسی کشور به خاطر همکاری لازم در خصوص در اختیار گذاشتن داده‌های این پژوهش نهایت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

آموزش قرارداد و از این رهگذر یک شبکه آموزش‌دیده برای آن حوضه داشت؛ بنابراین هر شبکه آموزش بافته برای داده‌های همان حوضه قابل اعتبار است و تنها برای همان حوضه می‌تواند به کار گرفته شود. ولی متدلوژی و روش یادشده در پژوهش، قابل‌تعمیم و کاربرد برای تمامی حوضه‌های دیگر است.

### References

- 1- Asadzadeh, F. Byzedi, M. and Kaki, M., 2016. Monitoring and prediction of drought in western Urmia lake basin rain gage stations by ANFIS model. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3(2): 205-218. (In Persian) Doi: doi: 10.22059/ije.2016.59661.
- 2- Ayttek, A., 2009. Co-active neurofuzzy inference system for evapotranspiration modeling. *Soft Computer*, 13. pp. 691-700.
- 3- Firat, M. Gungor, M., 2007. River flow estimation using adaptive neuro fuzzy inference system. *Mathematics and Computers in Simulation*, 75. pp. 87-96. Doi: 10.1016/j.matcom.2006.09.003.
- 4- Haghizadeh, A. Bayat, V. and Arshia A., 2019 Estimation of The Evapotranspiration potential of Kermanshah synoptic stations. *Using Genetic Programming*, 19(67) pp.29-42.
- 5- Hemachandra, S. and Satyanarayana, R. 2013. Co-Active Neuro-Fuzzy Inference System for prediction of electric load. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*, 3(2), pp. 217-222.
- 6- Jang, J.S., 1993 ANFIS adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 23(3), pp. 665-685.
- 7- Khorrim M, and Boghroniya A., 2006 *Analysis of time series with MINITAB AB14 software*, Sokhongostar publications. 151 p (In Persian).
- 8- Komasi, M. Ghobadi Khosro, S. and hashemi, M., 2018. Comparison Genetic Programming model and M5 model tree in Drought Forecasting. *Iranian Water Researches Journal*, 12(2), pp. 81-90 (In Persian).
- 9- Koochi, S., Azizian, A., and Mazandarani Zadeh, H., 2022. The Effects of Climate Change on Drought Conditions Using Fuzzy Logic under SSP3 and SSP5 scenarios. *Iran-Water Resources Research* (In Persian).
- 10- Malik A, Kumar A, and Kisi, O., 2017 Monthly pan-evaporation estimation in Indian central Himalayas using different heuristic approaches and climate based models. *Computers and Electronics in Agriculture*. 143(3), pp. 302-313. Doi: 10.1016/j.compag.2017.11.008.
- 11- Malik A, Kumar A, Salih S.Q, Kim S, Kim N.W. Yaseen, Z.M. and Singh, VP., 2020 Drought index prediction using advanced fuzzy logic model: Regional case study over Kumaon in India. *Journal PLoS*, 15(5), pp. 256-271. Doi: 10.1371/journal.pone.0233280.
- 12- Malik A, and Kumar A., 2015. Pan Evaporation Simulation Based on Daily Meteorological Data Using Soft Computing Techniques and Multiple Linear Regression. *Water Resources Management*, 29(3), pp. 124-139.
- 13- Malik A. Kumar A, and Singh R.P., 2019 Application of Heuristic Approaches for Prediction of Hydrological Drought Using Multi-scalar Streamflow Drought Index. *Water Resource Manage* 33(2), pp. 3985-4006.
- 14- Malik A. and Kumar A., 2020 Meteorological drought prediction using heuristic approaches based on effective drought index: a case study in Uttarakhand. *Arabgeo* 13(2), pp. 27-39.

- 15-Mashayekhi M, and Zakeri Niri M 2020a. Meteorological, Hydrological and Agricultural Droughts Prediction Using Wavelet Method in Tehran. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), pp.120-132 (In Persian).
- 16-McKee T. Doesken J, and Kleist, D., 1993 the relationship of drought frequency and duration to time scales. Proc. of the 8th Conference on Applied Climatology, *American Meteorological Society, Boston*, 12(4), pp.179-184.
- 17-Minasny B, and Mcbratney, A.B., 2002. The neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), pp. 352-361. Doi: 10.2136/sssaj2002.3520.
- 18-Moradi, M. and Rahimkhoob, A., 2013 Estimation of Reference Evapotranspiration Using NOAA Satellite Images and M5 Model Tree for Irrigation Networks - Case Study: *Gazvin Irrigation Network. JWSS*, 16(62), pp. 123-135 (In Persian).
- 19-Nourani, V. and Molajou A., 2017. Application of a hybrid association rules/decision tree model for drought monitoring. *Global and Planetary Change* 159(5), pp.37-45. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2017.10.008.
- 20-Poursalehi, F. Shahidi, A. and Khashei Siuki, A., 2020. Comparison of Decision Tree M5 and K-Nearest Neighborhood Algorithm Models in the Prediction of Monthly Precipitation (Case Study: Birjand Synoptic Station), *Iranian journal of irrigation and drainage*, 13(5), pp. 1283-1293. (In Persian).
- 21-Rezaei M, and Memarian, H., 2016 Application of Rainfall Time Series and Climatic Indices for Drought Prediction using Co-Active Neurofuzzy Inference System (Case Study: Birjand, Southern Khorasan). *Journal of Arid Biome*, 5(2), pp. 51-67(In Persian).
- 22-Sattari, M. Rezazadeh Joudi, A. and Nahrein F., 2014 Monthly Rainfall Prediction using Artificial Neural Networks and M5 Model Tree (Case study: Station of AHAR). *Physical Geography Research Quarterly*, 46(2), pp. 247-260. Doi: 10.22059/jphgr.2014.51428 (In Persian).
- 23-Sattari, M.T. Nahrein, F. and Azimi, V., 2013. M5 model trees and neural networks based prediction of daily ETO (case study: Bonab station). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 7(1), pp.104-113 (In Persian).
- 24-Sattari, M. Mirabbai Najafabadi, R. and Alimohammadi, M., 2016. Application of M5 Tree Model in Forecasting Drought (Case Study, Maragheh, Iran). *Hydro geomorphology*, 3(8), pp. 73-92. (In Persian).
- 25-Talebkeikhah, F. Rasam, S. Talebkeikhah, M. Torkashvand, M. Salimi, A. Moraveji, M. K., 2020. Investigation of effective processes parameters on lead (II) adsorption from wastewater by biochar in mild air oxidation pyrolysis process. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 12(1), pp. 1-21. Doi: 10.1080/03067319.2020.1777291.



**EXTENDED ABSTRACT**

**Experimental investigation of the effect of geometrical parameters on the equilibrium time of scour around the complex pier group**

S. Rahimnejad<sup>1</sup>, M. Esmaeili Varaki<sup>2\*</sup>, B. shafeie Sabet<sup>3</sup> and A. Radice<sup>4</sup>

1- M.Sc. student, Department of Water Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

2\* - Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Department of water and environmental engineering, Caspian Sea basin research center, University of Guilan, Rasht, Iran.([esmaeili@Guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@Guilan.ac.ir))

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Guilan, Rasht.

4- Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

**I - ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 10 December 2022

Revised: 29 April 2023

Accepted: 1 May 2023

*Keywords:*

Complex pier, Equilibrium scour time, Scour depth, Pile cap geometry.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Rahim Nejad, S., Esmaeili Varaki, M., Shafiei, B., Radice, A. (2024). 'Experimental investigation of the effect of geometrical parameters on the equilibrium time of scour around the complex pier group', *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 99-117. doi: 10.22055/jise.2023.42501.2048

**Introduction**

Scour around the bridge piers is a kind of erosion that occurs due to complex vortex flows and finally creates a hole around the bridge piers (Yang et al., 2019). The maximum scour depth, which called Equilibrium scour depth, can take a very long time to reach. Although many researches have been carried out to determine the equilibrium scour time, there is still no suitable criteria for determining the equilibrium scour time for the complex piers which consist of the pile group, pile cap and piers. In the present study, considering the importance of this fact that the local scour process is dependent on time, the effect of the complex pier geometrical parameters on the equilibrium scour time around the complex pier is investigated. In addition, a regression equation for the estimation of equilibrium scour time was presented which has suitable performance to estimate desired output in the range of the experimental data of the present study.

**Methodology**

The experiments were carried out at the hydraulic and physical-hydraulic modeling laboratory of the water engineering department of University of Guilan using a rectangular flume with a recirculation system 8.15 m long, 0.88m wide and 1 m deep which had walls made of glass and bed made of iron. The pier group in this study consisted of two rectangular columns made of aluminum with a width and length of 2.5 and 3.5 cm, respectively; with 28-degree skew angle were placed on rectangular pile cap with 10 cm width and 16 cm length and 3 and 5 cm thicknesses. The piles were prepared from iron pipes with 2 cm length and 3 cm width and were installed in the form of 2×2 and 2×3 arrangements below the pile cap the sediment used in this study was uniform sand with a particle size of 0.7 mm, large enough to avoid ripple formation. This sand was used to fill a recess section, 1.5 m long and 0.3 m deep. The upstream and downstream reaches of the flume were covered with coarser sand with a size of 1–2 mm. The recess section and the complex piers were sufficiently distant from the flume inlet to ensure that the scour process was induced by a developed flow.

For each run, water was let into the channel at a low discharge to prevent undesired sediment motion before the run was intended to start. Then, the flow depth was increased to the prescribed

value of 0.23 m using the butterfly gate. Finally, the flow discharge was increased to the target value of 0.0537 m<sup>3</sup>/s, continuously adjusting the butterfly gate to maintain a constant water depth.

Scour depth values were frequently collected using a point gauge whose shape enabled scour depth values to be taken below the cap if needed. Experiments were ended as the variation of the scour depth became less than 1 mm after 3 hours based on Raudkivi and Ettema (1983). The final scour topography was measured using a Laser scanner Leica with  $\pm 1$  mm accuracy.

## Results and Discussion

It is common to use the effective or equivalent diameter ( $D_e$ ) for the effect of the effective components in the investigation of scour around the pier groups. The comparison of the results showed that in each installation of the top level of the pile cap, the effective diameter increased by 40% on average with the increase in the diameter of the piles, while the effective diameter increased by 5% on average with increase in the thickness of the pile cap. Also, by increasing the top level installation of the pile cap, due to the smaller piles diameter compared to the pier width, the effective diameter decreases by an average of 8%.

The comparison of the laboratory results of the top level installation of the pile cap  $Z/D=1$ , indicated that as the relative piles diameter ( $d_p/D$ ) increased from 0.6 to 0.9 which led to increase in the relative effective diameter of the complex pier, the value of the equilibrium scour time and corresponding scour depth ( $d_{se}/D$ ) increased by 20% and 11% on average, respectively. At the same condition, the value of the relative pile cap thickness ( $t_{pc}/D$ ) increased from 0.9 to 1.4 and due to the increase in the relative effective diameter of the complex pier, the equilibrium scour time decreased by 27% on average. Also, the relative equilibrium scour depth ( $d_{se}/D$ ) decreased by 7% on average. Furthermore, by changing the arrangements of the piles from  $2 \times 2$  to  $2 \times 3$  and increasing the relative effective diameter of the complex pier, the value of equilibrium scour time and relative equilibrium scour depth ( $d_{se}/D$ ) increased by 15% and 13% on average, respectively.

The comparison of the laboratory results in the  $Z/D=2$ , indicated that with the increase of  $d_p/D$  from 0.6 to 0.9, the value of the equilibrium scour and  $d_{se}/D$  value increased by 27% and 20% on average, respectively. The laboratory results showed that the increase in  $T_{pc}/D$  from 0.9 to 1.4 and increase in  $D_e/D$  led to a decrease in the value of equilibrium scour time 34% on average. In addition, the value of  $d_{se}/D$  decreases 8% on average. Considering the results indicated that by changing the arrangement of the piles from  $2 \times 2$  to  $2 \times 3$  and increasing the  $D_e/D$ , the value of the equilibrium scour time and  $d_{se}/D$  did not change significantly.

Comparing the results showed that in the  $Z/D=3$ , by the increasing of  $d_p/D$  from 0.6 to 0.9 and increasing  $D_e/D$ , the value of the equilibrium scour time increased by 13% on average. In addition, the value of  $d_{se}/D$  increases by 23% on average. Considering the laboratory results showed that increasing  $T_{pc}/D$  from 0.9 to 1.4 did not significantly change the amount of equilibrium scour time and  $d_{se}/D$ . The comparison of the laboratory results showed that by changing the arrangement of the piles from  $2 \times 2$  to  $2 \times 3$ , the value of the equilibrium scour time and  $d_{se}/D$  did not change significantly.

The laboratory results in the  $Z/D=4$  showed that by increasing  $d_p/D$  from 0.6 to 0.9, the value of the equilibrium scour time increases and the  $d_{se}/D$  increased by 30 and 24% on average, respectively. The comparison of the results showed that the increase of  $T_{pc}/D$  from 0.9 to 1.4, the  $D_e/D$  increased and the amount of equilibrium scour time increased by 18% and the value of  $d_{se}/D$  increased by 12% on average. By changing the arrangement of piles from  $2 \times 2$  to  $2 \times 3$ , the value of the equilibrium scour time increased by 11% on average and the value of  $d_{se}/D$  does not change significantly.

In this study, in order to derive the regression equation to estimate the equilibrium scour time around the complex pier group, the effective parameters were studied in the form of following equation:

$$t_e = a \left(\frac{D_e}{T}\right)^b \left(\frac{Z}{T}\right)^c \left(\frac{d_p}{T}\right)^d \left(\frac{y}{D_e}\right)^e \left(\frac{d_{se}}{D_e}\right)^f \quad (1)$$

The corresponding values of variables are shown in Table (1). The comparison of results indicated that there is good agreement between the desired outputs and experimental results.

**Table 1- Coefficients of equations to estimate equilibrium time and related statistical indicat**

The number of parameters	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>RMSE</i>	<i>NSE</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>MAPE</i> (%)
2	0.68	1.05	2.32	0	0	0	0.12	0.99	0.99	4.67
4	0.72	0.97	-0.004	0.08	2.32	0	0.03	0.99	1	0.21
5	0.72	0.96	0.006	0.09	2.33	-0.01	0.04	0.99	1	0.015

### Conclusions

In this research, the effect of different parameters of complex bridge pier (the relative thickness of pile cap, the relative diameter of piles, the arrangement of piles and the relative elevation of pile cap) on the equilibrium scour time around the complex pier group was investigated experimentally. The comparison of the results showed that for all installation of the top level of pile cap, by changing the arrangements of the piles from 2×2 to 2×3, the equilibrium scour time increased between 4 and 22%. The results indicate that at all installation of the top level of the pile cap, by increasing ( $d_p/D$ ) from 0.6 to 0.9, the equilibrium scour time increases between 14 and 26% on average. The comparison of the results showed that the equilibrium scour time increased by increasing the relative thickness of the pile cap in the range of 8 to 18% on average, but by increasing the number of piles, the equilibrium scour time increased from 0.9 to 1.4 and by increasing the pile cap thickness ( $T_{pc}/D$ ), the equilibrium scour time increased by 3 and 28% on average. Also, in a regression equations including 2, 4, and 5 parameters were derived to estimate the equilibrium scour time around the complex pier group.

### References

- 1- Yang. Y. Melville. B.W. Macky. G. H. and Shamseldin. A. Y. 2019. Local scour at complex bridge piers in close proximity under clear-water and live-bed flow regime. *Water*, 11: 1530. [doi: 10.3390/w11081530](https://doi.org/10.3390/w11081530).
- 2- Raudkivi. A. J. and Ettema. R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (3): 339-350.



## مطالعه آزمایشگاهی اثر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آبشستگی اطراف گروه پایه مرکب

سپیده رحیم‌نژاد<sup>۱</sup>، مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۲\*</sup>، بهنام شفیعی ثابت<sup>۳</sup> و السیو رادیس<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir).

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت.

۴- دانشیار گروه عمران و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه پلی تکنیک میلان، ایتالیا، میلان.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

### چکیده

آبشستگی در مجاورت پایه‌های پل یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری پل‌های احداث شده در رودخانه‌ها می‌باشد. با توجه به اهمیت بررسی مکانیزم‌ها و پارامترهای اثرگذار بر مقدار عمق آبشستگی، تاکنون محققین زیادی به بررسی آن پرداخته‌اند. یکی از موضوع‌های مهم در این زمینه، اطمینان از حصول عمق تعادل آبشستگی و مدت زمان رسیدن به آن می‌باشد. در تحقیق حاضر، اثر پارامترهای هندسی گروه پایه مرکب بر زمان تعادل آبشستگی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها روی گروه پایه کج نصب شده روی سر شمع با ضخامت‌های نسبی  $(T_{pc}/D)$   $0/9$  و  $1/4$ ، گروه شمع‌هایی با قطرهای نسبی مختلف  $(d_p/D)$   $0/6$  و  $0/9$ ، آرایش شمع‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  و تراز نسبی کارگذاری سرشمع  $(Z/D)$   $1/2$ ،  $3$  و  $4$  انجام شدند. مقایسه نتایج نشان داد در هر تراز نسبی کارگذاری سرشمع‌ها، زمان تعادل آبشستگی با افزایش قطر شمع‌ها و تعداد شمع‌ها افزایش می‌یابد. همچنین در ترازهای کارگذاری سرشمع در نزدیکی بستر، با افزایش ضخامت سرشمع‌ها، زمان تعادل آبشستگی کاهش یافته و ولی با افزایش تراز کارگذاری و امکان عبور بیشتر جریان از فضای زیر سرشمع، زمان تعادل آبشستگی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، رابطه رگرسیونی برای برآورد زمان تعادل آبشستگی در دامنه داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر ارائه شد.

