



The effect of the energy head and the inlet and outlet key width on discharge coefficient of Piano key weir

Shima Komeili ¹, Mohammad Mehdi Heidari ²

¹ M.Sc Graduated of Water Structure, Department of Water Science and Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: shimak72@yahoo.com

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: mm.heidari@razi.ac.ir

ABSTRACT

Piano key weir is a form of nonlinear weir designed to improve the discharge capacity of spillway structures. Due to the increase in effective length, they can be used in dam spillways or water regulation structures. It is modified form of labyrinth weir which easy to place on the existing spillway or newly constructed dam with less base area. There is no standard method available for PK weir design, and the amount of published information is insufficient for the design of PK weir. In this research, the flow passing over piano key and labyrinth weir were simulated using FLOW-3D model and the results of the numerical model were compared with the laboratory data. The results showed that if the second order scheme and RNG k- ϵ turbulence model were used in the numerical model, the simulation accuracy of the flow over PKW increases. Also, in this research, the effect of the ratio of the inlet key width to the outlet key width (W_i/W_o) and the effect of the energy head on the discharge capacity are investigated. The results show that increasing the H_e/P decreases the discharge coefficient. The results showed that if the W_i/W_o equal to 1.5, the highest discharge coefficient occurs for the piano key weir.

Keywords: FLOW-3D model, Labyrinth weir, Turbulence model, Capacity of spillway

Article Type: Research Article

Article history: Received: 29 September 2023 Revised: 08 December 2023 Accepted: 27 December 2023 ePublished: 27 December 2023

1. Introduction

Piano key weir is a form of nonlinear weir designed to improve the discharge capacity of spillway structures. Due to the increase in effective length, they can be used in dam spillways or water regulation structures. It is modified form of labyrinth weir which easy to place on the existing spillway or newly constructed dam with less base area. There is no standard method available for PK weir design, and the amount of published information is insufficient for the design of PK weir. A large number of geometric and hydraulic parameters affect the discharge capacity of PK weir, and their effect on the hydraulic performance of the weir can be investigated with a numerical model or laboratory data. Simulation of flow over PKW using FLOW-3D software and the effect of the turbulence model on the accuracy of the numerical model is one of the goals of this study. Also, in this research, the effect of the ratio of the inlet key width to the outlet key width (W_i/W_o) and the effect of the energy head on the discharge capacity are investigated.

2. Methodology

2.1. Experimental model

Laboratory data is needed to verify the results of Flow-3D model. In this research, the laboratory data of Anderson (2011) were used to verify the flow passing through the piano key weir in free flow condition. The laboratory flume consists of a rectangular channel with a length of 7.3 meters, a width of 0.933 meters and a depth of 0.61 meters. The total length and height of the piano key weir are 4.848 and 0.197 m respectively, the floor slope in inlet and outlet key are 1:1.8, and number of keys is 4. The inlet and outlet key width are 0.116 and 0.925 m respectively, and the W_i/W_o ratio is 1.25.

2.2. Verification of the numerical model

Selection of boundary conditions for the numerical model is one of the most basic stages of simulation. In order to define the boundary conditions, in the inflow point (X_{min}) volume flow rate, in the sides of the weir (Y_{min} , Y_{max}) and bed (Z_{min}) wall condition, on the upper border (Z_{max}) symmetry condition and in the outflow section of the weir, outflow condition was used. The numerical model results were compared with the laboratory data. The results showed that if the second order scheme and RNG k- ϵ turbulence model are used in the numerical model, the simulation accuracy of the flow over PKW increases. Figure (1) shows the calculated and observed water depth for all simulations.

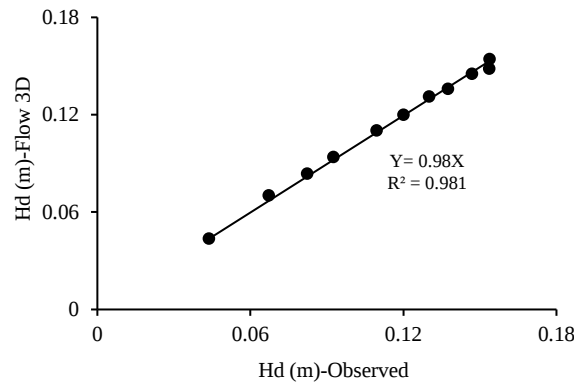


Figure 1. Observational and calculated water depth on piano key weir

The average error percentage of the numerical model in predicting the depth of water upstream of the piano key weir is 2.9%, which is suitable for predicting the rating curve of the weir.

3. Results and discussion

3.1. Comparison of the discharge coefficient of the piano key weir with the labyrinth weir

Several simulations were done for the PK1.25 piano key and the labyrinth weir using the numerical model. The height and length of both weir are 19.7 cm and 4.85 m, respectively, and the number of cycles of both weir is 4. By using Flow-3D model, the discharge coefficient of both weir was calculated and the results are shown in Figure (2).

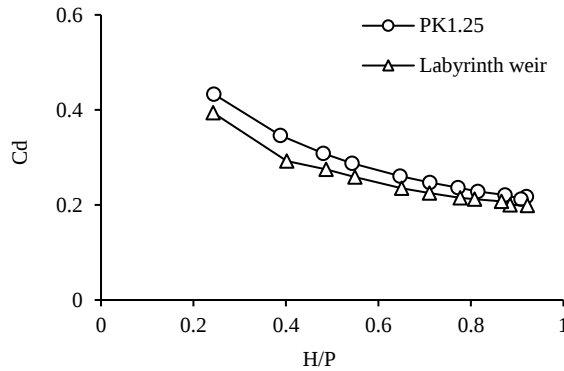


Figure 2. Comparison of the discharge coefficient of the piano key weir with the labyrinth weir

As can be seen, the discharge coefficient of the labyrinth weir and the piano key weir starts to decrease by increasing H/P value, and the discharge coefficient of the piano key weir is more than the the labyrinth weir. The slope of the input and output keys in the piano key weir is a factor that guides the flow and causes the discharge coefficient of the piano key weir to increase.

3.2. The effect of the energy head on the discharge coefficient

Several simulations were carried out with the numerical model to investigate the effect of the ratio of energy head to weir height on the discharge coefficient of piano key weir. For this purpose, different discharge were included as upstream boundary conditions in the model and water depth and the discharge coefficient were calculated. The results show that increasing the He/P decreases the discharge coefficient. So that the discharge coefficient for He/P=0.92 decreases by about 50% compared to He/P=0.24. With the increase of the water depth on the weir, the interference of the flow takes place at the breaking point of the weir cycles, and as a result, the discharge coefficient decreases.

3.3. the effect of the inlet-to-outlet key width ratio on the discharge coefficient

Another factor affecting the flow coefficient of the piano key is the ratio of the inlet key width to the outlet key width. In an effort to identify the range of the inlet-to-outlet width ratio (W_i/W_o) that produces the highest discharge efficiency (i.e., highest Cd values), five PK weir geometries with different W_i/W_o values [1.75 (PK1.75), 1.5 (PK1.5), 1.25 (PK1.25), 1.0 (PK1.0), 0.67 (PK0.67)] were tested; the test results are presented in Figure (3) with Cd as a function of H_t/P .

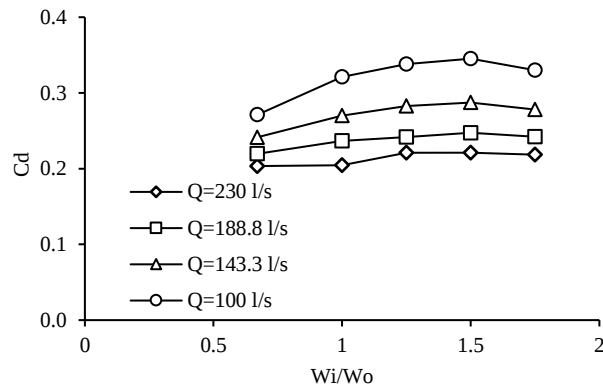


Figure 3. The effect of the inlet-to-outlet key width ratio on the discharge coefficient

The data in Figure (3) show that $W_i/W_o = 1.5$ (PK1.5) produced the highest discharge efficiency (i.e., largest C_d values). By increasing the W_i/W_o , the discharge coefficient has increased, and then it becomes maximum at $W_i/W_o = 1.5$. The influence of W_i/W_o on the discharge efficiency of the PK weir can likely be explained, in part, as follows. As inlet key widths increase relative to the outlet key widths, the inlet key entrance loss associated with the flow contraction at the key inlet decreases due to an increase in the inlet key area. Based on the assumption that $W_i + W_o = \text{constant}$, the outlet key width decreases as the inlet key width increases. As the outlet key widths decrease, the ability of the outlet keys to handle the discharge capacity of the more efficient inlet keys decreases. When the free-flow capacity of the outlet key is exceeded, a localized submergence condition develops.

4. Conclusions

In this research, the simulation of the flow over piano key and labyrinth weir was done using a numerical model. The results showed that for a fixed depth, the piano key weir passes more discharge than the labyrinth weir, and the ratio of flow through the piano key weir to the labyrinth weir is about 1.08. In other words, at a constant depth, the piano key weir passes 8% more flow. In this research, the effect of head energy on the discharge coefficient of the piano key weir was also investigated. The results show that increasing the H_e/P decreases the discharge coefficient. The results showed that if the W_i/W_o equal to 1.5, the highest discharge coefficient occurs for the piano key weir.

5. References

Anderson, R. M. (2011). Piano key weir head discharge relationships. M.S. thesis, Utah State University.