**کلید واژه‌ها:** پایه پل مرکب، زمان تعادل آبشستگی، عمق آبشستگی، هندسه سرشمع.

### مقدمه

آبشستگی یکی از مسائل مهم در علم مهندسی رودخانه و مهندسی سواحل می‌باشد. محققین آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل‌ها را یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌ها می‌دانند. براساس گزارش‌های منتشر شده، علی‌رغم بهبود و ارتقا دانش فنی در مورد طراحی سازه‌های پل‌ها و پیشرفت تکنولوژی، آمار تخریب پل‌ها افزایش یافته است. لذا بررسی هرچه بیشتر این پدیده جهت رسیدن به نتایج دقیق‌تر امری ضروری است. تخریب پل‌ها که می‌تواند ناشی از آبشستگی باشد نه تنها اهداف مهندسی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بلکه منجر به تغییرات ریخت‌شناسی، هیدرولیکی، رسوبی و محیط زیستی رودخانه در محدوده سازه می‌شود (Lagasse et al., 2009).

آبشستگی در حقیقت جابه‌جایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری است. آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسانی مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به‌طور کلی، آبشستگی را می‌توان از نظر علل

ایجاد آن به سه بخش آبشستگی عمومی، آبشستگی انقباضی و آبشستگی موضعی (اطراف پل‌ها و تکیه‌گاه‌ها) طبقه‌بندی نمود (Richardson and Davis, 2001).

آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها در واقع نوعی فرسایش می‌باشد که در اثر جریان‌های پیچیده گردابه‌ای شکل رخ داده و در نهایت باعث ایجاد یک گودال در اطراف پایه‌های پل می‌شود. مکانیزم و الگوی جریان آب در اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده است. دو عامل تاثیرگذار باعث تغییر در مکانیزم جریان در اطراف پایه‌های پل می‌شود: (۱) برخورد جریان آب و (۲) جدا شدن جریان آب از پایه‌های پل. با برخورد جریان به پایه پل، انرژی جنبشی جریان افزایش یافته و ساختارهای متلاطم جدیدی به نام گردابه‌های نعل‌اسبی، برخاستگی و موج کمائی ایجاد می‌شود. با برخورد جریان آب به پایه پل، کاهش فشار از سطح آزاد جریان به سمت بستر رخ داده و جریان‌های رو به پایینی ایجاد می‌شود. سرعت این جریان‌ها یکنواخت نبوده و به دلیل متغیر بودن گرادیان فشار در عمق، از سطح آب به طرف بستر بیشتر می‌شود. جریان‌های رو به پایین پس از برخورد به بستر رودخانه با جریان

هفته یا بیشتر در آزمایشگاه) به طول انجامد. طبق نتایج آن‌ها توسعه زمانی آب‌شستگی در شرایط آب زلال روند تقریبی از صفر تا عمق حداکثر آب‌شستگی دارد.

Raudkivi و Ettema (1983) آب‌شستگی آب زلال در پایه‌های استوانه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که عمق تعادل آب‌شستگی به اندازه ذرات رسوبی بستر، میانگین اندازه ذرات نسبت به قطر پایه استوانه‌ای، نسبت عمق جریان به قطر پایه و اندازه ذرات رسوبی بستگی دارد. ایشان زمان تعادل را مدت زمانی معرفی نمودند که در سه ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر آب‌شستگی رخ ندهد.

Melville و Chiew (1999)، مقیاس زمانی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بازه زمانی که نرخ تغییر آب‌شستگی پس از ۲۴ ساعت کمتر از پنج درصد از قطر پایه تغییر نماید را به‌عنوان زمان تعادل معرفی نمودند. نتایج نشان داد که با تغییر زمان انجام آزمایش‌ها از پنج تا ۴۰ درصد، عمق آب‌شستگی به مقدار ۵۰ تا ۸۰ درصد تغییر می‌یابد. در نهایت رابطه جدیدی برای تخمین زمان مورد نیاز برای توسعه عمق تعادل آب‌شستگی موضعی پیشنهاد شد.

Oliveto و Hager (2002)، توسعه زمانی آب‌شستگی در پایه و تکیه‌گاه پل‌ها را بررسی کردند. در این بررسی با استفاده از استدلال‌های تشابه و مقایسه خصوصیات جریان، رابطه‌ای را برای توسعه زمانی آب‌شستگی پیشنهاد داده و با روابط ارائه شده قبلی مقایسه نمودند. بررسی نتایج نشان داد که توسعه زمانی آب‌شستگی به سه پارامتر اصلی طول پایه و تکیه‌گاه، عدد فرود و زمان نسبی بستگی دارد.

Coleman et al. (2003)، توسعه آب‌شستگی در تکیه‌گاه پل را بررسی کردند. آن‌ها اظهار داشتند که عمق آب‌شستگی در اطراف پایه پل به سرعت جریان، قطر پایه، عمق جریان و مشخصات هندسی پایه پل بستگی دارد. آن‌ها افزایش عمق آب‌شستگی در دوره زمانی ۲۴ ساعته به کمتر از درصد خاصی (برای مثال ۱/۶۷ یا پنج درصد) از قطر پایه را به عنوان زمان تعادل آب‌شستگی تعریف کردند. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که میزان تاثیر قطر رسوبات بر زمان تعادل آب‌شستگی ناچیز است. آن‌ها همچنین روشی برای تخمین عمق آب‌شستگی اطراف گروه شمع ارائه کردند.

Oliveto و Hager (2002)، توسعه زمانی آب‌شستگی در پایه و تکیه‌گاه پل‌ها را بررسی کردند. این بررسی براساس ۱۵۰ آزمایش آب‌شستگی بود که به مدت ۵۲ روز ادامه داشت. ایشان رابطه جدیدی برای توسعه زمانی آب‌شستگی پیشنهاد دادند. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد زمانی که عدد فرود آستانه حرکت بیش از ۰/۶ باشد، رابطه ارائه شده عملکرد خوبی دارد.

Grimaldi (2005)، اقداماتی را برای کاهش نرخ آب‌شستگی انجام داد. او کاهش نرخ آب‌شستگی در دوره زمانی

اصلی ترکیب‌شده و گردابه نعل اسبی را به‌وجود می‌آورد. گردابه‌های نعل اسبی بیشتر در جلو و اطراف پایه پل تشکیل می‌شوند. در اثر جدایی خطوط جریان از پایه پل، گردابه برخاستگی به‌وجود آمده که مانند یک گردباد رسوبات را از کف چاله آب-شستگی به سمت بالا حرکت می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی نقش عمده‌ای را در ایجاد چاله آب‌شستگی اطراف پایه پل ایفا می‌کنند (Melville and Sutherland, 1988 & Yang et al., 2019).

با استفاده از گروه پایه‌ها، علاوه بر گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی، الگوی‌های متفاوت دیگری در اطراف پایه شکل گرفته که در نتیجه آن، مقدار آب‌شستگی تغییر می‌نماید. در این شرایط عامل تقویت‌کننده در پایه جلویی که باعث افزایش عمق آب‌شستگی در مجاورت آن شده و عامل حفاظ بودن که منجر به کاهش سرعت مؤثر در اطراف پایه پایین‌دست و در نتیجه کاهش مقدار آب‌شستگی در محدوده آن می‌گردد (Moreno and Couto 2015).

براساس مطالعه‌ای که توسط Yang et al. (2020) انجام گرفته است، پدیده آب‌شستگی به‌طور کلی دارای چهار مرحله ابتدایی، توسعه، تثبیت و تعادل است. در مرحله اول عمق حفره آب‌شستگی به سرعت افزایش می‌یابد و معمولاً مدت زمان کوتاه‌تری دارد و در ادامه مرحله دوم نرخ آب‌شستگی کاهش می‌یابد. در مرحله سوم دیواره پایین‌دست حفره آب‌شستگی دستخوش تغییرات محسوسی شده و روند تغییرات نيمرخ بستر کاهش می‌یابد. در نهایت در مرحله چهارم نرخ افزایش عمق آب‌شستگی ناچیز است و با توجه به شرایط جریان، ممکن است جابه‌جایی ذرات متوقف شده یا تنها حرکت ذرات درون حفره آب‌شستگی صورت گیرد.

تعیین عمق تعادل آب‌شستگی و زمان مربوطه در تخمین میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه‌ها و طراحی ابعاد پی آن‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. با وجود آنکه از سال ۱۹۵۱ تاکنون مطالعه‌های بسیار زیادی در رابطه با آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل انجام گرفته است که منجر به بهبود قابل توجهی در دقت برآورد عمق آب‌شستگی شده است ولی هنوز موارد بسیاری در زمینه آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل به ویژه پایه‌های مرکب (پل‌های شامل گروه پایه، سرشمع و شمع‌ها) وجود دارد که ادامه تحقیق در این زمینه را ضروری می‌سازد (Lee, 2006).

تاکنون جنبه‌های مختلف موضوع آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل بررسی شده است. از جمله این موارد توسعه زمانی آب‌شستگی و نقش مقیاس زمان بر تغییرات آب‌شستگی می‌باشد.

Chabert و Engeldinger (1956) آب‌شستگی اطراف پایه پل را بررسی کردند. آن‌ها مدت زمانی که عمق آب‌شستگی با گذشت زمان تغییر نمی‌کند را زمان تعادل آب‌شستگی معرفی کردند. از نظر آن‌ها آب‌شستگی در پایه‌های پل تحت شرایط آب زلال برای رسیدن به تعادل می‌تواند مدت زمان زیادی (تا چند

پارامترهای نسبت ضخامت سرشمع به عمق جریان، نسبت عرض پایه به عرض سرشمع، نسبت فاصله از سطح بستر اولیه تا بالای سرشمع به عمق جریان و شکل اجزای پایه‌های مرکب بستگی دارد.

Yang et al. (2019)، آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های پل را در شرایط آب زلال و بستر زنده بررسی کردند. آن‌ها با بررسی روش‌های متداول پیش‌بینی عمق تعادل آب‌شستگی، یک روش ترکیبی از روش‌های موجود را پیشنهاد دادند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که زاویه انحراف پایه نسبت به راستای جریان باعث تسریع روند توسعه آب‌شستگی می‌شود. آن‌ها بیان داشتند که آرایش پایه‌های پل اثر محسوسی بر توسعه زمانی آب‌شستگی دارد.

Yang et al. (2020)، توسعه زمانی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های مرکب با جانمایی کج و هم‌راستا با جریان برای شرایط آب زلال را بررسی کردند. نتایج گویای آن است که برای پایه‌های مرکب هم‌راستا با جریان، عمق حداکثر آب‌شستگی در پایین‌دست پایه جلویی رخ می‌دهد اما، برای پایه‌های مرکب با جانمایی کج، آب‌شستگی از هر دو کناره‌ی جانبی پایه شروع شده و عمق حداکثر آب‌شستگی در پایین‌دست کناره پایه رخ می‌دهد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که روند توسعه آب‌شستگی برای پایه‌های مرکب با جانمایی کج در مقایسه با پایه‌های منفرد، بیشتر است. همچنین آن‌ها اظهار داشتند که در سرشمع مدفون، در مدت زمان بسیار کوتاهی بیش از سه‌چهارم عمق تعادل آب‌شستگی رخ داده و تنها تغییرات آب‌شستگی بسیار کمی بعد از آن باقی می‌ماند. اگرچه تاکنون تحقیقات بسیاری برای تعیین زمان تعادل آب‌شستگی انجام شده است ولی، هنوز معیار مناسبی برای تعیین زمان تعادل آب‌شستگی برای شرایطی که پایه پل از هندسه مرکب شامل گروه پایه، سرشمع و شعع می‌باشد، وجود ندارد. با توجه به اهمیت این موضوع که روند آب‌شستگی موضعی وابسته به زمان است، در تحقیق حاضر اثر پارامترهای هندسی پایه مرکب شامل ضخامت سرشمع و تراز کارگذاری آن، قطر و آرایش شعع‌ها بر زمان تعادل آب‌شستگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی

مجموعه‌ای از پارامترهای توصیف‌کننده که اندرکنش این عوامل در مسیر جریان موجب افزایش و یا کاهش آب‌شستگی می‌گردد شامل مشخصات سیال و رسوبات بستر، هندسه پایه پل، شعع و سرشمع‌ها، شرایط هیدرولیکی جریان و زمان را می‌شود که آن‌ها را می‌توان به‌صورت رابطه تابعی زیر نوشت:

$$f_1(Y, B, d_{st}, D, D_{pc}, L_{pc}, T_{pc}, Z, d_p, m, n,$$

۲۴ ساعته به کمتر از پنج درصد از یک سوم قطر پایه پل را بعنوان یک معیار محدودکننده برای زمان تعادل آب‌شستگی معرفی کرد. طبق معیار ایشان مدت زمان آزمایش‌ها طولانی‌تر از معیارهای ارائه شده توسط سایر محققین می‌باشد.

Lu et al. (2011)، تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این بررسی مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای پیشنهاد شد. مقایسه نتایج گویای آن است که مدل پیشنهاد شده برای برآورد توسعه زمانی عمق آب‌شستگی نتایج و عملکرد قابل قبولی داشت.

Simarro et al. (2011)، عمق تعادل آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها زمان تعادل را در حدود ۱۰۰ ساعت پیش‌بینی کردند.

Lança et al. (2013)، آب‌شستگی آب زلال را در گروه پایه‌ها بررسی کردند. آن‌ها تأثیر زمان، فاصله شعع‌ها، زاویه انحراف و تعداد شعع‌های گروه شعع را بر عمق تعادل آب‌شستگی در شرایط آستانه حرکت رسوبات مورد بررسی قرار دادند. بررسی نتایج آزمایش‌های با دوره زمانی کمتر از هفت روز، حاکی از عدم اطمینان برای تعیین عمق تعادل آب‌شستگی می‌باشد. آن‌ها بیان داشتند که عمق آب‌شستگی محاسبه شده از روش برون‌یابی، به‌طور متوسط ۱۰ درصد بیشتر از عمق آب‌شستگی اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش‌های طولانی مدت است.

Ferraro et al. (2013)، اثر ضخامت سرشمع بر عمق حداکثر آب‌شستگی در پایه‌های مرکب را بررسی کردند. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که به‌طور کلی سرشمع ضخیم‌تر، حفره آب‌شستگی عمیق‌تری ایجاد می‌کند. همچنین ضخامت سرشمع با تغییر تراز کارگذاری سرشمع بر توسعه زمانی آب‌شستگی اثرگذارتر می‌شود. بررسی نتایج حاکی از آن بود که فاصله سرشمع نسبت به بستر اولیه روی زمان تعادل آب‌شستگی اثرگذار است ولی بر عمق حداکثر آب‌شستگی تأثیری ندارد.

Moreno و Couto (2015)، اثر عرض نسبی پایه و ارتفاع سرشمع بر عمق آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌های مرکب را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که افزایش مقادیر عمق آب‌شستگی (توسعه زمانی) به افزایش عرض پایه و تراز کارگذاری سرشمع مرتبط می‌باشد. آن‌ها با بررسی معیارهای متداول برای توقف آزمایش‌ها در پایه‌های مرکب، معیار جدیدی را معرفی کردند.

Moreno و Couto (2016)، پیش‌بینی عمق تعادل آب‌شستگی موضعی در پایه‌های مرکب پل را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن بود که در یک موقعیت خاص فاصله از سطح بستر اولیه تا بالای سرشمع، افزایش عرض پایه، کاهش طول بخش‌های پیشانی و جانبی سرشمع سبب افزایش مقادیر عمق تعادل آب‌شستگی می‌شود. علاوه بر این مدت زمان آزمایش و مراحل مختلف آب‌شستگی به

با جایگزینی پارامتر  $D$  به جای  $y$  به عنوان مقیاس طول، رابطه (۲) به صورت رابطه (۳)، ساده می‌گردد.

$$\frac{d_{st}}{D} = f_3\left(\frac{B}{D}, \frac{D}{y}, \frac{D_{pc}}{D}, \frac{L_{pc}}{D}, \frac{T_{pc}}{D}, \frac{Z}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\rho U y}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \sigma_g, m, n, \alpha, \beta, \frac{U t}{D}\right) \quad (3)$$

با توجه به شرایط آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، از میان پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی پایه پل، زاویه‌های پایه‌های پل در صفحه موازی و قائم جریان ( $\alpha$  و  $\beta$ ) ثابت در نظر گرفته شد. پارامتر انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی ( $\sigma_g$ ) به جهت یکنواختی رسوبات مورد استفاده بر تغییرات عمق آب‌شستگی بی‌تأثیر است. همچنین، به دلیل آشفته بودن جریان، عدد رینولدز در تمام آزمایش‌ها از ۹۱۰۰ بیشتر بود و از این رو از تأثیر این پارامتر صرف نظر شد و رابطه (۳) به صورت رابطه (۴) اصلاح شد.

$$\frac{d_{st}}{D} = f_4\left(\frac{D}{y}, \frac{T_{pc}}{D}, \frac{Z}{D}, \frac{d_p}{D}, m, n, \frac{U t}{D}\right) \quad (4)$$

در این تحقیق از رابطه (۴) به عنوان یک رابطه اصلی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

$$D_{50}, U, U_c, \rho, \rho_s, \mu, g, \sigma_g, \alpha, \beta, t) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $y$ : عمق جریان،  $B$ : عرض فلوم،  $d_{st}$ : عمق لحظه‌ای آب‌شستگی،  $D$ : عرض پایه پل،  $D_{pc}$ : عرض سرشمع،  $L_{pc}$ : طول سرشمع،  $T_{pc}$ : ضخامت سرشمع،  $Z$ : فاصله سرشمع تا تراز بستر اولیه جریان،  $d_p$ : قطر شمع،  $m$ : تعداد شمع در یک ردیف،  $n$ : تعداد شمع در یک ستون،  $D_{50}$ : قطری از ذرات که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر است،  $U$ : سرعت متوسط جریان،  $U_c$ : سرعت جریان برای شرایط آستانه حرکت،  $\rho$ : چگالی آب،  $\rho_s$ : چگالی رسوبات بستر،  $\mu$ : لزجت دینامیک،  $g$ : شتاب ثقل،  $\sigma_g$ : انحراف معیار مصالح رسوبی بستر،  $\alpha$ : زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه موازی جریان،  $\beta$ : زاویه انحراف پایه‌ها در صفحه عمود بر جریان، و  $t$ : زمان از شروع آب‌شستگی می‌باشد. در شکل (۱)، برخی از پارامترهای هندسی معرفی شده است.