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Komeili, Sh., & Heidari, M.M. (2023). The effect of the energy head and the inlet and outlet key width on discharge coefficient of piano key weir, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 1-17. DOI: 10.22126/ATWE.2024.9923.1068

Publisher: Razi University

© The Author(s).





تأثیر هد انرژی و عرض کلیدهای ورودی و خروجی بر ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی

شیمای کمیلی^۱، محمدمهدی حیدری^۲

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: shimak72@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: mm.heidari@razi.ac.ir

چکیده

سرریزهای کلید پیاپویی نوعی از سرریزهای غیرخطی است که دبی در واحد عرض بیشتری نسبت به سایر سرریزها دارد و در مناطقی که تکیه گاه سد اجازه احداث سرریز با طول زیاد را نمی دهد، می توان استفاده کرد. این نوع سرریز اخیراً در مخازن سدها مورد استفاده قرار گرفته و به همین دلیل هنوز بررسی جامع روی این نوع سرریز صورت نگرفته است. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از مدل عددی فلوتردی جریان عبوری از سرریز کلید پیاپویی شبیه سازی و نتایج مدل با داده های آزمایشگاهی مقایسه شد. در صورتی که در مدل فلوتردی برای جداسازی معادله اندازه حرکت از شمای second order و مدل آشفتگی k-ε RNG استفاده شود، دقت شبیه سازی جریان عبوری از سرریز بیشتر می شود. همچنین در این پژوهش تأثیر هد انرژی و نسبت عرض کلیدهای ورودی و خروجی بر ضریب دبی سرریز با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دارد، افزایش نسبت H_e/P باعث کاهش ضریب دبی می شود. به طوری که ضریب دبی برای $H_e/P=0.92$ حدود ۵۰ درصد نسبت به $H_e/P=0.24$ کاهش می یابد. با افزایش عمق آب روی سرریز، تداخل جریان در محل شکستگی سیکل های سرریز صورت می گیرد و در نتیجه ضریب دبی کاهش می یابد. یکی دیگر از عوامل مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی نسبت عرض کلید ورودی به خروجی است. با افزایش نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی ضریب دبی افزایش یافته و سپس در W_i/W_o برابر ۱/۵ حداکثر می شود. تأثیر نسبت W_i/W_o بر ضریب دبی با افزایش عمق آب روی تاج سرریز بیشتر می شود.

واژه های کلیدی: مدل فلوتردی، سرریز کنگره ای، مدل آشفتگی، ضریب تخلیه سرریز

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۷ مهر ۱۴۰۲ اصلاح: ۱۷ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۶ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۶ دی ۱۴۰۲

استناد: کمیلی، ش.، و حیدری، م. م. (۱۴۰۲). تأثیر هد انرژی و عرض کلیدهای ورودی و خروجی بر ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی، فناوری های پیشرفته در بهره وری

آب، ۳(۴)، ۱۷-۱، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.9923.1068



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

سرریزها سازه‌هایی هستند که برای اندازه‌گیری دبی، انحراف و یا کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها استفاده می‌شوند. سرریزها به‌طور کلی از لحاظ شکل پلان به دودسته سرریزهای خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. سرریزهای خطی، سرریزهایی هستند که تاج آن‌ها در پلان به‌صورت خط راست بوده و شکستگی و یا انحنایی در آن‌ها دیده نمی‌شود. سرریز اوجی و سرریز پلکانی نمونه‌هایی از سرریزهای خطی هستند. سرریزهای غیرخطی، سرریزهایی هستند که تاج آن‌ها در پلان به‌صورت خط راست نبوده بلکه به‌صورت انحنا دار و یا خطوط شکسته است. سرریز نیلوفری، سرریز چندوجهی یا کنگره‌ای و سرریز کلید پیانویی نمونه‌ای از سرریزهای غیرخطی است. سرریزهای مستقیم، معمول‌ترین سرریزهای مورد استفاده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی هستند این سرریزها به‌صورت عمود بر جریان قرار گرفته و عرض آن‌ها با عرض کانال برابر می‌باشند. در صورتی که محل احداث سرریز با محدودیت در عرض مواجه باشد، می‌توان با استفاده از سرریزهای کنگره‌ای و یا سرریز کلید پیانویی طول سرریز را افزایش داد (فالوی^۱، ۲۰۰۳). سرریزهای کنگره‌ای نیاز به سطح پی و حجم بتن‌ریزی بالایی دارند و نسبت به سرریزهای کلید پیانویی هزینه ساخت بیشتری دارند (اندرسون و تولیس^۲، ۲۰۱۲). سرریزهای کلید پیانویی که دهانه‌ها یک‌درمیان شیب‌دار به سمت داخل و خارج مخزن سد دارند، نسبت به سرریزهای کنگره‌ای، فضای کمتری نیاز داشته و لذا پی این نوع سرریزها می‌تواند ابعاد کوچک‌تری داشته باشد، به‌نحوی که این مزیت باعث شده است تا بتوان از این نوع سرریز در تاج سدهای بتنی استفاده کرد (اندرسون و تولیس^۲، ۲۰۱۲). شکل (۱) نمونه‌ای از سرریز کلید پیانویی که به‌عنوان سرریز اضطراری سد استفاده شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمونه‌ای از سرریز کلید پیانویی مورد استفاده در سد بتنی (سد اترویت در فرانسه)

در سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان غالب وجود دارد، کلیدهای ورودی جریان نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و مانند سرریزهای لبه تیز با بدنه شیب‌دار عمل می‌کند و جریان از روی تاج ورودی به‌صورت ریزشی به سمت پایین‌دست تخلیه می‌شود. الگوی دوم بر روی کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد؛ و جریان عبوری از روی تاج خروجی، مشابه یک جت به سمت پایین‌دست بخش شیب‌دار کلید تخلیه می‌شود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

اوماین و لمپریه^۳ (۲۰۰۶) با بررسی روی سرریز کلید پیانویی در سیکل‌های مختلف بیان نمودند که برای مقادیر He/P کم، تعداد سیکل‌های بیشتر از ۸/۵ باعث افزایش ضریب دبی می‌شود، اما برای مقادیر He/P زیاد، تعداد سیکل زیاد در افزایش بهره‌وری تأثیر بسزایی ندارد. اوماین و لمپریه (۲۰۰۶) سه نوع سرریز کلید پیانویی را با نسبت w_i/w_o ، ۰/۶۷، ۱ و ۱/۵ آزمایش کردند آن‌ها دریافتند که با افزایش w_i/w_o کارایی سرریز افزایش می‌یابد. حیدر پور و همکاران (۱۳۸۵) به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی ضریب دبی سرریزهای زیگزاگی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار ضریب دبی سرریز در یک He/P ثابت افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش طول موازی با جهت جریان در سرریزهای زیگزاگی باعث کاهش ضریب دبی و

¹ Falvey

² Anderson & Tullis

³ Ouamane & Lempérière

افزایش طول عمود برجهت جریان، باعث افزایش ضریب دبی می شود. ریبRIO و همکاران^۱ (۲۰۱۲) با استفاده از نتایج مدل های فیزیکی موجود یک معادله عمومی برای رابطه اشل-دبی این نوع سرریزها ارائه کردند. بر اساس نتایج این تحقیقات، ظرفیت این نوع سرریزها عمدتاً به هد آب روی سرریز، طول کل، ارتفاع کلیدهای ورودی و عرض جانبی آن بستگی دارد. اندرسون^۲ (۲۰۱۱) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره های و کلید پیانویی مستطیلی را مقایسه کرد. نتایج نشان داد، سرریز کلید پیانویی به دلیل کاهش افت در کلیدهای ورودی، از عملکرد بهتری برخوردار است. دابلینگ و تولیس^۳ (۲۰۱۲) هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی واقع در کانال ها را مطالعه نموده و به این نتیجه رسیدند که در شرایط استغراق کم، سرریزهای کلید پیانویی نسبت به سرریزهای کنگره های نیاز به انرژی بالادست کمتری برای عبور یک دبی ثابت دارند. ماچیلز و همکاران^۴ (۲۰۱۴) برای محاسبه دبی عبوری از روی سرریز کلید پیانویی یک راه حل تحلیلی ارائه دادند. در روش آن ها، دبی عبوری از روی تاج مربوط به کلید ورودی و خروجی و همچنین تاج جانبی به صورت مجزا حساب می شود و با در نظر گرفتن ضرایبی باهم جمع می شوند. کریمی و همکاران (۱۳۹۹) به مقایسه ضریب دبی سرریز کلید پیانویی و سرریز مستطیلی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی سرریز کلید پیانویی به طور قابل توجهی بیشتر از ضریب دبی سرریز مستطیلی است. سرریز کلید پیانویی با طول تاج بیشتر دارای ضریب دبی بیشتر است اما تأثیر این پارامتر با افزایش عدد فرود و بار آبی بالادست کاهش می یابد. کروکستون^۵ (۲۰۱۷) با استفاده از مدل عددی فلوتردی تنها یک کلید از سرریز کلید پیانویی را شبیه سازی کرد و بیان کرد در صورتی که از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG استفاده شود و شرط مرزی عرضی از نوع متقارن در نظر گرفته شود، نتایج مدل عددی بهتر است. صفر زاده و نوروزی (۱۳۹۳) جریان سه بعدی روی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی، دوزنقه ای و انحنا دار را با استفاده از مدل عددی فلوئنت شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد که کلیدهای دوزنقه ای شکل تأثیر قابل ملاحظه ای برافزایش ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دارد. به طور میانگین ضریب دبی سرریز دوزنقه ای به اندازه ۲۳ و ۱۸ درصد بیشتر از سرریزهای کنگره ای و کلید پیانویی مستطیلی با طول تاج یکسان است. برمر و اورتل^۶ (۲۰۱۷) با استفاده از مدل عددی فلوتردی به بررسی تأثیر ضخامت دیواره بر روی ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل عددی فلوتردی توانایی بالایی در شبیه سازی الگوی جریان عبوری از سرریز را دارد. همچنین افزایش ضخامت دیواره باعث کاهش ضریب دبی می شود به طوری که کاهش چهار برابری ضخامت دیواره سرریز کلید پیانویی باعث افزایش ۴۰ درصدی ضریب دبی سرریز در دبی های پایین می شود. صفرزاده و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر افزایش هد آب بالادست و ارتفاع نسبی بر نحوه توزیع جریان روی تاج سرریز کلید پیانویی را بررسی کردند. نتایج حاکی از افزایش ضریب دبی سرریز با کاهش ارتفاع نسبی است. همچنین در این تحقیق، رابطه جدیدی برای تعیین ضریب دبی سرریز کلید پیانویی ارائه شده است و دبی عبوری از تاج کلید ورودی و خروجی و همچنین تاج جانبی محاسبه شده است. چهارطاقی و همکاران^۷ (۲۰۱۹) به بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی با انحنا در پلان پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش H/P (هد انرژی به ارتفاع تاج) ضریب دبی سرریز کلید پیانویی دوزنقه ای انحنا دار نسبت به کلید پیانویی مستطیلی خطی افزایش می یابد. کاهش زاویه انحنا در سرریز کلید پیانویی دوزنقه ای انحنا دار در ابتدا ضریب دبی این مدل را کاهش و سپس به طرز چشمگیری افزایش می دهد. یوسف^۸ (۲۰۲۰) تأثیر زاویه دیوار جانبی بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی را با استفاده از داده های آزمایشگاهی بررسی کرد و نشان داد که سرریز کلید پیانویی مستطیلی از تمام مدل های غیر مستطیلی خیلی بهتر عمل می کند. همچنین تحقیقات ایشان نشان داد که افزایش زاویه دیوار جانبی از صفر به ۵ و ۷ درجه باعث کاهش ۱۲ تا ۱۸ درصدی ضریب دبی سرریز می شود. غریبوند و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل فلوتردی به بررسی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی دوزنقه ای پرداختند. طبق نتایج، سرریزهای کلید پیانویی از ضریب دبی بیشتری نسبت به

¹ Riberio et al

² Anderson

³ Dabbling & Tullis

⁴ Machiels et al

⁵ Crookston

⁶ Bremer & Oertel

⁷ Chahartaghi et al

⁸ Yousif

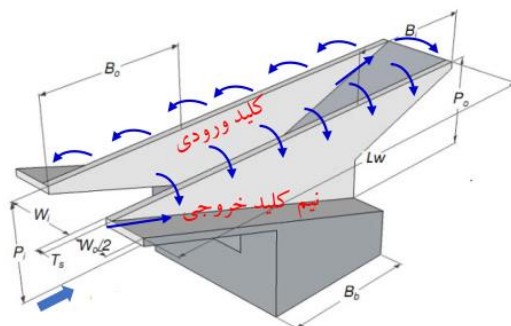
سرریزهای زیگزاگی برخورددار بودند. آنها همچنین با کمک مدل عددی به بررسی تأثیر ارتفاع سرریز بر ضریب دبی هردو نوع سرریز پرداختند. نتایج نشان داد، افزایش ارتفاع سرریز کلید پیانویی و زیگزاگی از ۵ به ۷/۵ سانتی‌متر (۵۰ درصد افزایش ارتفاع سرریز) به ترتیب باعث افزایش ۲۶ و ۲۴ درصدی ضریب دبی سرریز می‌شود.

مطالعه و بررسی پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر هیدرولیک جریان برای سرریزهای پیانویی محدود انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D به بررسی عوامل مؤثر بر هیدرولیک جریان پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی جریان روی سرریز کلید پیانویی و مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی، تأثیر جداسازی معادله اندازه حرکت و مدل آشفتگی بر دقت مدل عددی و انتخاب بهترین نوع آنها، تأثیر نسبت عرض کلید ورودی به خروجی بر ضریب دبی و همچنین تأثیر هد انرژی بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی از اهداف این تحقیق است.

روش پژوهش

معادلات حاکم

عوامل هندسی متعددی بر عملکرد سرریزهای کلید پیانویی دخالت دارد که شامل عرض کلید ورودی W_i ، عرض کلید خروجی W_o ، ارتفاع سرریز P ، طول شیروانی‌های پایین‌دست و بالادست B_i و B_o ، طول تاج کناری B است. شکل (۲) پارامترهای هندسی مؤثر بر هیدرولیک جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. یک سیکل از سرریز کلید پیانویی به همراه پارامترهای هندسی (صفرزاده، رستمی ۱۳۹۴)

معادله عمومی دبی عبوری از روی سرریزها مطابق رابطه (۱) است (هندرسون^۱، ۱۹۶۶):

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H_c^{1.5} \quad (1)$$

که در این رابطه Q ، شدت جریان عبوری از روی سرریز کلید پیانویی برحسب مترمکعب بر ثانیه، L طول تاج سرریز برحسب متر، H_c ارتفاع انرژی کل جریان بالادست نسبت به تاج سرریز برحسب متر، C_d ضریب دبی سرریز و g شتاب ثقل برحسب متر بر مجذور ثانیه است. طول تاج سرریز کلید پیانویی را می‌توان طبق رابطه (۲) محاسبه کرد:

$$L = N(W_i + W_o) + 2N(T_s + B) \quad (2)$$

در رابطه فوق، T_s ضخامت دیواره و N تعداد سیکل‌های سرریز است. به‌منظور شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و عددی استفاده نمود. در دهه‌های اخیر با رشد چشمگیر کامپیوتر و روش‌های عددی تمایل محققین به مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان افزایش یافته است. معادلات حاکم بر میدان جریان در سیالات عبارت‌اند از معادله پیوستگی و اندازه حرکت که برای جریان آشفته تراکم ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به‌صورت روابط (۳) و (۴) بیان می‌شوند (راهنمای مدل Flow 3D^۲، ۲۰۱۴):

¹ Yousif

² Flow Science

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i A_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_s}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (4)$$

که در آن، u_i بیان کننده سرعت در جهت x_i (جهات x ، y و z)، t زمان، V_f جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR، ρ جرم مخصوص سیال، A_i جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت i فشار هیدرواستاتیک، g_i بیانگر شتاب ثقلی و f_i بیانگر شتاب ناشی از لزجت که دربرگیرنده اثرات لزجت مولکولی و لزجت ناشی از آشفتگی است، است.

معرفی مدل FLOW-3D

با توجه به توسعه امکانات رایانه‌ای و نیز ارائه نرم‌افزارهای قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، امکان بررسی جریانات پیچیده با استفاده از شبیه‌سازی عددی فراهم شده است. در بین نرم‌افزارهای قابل استفاده، با توجه به ویژگی‌هایی از جمله سرعت و دقت مطلوب و شبکه‌بندی مناسب، نرم‌افزار FLOW-3D برای انجام تحقیق حاضر انتخاب شد. این مدل توسط شرکت Flow Science در سال ۱۹۸۰ توسعه داده شده است و محبوبیت زیادی را در بین کاربران دارد. یکی از دلایل محبوبیت زیاد این مدل نتایج بسیار خوب گرافیکی است. این نرم‌افزار معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌هایی با سلول‌های مکعبی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است که شامل روش VOF^1 در پیش‌بینی سطح آزاد سیال و ترکیب آن با روش FAVOR² در تشخیص مرزهای صلب است.

داده‌های آزمایشگاهی

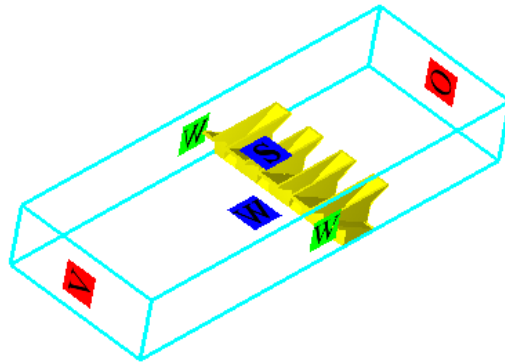
برای صحت سنجی نتایج مدل عددی Flow-3D نیاز به داده‌های آزمایشگاهی است. در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی اندرسون (۲۰۱۱) برای صحت‌سنجی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی در حالت جریان آزاد استفاده گردید. مجموعه آزمایشگاهی شامل یک فلوم مستطیلی به طول به طول ۷/۳ متر، عرض ۰/۹۳۳ و عمق ۰/۶۱ متر است. آب از یک مخزن تأمین آب به وسیله یک پمپ که حداکثر ظرفیت ۲۴۰ لیتر بر ثانیه را دارد، وارد فلوم می‌شود. در ابتدای فلوم جهت آرام نمودن جریان و کاهش نوسانات سطح آب در بالادست سرریز، از صفحات آرام‌کننده جریان استفاده شده است. دو عدد پیزومتر در دو طرف دیواره‌های فلوم آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری سطح آب در بالادست استفاده شده است. از بین سرریزهای ایشان، سرریز کلید پیانویی PK1.25 انتخاب و برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. طول کل سرریز ۴/۸۴۸ متر، ارتفاع سرریز ۰/۱۹۷ متر، طول تاج کنار سرریز ۰/۴۸۹ متر، شیب شیروانی‌های بالادست و پایین دست هر کلید ۱:۸ و تعداد سیکل سرریز ۴ عدد است. عرض کلید ورودی و خروجی به ترتیب ۰/۱۱۶ و ۰/۹۲۵ متر و نسبت W_i/W_o برابر ۱/۲۵ است.