با استفاده از تئوری باکینگهام و با در نظر گرفتن متغیرهای  $y$ ،  $U$  و  $\rho$  به عنوان متغیرهای تکراری در تحلیل ابعادی می‌توان کمیت‌های بی‌بعد زیر را به دست آورد:

$$\frac{d_{st}}{D} = f_2\left(\frac{B}{y}, \frac{D}{y}, \frac{D_{pc}}{y}, \frac{L_{pc}}{y}, \frac{T_{pc}}{y}, \frac{Z}{y}, \frac{d_p}{y}, \frac{D_{50}}{y}, \frac{U}{U_c}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\rho U y}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gy}}, \sigma_g, m, n, \alpha, \beta, \frac{U t}{y}\right) \quad (2)$$

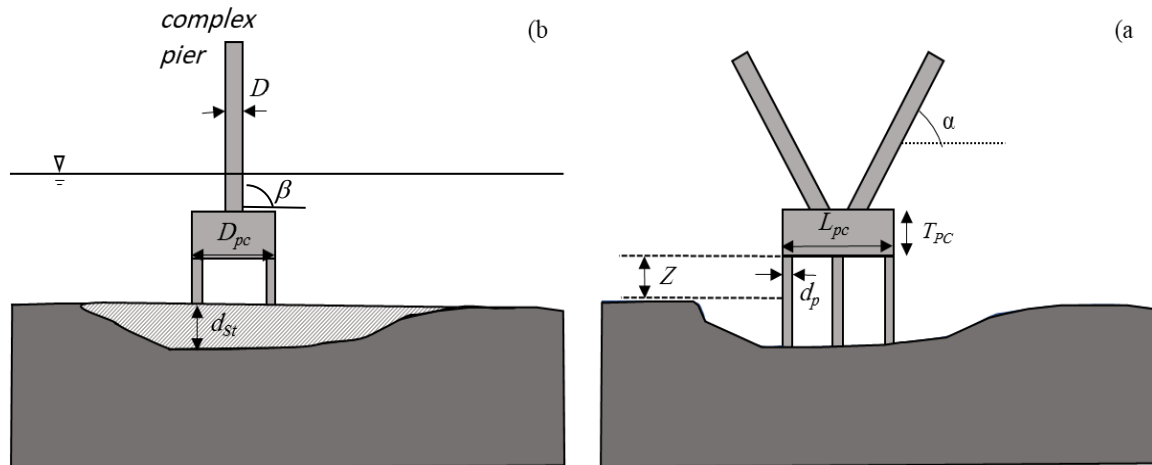


Fig. 1- Introducing the parameters of the complex pier group: (a side view and (b front view

شکل ۱- معرفی پارامترهای گروه پایه مرکب (a نمای جانبی و (b نمای روبه‌رو

توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به پایه پل اطمینان حاصل شود.

گروه پایه مورد بررسی در این تحقیق از دو پایه کج مستطیلی شکل از جنس آلومینیوم به طول و عرض  $2/5$  و  $3/5$  سانتی‌متر تشکیل شده که با زاویه  $(\alpha)$   $28$  درجه روی سرشمع مستطیلی شکل به طول و عرض  $10$  و  $16$  سانتی‌متر و با ضخامت‌های سه و پنج سانتی‌متری نصب شد.

لازم به ذکر است تناسب هندسی این گروه پایه دارای مقیاس  $1/190$  از پل هشتم شهر اهواز می‌باشد. در انتخاب مقیاس و ابعاد نهایی گروه پایه، ضوابطی که محققان در خصوص تاثیرناپذیری مقدار آب‌شستگی از عرض فلوم ارائه داده‌اند، رعایت گردید. طبق نظر Raudkivi و Ettema (1983) اگر نسبت عرض فلوم به عرض پایه پل از  $6/25$  بیشتر باشد، دیواره‌های فلوم تاثیری بر مقدار آب‌شستگی نخواهند داشت. این نسبت برای پایه و ابعاد سرشمع پل مورد بررسی در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب برابر با  $25$  و نه است. شمعی‌های مورد استفاده از لوله‌هایی با جنس آهن در قطرهای دو و سه سانتی‌متر تهیه و در قالب آرایش‌های  $2 \times 2$  و  $2 \times 3$  در زیر سرشمع نصب گردیدند.

### تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان در فلومی به شکل مستطیل با سیستم بازچرخانی به طول  $8/15$  متر، عرض  $0/88$  متر و عمق یک متر که دارای دیواره‌های از جنس شیشه و کف فلزی است، انجام گردید. در شکل‌های (۲) و (۳)، طرح کل فلوم آزمایشگاهی و پایه مرکب مورد بررسی نشان داده شده است.

به‌منظور تأمین دبی جریان، از پمپ سانتریفیوژ استفاده شد که می‌تواند دبی جریان را تا  $70$  لیتر بر ثانیه تأمین کند. با توجه به اهمیت تنظیم دقیق دبی در آزمایش‌ها، از یک دستگاه کنترل‌کننده سرعت دورانی الکتروموتور پمپ استفاده شد که با حداقل اتلاف وقت امکان تنظیم دبی جریان میسر می‌گردد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از دبی‌سنج التراسونیک با دقت  $\pm 0/01$  لیتر بر ثانیه استفاده شد که روی لوله مکش پمپ نصب شده بود. جریان خروجی از پمپ ابتدا وارد مخزن اولیه و پس از عبور از آن وارد مخزن آرام‌کننده پایین‌دست می‌شود و سرانجام با عبور از مستقیم‌ساز جریان در خروجی این مخزن، وارد فلوم می‌گردد. محل نصب پایه پل پنج متر بعد از ورودی فلوم انتخاب شد تا از

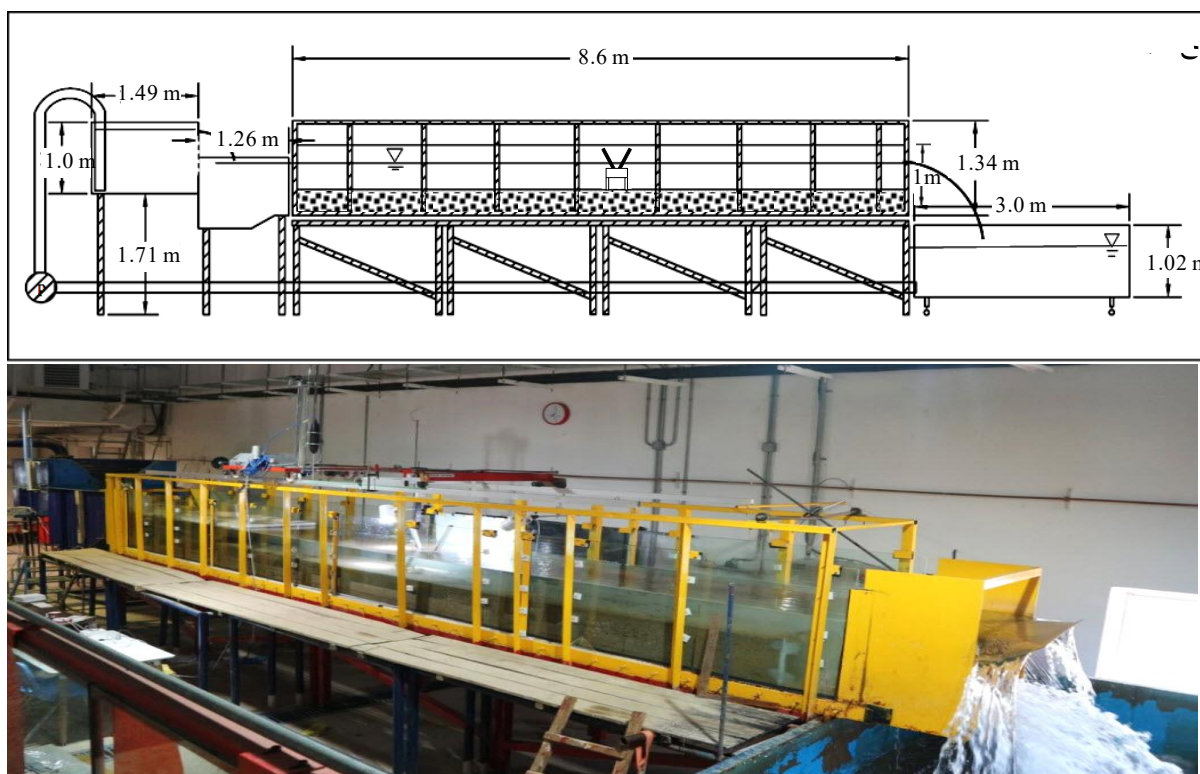


Fig. 2- Scheme and view of laboratory flume

شکل ۲ - طرح کلی و نمایی از فلوم آزمایشگاهی



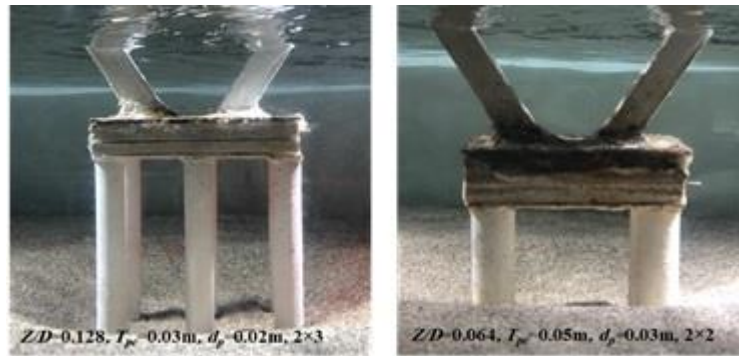


Fig. 3- View of the complex pier for different pile group geometries at the different relative pile cap elevation

شکل ۳- نمایی از گروه پایه مرکب برای هندسه‌های مختلف گروه‌شمع در ترازهای نسبی مختلف کارگذاری سرشمع

Table 1- The range of experimental parameters

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

Z/D	Fr	y/D	Pile arrangement	$d_p/D$	$T_{pc}/D$
1, 2, 3, 4	0.18	6.57	3×2 & 2×2	0.6 & 0.9	0.9
					1.4

انتهایی برای رسیدن به زمان تعادل نمی‌توان به‌دست آورد چراکه هرچه از زمان شروع آب‌شستگی گذشته باشد، باز هم فرآیند فرسایش در حفره هر چند اندک و نامحسوس ادامه می‌یابد و در زمان طولانی نمودار تغییرات آن بصورت مجانب‌وار با خط افق امتداد می‌یابد.

در این تحقیق از دو معیار Melville و Chiew (1999) و Raudkivi و Ettema (1983) برای تعیین زمان تعادل استفاده شد.

در ابتدای هر آزمایش با نصب گروه پایه مورد نظر، بستر رسوبی در مجاورت آن تراز شده و به تدریج آب‌اندازی به کانال انجام می‌گرفت. در نهایت بعد از تنظیم دقیق دبی جریان برای تامین سرعت جریان معادل ۰/۹۵ آستانه حرکت ذرات، عمق نسبی جریان ( $y/D$ ) در کانال با مانور دریچه انتهایی فلوم برابر ۶/۵۷ تنظیم می‌گردید. پس از شروع آزمایش مقدار توسعه زمانی عمق آب‌شستگی به‌صورت پیوسته با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ ± میلی‌متر اندازه‌گیری به‌عمل می‌شد. در پایان هر آزمایش، عمق حداکثر آب‌شستگی و توپوگرافی بستر با استفاده از متر لیزری با دقت ۱ ± میلی‌متر قرائت شد.

در این تحقیق به‌منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آب‌شستگی و ارزیابی روابط ارائه شده برای برآورد آن، در مجموع ۳۲ آزمایش برای گروه پایه مرکب با ضخامت نسبی سرشمع ( $T_{pc}/D$ ) ۰/۹ و ۱/۴، قطر نسبی شمع ( $d_p/D$ ) ۰/۶ و ۰/۹ و آرایش شمع‌های ۲×۲ و ۲×۳ و ترازهای نسبی کارگذاری سرشمع ( $Z/D$ ) یک، دو، سه و چهار اجرا شد که دامنه این پارامترهای مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

اندازه ذرات رسوبی از عوامل مؤثر بر عمق آب‌شستگی است. Sutherland و Melville (1988) نشان دادند که اگر نسبت عرض پایه به قطر ذرات رسوبی ( $D_{col}/D_{50}$ ) از ۲۰ تا ۲۵ بیشتر باشد، کاهش قطر ذرات تاثیری بر مشخصات آب‌شستگی نخواهد داشت. Raudkivi و Ettema (1983) بیان داشتند که برای جلوگیری از تشکیل شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر ذرات رسوبی باید از ۰/۷ میلی‌متر بیشتر باشد. در این تحقیق، قطر ذرات رسوبی مورد استفاده یکنواخت و برابر ۰/۷ میلی‌متر انتخاب و در بازه‌ای به طول ۱/۵ متر، ضخامت ۰/۳ متر در فاصله پنج متری از ابتدای فلوم قرار داده شد که محدوده مورد مطالعه برای آب‌شستگی پایه پل بود. به منظور شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، بالادست و پایین دست بازه مورد مطالعه برای آب‌شستگی پایه پل از رسوبات درشت‌دانه که در مرحله الک کردن باقی مانده بود، پوشانده شد.

حداکثر آب‌شستگی موضعی در مجاورت پایه پل زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات رسوبی بستر در بالادست پایه پل در آستانه حرکت قرار می‌گیرند. از این رو لازم است قبل از شروع بررسی پدیده آب‌شستگی، مقدار سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی تعیین گردد. برای این منظور، در دامنه‌ای از سرعت و عمق جریان وضعیت حرکت ذرات بستر بررسی و در نهایت مقدار متوسط سرعت برای آستانه حرکت رسوبات بستر ۰/۲۸ متر بر ثانیه تعیین گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که هم‌خوانی مطلوبی با دیاگرام شیلدز و روابط تجربی وجود دارد.

همان‌طور که اشاره شد، پدیده آب‌شستگی فرآیندی زمان بر بوده و تعیین زمان تعادل آب‌شستگی یکی از مباحث مهم در بررسی آب‌شستگی است. لازم به ذکر است که به‌صورت مطلق

## نتایج و بحث

## الف) بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر زمان تعادل آبشستگی در ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع

در بررسی آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها متداول است که از قطر مؤثر یا معادل برای اثرگذاری اجزای مؤثر بر آبشستگی استفاده شود. شکل (۴) مفهوم کلی قطر مؤثر پایه مرکب را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای محاسبه قطر معادل از روش ارائه شده توسط Renna و Sheppard (2005) استفاده شد. در این روش برای محاسبه قطر مؤثر پایه مرکب با توجه به شرایط رسوبات بستر و تراز کارگذاری سرشمع سه حالت شامل (۱) سرشمع بیرون از بستر رسوبی قرار دارد، (۲) سرشمع کمی در بستر رسوبی مدفون شده است و (۳) سرشمع به طور کامل مدفون شده است، تعریف گردید. در نهایت قطر مؤثر هر یک از اجزای پایه مرکب شامل قطر مؤثر پایه پل ( $D_{col}$ )، قطر مؤثر گروه شمع ( $D_{pg}$ ) و قطر مؤثر سرشمع ( $D_{pc}$ )، جداگانه محاسبه شده و از مجموع قطر مؤثر هر یک از اجزا، قطر مؤثر پایه مرکب به دست می‌آید.

$$D_e = D_{pc} + D_{pg} + D_{col} \quad (5)$$

قطر مؤثر پایه پل به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_{col} = K_s K_\alpha K_f b_{col} [0.1162 \left( \frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \right)^2] - 0.3617$$

$$\left( \frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \right) + 0.2476 \quad \text{for } 0 \leq \frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \quad (\text{الف-۶})$$

$$D_{col} = 0 \quad \text{for } 0 > \frac{H_{col}}{y_{0(max)}} \quad (\text{ب-۶})$$

که در آن  $K_s$ : ضریب شکل،  $K_\alpha$ : ضریب زاویه انحراف جریان،  $K_f$ : ضریب توسعه سرشمع،  $b_{col}$ : عرض پایه پل،  $H_{col}$ : فاصله بین بستر و زیر پایه پل،  $y_{0(max)}$ : مقدار حدی برای محاسبه قطر مؤثر است.

برای محاسبه قطر معادل سرشمع رابطه زیر ارائه شد:

$$D_{pc} = K_s K_\alpha b_{pc} \exp\left(\frac{H_{pc}}{y_{0(max)}}\right) + 1.695 \left(\frac{T_{pc}}{y_{0(max)}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

که در آن  $b_{pc}$ : عرض سرشمع،  $H_{pc}$ : فاصله بین بستر و زیر سرشمع،  $T_{pc}$ : ضخامت سرشمع است.

قطر معادل شمع‌ها به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_{pg} = K_{sp} K_h K_m K_s W_p \quad (8)$$

که در آن  $K_{sp}$ : ضریب شکل سرشمع،  $K_h$ : ضریب ارتفاع گروه‌شمع که روی سرشمع تعبیه شده است،  $K_m$ : تعداد شمع‌های در معرض جریان،  $W_p$ : عرض محاسبه شده شمع‌ها در گروه شمع است.

در شکل (۵) قطر مؤثر پایه مرکب محاسبه شده برای هندسه‌های مختلف سرشمع در تراز نسبی مختلف کارگذاری سرشمع ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان داد که در هر تراز با افزایش قطر شمع‌ها به طور متوسط ۴۰ درصد قطر مؤثر افزایش یافته در حالیکه با افزایش ضخامت سرشمع، قطر مؤثر پنج درصد بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش تراز کارگذاری سرشمع‌ها، قطر مؤثر به دلیل کمتر بودن قطر شمع‌ها نسبت به عرض پایه و افزایش سطح در تماس جریان شمع‌ها نسبت به پایه‌های پل، به طور متوسط هشت درصد کاهش می‌یابد.

در شکل (۶)، توسعه زمانی عمق حداکثر آبشستگی برای شرایط مختلف هندسه شمع‌ها و ترازهای مختلف کارگذاری سرشمع آورده شده است.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=1$  حاکی از آن است که برای ضخامت نسبی سرشمع  $(T_{pc}/D)$  ۱/۴، در آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$ ، با افزایش قطر نسبی شمع  $(d_p/D)$  از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش قطر مؤثر نسبی پایه مرکب  $(D_e/D)$  از ۱/۳۹ به ۱/۸۷، مقدار زمان تعادل آبشستگی ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار عمق نسبی تعادلی آبشستگی  $(d_{se}/D)$  از ۲/۱۱ به ۲/۶ تغییر پیدا نمود. برای  $T_{pc}/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$ ، افزایش  $d_p/D$  از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش قطر مؤثر نسبی پایه مرکب  $(D_e/D)$  از ۱/۴۵ به ۱/۹۴، مقدار زمان تعادل آبشستگی را به میزان هشت درصد افزایش می‌دهد. در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند.

مقایسه نتایج نشان داد که در تراز کارگذاری سرشمع مذکور، با کاهش  $T_{pc}/D$  به ۰/۹، در آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $d_p/D$  از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۳۶ به ۱/۷۵، مقدار زمان تعادل آبشستگی چهار درصد افزایش یافته و مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۴ به ۲/۷۱ می‌رسد. با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$  و افزایش  $d_p/D$  از ۱/۳۶ به ۱/۸، مقدار زمان تعادل آبشستگی و  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند.

به عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=1$ ، اثر افزایش قطر شمع بر مقدار و زمان آب-شستگی تنها در آرایش  $2 \times 2$  همسو می‌باشند. با افزایش تعداد شمع‌ها در آرایش  $2 \times 3$  و وقوع پدیده سپرشدگی برای پایه میانی و عقبی، افزایش قطر شمع‌ها از ۰/۶ به ۰/۹، مدت زمان آبشستگی را افزایش داده ولی مقدار آبشستگی افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند.

نشان داد که برای  $d_p/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0.9$  به  $1.4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1.36$  به  $1.45$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان  $20\%$  کاهش می‌یابد. علاوه بر این در این شرایط مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/57$  به  $2/57$  کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد برای  $d_p/D$  برابر با  $0.6$ ، در آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0.9$  به  $1.4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1.36$  به  $1.39$  منجر به کاهش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان  $23\%$  می‌شود. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/4$  به  $2/11$  تغییر می‌کند. مقایسه نتایج

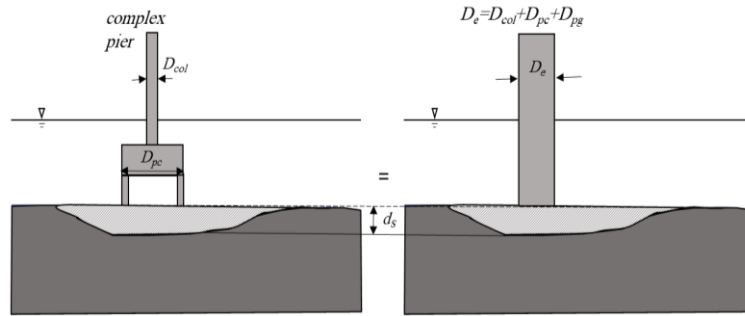


Fig. 4- Scheme of effective diameter for a complex pier

شکل ۴- طرح کلی قطر مؤثر برای گروه پایه مرکب

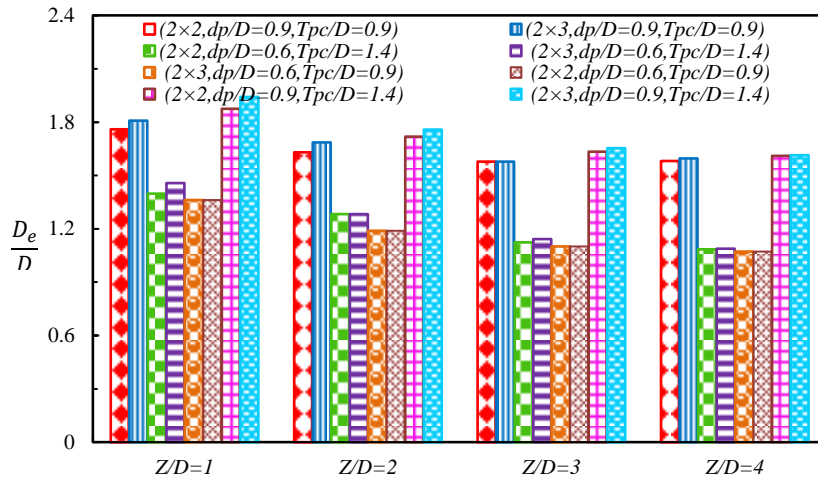


Fig. 5- Calculated effective diameter of the complex pier at the different relative pile cap installation level

شکل ۵- مقادیر قطر مؤثر محاسبه شده برای گروه پایه مرکب در ترازهای نسبی مختلف کارگذاری سرشمع

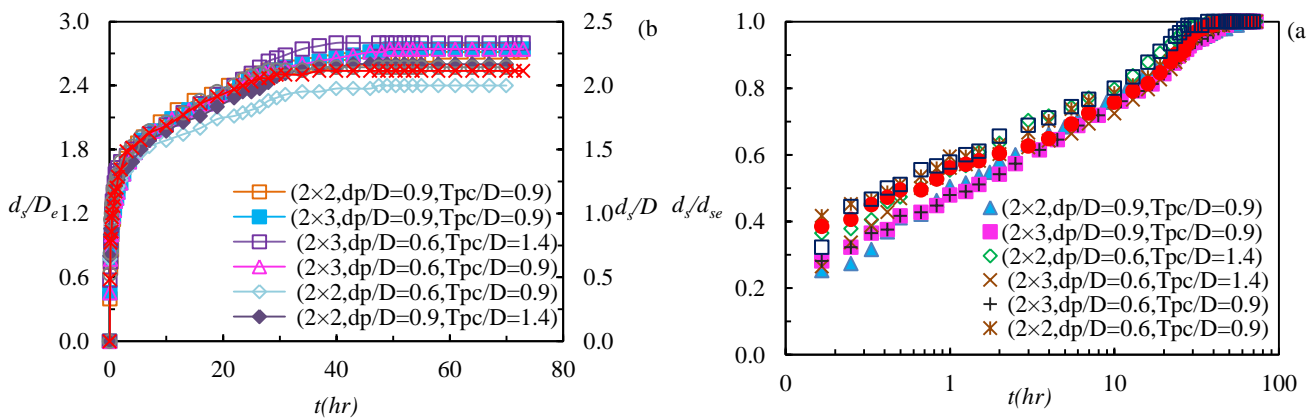


Fig. 6- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation  $Z/D=1$  a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier

شکل ۶- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای هندسه‌های مختلف گروه شمع در تراز نسبی کارگذاری سرشمع

(a)  $Z/D=1$  عمق نهایی آب‌شستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل

هفت درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این شرایط مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/54$  به  $2/74$  افزایش می‌یابد.

بررسی نتایج حاکی از آن است که برای  $T_{pc}/D$  برابر با  $0/9$ ، در آرایش شمع  $2 \times 3$ ، افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/18$  به  $1/68$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی ۱۱ درصد افزایش یافته و مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/57$  به  $2/8$  تغییر پیدا می‌کند. بنابراین، با افزایش تراز کارگذاری سرشمع و عبور بیشتر جریان از فضای بین سرشمع و چاله آب‌شستگی، اثر تغییر قطر شمعه‌ها و آرایش آن‌ها بر زمان و مقدار آب‌شستگی مشهودتر می‌گردد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با  $(d_p/D)$  برابر با  $0/6$ ، در آرایش شمعه‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/18$  به  $1/28$  منجر به کاهش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۲۱ درصد می‌شود. علاوه بر این در این شرایط مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/54$  به  $2/11$  کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که برای  $d_p/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمعه‌ها به  $2 \times 3$ ، با افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/18$  به  $1/28$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان چهار درصد کاهش یافته و به تبع آن مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/57$  به  $2/28$  کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است که برای گروه پایه با  $d_p/D$  برابر با  $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/62$  به  $1/71$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند. علاوه بر این مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/74$  به  $2/68$  کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای قطر نسبی شمعه  $(d_p/D)$  برابر با  $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها  $2 \times 3$ ، با افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/68$  به  $1/75$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان چهار درصد کاهش یافته ولی مقدار  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که برای گروه پایه با  $T_{pc}/D$  برابر با  $0/9$  و  $d_p/D$  برابر با  $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، اگرچه مقدار  $D_e/D$  و زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند ولی مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/54$  به  $2/57$  افزایش می‌یابد. همچنین در  $T_{pc}/D$  و  $d_p/D$  برابر با  $0/9$ ، تغییر آرایش شمعه‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/62$  به  $1/68$ ، منجر به افزایش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان چهار درصد و تغییر مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/74$  به  $2/8$  می‌گردد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با  $T_{pc}/D$  برابر با  $1/4$  و  $d_p/D$  برابر با  $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ،  $D_e/D$  یکسان باقی مانده ولی مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۲۳ درصد و  $d_{se}/D$  از  $2/11$  به  $2/28$  افزایش می‌یابد. بررسی نتایج در تراز مذکور حاکی از آن است که برای گروه پایه با  $T_{pc}/D$  برابر با  $1/4$ ، با افزایش  $d_p/D$  به  $0/9$ ، تغییر

بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است که برای گروه پایه با  $d_p/D$  برابر با  $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/75$  به  $1/87$  منجر به کاهش مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۳ درصد می‌شود. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/71$  به  $2/6$  تغییر پیدا نمود. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با  $d_p/D$  برابر با  $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها  $2 \times 3$ ، با افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/8$  به  $1/94$ ، مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/74$  به  $2/57$  کاهش و به تبع آن زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۴ درصد کاهش یافت.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که برای  $T_{pc}/D$  برابر با  $0/9$  و  $d_p/D$  برابر با  $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، اگرچه مقدار  $D_e/D$  تغییر محسوسی نکرد، ولی مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان پنج درصد افزایش یافته و مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/4$  به  $2/74$  افزایش می‌یابد. همچنین در  $T_{pc}/D$  مذکور و  $d_p/D$  برابر با  $0/9$ ، تغییر آرایش شمعه‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/75$  به  $1/8$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند. یا این وجود، مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/71$  به  $2/74$  افزایش یافت.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش  $T_{pc}/D$  به  $1/4$ ، در  $d_p/D$  برابر با  $0/6$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه تغییر  $D_e/D$  از  $1/39$  به  $1/45$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/11$  به  $2/57$  افزایش می‌یابد. بررسی نتایج در  $T_{pc}/D$  مذکور حاکی از آن است که با افزایش  $d_p/D$  به  $0/9$ ، با تغییر آرایش شمعه‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/87$  به  $1/94$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی و  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند.

در شکل (۷)، توسعه زمانی عمق حداکثر آب‌شستگی برای شرایط مختلف هندسه شمعه‌ها در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=2$  آورده شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=2$  حاکی از آن است که برای  $T_{pc}/D$  برابر با  $1/4$ ، در آرایش شمعه‌ها  $2 \times 2$ ، با افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/28$  به  $1/71$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/11$  به  $2/68$  افزایش می‌یابد.

برای  $T_{pc}/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمعه‌ها به  $2 \times 3$ ، افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/28$  به  $1/75$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی را به میزان ۱۱ درصد افزایش می‌دهد. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/28$  به  $2/8$  تغییر می‌کند.

مقایسه نتایج نشان داد که برای  $T_{pc}/D$  برابر با  $0/9$ ، در آرایش شمعه‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/18$  به  $1/62$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی

بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای گروه پایه با  $d_p/D$  برابر با ۰/۶، در آرایش شمعه  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۱ به ۱/۱۲ مقدار زمان تعادل آبشستگی و  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند. مقایسه نتایج نشان داد که برای  $d_p/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمعه به  $2 \times 3$ ، با افزایش  $T_{pc}/D$  از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۱ به ۱/۱۴، مقدار زمان تعادل آبشستگی تغییر محسوسی نمی‌کند ولی، مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۳۷ به ۲/۴۲ افزایش می‌یابد. بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است که با افزایش قطر گروه پایه به  $d_p/D$  برابر با ۰/۹، در آرایش شمعه  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۵۷ به ۱/۶۳، مقدار زمان تعادل آبشستگی و  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند. با تغییر آرایش شمعه به  $2 \times 3$ ، با افزایش  $T_{pc}/D$  از ۰/۹ به ۱/۴ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۵۷ به ۱/۶۵، مقدار زمان تعادل آبشستگی به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نکرد. این موضوع توسط Esmaili Varaki et al. (2022) نیز گزارش شده است.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که در  $T_{pc}/D$  برابر با ۰/۹ و  $d_p/D$  برابر با ۰/۶، با تغییر آرایش شمعه از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه این تغییرات  $D_e/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند و مقدار زمان تعادل آبشستگی به میزان ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این در این شرایط مقدار  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند. در ضخامت سرشمع مذکور با افزایش  $d_p/D$  به ۰/۹، تغییر آرایش شمعه از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، تاثیر محسوسی بر مقدار زمان تعادل آبشستگی،  $D_e/D$  و  $d_{se}/D$  ندارد.

آرایش شمعه از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و  $D_e/D$  و زمان تعادل آبشستگی تغییر محسوسی پیدا نکرده ولی مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۶۸ به ۲/۸ افزایش می‌یابد. بنابراین در این تراز کارگذاری سرشمع، به جهت عبور بیشتر جریان نزدیک شونده از فضای زیر سرشمع و افزایش سرعت جریان در اطراف شمعه‌ها، اثر سپردگی شمعه‌های جلویی برای شمعه‌های میانی و عقبی کاهش یافته و عمق آبشستگی افزایش بیشتری می‌یابد.

در شکل (۸)، توسعه زمانی عمق حداکثر آبشستگی برای شرایط مختلف هندسه شمعه در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=3$  آورده شده است. مقایسه نتایج نشان داد که برای  $T_{pc}/D$  برابر با ۱/۴، در آرایش شمعه  $2 \times 2$ ، با افزایش  $d_p/D$  از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۱۲ به ۱/۶۳، مقدار زمان تعادل آبشستگی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۳۷ به ۲/۹۷ افزایش می‌یابد. همچنین برای  $T_{pc}/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمعه به  $2 \times 3$ ، افزایش  $d_p/D$  از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۱۴ به ۱/۶۵، مقدار زمان تعادل آبشستگی را به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۴ به ۲/۹۷ افزایش می‌یابد.

مقایسه نتایج نشان داد که با کاهش  $T_{pc}/D$  به ۰/۹، در آرایش شمعه  $2 \times 2$ ، افزایش  $d_p/D$  از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۱ به ۱/۵۷، مقدار زمان تعادل آبشستگی به میزان ۱۶ درصد و مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۳۷ به ۲/۹۷ افزایش می‌یابد. بررسی نتایج حاکی از آن است که برای  $T_{pc}/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمعه به  $2 \times 3$ ، افزایش  $d_p/D$  از ۰/۶ به ۰/۹ و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۱ به ۱/۵۷، اگرچه مقدار زمان تعادل آبشستگی تغییر محسوسی نمی‌کند ولی مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۳۷ به ۲/۴۲ افزایش می‌یابد.

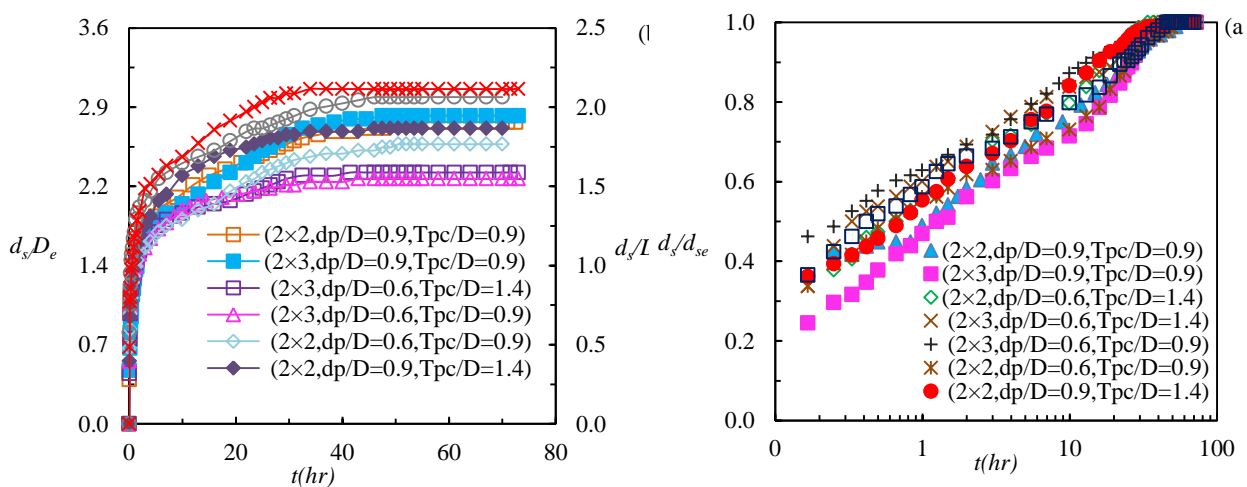
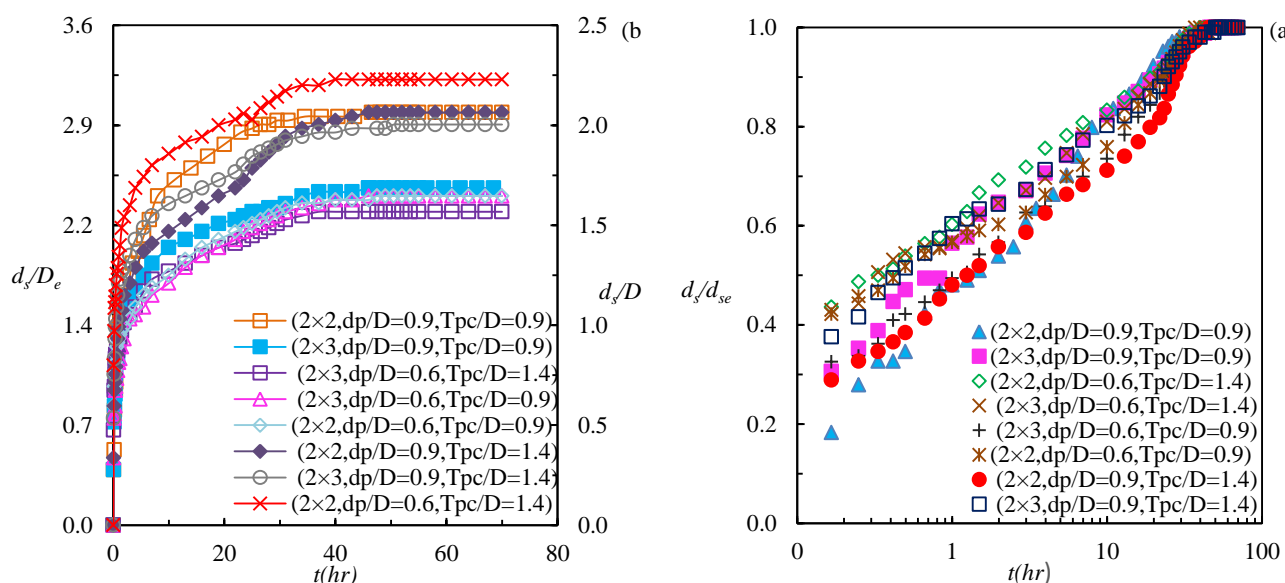