شبکه‌بندی، شرایط مرزی و انفصال معادلات

بررسی میدان جریان عبوری از سرریز در این پژوهش به صورت سه بعدی انجام شده است. محدوده شبیه‌سازی جریان و هندسه سرریز بر اساس ابعاد مدل فیزیکی با نرم‌افزار اتوکد ترسیم و سپس به مدل فلوتردی منتقل شد. بعد از اجرای اولیه، تعداد مش در محدوده حل تا رسیدن به مش بهینه افزایش داده شد. شرایط مرزی و اولیه برای اجرای جریان غیر ماندگار توسط فلوئنت از اساسی‌ترین مراحل شبیه‌سازی است. در این تحقیق مطابق شکل (۳)، برای کف فلوم و سرریز شرط مرزی دیواره (wall)، در قسمت خروجی شرط مرزی آزاد (Outflow)، در بخش فوقانی شرط مرزی تقارن (Symmetry) و در قسمت ورودی شرط مرزی از شرط مرزی سرعت (Specified Velocity) استفاده شد.

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area-Volume Obstacle Representation



شکل ۳. شرایط مرزی اعمال شده برای شبیه سازی جریان از روی سرریز کلید پیانویی

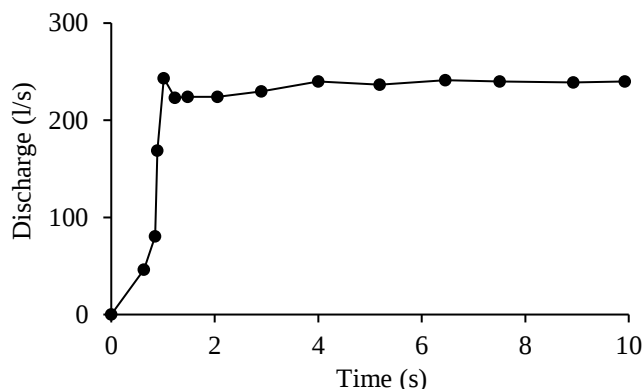
اندازه شبکه، نوع مدل های آشفتگی و شمای عددی حل از عوامل تأثیرگذار بر شبیه سازی جریان است. بدین منظور، جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی PK_{1.25} برای دبی ۲۳۰ لیتر بر ثانیه شبیه سازی و مقدار عمق آب بالادست سرریز از مدل استخراج شد. با استفاده از رابطه (۱) ضریب دبی سرریز محاسبه و با داده های آزمایشگاهی مقایسه شد. در جدول (۱) مشخصات مدل های مختلف مورد استفاده در تحقیق و متوسط درصد خطای محاسبه ضریب دبی سرریز توسط مدل عددی آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل های شبیه سازی و متوسط درصد خطای ضریب دبی محاسباتی

شماره مدل	تعداد سلول ها	مدل آشفتگی	جداسازی اندازه حرکت	درصد خطا
A1	۲۰۰۰۰	k-ε	First Order	۱۲/۸
A2	۵۰۰۰۰	k-ε	First Order	۸/۵
A3	۱۰۰۰۰۰	k-ε	First Order	۳/۵
A4	۲۰۰۰۰۰	k-ε	First Order	۳/۱
B1	۲۰۰۰۰	RNG	First Order	۱۰/۹
B2	۵۰۰۰۰	RNG	First Order	۸/۲۵
B3	۱۰۰۰۰۰	RNG	First Order	۳/۱
B4	۲۰۰۰۰۰	RNG	First Order	۳/۰
C1	۲۰۰۰۰	k-ε	Second Order	۱۰/۶
C2	۵۰۰۰۰	k-ε	Second Order	۷/۵
C3	۱۰۰۰۰۰	k-ε	Second Order	۲/۹
C4	۲۰۰۰۰۰	k-ε	Second Order	۲/۷
D1	۲۰۰۰۰	RNG	Second Order	۷/۸
D2	۵۰۰۰۰	RNG	Second Order	۶/۲
D3	۱۰۰۰۰۰	RNG	Second Order	۲/۴
D4	۲۰۰۰۰۰	RNG	Second Order	۲/۲

همان طور که ملاحظه می شود، مدل D4 کمترین مقدار درصد خطا یعنی ۲/۲ درصد را در بین شبیه سازی ها دارد، اما مدت زمان شبیه سازی بسیار طولانی است. مدل D3 متوسط درصد خطا آن ۲/۴ و مدت زمان شبیه سازی آن کمتر است. بنابراین به دلیل مدت زمان کمتر و اختلاف دقت ناچیز، مدل D3 به عنوان مدل مناسب برای پژوهش حاضر در شبیه سازی ها در نظر گرفته می شود. در این مدل برای جداسازی معادله اندازه حرکت از شمای second order، از مدل آشفتگی k-ε RNG و تعداد سلول های محاسباتی حدود ۱ میلیون است.

مدت زمان شبیه سازی نیز یکی از عوامل مؤثر بر دقت نتایج است. در صورت انتخاب مدت زمان کم، ممکن است جریان هنوز ماندگار نشده باشد و انتخاب مقدار زیاد آن نیز، زمان اجرای برنامه را طولانی می کند. در مدل عددی حاضر پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای اجرا ۱۰ ثانیه مدنظر قرار گرفت. شکل (۴) هیدرو گراف دبی خروجی از مرز پایین دست برای دبی ۲۳۰ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود جریان از ثانیه ۷ به بعد، ماندگار شده است.

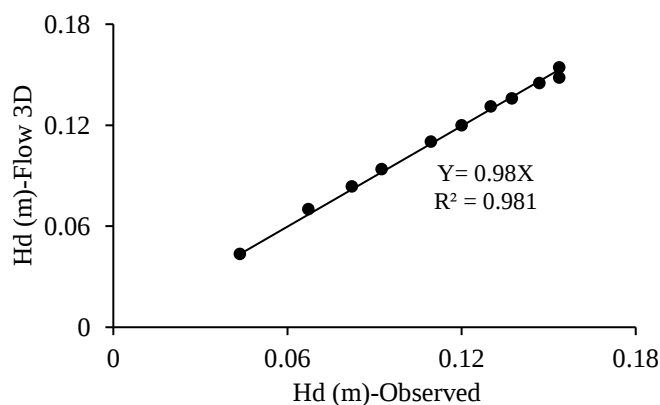


شکل ۴. نمودار تغییرات دبی نسبت به زمان برای سرریز PK1.25

یافته ها

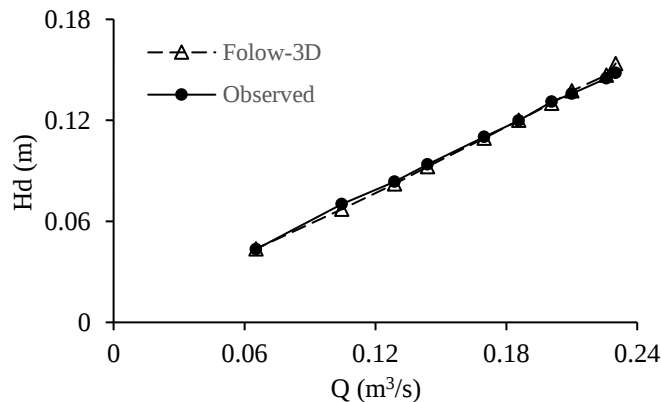
صحت سنجی مدل عددی برای شبیه سازی هیدرولیک سرریز کلید پیانویی

برای صحت سنجی مدل عددی از داده های آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی اندرسون (۲۰۱۱) استفاده شد. سرریزهای مطالعه شده به ازای دبی های گوناگون در حالت جریان آزاد با نرم افزار فلوتردی شبیه سازی شد. دبی مشخص به عنوان شرط مرزی بالادست در نظر گرفته شد و مدل بعد از ۱۰ ثانیه اجرا و عمق آب خروجی از نرم افزار استخراج شد. شکل (۵) عمق آب محاسباتی و مشاهداتی را برای تمام شبیه سازی ها نشان می دهد.



شکل ۵. عمق آب مشاهداتی و محاسباتی روی سرریز کلید پیانویی PK1.25

ضریب تبیین (R^2) برای مدل ۰/۹۸۱ است که نشان دهنده دقت خوب مدل عددی است. شکل (۶) منحنی دبی-اشل محاسباتی و مشاهداتی مربوط به مدل PK1.25 را نشان می دهد.