Fig. 7- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation  $Z/D=2$  to a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier

شکل ۷- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آبشستگی برای هندسه‌های مختلف گروه شمعه در تراز نسبی کارگذاری سرشمع

(a)  $Z/D=2$  عمق نهایی آبشستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل



**Fig. 8- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation  $Z/D=3$  to a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier**

شکل ۸- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای هندسه‌های مختلف گروه‌شمع در تراز نسبی کارگذاری سرشمع  
 (a)  $Z/D=3$  عمق نهایی آب‌شستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل

از  $1/97$  به  $2/42$  افزایش می‌یابد. با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$ ، افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  باعث افزایش  $D_e/D$  از  $1/07$  به  $1/59$  شده و زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۹ درصد افزایش یافته و مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/11$  به  $2/54$  بیشتر می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد که در تراز کارگذاری سرشمع مذکور،  $d_p/D$  برابر با  $0/6$  و آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  اگرچه مقدار  $D_e/D$  را تغییر محسوسی نداد ولی، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۲ درصد افزایش یافته و مقدار  $d_{se}/D$  از  $1/97$  به  $2/11$  افزایش پیدا کرد. همچنین برای  $d_p/D$  مذکور، با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  مقدار  $D_e/D$  را مانند آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$  تغییر مشهودی نداده ولی، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۹ درصد و به تبع آن مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/11$  به  $2/4$  افزایش یافت. بررسی نتایج آزمایشگاهی گویای آن است با افزایش قطر شمع با  $d_p/D$  به  $0/9$  و آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/58$  به  $1/6$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۵۶ درصد افزایش پیدا کرد و مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/42$  به  $2/77$  افزایش یافت. با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$ ، افزایش  $T_{pc}/D$  از  $0/9$  به  $1/4$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/59$  به  $1/61$  و مقدار زمان تعادل آب‌شستگی ۳۴ درصد بیشتر شده و در نتیجه آن، مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/88$  به  $2/54$  افزایش پیدا کرد. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت نسبی سرشمع، میزان انسداد جریان توسط اجزای گروه‌پایه کج بیشتر شده و در نتیجه زمان و عمق تعادل آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش  $T_{pc}/D$  به  $1/4$ ، برای  $d_p/D$  برابر با  $0/6$ ، با تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/12$  به  $1/14$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۶ درصد و مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/37$  به  $2/42$  افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش  $d_p/D$  به  $0/9$ ، تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/63$  به  $1/65$  و مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  تغییر محسوسی نمی‌کند. در شکل (۹)، توسعه زمانی عمق حداکثر آب‌شستگی برای شرایط مختلف هندسه شمع‌ها در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=4$  آورده شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=4$  حاکی از آن است که برای  $T_{pc}/D$  برابر با  $1/4$ ، در آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$ ، با افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/08$  به  $1/6$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$  از  $2/11$  به  $2/77$  افزایش می‌یابد. با تغییر آرایش شمع‌ها به  $2 \times 3$  در  $T_{pc}/D$  مذکور، افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/08$  به  $1/61$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی ۳۴ درصد افزایش یافته و  $d_{se}/D$  از  $2/4$  به  $2/88$  تغییر می‌کند. بررسی نتایج نشان داد که با کاهش  $T_{pc}/D$  به  $0/9$ ، در آرایش شمع‌ها  $2 \times 2$ ، افزایش  $d_p/D$  از  $0/6$  به  $0/9$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از  $1/07$  به  $1/58$ ، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی تغییر محسوسی نمی‌کند. همچنین در شرایط مذکور مقدار  $d_{se}/D$

استخراج معادله در قالب معادله دو، چهار و پنج پارامتری بررسی شد. به منظور استخراج ضرایب این معادله‌ها، داده‌های حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی در دو قالب ۷۰ درصد برای استخراج و ۳۰ درصد برای صحت‌سنجی در نرم افزار SAS (Statistical Analysis System) مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی عملکرد معادله‌های رگرسیونی استخراج شده، شاخص‌های آماری ضریب کارایی Nash-Sutcliffe، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) که در روابط (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفت (Nash and Sutcliffe 1970 & Krause et al., 2005).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(t)_{meas} - (t)_{est}]^2}{\sum_{i=1}^n [(t)_{meas} - \overline{(t)_{meas}}]^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(t)_{meas} - (t)_{est}]^2} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(t)_{meas} - (t)_{est}}{(t)_{meas}} \right| \quad (12)$$

که در آن  $(t)_{meas}$ : زمان تعادل آب‌شستگی اندازه‌گیری شده بر حسب ساعت،  $(t)_{est}$ : زمان تعادل آب‌شستگی محاسبه شده،  $(t)_{meas}$ : میانگین زمان تعادل آب‌شستگی و  $n$ : تعداد داده‌ها است. در جدول (۳) ضرایب و توان‌های معادلات استخراج شده آورده شد. نتایج نشان دادند که رابطه ۲ پارامتر به ازای میانگین مقادیر  $NSE$ ،  $RMSE$  و  $R^2$  و  $MAPE$  به ترتیب برابر با ۰/۹۹، ۰/۱۲، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ و ۴/۶۷ نامناسبترین عملکرد و رابطه (۵) پارامتر به ازای میانگین مقادیر  $NSE$ ،  $RMSE$  و  $R^2$  و  $MAPE$  به ترتیب برابر با ۰/۰۴، ۰/۹۹، ۱ و ۰/۱۵ بهترین عملکرد را برای تخمین زمان تعادل آب‌شستگی اطراف پایه پل ارائه کرد.

در شکل (۱۰) مقایسه مقادیر برآورده شده توسط رابطه رگرسیونی با داده‌های آزمایشگاهی به همراه مقادیر برآورد شده با استفاده از روابط جدول (۲) نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، زمان تعادل آب‌شستگی محاسبه شده با استفاده از این روابط بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی در تراز مذکور حاکی از آن است که برای گروه پایه با  $D_{pc}/D$  برابر با ۰/۹،  $d_p/D$  برابر با ۰/۶، با تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، اگرچه مقدار  $D_e/D$  تغییر محسوسی نداشته ولی زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۲۲ درصد افزایش یافته و مقدار  $d_{se}/D$  از ۱/۹۷ به ۲/۱۱ افزایش پیدا می‌کند. با افزایش  $d_p/D$  به ۰/۹، با تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$  و در نتیجه افزایش  $D_e/D$  از ۱/۵۸ به ۱/۵۹، مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۳۲ درصد افزایش یافته و مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۴۲ به ۲/۵۴ تغییر پیدا می‌کند. با افزایش  $T_{pc}/D$  به ۱/۴ و برای  $d_p/D$  برابر با ۰/۶، تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، هرچند  $D_e/D$  تغییر محسوسی نداشت ولی، زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۸ درصد و مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۱۱ به ۲/۴ افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که با افزایش  $d_p/D$  به ۰/۹، تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، نیز تغییر محسوسی در  $D_e/D$  نداشته ولی زمان تعادل آب‌شستگی به میزان ۱۳ درصد و مقدار  $d_{se}/D$  از ۲/۷۷ به ۲/۸۸ افزایش پیدا کرد. بنابراین در این تراز با افزایش تعداد شمع‌ها، اگرچه قطر معادل گروه پایه تغییر محسوسی ندارد ولی به جهت افزایش جریان عبوری از زیر سرشمع، نقش اثر فشردگی جریان و تاثیر آن بر قدرت گردابه‌های تشکیل شده در اطراف شمع‌ها بیشتر شده و به تبع آن زمان و عمق تعادل آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد.

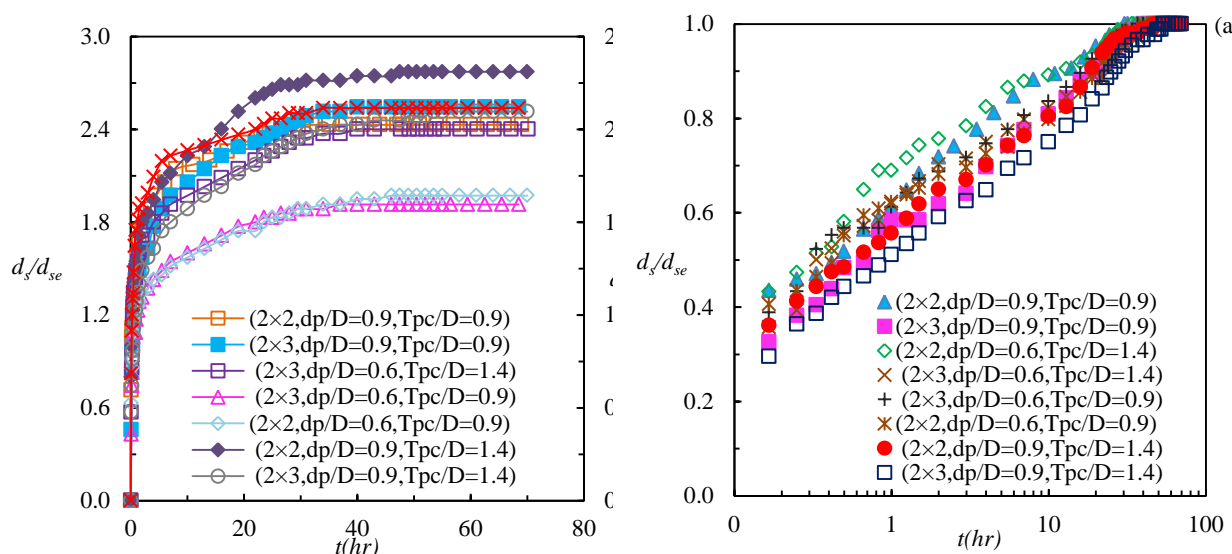
### ب) برآورد زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب

طی دهه‌های گذشته، روابط تجربی متعددی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برای برآورد عمق و زمان تعادل آب‌شستگی اطراف پایه پل استخراج شده است که در جدول (۲) روابط ارائه شده توسط Moreno et al. (1999) Chiew و Melville و Yang et al. (2015) و Yang et al. (2020) آورده شده است.

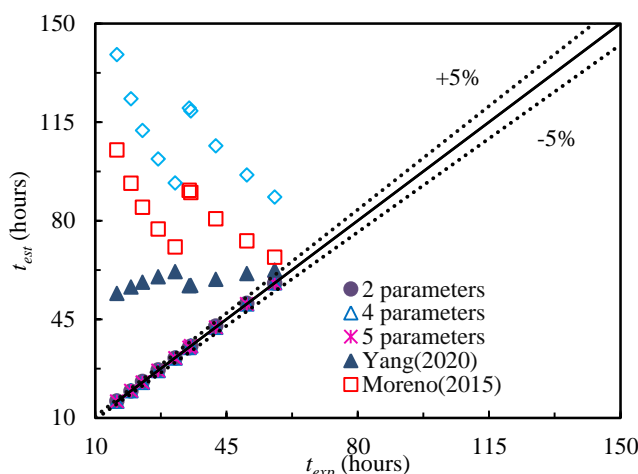
به منظور استخراج معادله رگرسیونی برای برآورد زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب، پارامترهای مؤثر در قالب معادله (۹) مورد بررسی قرار گرفت.

$$t_e = a \left( \frac{D_e}{T_{pc}} \right)^b \left( \frac{Z}{T_{pc}} \right)^c \left( \frac{d_p}{T_{pc}} \right)^d \left( \frac{y}{D_e} \right)^e \left( \frac{d_{se}}{D_e} \right)^f \quad (9)$$

اگرچه کلیه پارامترهای هندسی نظیر ابعاد پایه، سرشمع، شمع‌ها و تراز کارگذاری آن‌ها به نوعی با محاسبه قطر معادل لحاظ می‌شود، با این وجود برای بررسی اثر حضور هریک از آن‌ها،



**Fig. 9- Temporal development of the instant scour depth for pile group geometries at the relative pile cap elevation  $Z/D=4$  to a) maximum scour depth b) effective diameter of complex pier**  
 شکل ۹- توسعه زمانی عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای هندسه‌های مختلف گروه‌شمع در تراز نسبی کارگذاری سرشمع (a)  $Z/D=4$  عمق نهایی آب‌شستگی (b) قطر مؤثر پایه مرکب و عرض پایه پل



**Fig. 10- Comparison of the calculated and observed equilibrium time values**  
 شکل ۱۰- مقایسه مقادیر زمان تعادل آب‌شستگی محاسبه شده و مشاهده شده

عمق آب‌شستگی کمتر از پنج درصد قطر پایه در بازه ۲۴ ساعت و یا Raudkivi و Ettema (1983) که معیار تغییرات عمق آب‌شستگی یک میلی‌متر در بازه زمانی سه ساعت، را معرفی کرده‌اند، اختلاف زیادی در مدت زمان تعادل عمق آب‌شستگی حاصل می‌شود. این موضوع با نگاهی به نمودارهای توسعه زمانی ارائه شده در نتایج محققین بخوبی مشهود می‌باشد. همچنین در غالب آن‌ها، تقریباً بیش از ۹۰ درصد آب‌شستگی در بازه زمانی ۱۲ تا ۲۴ ساعت از شروع آزمایش شکل گرفته و بعد از آن تغییرات عمق لحظه‌ای آب‌شستگی میل به خط مجانب دارد.

دلایل مختلفی برای تفاوت در مقدار زمان تعادل آب‌شستگی به‌دست آمده در تحقیق حاضر با مقدار برآورد شده توسط محققین مختلف وجود دارد. سهمی از آن مربوط به قطر معادل بوده که منعکس کننده کامل آنچه که در واقعیت توسط اجزاء پل مرکب شامل شمع‌ها و آرایش آن‌ها، سرشمع و پایه‌ها پل، در آب‌شستگی نقش ایفا می‌نمایند، نمی‌باشد. علاوه‌براین در عمده تحقیقات مشابه، مقیاس تغییرات عمق آب‌شستگی بعد از ۱۲ تا ۲۴ ساعت اول، در محدوده یک تا دو میلی‌متر می‌باشد. از این رو با در نظر گرفتن معیار Chiew و Melville (1999) که مقدار تغییر



جدول ۲- روابط زمان تعادل آب‌شستگی بررسی شده در تحقیق حاضر  
Table 2- the time scale equations studied in present study

Descriptions	Equations	Researchers
$t_e$ : Equilibrium time (day) $D$ : Pier diameter $V$ : Mean flow velocity $V_C$ : Inception of motion velocity $y$ : Flow depth $t_{emax}$ : Maximum Equilibrium time for $V = V_C$ and $\frac{y}{D} > 6$	$t_e = 30.89 \left(\frac{D}{V}\right) \left(\frac{V}{V_C} - 0.4\right) \left(\frac{y}{D}\right)^{0.25} \quad \text{for } \frac{y}{D} \leq 6$ $t_e = 48.26 \left(\frac{D}{V}\right) \left(\frac{V}{V_C} - 0.4\right) \quad \text{for } \frac{y}{D} > 6$ $t_{e(max)} (days) = 28.96 \frac{D}{V}$	Melville and Chiew (1999)
$t_{dms}$ : Experiments duration time (day) $D_e$ : Effective complex pier diameter $U$ : Mean flow velocity $U_C$ : Critical flow velocity $h$ : Flow depth	$t_{dms} = 127.8 \left(\frac{D_e}{U}\right) \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) \left(\frac{h}{D_e}\right)^{0.25} e^{-1.83 \times \frac{U}{U_C}} \quad \text{for } \frac{h}{D_e} \leq 6$ $t_{dms} = 200 \left(\frac{D_e}{U}\right) \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) e^{-1.83 \times \frac{U}{U_C}} \quad \text{for } \frac{h}{D_e} > 6$	Moreno and Couto (2015)
$D_e$ : Effective complex pier diameter $C_2$ : 200 day/s $C_3$ : 127.8 day/s $U$ : Mean flow velocity $U_C$ : Critical flow velocity $y_0$ : Flow depth $t_e$ : Equilibrium time (day) $t_{90}$ : Time to reach 90 percent of the equilibrium scour depth	$t_e (days) = C_2 \frac{D_e}{U} \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) \quad \text{for } \frac{y_0}{D_e} > 6 \text{ and } \frac{U}{U_C} > 0.4$ $t_e (days) = C_3 \frac{D_e}{U} \left(\frac{U}{U_C} - 0.4\right) \left(\frac{y_0}{D_e}\right)^{0.2} \quad \text{for } \frac{y_0}{D_e} \leq 6 \text{ and } \frac{U}{U_C} > 0.4$ $t_{90} (days) = \exp(-1.83 \frac{U}{U_C}) t_e$	Yang et al., (2020)

جدول ۳- ضرایب و عملکرد معادله‌های رگرسیونی برای برآورد زمان تعادل آب‌شستگی

Table 3- Coefficients of equations to estimate equilibrium time and related statistical indicatcs

MAPE (%)	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE	f	e	d	c	b	a	Number of parameter
4.67	0.99	0.99	0.12	0	2.32	0	0	1.05	0.68	2
0.21	1.0	0.99	0.03	0	2.32	0.08	-0.004	0.97	0.72	4
0.015	1.0	0.99	0.04	-0.01	2.33	0.09	0.006	0.96	0.72	5

### نتیجه‌گیری

افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که در ترازهای کارگذاری سرشمع نزدیک به بستر یعنی  $Z/D=1$  و  $Z/D=2$  با افزایش  $(T_{pe}/D)$  از ۰/۹ تا ۱/۴، زمان تعادل آب‌شستگی را به‌طور متوسط در محدوده هشت تا ۱۸ درصد کاهش می‌دهد ولی با افزایش تراز کارگذاری سرشمع و اثرگذاری بیشتر شمع‌ها بر مقدار آب‌شستگی در تراز کارگذاری سرشمع  $Z/D=3$  و  $Z/D=4$ ، با افزایش ضخامت نسبی سرشمع  $(T_{pe}/D)$  از ۰/۹ تا ۱/۴، زمان تعادل

در تحقیق حاضر تاثیر پارامترهای مختلف پایه پل مرکب (ضخامت نسبی سرشمع، قطر نسبی شمع، آرایش شمع‌ها و تراز نسبی کارگذاری سرشمع) بر زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه مرکب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در کلیه ترازهای کارگذاری سرشمع، با افزایش  $(d_p/D)$  از ۰/۱۶ به ۰/۹، زمان تعادل آب‌شستگی به‌طور متوسط بین ۱۴ و ۲۶ درصد

روابط رگرسیونی مرکب از دو، چهار و پنج پارامتر برای برآورد زمان تعادل آب‌شستگی اطراف گروه پایه کج مستقر بر روی سرشمع ارائه شد.