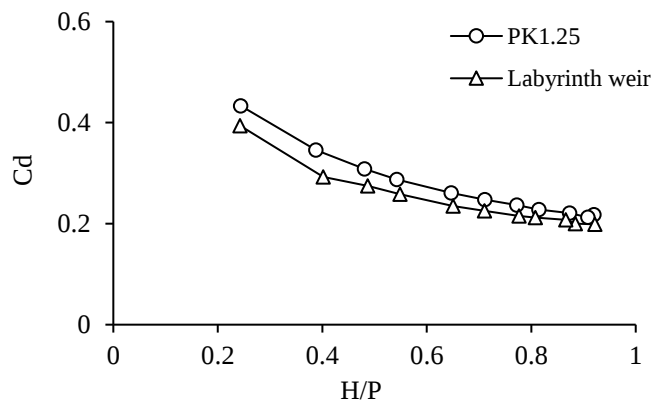


شکل ۶. منحنی دبی-اشل مشاهداتی و محاسباتی سرریز کلید پیانویی PK1.25

متوسط درصد خطای مدل عددی در پیش‌بینی عمق آب بالادست سرریز کلید پیانویی ۲/۹ درصد است که برای پیش‌بینی منحنی دبی-اشل سرریز مناسب است.

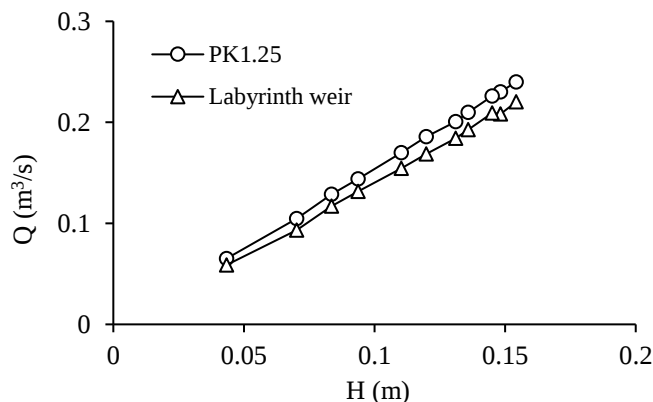
مقایسه ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی با سرریزهای کنگره‌ای

به‌منظور مقایسه ضریب دبی سرریز کلید پیانویی با ضریب دبی سرریز کنگره‌ای، با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی‌های متعددی برای سرریز کلید پیانویی PK1.25 و سرریز کنگره‌ای صورت گرفت. ارتفاع و طول هر دو سرریز به ترتیب ۱۹/۷ سانتی‌متر ۴/۸۵ متر و تعداد سیکل هر دو سازه ۴ عدد است. با استفاده از خروجی مدل عددی فلوتردی، ضریب دبی هر دو سرریز محاسبه و نتایج در شکل (۷) آورده شده است.

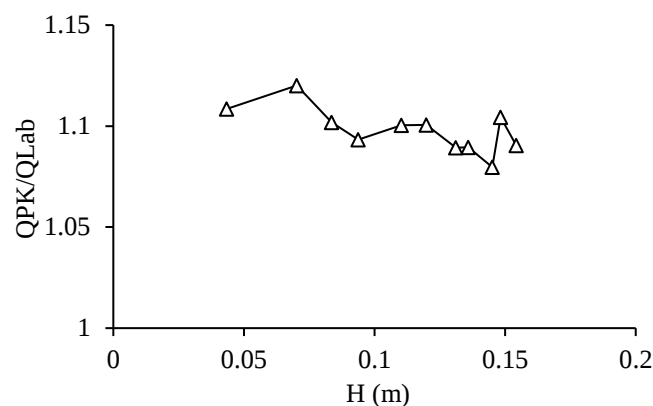


شکل ۷. مقایسه ضریب دبی سرریز کلید پیانویی با سرریز کنگره‌ای

ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای و کلید پیانویی رابطه عکس با متغیر H/P دارد. برای یک ارتفاع ثابت از سرریز، افزایش عمق آب در بالادست سبب می‌شود در محل اتصال سیکل‌های سرریز، تداخل جریان صورت گیرد و در نتیجه ضریب دبی کاهش یابد. شیب کلیدهای ورودی و خروجی در سرریزهای کلید پیانویی یک عامل هدایت‌کننده جریان است و سبب می‌شود ضریب دبی سرریز کلید پیانویی بیشتر از ضریب دبی سرریز کنگره‌ای شود. به‌منظور بررسی مزیت سرریز کلید پیانویی، دبی عبوری از این دو نوع سرریز باهم مقایسه و در شکل (۸) آورده شده است، همچنین شکل (۹) نسبت دبی سرریز کلید پیانویی به سرریز کنگره‌ای (Q_{PK}/Q_{Lab}) را نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی با سرریز کنگره‌ای

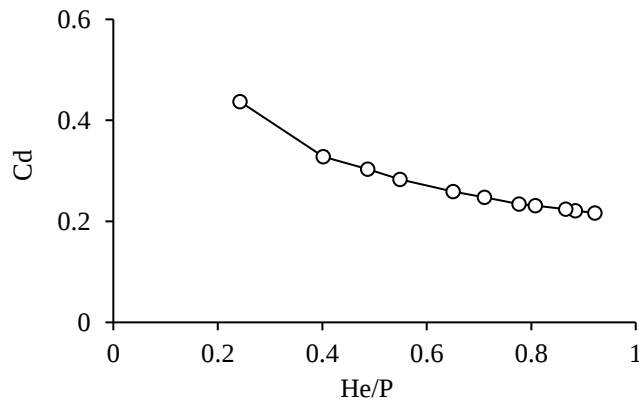


شکل ۹. نسبت دبی سرریز کلید پیانویی به سرریز کنگره‌ای برای عمق‌های مختلف

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سرریز کلید پیانویی به علت داشتن ضریب دبی بیشتر برای یک عمق معین، دبی بیشتری را نسبت به سرریز کنگره‌ای عبور می‌دهد و به‌طور متوسط، نسبت دبی سرریز کلید پیانویی به سرریز کنگره‌ای (Q_{PK}/Q_L)، حدود ۱/۰۸ است. به عبارت دیگر در یک عمق ثابت، سرریز کلید پیانویی ۸ درصد بیشتر دبی را از خود عبور می‌دهد.

بررسی تأثیر پارامتر He/P بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی

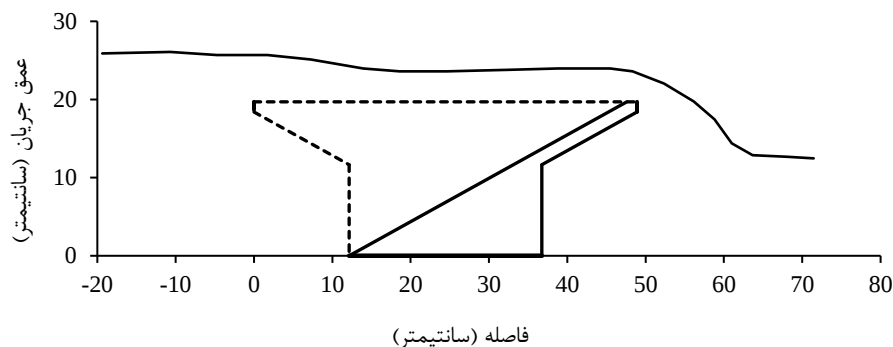
شبیه‌سازی‌های متعددی با مدل فلوتردی بررسی به منظور تأثیر نسبت هد انرژی به ارتفاع سرریز بر ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی انجام شد. بدین منظور دبی‌های مختلفی به عنوان شرط مرزی بالادست در مدل قرار داده شد و بعد از اطمینان از ماندگار شدن جریان، عمق آب در بالادست سرریز از مدل عددی استخراج شد و سپس ضریب دبی سرریز از طریق رابطه حاکم بر دبی عبوری از سرریز محاسبه شد. در شکل (۱۰) تأثیر پارامتر He/P بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی PK1.25 آورده شده است.



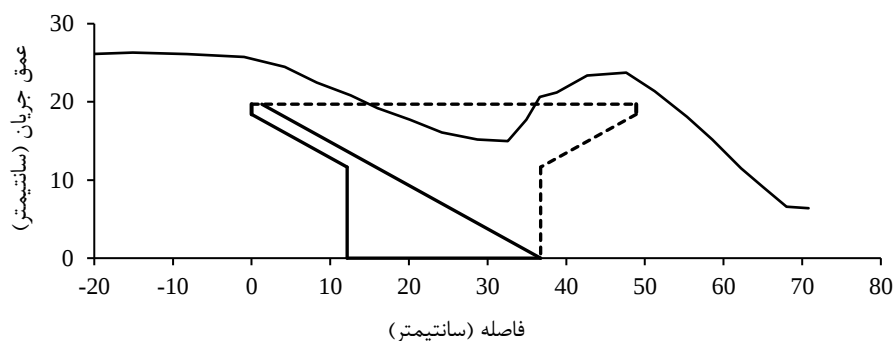
شکل ۱۰. تأثیر پارامتر He/P بر ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی

برای یک ارتفاع ثابت از سرریز کلید پیانویی، افزایش نسبت He/P باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. به‌طوری‌که برای $He/P=0.24$ ضریب دبی 0.45 و برای $He/P=0.92$ ضریب دبی 0.22 است که حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. با افزایش عمق آب روی سرریز، تداخل جریان در محل شکستگی سیکل‌های سرریز صورت می‌گیرد و در نتیجه ضریب دبی کاهش می‌یابد. بر اساس تحقیقات سایر محققین، نسبت هد بالادست به ارتفاع سرریز باید کمتر از یک باشد، افزایش این نسبت از مقدار ذکر شده باعث می‌شود که سرریز کلید پیانویی کارایی خود را به تدریج از دست می‌دهد.