آب‌شستگی را به میزان سه و ۲۸ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد کلیه ترازهای کارگذاری سرشمع، با تغییر آرایش شمع‌ها از  $2 \times 2$  به  $2 \times 3$ ، زمان تعادل آب‌شستگی بین چهار تا ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در تحقیق حاضر

### References

- 1- Chabert, J. and Engeldinger, P., 1956. Study of the scour around the bridge piers. *Laboratoire National d'Hydraulique. Chatou, October.*
- 2- Coleman, S. E., Lauchlan, C.S. and Melville, B. W., 2003. Clear water scour development at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Research, 41(5): 521-531.* Doi: 10.1080/00221680309499997.
- 3- Esmaeili Varaki, M., Tavazo, N. and Radice, A., 2022. Using a bed sill as a countermeasure for clear-water scour at a complex pier with inclined columns footed on capped piles. *Hydrology, 9(65): 1-19.* Doi: 10.3390/hydrology9040065.
- 4- Ferraro, D., Tafarjnoruz, A., Gaudio, R. and Cardoso, A. H., 2013. Effects of pile cap thickness on the maximum scour depth at a complex pier. *Journal of Hydraulic Engineering, 139 (5): 482-491.* Doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000704.
- 5- Grimaldi, C., 2005. Non-conventional countermeasures against local scouring at bridge piers. *Ph.D. Thesis, Hydraulic Engineering for Environment and Territory, Univ. of Calabria.*
- 6- Krause, P., Boyle, D. and Båse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences, 5: 89-97.*doi:10.5194/adgeo-5-89-2005.
- 7- Lagasse, P. F., Clopper, P.E., Pagan-Qrtiz, J. E., Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Schall, J. D. and Girard. L. G., 2009. Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures, Experience, Selection, and Design Guidance. *FHWA, Hydraulic Engineering Circular, No. 23.*
- 8- Lança, R. M., Fael, C. S., Maia, R. J., Pêgo, J. P, and Cardoso. A. H., 2013. Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 139 (11): 1117-1125.*
- 9- Lee, S. O., 2006. Physical modeling of local scour around complex bridge piers. *Gooria Institute of Technology.*
- 10- Lu, J. Y., Shi, Z. Z., Hong, J. H., Lee, J. J. and Raikar, V. K., 2011. Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 137(1): 45-56.*
- 11- Melville, B.W., Sutherland, A.J., 1988. Design method for local scour at bridge piers. . *Journal of Hydraulic Engineering, 114(10): 1210-1226.*
- 12- Melville, B. W. and Chiew, Y. M, 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 125 (1): 59-65.*
- 13- Moreno, M. R. and Couto. L., 2015. Effects of relative column width and pile-cap elevation on local scour depth around complex piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 142 (2): 04015051.*
- 14- Moreno, M. R. and L., 2016. Prediction of equilibrium local scour depth at complex bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, 142(11): 04016045.*
- 15- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10(3): 282-290.* Doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- 16- Oliveto G. and Hager, W. H., 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering, 128(9): 811-820.* Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(811).

- 
- 17- Oliveto, G., and Hager, W. H., 2005. Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2): 97-105.
  - 18- Raudkivi, A. J. and Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3): 339-350.
  - 19- Richardson, E. V. and Davis, S. R., 2001. Evaluating scour at bridges. *Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18). Rep. No. FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.*
  - 20- Sheppard, D. M. and Renna, R. 2005. Florida bridge scour manual. *Tallahassee, FL: Published by Florida Department of Transportation.*
  - 21- Simarro, G., Fael, C. M. and Cardoso, A. H., 2011. Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (9): 1089–1093.
  - 22- Yang, Y., Melville, B.W. Macky, G. H. and Shamseldin, A. Y., 2019. Local scour at complex bridge piers in close proximity under clear-water and live-bed flow regime. *Water.*, 11: 1530. doi.org/10.3390/w11081530.
  - 23- Yang, Y., Melville, B.W. Macky, G. H. and Shamseldin, A. Y., 2020. Temporal evolution of clear water local scour at aligned and skewed complex bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(4): 04020026.



**EXTENDED ABSTRACT**

## Experimental Study of Water Entrainment in Plunging Phenomena in Channel's Bend

R. Elahi<sup>1</sup>, M. Ghomeshi<sup>2</sup> and M. Zayeri<sup>3\*</sup>

1- PhD student in Civil Engineering, Water Resources Engineering and Management, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3\* - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran ([m.zayri@scu.ac.ir](mailto:m.zayri@scu.ac.ir)).

### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 16 May 2021

Revised: 3 March 2022

Accepted: 6 March 2022

### TO CITE THIS ARTICLE:

Elahi, R., Ghomeshi, M., Zayeri, M. (2024). 'Experimental Study of Water Entrainment in Plunging Phenomena in Channel's Bend', *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), pp. 119-130. doi: 10.22055/jise.2017.21656.1581.

*Keywords:*

Plunging point, Turbidity current,

Mixing coefficient, Relative radius.

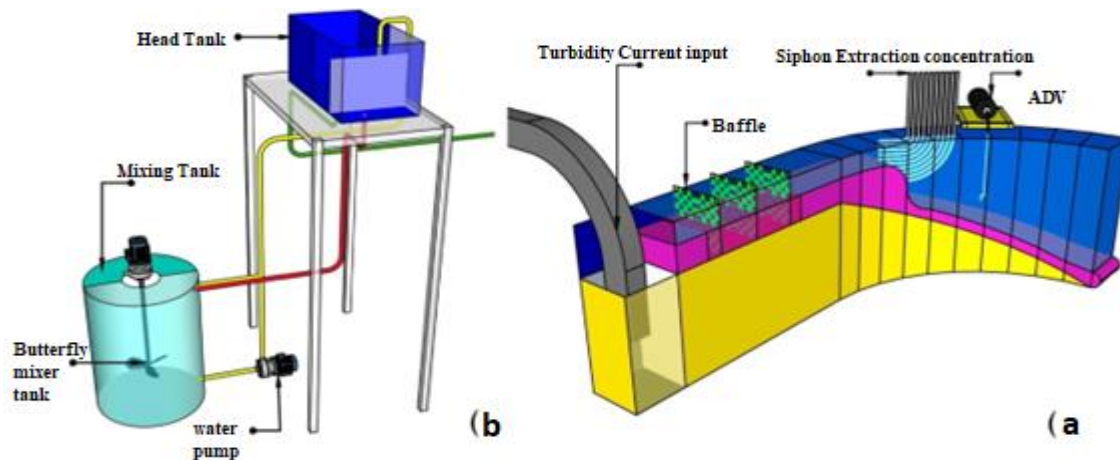
### Introduction

Turbidity currents, or dense flows, occurs when a fluid moves within another fluid with different densities, also Turbidity Current occurs when a fluid with a higher or lower density than the ambient fluid enters a fluid with a different density. The main cause of this phenomenon is the effect of the difference in density on gravitational acceleration; hence, Turbidity Currents are also referred to as gravitational flows (Graf & Altinakar, 2003). Karamichemeh (2014) investigated the effect of slope and concentration on turbulent flows in the submerged region along a straight path. To achieve this, they conducted 60 experiments with four discharge rates ranging from 5.0 to 2.0 liters per second, four concentrations with volumetric mass of 1013, 1009, 1006, and 1016 kilograms per cubic meter, and three slopes of 8, 12, and 16 percent. The results of this study showed that with an increase in the Richardson number (inverse of the square root of the densimetric Froude number), the intensity of mixing decreases. Additionally, the intensity of mixing in the submerged region is greater compared to the intensity of mixing in the body region. Given the limited studies on the movement of Turbidity currents in curved paths, the aim of this research is to investigate the effect of bends on the Water Entrainment in the plunging region.

### Methodology

A three-bend flume with 90-degree bends and radii of 40, 80, and 120 cm, height of 60 cm, and width of 20 cm, was used in the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Water and Environmental Engineering of Shahid Chamran University of Ahvaz. In this flume, the turbidity current from the beginning of the flume entered a cavity with a depth of about 40 cm through a flexible and removable pipe with a diameter of 10 cm, and after filling the cavity and passing through three net-shaped relaxers, it entered the arch. At the end of the flume, clear water entered the flume; In such a way that the volume of the output turbidity current is almost equal to the input clear water. In order to create the immersion area, a 33% slope was created in the path of the arch by sand at the place of

the arches (separately); Also, to reduce the roughness of the floor, a piece of polished wood was used on the sands (Figure 1). In the current study, water and salt solution was used as a turbidity current, and to make this solution and transfer it to the flume, the mixing system includes a tank with a capacity of 2000 liters, a pump with a power of two horsepower in order to transfer the flow to the head tank (Head Tank) and The shaft and propeller along with the two horsepower engine were made to homogenize the water and salt mixture. The mentioned mixing system includes the mixing tank, pump, pipes and connections, as well as the tank head, which was responsible for creating a constant head from the turbidity current to be transferred to the flume.



**Fig. 1- a) view of the flow transfer system to the flume and how to measure the effective parameters b) A view of the Turbidity Current preparation and pumping system**

## Results and Discusspn

The maximum value of the initial mixing coefficient of the ambient fluid to the turbidity current is 0.4 which means that a maximum of 40% of the flow of the ambient fluid can enter the turbidity current in the plunging region. By increasing the radius of curvature and reducing the effect of centrifugal force, the transverse velocity (velocity perpendicular to the arc) decreases and this decrease causes an increase in the longitudinal velocity (velocity along the arc). An increase in the longitudinal velocity causes an increase in the momentum of the concentrated flow in the direction of the arc and more collisions between the concentrated flow and the ambient fluid. Therefore, in the third arc (the arc with a radius to width ratio of six) the highest longitudinal speed and the highest intensity of mixing occurred.

## Conclusions

The phenomenon of turbidity current occurs when a fluid moves inside another fluid due to the difference in density. When the density of the fluid is greater than the density of the ambient fluid, underflow occurs. In turbidity currents in the contact area of the flow with the ambient fluid, the instability of the flow at the boundary between the two layers causes the ambient fluid to enter the turbidity current. The submergence zone is one of the four areas of underpass turbidity currents, which has the highest amount of ambient fluid entering into the turbidity current. In this research, the behavior of concentrated salt flows in arches was studied. The results show that the increase in the radius of curvature leads to a decrease in the centrifugal force and an increase in the speed in the direction of the flow, and this causes an increase in the mixing intensity. As the density of the turbidity current increases, the tendency of still clear water to penetrate into it decreases. Also, in the context of the ambient fluid entering the turbidity current, a relationship has been presented that

shows that a maximum of 40% of the ambient fluid discharge can enter the turbidity current in the plunging region.

### **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 third author's Grant (SCU.WH1402.43525) 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-Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (2003). *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry* (Reprint). Wiley.
- 2- Karamichameh, D., Ghomeshi, M., Golmaee, H. and Shahnazari, A., 2014. Experimental study on the characteristics of plunge region of saline density current. *Irrigation Sciences and Engineering*, 36(4), pp.9-18. DOR: 20.1001.1.25885952.1392.36.4.2.9.



© 2024 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 کشش آب در ناحیه غوطه‌وری جریان‌های غلیظ در محل قوس‌ها

رضا الهی<sup>۱</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup> و محمدرضا زایری<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری عمران مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.  
 ۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.  
 ۳- نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.  
 (m.zayri@scu.ac.ir)

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۲

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

### چکیده

پدیده جریان غلیظ زمانی رخ می‌دهد که سیالی به دلیل اختلاف چگالی درون سیال دیگر حرکت کند. هنگامی که چگالی سیال بیشتر از چگالی سیال پیرامون باشد، جریان زیرگذر رخ می‌دهد. در جریان‌های غلیظ در ناحیه تماس جریان با سیال پیرامون، ناپایداری جریان در مرز بین دو لایه عامل ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ می‌شود. ناحیه غوطه‌وری یکی از نواحی چهارگانه جریان‌های غلیظ زیرگذر است که بیشترین میزان ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ را داراست. در این تحقیق رفتار جریان‌های غلیظ نمکی در قوس‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزایش شعاع انحنا منجر به کاهش نیروی گریزازمرکز و زیاد شدن سرعت در راستای جریان گشته و این امر افزایش شدت اختلاط را موجب می‌شود. هر قدر بر چگالی سیال غلیظ افزوده شود تمایل آب زلال ساکن برای نفوذ به درون آن کاهش می‌یابد. همچنین در زمینه ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ رابطه‌ای ارائه شده است که نشان می‌دهد حداکثر ۴۰ درصد دبی سیال پیرامون می‌توان وارد جریان غلیظ در ناحیه غوطه‌وری گردد.

**کلیدواژه‌ها:** ناحیه غوطه‌وری، مدل فیزیکی، عدد ریچاردسون، شدت اختلاط.

### مقدمه

جریان غلیظ یا جریان چگال، در اثر حرکت یک سیال درون سیال دیگر با چگالی متفاوت به وجود می‌آید. زمانی که سیالی با جرم مخصوص بیشتر یا کمتر از سیال پیرامونی ( $\rho \pm \rho_d$ ) وارد یک سیال با جرم مخصوص  $\rho$  می‌شود، پدیده جریان غلیظ رخ می‌دهد. علت اصلی وقوع این پدیده تأثیر اختلاف جرم مخصوص بر روی شتاب ثقل است، از این رو جریان‌های غلیظ را جریان‌های ثقلی نیز می‌نامند (Graf & Altinakar, 2003).

یک جریان غلیظ زیرگذر دارای چهار ناحیه شامل ۱- ناحیه قبل از ورود به مخزن (جریان یکدست) ۲- ناحیه غوطه‌وری ۳- بدنه جریان ۴- پیشانی (رأس) جریان. بوده که این نواحی در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند (Lee and Yu, 1997). جریان غلیظ در قسمت انتهایی جریان، دارای یک پیشانی و یا یک هد غلطان است و بعد از آن بدنه جریان قرار دارد. جریان در پیشانی غیردائمی بوده و نیروی محرک آن گرادین فشار ناشی از اختلاف دانسیته بین پیشانی و سیال پیرامون است و با پیشروی جریان رشد می‌کند؛

اما جریان در بدنه، جریان دائمی در نظر گرفته می‌شود و نیروی محرک بدنه، نیروی ثقل مؤثر است. در ادامه جریان در ناحیه

غوطه‌وری قرار دارد که شبه دائمی در نظر گرفته می‌شود و بیشترین میزان اختلاط جریان غلیظ با سیال پیرامون در این ناحیه رخ می‌دهد (Shekholeslami and Ghomeshi, 2017).

میزان اختلاط سیال غلیظ با سیال پیرامون به وسیله پارامتری به نام شدت اختلاط (نسبت تغییرات دبی جریان غلیظ بین دو مقطع به دبی اولیه جریان غلیظ،  $\gamma = \frac{\Delta q}{q_0}$ ) بیان می‌شود. شدت اختلاط در واقع نسبت اختلاط دبی خروجی جریان غلیظ و دبی ورودی به دبی ورودی جریان غلیظ است (Parker and Toniolo, 2007).

Turner (1979) اختلاط جریان غلیظ با سیال پیرامون را ناشی از ناپایداری بین سطح تماس جریان غلیظ و سیال پیرامون دانست و آن را تابعی از نسبت سرعت جریان به شتاب ثقل کاهش یافته بیان نمود. Akiyama و Stefan (1984) با بررسی روابط تئوری و مقایسه آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و سد ولینگتون، دو عامل شیب و شدت اختلاط (در ناحیه غوطه‌وری) را در پدیده غوطه‌وری مؤثر دانستند. آن‌ها پدیده غوطه‌وری را چنین توصیف کردند: جریان ورودی در محل غوطه‌وری، سیال پیرامونی را به سمت جلو رانده و در حین حرکت در زیر آن، سیال پیرامون به سمت نقطه‌ی غوطه‌وری کشیده می‌شود.



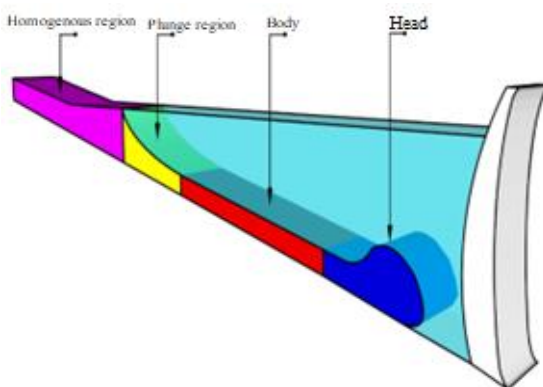


Fig. 1- Schematic of a Turbidity Current  
شکل ۱- شمای یک جریان غلیظ (جریان کدر)

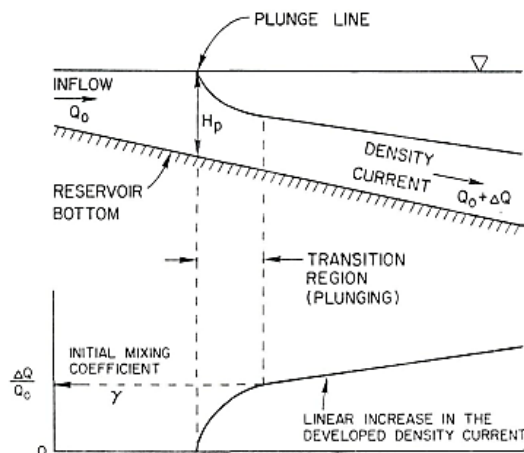


Fig. 2- Schematic of the amount of Ambient Flow fluid entering in different areas of Turbidity flow movement (Farrell and Stefan, 1988)

شکل ۲- شماتیک مقدار ورود سیال پیرامون به در نواحی مختلف حرکت جریان غلیظ – (Farrell and Stefan, 1988)

در زمینه شدت اختلاط سیال پیرامون در ناحیه غوطه‌وری مطالعه‌های کمی صورت گرفته است. Farrell و Stefan (1988) با فرض ناپایداری جریان غلیظ و انتخاب مدل  $k - \epsilon$  به‌عنوان مدل آشفتگی، روابطی را در مختصات قطبی برای توصیف حرکت جریان غلیظ در مخازن سدها بیان کردند. آن‌ها همچنین به بررسی ورود سیال پیرامونی به درون جریان غلیظ مطابق شکل (۲) در ناحیه غوطه‌وری پرداختند و با مقایسه عدد فرود دنسیومتریکی  $(Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'D}})$  با ضریب شدت اختلاط  $(\gamma)$ ، رابطه (۱) را برای ضریب شدت اختلاط اولیه به دست آوردند (شکل ۳).

در زمینه شدت اختلاط سیال پیرامون در ناحیه غوطه‌وری مطالعه‌های کمی صورت گرفته است. Farrell و Stefan (1988) با فرض ناپایداری جریان غلیظ و انتخاب مدل  $k - \epsilon$  به‌عنوان مدل آشفتگی، روابطی را در مختصات قطبی برای توصیف حرکت جریان غلیظ در مخازن سدها بیان کردند. آن‌ها همچنین به بررسی ورود سیال پیرامونی به درون جریان غلیظ مطابق شکل (۲) در ناحیه غوطه‌وری پرداختند و با مقایسه عدد فرود دنسیومتریکی  $(Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'D}})$  با ضریب شدت اختلاط  $(\gamma)$ ، رابطه (۱) را برای ضریب شدت اختلاط اولیه به دست آوردند (شکل ۳).

$$\gamma = 0.00175Ri^{-0.19} \quad R^2 = 0.66 \quad (2)$$

$$\gamma = 0.5(Fr_d - 0.7) \quad (1)$$

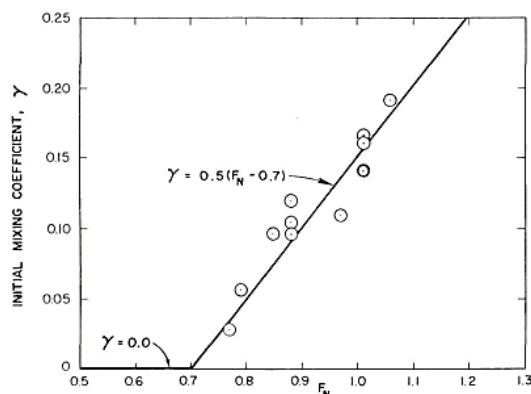


Fig 3- Comparison of initial mixing intensity coefficient with densimetric Froude number (Farrell and Stefan, 1988)

شکل ۳- مقایسه ضریب شدت اختلاط اولیه با عدد فرود دنیومتریکی (Farrell & Stefan, 1988)

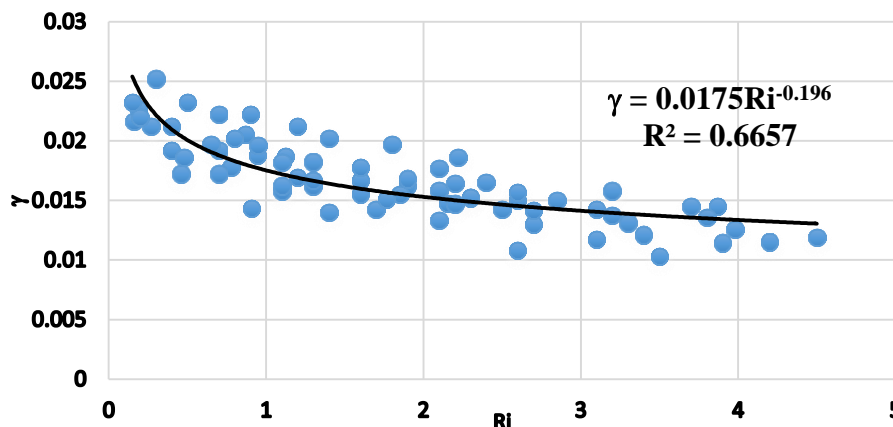


Fig 4- Relationship between Entrainment intensity and Richardson number in the Plunging zone (Karamichemeh et al., 2014)

شکل ۴- رابطه بین شدت اختلاط و عدد ریچاردسون در ناحیه غوطه‌وری (Karamichemeh et al., 2014)

هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر قوس بر شدت اختلاط در ناحیه غوطه‌وری است.

### مواد و روش‌ها

#### تحلیل ابعادی

متغیرهای موجود برای آنالیز ابعادی شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون در این آزمایش‌ها مطابق رابطه (۴) است:

$$f(S_0, b, r_m, \theta, g, \rho_d, \rho_a, U, v, q_0, h, f_t) = 0 \quad (4)$$

Ghasemi et al. (2011) به بررسی خصوصیات ناحیه غوطه‌وری جریان‌های غلیظ در مسیر مستقیم پرداختند. بدین منظور ۲۰ آزمایش با ۴ شیب ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد با تغییر دبی و غلظت جریان ورودی، در هر شیب پنج آزمایش انجام دادند. آن‌ها شدت اختلاط جریان غلیظ با سیال پیرامون در ناحیه غوطه‌وری را ۴۰ درصد تا ۴۳ درصد اختلاط کل به دست آوردند. آن‌ها همچنین رابطه (۳) را بین شدت اختلاط ( $\gamma$ ) و عدد ریچاردسون ( $Ri$ ) به دست آوردند؛ همچنین به واسطه در نظر گرفتن شیب کمتر نسبت به تحقیق کریمی چمه، ضریب عدد ریچاردسون ( $Ri$ ) عدد منفی بزرگتری به دست آمده؛ این بدان معناست که هر چه شیب کمتر باشد، شدت اختلاط نیز کمتر می‌شود.

$$\gamma = 0.0017Ri^{-1.042} \quad R^2 = 0.95 \quad (3)$$

مرکزی خم ( $\theta$ ) و نیز شیب کف فلوم ( $S_0$ ) ثابت بوده و تنها شعاع انحنای فلوم تغییر می‌کند؛ بنابراین تأثیر تغییرات آن در این تحقیق بررسی نمی‌گردد. از آنجاکه آزمایش‌های این تحقیق در فلوم و در شرایط جریان آزاد و تغییرات کم‌دمایی صورت پذیرفت و از طرفی پس از محاسبه عدد رینولدز ( $Re$ ) جریان غلیظ مشاهده شد که عدد رینولدز در این آزمون همواره در محدوده جریان متلاطم قرار داشت، همانند کار دیگر محققین از بررسی اثر آن صرف‌نظر شد Mansouri Hafshejani et al, (2012) Kaheh et al Torabi Poudeh et al, (2014) Mehdi et al, (2016) (2007) و Varjavand et al (2016) همچنین به دلیل صاف و صیقلی بودن بستر از تأثیر تغییرات ضریب اصطکاک کف ( $f_t$ ) صرف‌نظر می‌گردد.

با توجه به مطالب گفته‌شده پارامترهای بدون بعد مؤثر را می‌توان به صورت رابطه (۷) نوشت:

$$f\left(\frac{r_m}{b}, Ri, \gamma\right) = 0 \quad (7)$$

#### مدل فیزیکی

در انجام آزمایش‌ها از یک فلوم با سه قوس ۹۰ درجه با شعاع‌های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ و عرض ۲۰ سانتی‌متر، مطابق با جدول (۱) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده گردید (شکل ۶).

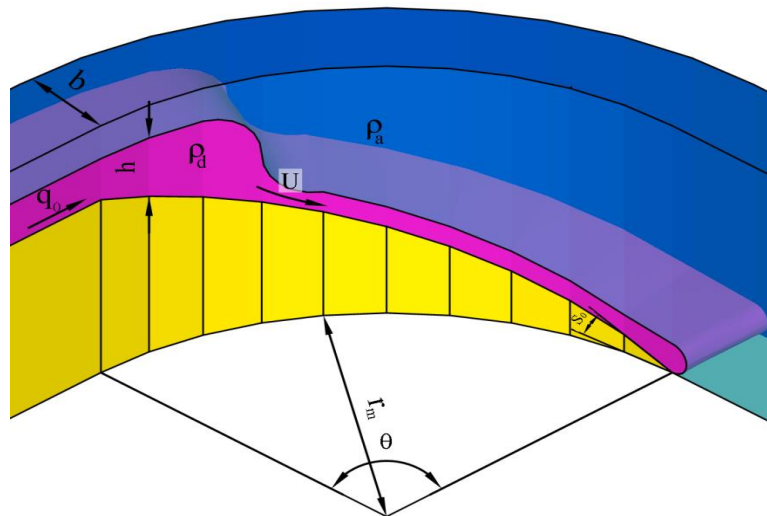


Fig 5- A view of the effective parameters in the current research

شکل ۵-نمایی از پارامترهای مؤثر در تحقیق حاضر

که در آن  $S_0$ ، شیب کف،  $b$ ، عرض فلوم،  $r_m$ ، شعاع قوس،  $\theta$ ، زاویه قوس،  $g$ ، شتاب جاذبه،  $\rho_d$ ، جرم واحد حجم (چگالی) سیال غلیظ،  $\rho_a$ ، چگالی سیال پیرامونی،  $U$ ، سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ،  $v$ ، لزجت سینماتیکی جریان غلیظ،  $q_0$ ، دبی ورودی جریان غلیظ،  $h$ ، ارتفاع بدنه جریان غلیظ و  $f_t$ ، ضریب اصطکاک کف است (شکل ۵). با استفاده از آنالیز ابعادی به روش باکینگهام و انتخاب پارامترهای  $\rho_d$ ،  $U$ ،  $g$  به عنوان پارامترهای تکراری، اعداد بدون بعد زیر حاصل می‌شود:

$$f\left(S_0, \frac{r_m}{b}, \theta, \frac{U^2}{g'h}, \frac{\rho_a - \rho_d}{\rho_a}, \frac{q_0}{Uh}, \frac{Uh}{v}, f_t\right) = 0 \quad (8)$$

با معرفی  $g' = \frac{\rho_a - \rho_d}{\rho_a} g$ ،  $\gamma = \frac{q - q_0}{q_0}$  و  $Re = \frac{Uh}{v}$  (به ترتیب شتاب ثقل کاهش یافته، ضریب شدت اختلاط و عدد رینولدز) و وارد نمودن آن‌ها در رابطه (۵) می‌توان اعداد بدون بعد را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$f\left(S_0, \frac{r_m}{b}, \theta, \frac{U^2}{g'h}, \gamma, Re, f_t\right) = 0 \quad (9)$$

که در این رابطه  $\frac{q - q_0}{q_0}$ ، ضریب شدت اختلاط ( $\gamma$ ) است. همچنین می‌توان به جای  $\left(\frac{U^2}{g'h}\right)$  می‌توان عدد ریچاردسون ( $Ri = Fr_d^{-2} = \left(\frac{U^2}{g'h}\right)^{-1}$ ) را وارد رابطه (۹) کرد. در این تحقیق زاویه

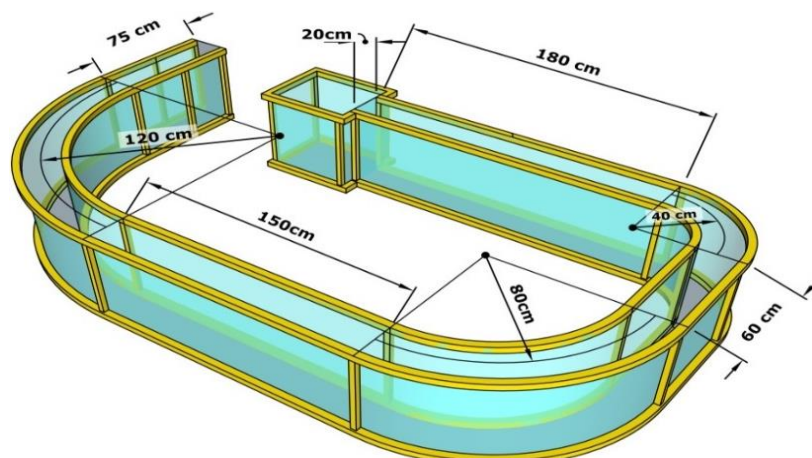


Fig 6- An overview of the Flume used in this research

شکل ۶- نمایی از فلوم مورد استفاده در تحقیق حاضر

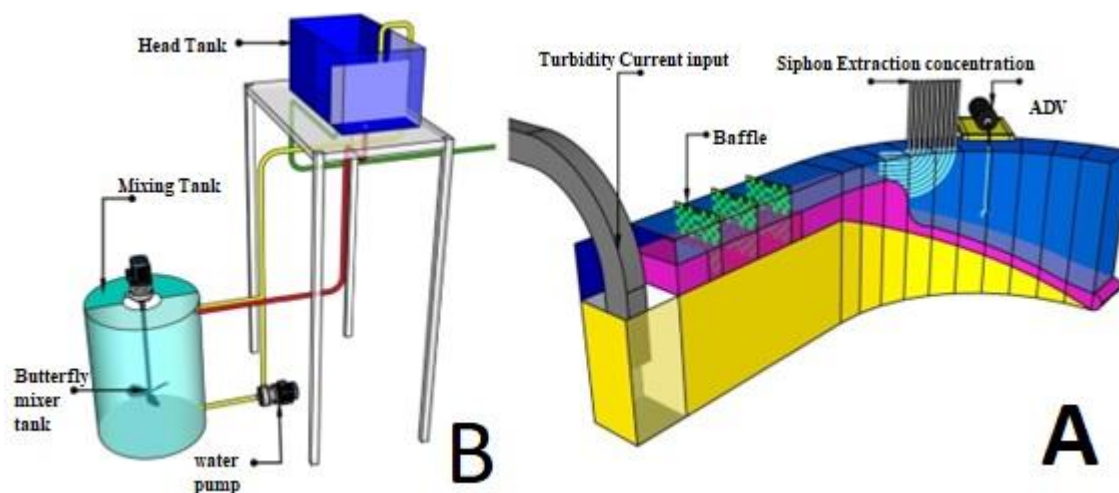


Fig 7- A) A view of the flow transfer system to the flume and how to measure the effective parameters  
B) A view of the Turbidity Current preparation and pumping system

شکل ۷- الف) نمایی از سیستم انتقال جریان به فلوم و نحوه اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر ب) نمایی از سیستم تهیه و پمپاژ

#### سیال غلیظ

در مطالعه حاضر از محلول آب و نمک به‌عنوان سیال غلیظ استفاده گردید که برای ساخت این محلول و انتقال آن به فلوم، سیستم اختلاط، شامل مخزنی با ظرفیت ۲۰۰۰ لیتر، پمپی با قدرت دو اسب بخار به‌منظور انتقال جریان به هد تانک (Head Tank) و شفت و پروانه به همراه موتور دو اسب بخار به‌منظور همگن‌سازی مخلوط آب و نمک ساخته شد. سیستم اختلاط اشاره‌شده شامل مخزن اختلاط، پمپ، لوله‌ها و اتصالات و همچنین هد تانک که عمل ایجاد هد ثابت از سیال غلیظ جهت انتقال به فلوم بر عهده داشت، صورت گرفت (شکل ۷-ب).

در این فلوم، سیال غلیظ از قسمت ابتدایی فلوم توسط لوله‌ای انعطاف‌پذیر و قابل جابجایی به قطر ۱۰ سانتی‌متر وارد یک حفره به عمق حدودی ۴۰ سانتی‌متر شد و پس از سرریز شدن از حفره و عبور از سه آرام‌کننده توری شکل وارد قوس شد. در انتهای فلوم، آب زلال وارد فلوم شد؛ به‌نحوی که میزان سیال غلیظ خروجی با آب زلال ورودی تقریباً برابر باشد. به‌منظور ایجاد ناحیه غوطه‌وری، در مسیر قوس شیب ۳۳ درصد به‌وسیله ماسه در محل قوس‌ها (به‌طور جداگانه) ایجاد شد؛ همچنین برای کاهش اثر زبری کف، از قطعه یکپارچه چوبی صیقل داده‌شده بر روی ماسه‌ها استفاده شد (۷-الف).