با توجه به زیر بحرانی بودن جریان نزدیک شونده روی کلید ورودی، ضمن افزایش تراز ورودی سرریز به دلیل شیب کلید، کاهش تراز سطح آب رخ داده و جریان پس از رسیدن به لبه تاج خروجی پایین دست، به صورت جت ریزشی به پایین دست تخلیه می‌شود. الگوی جریان عبوری از کلید خروجی بسیار پیچیده‌تر از کلید ورودی است. در این بخش از سرریز، به دلیل تلاقی جریان ناشی از جت‌های ریزشی از تاج‌های کناری با جریان تاج خروجی بالادست، بالا زدگی سطح آب رخ داده و بر روی شیب کلید خروجی، الگوی گرده‌ماهی شکل می‌گیرد. شکل (۱۱)، تغییرات سطح آب روی سرریز PK1.25 در کلید ورودی و خروجی به ازای دبی ۳۳۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد.



الف-کلید ورودی



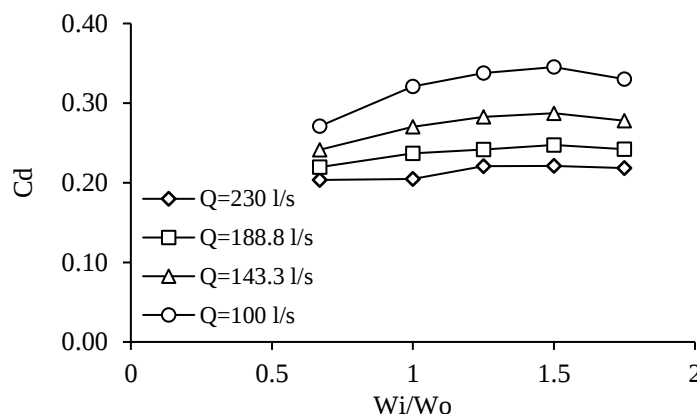
ب-کلید خروجی

شکل ۱۱. پروفیل سطح آب بر روی سرریز PK1.25 برای دبی ۲۳۰/۱ لیتر بر ثانیه و در حالت جریان آزاد

وقوع الگوی گرده‌ماهی باعث کاهش ظرفیت تخلیه از کلید خروجی می‌شود. از طرف دیگر، جریان‌های ریزشی از تاج‌های کناری در دبی‌های بالا به یکدیگر برخورد نموده و باعث پر شدن کلید خروجی می‌شوند. این دو پدیده باعث ایجاد استغراق موضعی و کاهش ضریب دبی سرریز کلید پیانویی در دبی‌های بالا می‌شوند.

تأثیر نسبت عرض کلید ورودی به خروجی بر هیدرولیک جریان

یکی از عوامل مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی نسبت عرض کلید ورودی به خروجی است. به منظور بررسی تأثیر پارامتر W_i/W_o ، پنج نوع سرریز با نسبت‌های ۰/۶۷، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵ و ۱/۷۵ که به ترتیب با نمادهای PK0.67، PK1، PK1.25، PK1.5 و PK1.75 نشان داده می‌شود، با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی شد. لازم به ذکر است طول سرریزها ۴/۸۴۸ متر، ارتفاع ۰/۱۹۷ متر، طول تاج کنار سرریز ۰/۴۸۹ متر، تعداد سیکل‌ها ۴ و شیب شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست هر کلید ۱/۸ است. همچنین عرض کلید ورودی ۰/۱۱۵۶ متر و عرض کلید خروجی بر اساس نسبت W_i/W_o برای هر سرریز قابل محاسبه است. بعد از شبیه‌سازی مقدار عمق و دبی عبوری از سرریزها تعیین و ضریب دبی هر یک محاسبه شد. در شکل (۱۲) ضریب دبی سرریزها با نسبت W_i/W_o مختلف برای هر شبیه‌سازی آورده شده است.



شکل ۱۲. تأثیر نسبت عرض کلید ورودی به خروجی بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی

مطابق با شکل (۱۲) با افزایش نسبت عرض کلید ورودی به کلید خروجی ضریب دبی افزایش می‌یابد و در W_i/W_o برابر $1/5$ ضریب دبی حداکثر است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تأثیر نسبت W_i/W_o بر ضریب دبی با افزایش دبی و یا به عبارت دیگر افزایش عمق آب روی تاج سرریز بیشتر می‌شود. افزایش پارامتر W_i/W_o باعث شده است که ضریب دبی سرریز برای دبی 230 لیتر بر ثانیه از 0.271 به 0.345 افزایش می‌یابد که حدود $27/3$ درصد بیشتر شده است، این در حالی است که افزایش پارامتر W_i/W_o برای دبی 100 لیتر بر ثانیه، حدود $7/4$ درصد ضریب دبی سرریز را افزایش داده است.

بحث

سرریزهای کلید پیانویی و کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم به دلیل افزایش طول تاج در یک عرض ثابت، دبی بیشتری را برای عمق آب یکسان از خود عبور می‌دهند؛ بنابراین با توجه به ظرفیت تخلیه دبی بالایی که دارند، می‌توانند به عنوان سازه‌ای اقتصادی با کارایی بالا در سدها به کار گرفته شوند. ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی بیشتر از سرریزهای کنگره‌ای است زیرا شیب کلیدهای ورودی و خروجی در سرریزهای کلید پیانویی یک عامل هدایت‌کننده جریان است و سبب می‌شود جریان به آرامی به پایین دست منتقل شود و افت انرژی کمتری داشته باشد. جریان نزدیک شونده به سرریزهای کنگره‌ای به دلیل برخورد به بدنه قائم در قسمت ورودی باعث ایجاد افت انرژی و کاهش ضریب دبی می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل عددی به شبیه‌سازی جریان روی سرریزهای کلید پیانویی و کنگره‌ای پرداخته شد. نتایج نشان داد سرریز کلید پیانویی برای یک عمق معین، دبی بیشتری را نسبت به سرریز کنگره‌ای عبور می‌دهد و به طور متوسط، نسبت دبی سرریز کلید پیانویی به سرریز کنگره‌ای حدود $1/0.8$ است. به عبارت دیگر در یک عمق ثابت، سرریز کلید پیانویی 8 درصد بیشتر دبی را از خود عبور می‌دهد. در این تحقیق همچنین به بررسی تأثیر هد انرژی بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی پرداخته شد. برای یک ارتفاع ثابت از سرریز کلید پیانویی، افزایش نسبت He/P باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. به طوری که برای $He/P=0.24$ ضریب دبی 0.435 و برای $He/P=0.92$ ضریب دبی 0.216 است که حدود 50 درصد کاهش یافته است. با افزایش عمق آب روی سرریز، تداخل جریان در محل شکستگی سیکل‌های سرریز صورت می‌گیرد و در نتیجه ضریب دبی کاهش می‌یابد. نسبت عرض کلید ورودی به خروجی یکی از عوامل مؤثر بر ضریب دبی سرریز کلید پیانویی است. در این تحقیق برای نسبت‌های مختلف، شبیه‌سازی جریان روی سرریز توسط مدل عددی انجام شد. نتایج نشان داد برای نسبت W_i/W_o برابر $1/5$ ، بیشترین ضریب دبی برای سرریز کلید پیانویی ایجاد می‌شود.

منابع

- حیدرپور، منوچهر، موسوی، سید فرهاد، و روشنی زرمهری، علی رضا. (۱۳۸۵). بررسی سرریزهای چند وجهی با پلان مستطیلی و U شکل. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۰(۳)، ۱-۱۲.
<https://www.sid.ir/paper/440089/fa#downloadbottom>
- صفرزاده، اکبر، و نوروزی، بهزاد. (۱۳۹۳). هیدرودینامیک سه بعدی سرریزهای کلید پیانویی انحنا دار در پلان. نشریه هیدرولیک. ۹(۳)، ۶۱-۷۹.
<https://doi.org/10.30482/JHYD.2014.10176>
- صفرزاده، اکبر، و خیاط رستمی، سیامک. (۱۳۹۴). ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع بر هیدرولیک سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی مستغرق. نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، ۲(۷)، ۱-۱۲.
<https://doi.org/20.1001.1.23225882.1394.2.7.2.1>
- صفرزاده، اکبر، خیاط رستمی، سیامک، و خیاط رستمی، بابک. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر هد آب بر نحوه توزیع دبی بر روی تاج و رفتار خطوط جریان در سرریز کلیدپیانویی نامتقارن. نشریه هیدرولیک. ۱۴(۱)، ۱-۱۷.
<https://doi.org/10.30482/JHYD.2019.101685.1253>
- غریبوند، رامین، حیدرنژاد، محمد، کشکولی، حیدرعلی، حسونی زاده، هوشنگ، و کمان بدست، امیرعباس. (۱۳۹۹). بررسی عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلیدپیانویی و زیگزگی دوزنقه‌ای. مجله علوم آب و خاک، ۲۴(۱)، ۴۵-۵۶.
<https://doi.org/10.47176/jwss.24.1.38092>
- کریمی، محمد، جلیلی قاضی زاده، محمد رضا، صانعی، مجتبی، و عطاری، جلال. (۱۳۹۹). بررسی آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی جانبی با کلیدهای مورب. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۲(۷)، ۱۶۸۴-۱۶۷۱.
<https://doi.org/10.22060/CEEJ.2019.15599.5970>