جدول ۱- برنامه آزمایش‌های انجام‌شده

Table 1- Range of data collected in the present study

description	number of change states	Parameter
straight path $\frac{R}{B} = 2,4,6$	1+3	Radius of relative curvature
10 cm on the straight path	1	fluid water level
5, 7.5, 10, 12.5 g/l	4	Concentration (grams per liter)
1, 1.5, 2, 2.5 L/s	4	flow rate (liters per second)
	64	total number of tests performed

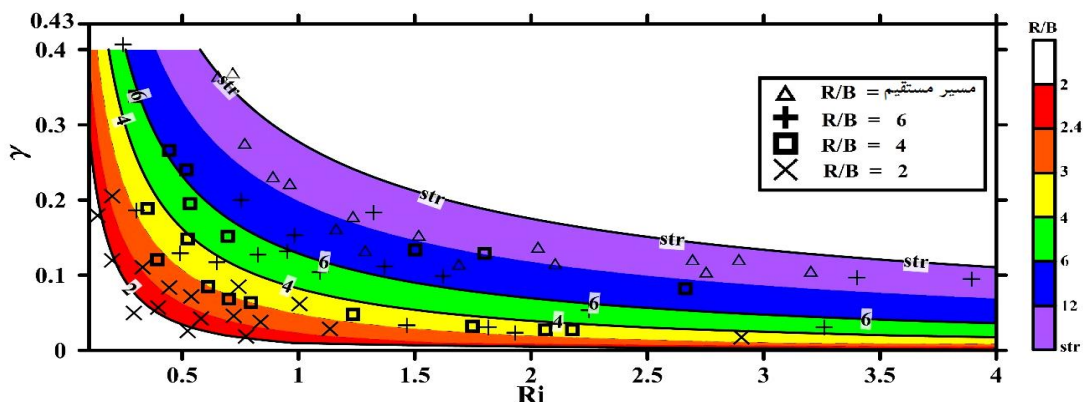


Fig 8- The change of mixing intensity coefficient against Richardson's number in the present research

شکل ۸- تغییر ضریب شدت اختلاط در مقابل عدد ریچاردسون در تحقیق حاضر

حداکثر مقدار ضریب اختلاط اولیه سیال پیرامون به جریان غلیظ ۰/۴ بوده شکل (۹)، این بدان معنی است که حداکثر ۴۰ درصد دبی سیال پیرامون می‌توان وارد جریان غلیظ در ناحیه غوطه‌وری گردد این مقدار با نتایج تحلیلی صورت گرفته توسط Dai و García (2010) مطابقت دارد. در Fig 10 - The effect of the transverse speed on the value of the longitudinal speed at a Q=1 L/s and a concentration of 5 g/L a) Speed along the length of the arc b) Speed along the (width of the arc (Cm/S)

شکل (۱۰) تأثیر شعاع قوس بر پروفیل سرعت را می‌توان مشاهده نمود. با افزایش شعاع انحنا و کاهش تأثیر نیروی گریز از مرکز، سرعت عرضی (سرعت در راستای عمود بر قوس) کاهش می‌یابد و این کاهش سبب افزایش سرعت طولی (سرعت در راستای قوس) می‌شود. افزایش سرعت طولی سبب افزایش مومنتوم جریان غلیظ در راستای قوس و برخورد بیشتر جریان غلیظ با سیال پیرامونی می‌شود؛ بنابراین در قوس سوم (قوس با نسبت شعاع به عرض شش بیشترین سرعت طولی و بیشترین شدت اختلاط رخ داده است.

قبل از ورود جریان به فلوم، دبی جریان به وسیله دبی سنج اندازه‌گیری شد. در قوس به واسطه شیب ایجاد شده، جریان در نقطه‌ای غوطه‌ور شد. با غوطه‌ور شدن جریان، سرعت جریان به وسیله دستگاه سرعت سنج (adv) در مش‌بندی و زوایای مشخص برداشت شد (مش‌بندی افقی بافاصله یک سانتی‌متری از هم و مش‌بندی عمودی بافاصله ۲/۵ سانتی‌متری از هم). سپس غلظت جریان به وسیله سیفون در نقاط مشخص برداشت شد. همچنین برای تعیین محل غوطه‌وری از دوربین نصب‌شده روی فلوم (GoPro) استفاده شد.

### نتایج و بحث

به منظور بررسی تأثیر شعاع انحنا بر روی ضریب اختلاط، نتایج به دست آمده برای ضریب اختلاط در برابر عدد ریچاردسون برای تمامی مسیرها در شکل (۸) و در رابطه (۸) آورده شده است. همچنین لازم به ذکر است که رابطه (۸) براساس ۷۰ درصد داده‌ها برآورد شده و با ۳۰ درصد باقیمانده صحت سنجی شده است.

$$\gamma = 0.75 Ri^{-1/4} - 1.15 \left( \frac{R}{B} \right)^{-1/3} \quad R^2 = 0.82 \quad (8)$$

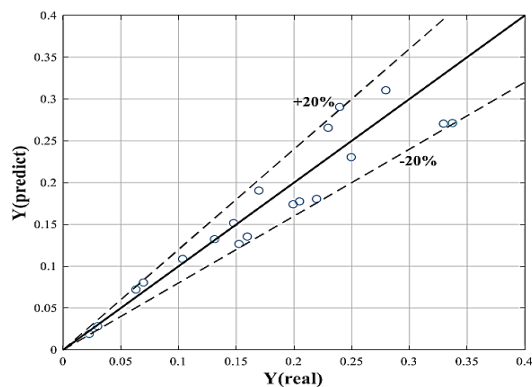


Fig 8- Verification of the results obtained from equation (8)

شکل ۹- صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از رابطه (۸)

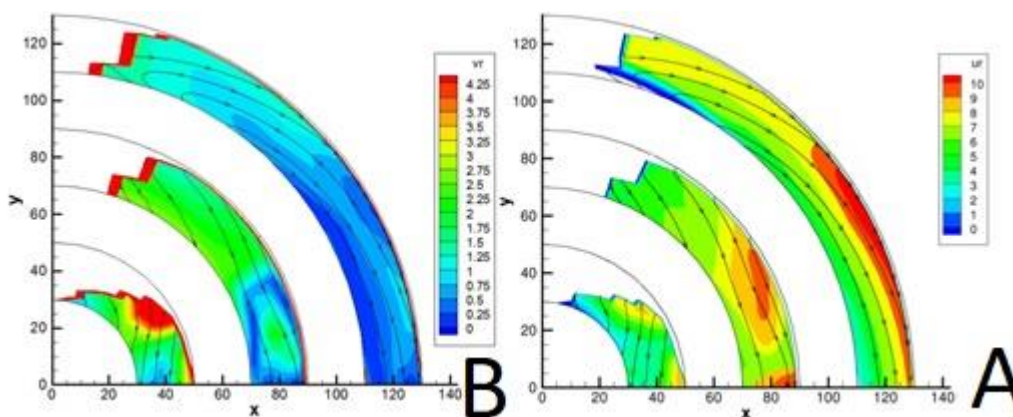


Fig 10 - The effect of the transverse speed on the value of the longitudinal speed at a  $Q=1$  L/s and a (concentration of 5 g/L a) Speed along the length of the arc b) Speed along the width of the arc (Cm/S)

شکل ۱۰- تأثیر سرعت عرضی بر مقدار سرعت طولی در دبی ۱ لیتر بر ثانیه و غلظت ۵ گرم بر لیتر الف) سرعت در راستای طول قوس ب) سرعت در راستای عرض قوس (سرعت‌ها برحسب سانتی‌متر بر ثانیه است)

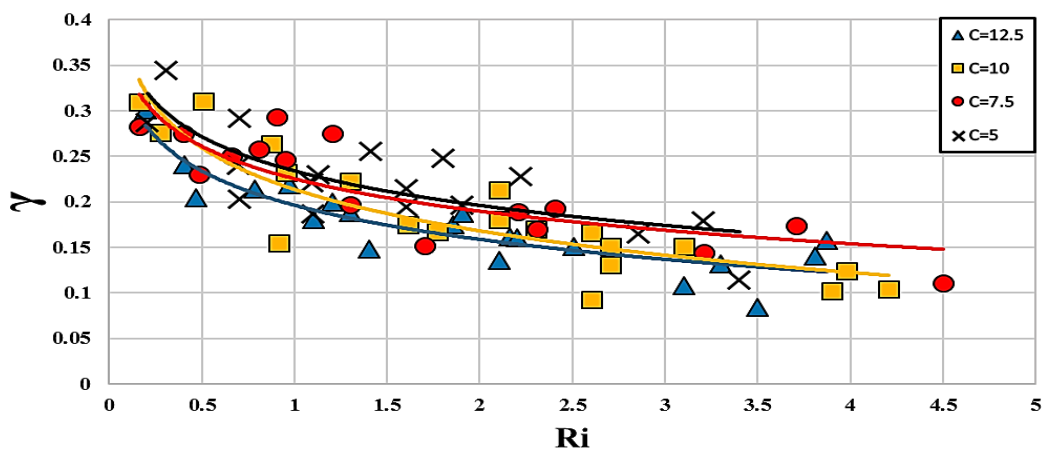


Fig 11 - The effect of changing concentration on  $\gamma$  versus  $Ri$  in concentrated flow

شکل ۱۱- تأثیر تغییر غلظت در روند تغییرات  $\gamma$  در مقابل  $Ri$  در جریان غلیظ

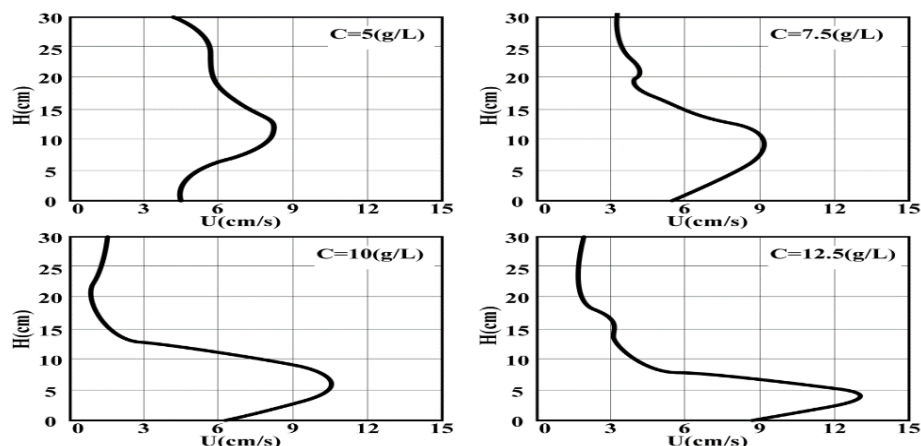


Fig. 12 - The effect of concentration on the longitudinal velocity profile at the end of the bend for a  $Q=2.5$  L/s and a radius of 6 (measured velocity profile in the middle of the arch)

شکل ۱۲- تأثیر غلظت بر پروفیل سرعت طولی در انتهای خم به ازای دبی ۲,۵ لیتر بر ثانیه و شعاع به عرض ۶ (پروفیل سرعت اندازه گیری شده در میانه قوس)

### نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر قوس بر خصوصیات جریان غلیظ در ناحیه غوطه‌وری پرداخته شد. آزمایش‌ها نشان داد با افزایش شعاع انحنا به دلیل کاهش نیروی گریز از مرکز و افزایش سرعت طولی جریان غلیظ، شدت اختلاط جریان غلیظ با سیال پیرامونی افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش غلظت جریان به دلیل افزایش پایداری بدنه جریان و متمایل شدن موقعیت سرعت بیشینه به سمت بستر و در نتیجه کاهش سطح تماس توده سیال غلیظ با سیال پیرامونی، شدت اختلاط کاهش می‌یابد؛ از این رو در یک عدد ریچاردسون برابر در جریان غلیظ با غلظت بالاتر، شدت اختلاط کمتری را در مقایسه با جریان غلیظ با غلظت کمتر شاهد بودیم.

### تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت واحد پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده سوم به شماره (SCU.WH1402.43525) تهیه شده که بدینوسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی میکنند.

در شکل (۱۱) تأثیر تغییر غلظت در روند تغییرات ضریب اختلاط با عدد ریچاردسون در جریان غلیظ نمکی نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است با کاهش غلظت جریان غلیظ، شدت اختلاط جریان غلیظ با سیال پیرامونی افزایش می‌یابد؛ علت این پدیده را می‌توان در شکل (۱۲) مشاهده نمود. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با افزایش غلظت، بیشینه سرعت طولی جریان غلیظ در انتهای خم افزایش می‌یابد؛ علت این امر را می‌توان به افزایش مؤلفه وزن سیال در اثر افزایش غلظت نسبت داد؛ همچنین به دلیل زیاد بودن غلظت جریان غلیظ در نزدیکی بستر موقعیت حداکثر سرعت جریان با افزایش غلظت به سمت بستر منتقل می‌شود. با توجه به کاهش ارتفاع جریان و نیز کاهش شدت اختلاط به ازای افزایش غلظت آن، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که هر قدر بر چگالی سیال غلیظ افزوده شود تمایل آب زلال ساکن برای نفوذ به داخل آن کاهش می‌یابد و سیال بر روی بستر خود به سمت پایین دست می‌لغزد.

### منابع

- 1- Akiyama, J., & Stefan, H. G. (1984). Plunging Flow into a Reservoir: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(4), 484–499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:4\(484\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:4(484)).
- 2- Dai, A., & García, M. H. (2010). Energy Dissipative Plunging Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(8), 519–523. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000176).
- 3- Farrell, G. J., & Stefan, H. G. (1988). Mathematical modeling of plunging reservoir flows. *Journal of Hydraulic Research*, 26(5), 525–537. <https://doi.org/10.1080/00221688809499191>.

- 4- Ghasemi, N. afrin, Shushtri, M. M., & Dehghani, R. (2011). *Laboratory investigation of static water tension in Turbidity Current and mixing in the immersion zone*. The 6th National Congress of Civil Engineering. <https://en.civilica.com/doc/120786/>.
- 5- Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (2003). *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry* (Reprint). Wiley.
- 6- Kaheh, M., Ghomeshi, M., & Mousavi Jahromi, S. H. (2012). Experimental Investigation of Gravity Current Frontal Velocity on Rough Beds. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(1), 101–109. [https://jise.scu.ac.ir/article\\_10504\\_en.html](https://jise.scu.ac.ir/article_10504_en.html)
- 7- Karamichemeh D, Shahnazari A, Golmaei H, & Ghomeshi M. (2014). *EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF PLUNGE REGION OF SALINE DENSITY CURRENT*. 36(4), 0–0. <https://www.sid.ir/paper/359064/fa>
- 8- Lee, H.-Y., & Yu, W.-S. (1997). Experimental Study of Reservoir Turbidity Current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(6), 520–528. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:6\(520\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:6(520))
- 9- Mansouri Hafshejani, M., Ghomeshi, M., Shafae Bajestan, M., & Ahadiyan, J. (2016). Estimation of Relative Head Velocity of Density Current When Ambient Water Flowing in Same Direction of Density Current. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), 193–200. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12507>
- 10- Mehdi, G., Ali, H. D., Peyman, V., & Davood, F. (2014). *EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF ARTIFICIAL BED ROUGHNESS ON HYDRAULIC PARAMETERS OF SALINE DENSITY CURRENTS*. 37(3), 95–105. <https://www.sid.ir/paper/217167/fa>
- 11- Parker, G., & Toniolo, H. (2007). Note on the Analysis of Plunging of Density Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 690–694. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(690\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(690))
- 12- Sheikholeslami, M., Ghomeshi, M. (2017). 'Experimental Study of Radius of Curvature Influence On Density Current Behavior in 90 Degree Bend', *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), pp. 131-143. doi: 10.22055/jise.2017.12672. (in persain)
- 12- Torabi Poudeh, H., Fathi Moghadam, M., Ghomeshi, M., & Shafai-Bajestan, M. (2007). Head Velocity and Entrainment of Density Current in an Expansion Reach. *Iran-Water Resources Research*, 3(1), 56–67. [https://www.iwrr.ir/article\\_15478\\_en.html](https://www.iwrr.ir/article_15478_en.html).
- 13- Turner, J. S. (1979). *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press.
- 14- Varjavand, P., Ghomeshi, M., Hosseinzadeh, A., Dalir, & Farsadizadeh, D. (2016). Experimental Investigation of lifting phenomenon in Sediment-Laden Density Currents. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 129–144. <https://www.magiran.com/paper/1668255/experimental-investigation-of-lifting-phenomenon-in-sediment-laden-density-currents?lang=en>



In The Name of God

# Irrigation Sciences and Engineering

(Scientific)

Vol. 47 (1)

Spring 2024

## 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

Type Setting: Yazdani, N.

E-mail: [JISE.Water@Scu.ac.ir](mailto:JISE.Water@Scu.ac.ir)  
[JISE.Water@yahoo.com](mailto: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
<b>Estimation of Sugar Cane Evapotranspiration Using Sybal Algorithm and Presly Taylor Method (Case Study of Amir Kabir Cultivation and Industry)</b>	J. Jalali, F. Radmanesh, A. A Naseri, M. A. Akhond Ali and H. Zarei	<b>1</b>
<b>Investigation the Effective Parameters on the Drag Coefficient in Rigid and Flexible Vegetation</b>	S. Salmanzadeh, M. Fathi-Moghadam, J. Ahadiyan and S. M. Sajadi	<b>15</b>
<b>Determination of contribution of flow network components around drain tubes in paddy field drainage</b>	M. Jafari-Talukolaee A. Shahnazari and H. Ritzema	<b>33</b>
<b>Investigation of mechanical properties of concrete lining of water conveyance channels containing bamboo nanoparticles</b>	J. Abedi-Koupai, A. Gohari, S. Eslamian and A. Motamedi	<b>53</b>
<b>The MODIS daily produces snow cover modification based on cloudy effects analysis (case study: northwest of Iran)</b>	R. Ebrahimi, S. Marofi and H. Torabzadeh Khorasani	<b>67</b>
<b>Evaluation of the Performance of CANFIS, MLPNN, MLR and M5 Models in the Simulation of Meteorological Drought Index (Case Study: Kermanshah Synoptic Station)</b>	H. Mazandarani Zadeh and F. Khodabakhshi	<b>83</b>
<b>Experimental investigation of the effect of geometrical parameters on the equilibrium time of scour around the complex pier group</b>	S. Rahimnejad, M. Esmaeili Varaki, B. shafeie Sabet and A. Radice	<b>99</b>
<b>Experimental Study of Water Entrainment in Plunging Phenomena in Channel's Bend</b>	R. Elahi, M. Ghomeshi and M. Zayeri	<b>119</b>