References

- Anderson, R. M. (2011). Piano key weir head discharge relationships. M.S. thesis, Utah State Univercity.
- Anderson, R.M., & Tullis, B.P. (2012). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir. Journal of Hydraulic Engineering, 138, 358- 361. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000509](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000509)
- Bremer, F.L., & Oertel, M. (2017). Numerical investigation of wall thickness influence on Piano Key Weir discharge coefficients: A preliminary study. Labyrinth and Piano Key Weirs III, CRC Press, London. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315169064-14>
- Chahartaghi, M.K., Nazari, S., & Mahmoodian Shooshtari, M. (2019). Experimental and numerical simulation of arced trapezoidal piano key weirs. Flow Measurement and Instrumentation, 68, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101576>
- Crookston, B. M., Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2018). Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries. Journal of Hydroenvironment Research. 19, 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2017.10.003>
- Dabling, M. R., & Tullis, B. P. (2012). Piano key weir submergence in channel application. Journal of Hydraulic Engineering, 138(7), 661-666. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000563](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000563)
- Falvey, H. T. (2003). Hydraulic design of labyrinth weirs. ASCE Press, USA. <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/61317/1/1081.pdf>
- Flow Science, Inc. (2014). FLOW-3D user's manual version 11.0. Santa Fe, Mexico. https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2020/10/FLOW-3D_HYDRO_installation_instructions.pdf
- Gharibvand, R., Heidarnejad, M., Kashkouli, H.A., Hasoonizadeh, H., & Kamanbedast A. A. (2020). Numerical Analysis of Flow Hydraulic in Trapezoidal Labyrinths and Piano Key Weirs. Journal of Water and Soil Science, 24(1), 45-56. <https://doi.org/10.47176/jwss.24.1.38092> [In Persian]
- Heidarpour, M., Mousavi, F., & Roshani-Zarmehri, R. (2006). Labyrinth weir with rectangular and U-shape plan-forms, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 10(3), 1-11. <https://www.sid.ir/paper/440089/fa#downloadbottom> [In Persian]
- Henderson, F. M. (1966). Open channel flow, Channel controls. MacMillan. United State of America. <https://heidarpour.iut.ac.ir/sites/heidarpour.iut.ac.ir/files/u32/open-henderson.pdf>

- Karimi, M., Jalili-Ghazizadeh, M., saneie, M., & Attari, J. (2020). Experimental study of piano key side weir with oblique keys. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(7), 1671-1684. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2019.15599.5970> [In Persian]
- Machiels, O., Piroton, M., Pierre, A., Dewals, B., & Erpicum, S. (2014). Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research*. 52(3), 326-335. <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.875070>
- Ouamane, A., & Lempérière, F. (2006). Design of a new economic shape of weir. *Proc. Int. Symp. Dams in the Societies of the 21st Century*, Barcelona, Spain. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3431226>
- Riberio, M., Pfister, M., Schleiss, A. J., & Boillat, J. L. (2012). Hydraulic design of A-type Piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), 400-408. <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.695041>
- Safarzadeh, A & khayyatrostami, S. (2016) Laboratory evaluation of height effects on hydraulics of submerged piano key weirs. *Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, 2(7), 1-12. <https://doi.org/20.1001.1.23225882.1394.2.7.2.1> [In Persian]
- Safarzadeh, A., & Noroozi, B. (2014) Three dimensional hydrodynamics of arced piano key spillways. *Journal of Hydraulic*, 9(3), 61-79. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2014.10176> [In Persian]
- Safarzadeh, A., Khayat Rostami, S., & Khayat Rostami, B. (2019). Investigation on the effects of water head on discharge distribution and streamlines pattern over the Asymmetric Piano key weirs. *Journal of Hydraulic*, 14(1), 1-17. <https://doi.org/10.30482/JHYD.2019.101685.1253> [In Persian]
- Yousif, A.A. (2020) Experimental investigation on hydraulic performance of non-rectangular piano key weir (PKW). *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(8), 4467-4480. <https://www.researchgate.net/publication/342550937>



Numerical study of spudcan penetration on two-layered soil with Lagrangian-Eulerian couple

Kamal Alikhani¹ , Morteza Bakhtiari² , Etemadaldin Rabie Gholami³

¹ MS.c graduated of Coastal ports and marine structures engineering, Department of Marine Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Sciences and Techniques, Khorramshahr, Iran. E-mail: kamal.alikhani2014@gmail.com

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Marine Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technologies, Khorramshahr, Iran. E-mail: bakhtiari@kmsu.ac.ir

³ MS.c graduated of Science of Naval Architectures, Department of Naval Architectures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technologies, Khorramshahr, Iran. E-mail: rabei.emad@yahoo.com

ABSTRACT

Knowing about the soil flow mechanisms around the foundation of the spudcan that are subjected to continuous large penetration and also estimating the probability and severity of a sudden spudcan penetration are very important issues. In the present research, a numerical study was carried out to investigate the bearing capacity of the spudcan foundation of the offshore jackup structure in soil, with a two-layer system of sand on clay, using the Lagrangian-Eulerian couple method (CEL). In this research, the effect of characteristics of sand and clay layers, including relative density (ID) and thickness of sand layer, shear strength at the boundary of two layers (su_0), gradient of shear strength of clay layer on bearing capacity and punch rupture phenomenon are studied. In this research, the Mohr-Columb model was used to model the behavior of sandy and clay soils. The results of the research show that the parameters related to geotechnical characteristics, including the shear strength of the clay layer, the shear resistance gradient, the relative density of the sand layer, and the thickness of the sand layer have a direct relationship with the bearing strength of the spudcan foundation. So that with the increase of each of these characteristics, the bearing resistance also increases. The results obtained for changing the thickness of the sand layer (6, 7 and 8 meters) show the values of 263, 307 and 346 kPa for peak of bearing capacity. Also for the shear resistance at the border of two layers 11, 15, 20 kPa values of 307, 347 and 390 kPa have been obtained. For the values of relative density of sandy soil from 20 to 60%, the peak bearing capacity is calculated as 328, 343 and 367 kilopascals

Keywords: spud can, Lagrangian-Eulerian couple, Abaqus soft ware, punch, relative density

Article Type: Research Article

Article history: Received: 25 September 2023 Revised: 01 December 2023 Accepted: 22 December 2023 ePublished: 22 December 2023

1. Introduction

Self-elevating offshore platforms or jack-ups are one of the most common types of offshore platforms that are built for oil and gas extraction. According to the investigations, one third of the accidents that happened to jackups are related to their foundation, and more than 53% of the accidents related to the jackup foundation are related to punch penetration type, which sometimes leads to the buckling of the foundations. Nowadays, it is customary to use spudcan as the foundation of the jackup drilling platform. A rapid penetration (punch penetration rupture) during operation, in special geotechnical conditions where a strong soil layer is placed on a weak layer, so that the spudcan foot punches a mass of soil from the strong layer into the weak layer. it happens Hence, when a spudcan is penetrating a layered soil of sand over clay. It is necessary to have sufficient information about the soil rupture mechanisms under the spudcan in order to predict the performance of the spudcan. Therefore, simplified conceptual models such as the projected area method, the punch cut method, Teh model 2007, Lee model 2013, and Hu model 2014, in order to estimate the bearing capacity of a spudcan infiltrating sand layered soil on clay, have been developed (Dier et al. 2004, Drescher et al. 1993, Gao et al. 2012, Gerwick 1970, Hansen et al. 1970).

2. Methodology

Nowadays, numerical methods can be a good tool to estimate the bearing capacity of Spadcan foundation. However, the simulation of the deep penetration process of a Spadcan foundation in the seabed is difficult due to the numerical convergence problem caused by 1) distortion of meshes due to severe deformation, 2) nonlinear materials due to complex soil behavior, 3) nonlinear boundary conditions including contact Friction requires the use of techniques that can overcome these problems. For this purpose, in this research, numerical simulation has been performed using the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method. Soil is considered as the Eulerian part and Spudken is considered as the Lagrangian part of the CEL technique. It should be noted that several problems were analyzed by Gio et al. 2011 .in order to measure the accuracy of the CEL method, and the results show the ability of this method to solve numerical problems involving large deformations that can be achieved using classical finite element methods. It did not give them acceptance (Hu et al. 2014). Abaqus software was used in order to

carry out this research. This software is a set of very capable modeling programs, based on the finite element method, capable of solving problems from a simple linear analysis to the most complex nonlinear modeling. This software has a very wide set of elements that any type of geometry can be modeled virtually by these elements. It also has a lot of engineering material models that can be used to model all kinds of materials with different properties and behaviors such as metals, rubbers, polymers, composites, reinforced concrete, spring foams and also breakable materials as well as materials in the ground such as soil and stone. Considering that Abaqus is a general and extensive modeling tool, its use is not limited to the mechanical analysis of solids and structures (stress-displacement). By using this software, various issues such as heat transfer, mass penetration, thermal analysis of electrical components, acoustics, soil mechanics and piezoelectricity can be studied. The soil geometry was modeled in a three-dimensional Eulerian domain by means of linear hexahedral elements of the EC3D8R type. Each Eulerian element has 8 nodes and it allows to have several Eulerian elements at the same time. It should be noted that until now there is no two-dimensional element in Abaqus for the Eulerian method. Due to the geometric symmetry of the model and to reduce the calculation time, only a quarter of the entire model was modeled in the 3D analysis. Also, a layer with a low height and empty of material is taken on top of the sand layer so that a volume of soil around the spudcan, which flows upwards during infiltration, enters into the empty layer.

3.Results and discussion

The results of the research show that the parameters related to geotechnical characteristics, including the shear strength of the clay layer, the shear resistance gradient, the relative density of the sand layer, and the thickness of the sand layer have a direct relationship with the bearing strength of the Spadcan foundation. So that with the increase of each of these characteristics, the bearing resistance also increases. The obtained results showed that by increasing the thickness (H_s) and relative density (ID) of the sand layer, the load bearing capacity of the pispodken (q) and the volume of the transferred sandy soil mass (the height of the soil mass (h_{plug}) and the width of the soil mass (b_{plug}) increases, so that with the increase of H_s from 6 m to 8 m, the value of q_{peak} increases from 263 kPa to 346 kPa, the value of h_{plug} from 6.52 m to 8.26 m and the value of b_{plug} from 6.6 m to 6.9 m and with The increase of ID from 20% to 60% increases the q_{peak} value from 328 kPa to 367 kPa, the h_{plug} value from 6.85 m to 7.14 m, and the b_{plug} value from 5.7 m to 6 m. Also, the investigation of the effects of shear resistance (su_0) and shear resistance gradient (p) of the clay layer shows their direct relationship with the bearing capacity and the reverse relationship with the volume of the transferred soil mass, so that with the increase of su_0 from 11 kPa to 20 kPa, the value of q_{peak} from 307 kPa to 390 kPa, the value of h_{plug} from 7.41 m to 7.14 m and the value of b_{plug} from 6.9 m to 6.6 m, and with the increase of p from 1 kPa/m to 2 kPa/m, the value of q_{peak} from 314 kPa At 352 kPa, the value of h_{plug} goes from 7.14 m to 6.9 m and the value of b_{plug} goes from 6 m to 5.7 m.

4.Conclusions

The results of this research can be summarized as follows:

Parameters related to geotechnical characteristics, including shear resistance of clay layer, gradient of shear resistance, relative density of sand layer, thickness of sand layer have a direct relationship with the load bearing strength of the foundation. So that with the increase of each of these characteristics, the bearing resistance also increases. The severity and risk of punch breakage increases with the increase in the thickness of the sand layer and the decrease in the shear strength of the clay layer. The soil rupture pattern under the infiltrating spudcan foundation changes with respect to the depth, such that at surface depths, the rupture has two components, shear along the almost vertical shear plane in the sand layer and local shear rupture in the clay layer.

5.References

- Teh, K. L. (2007). Punch- through of spudcan foundation on sand overlying clay. PhD thesis, National University of Singapore. <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/28149>
- Lee, K. K., Randolph, M. F., & Cassidy, M. J. (2013). Bearing capacity on sand overlying clay soils: A simplified conceptual model. *Geotechnique*, 63(15), 1285-1297. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.176>
- Dier, A., Carrol, B., & Abolfathi, S. (2004). Guidelines For Jack Up Rigs with Particular Reference to Foundation Integrity, Health and Safety Executive (HSE), Research Report, 1-91. <https://www.hse.gov.uk/Research/rhhtm/r289.htm>
- Drescher, A., & Detournay, E. (1993). Limit load in translational failure mechanisms for associative and non- associative materials. *Geotechnique*, 43(3), 443-456. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.443>
- Gao, W., Yu, L., & Hu, Y. (2012). Large deformation FE analysis of large diameter spudcan penetration into two-layer of uniform clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(2), 171-177. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.02.171-177>
- Gerwick, B. C. (1986). Construction of offshore structures. John Wiley, New York. <https://doi.org/10.1201/9780849330520>
- Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. *Bulleting of the danish geotechnical institute*, 28, 5-11. <https://www.semanticscholar.org>
- Hu, P., Stanier, S. A., Cassidy, M. J., & Wang, D. (2014). Predicting peak resistance of spudcan penetrating sand overlying clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001016)

6.Declaration of interest

The authors report no declarations of interest.

7.Acknowledgment

This work was supported by the Khorramshahr University of Marine Science and Technology.

Cite this article: Alikhani, K., Bakhtiari, M., & Rabie Gholami, E. (2023). Numerical study of spudcan penetration on two-layered soil with Lagrangian-Eulerian couple, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 18-40. DOI: 10.22126/ATWE.2024.9898.1067





مطالعه عددی نفوذ اسپادکن بر روی خاک دولایه ای با روش کوپل لاگرانژی - اوپلری

کمال علیخانی^۱، مرتضی بختیاری^۲، اعتمادالدین رباعی غلامی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، گروه مهندسی سازه های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: kamal.alikhani2014@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی سازه های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: bakhtiari@kmsu.ac.ir

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی کشتی سازی، گروه مهندسی کشتی سازی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: rabei.emad@yahoo.com

چکیده

آگاهی در مورد مکانیسم های جریان خاک پیرامون پی اسپادکن که متحمل نفوذ بزرگ مداوم می شوند و نیز برآورد کردن احتمال و درجه شدت یک نفوذ ناگهانی اسپادکن از موضوعات بسیار حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر، اقدام به مطالعه عددی بررسی ظرفیت باربری پی اسپادکن سازه جکاپ فراساحلی در خاک، با سیستم دو لایه ای ماسه بر روی رس، با روش کوپل لاگرانژی - اوپلری (CEL) گردید. در این پژوهش تأثیر خصوصیات لایه های ماسه ای و رسی از جمله تراکم نسبی (ID) و ضخامت لایه ماسه ای، مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (SU₀)، گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی پانچ مورد مطالعه قرار گرفت در تحقیق حاضر برای مدل سازی رفتار خاک های ماسه ای و رسی از مدل موهر-کلمب استفاده گردید. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد، پارامترهای مرتبط با خصوصیات ژئوتکنیکی شامل مقاومت برشی لایه رسی، گرادیان مقاومت برشی، تراکم نسبی لایه ماسه ای، ضخامت لایه ماسه ای نسبت مستقیمی با مقاومت باربری پی اسپادکن دارند به طوری که با افزایش هر کدام از این خصوصیات، مقاومت باربری نیز افزایش می یابد. نتایج به دست آمده برای تغییر ضخامت لایه ماسه ای (۶، ۷ و ۸ متر) مقادیر ۲۶۳، ۳۰۷ و ۳۴۶ کیلو پاسکال را برای ظرفیت باربری اوج نشان می دهد. همچنین برای مقاومت برشی موجود در مرز دولایه ۱۱، ۱۵ و ۲۰ کیلو پاسکال مقادیر ۳۰۷، ۳۴۷ و ۳۹۰ کیلو پاسکال به دست آمده است. برای مقادیر تراکم نسبی خاک ماسه ای از ۲۰ تا ۶۰ درصد، میزان ظرفیت باربری اوج ۳۲۸، ۳۴۳ و ۳۶۷ کیلو پاسکال محاسبه شده است.

واژه های کلیدی: اسپادکن، کوپل لاگرانژی - اوپلر، نرم افزار آباکوس، گسیختگی، تراکم نسبی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۳ مهر ۱۴۰۲ اصلاح: ۱۰ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۱ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۱ دی ۱۴۰۲

استناد: علیخانی، ک.، بختیاری، م.، و رباعی غلامی، ا. (۱۴۰۲). مطالعه عددی نفوذ اسپادکن بر روی خاک دولایه ای با روش کوپل لاگرانژی - اوپلری، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۴)، ۱۸-۴۰. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.9898.1067

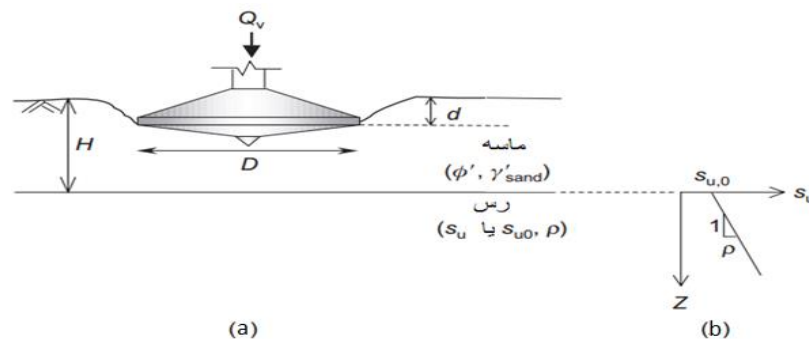


© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

سکوه‌های دریایی خود بالابر یا جک‌آپ‌ها یکی از متداول‌ترین نوع سکوه‌های دریایی می‌باشند که برای استحصال نفت و گاز ساخته می‌شوند. بر طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده، یک‌سوم حوادثی که برای جک‌آپ‌ها رخ داده در ارتباط با شالوده آن‌ها بوده و بیش از ۵۳ درصد از حوادث مربوط به شالوده جک‌آپ از نوع نفوذ پانچ است که در بعضی مواقع منجر به کمانش پایه‌ها، انهدام سکو و یا واژگون شدن آن می‌گردد. امروزه از استفاده از اسپادکن به‌عنوان پی سکوی حفاری جک‌آپ مرسوم است. یک نفوذ سریع (گسیختگی نفوذ پانچ) در حین عملیات، در شرایط خاص ژئوتکنیکی که در آن لایه خاک قوی بر روی لایه‌ای ضعیف قرار گرفته، به‌طوری‌که پی اسپادکن توده‌ای از خاک لایه قوی را به داخل لایه ضعیف پانچ می‌کند، اتفاق می‌افتد. از این‌رو زمانی که یک اسپادکن در حال نفوذ در یک خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس است که در شکل (۱) نشان داده شده است. داشتن اطلاعات کافی در مورد مکانیسم‌های گسیختگی خاک زیر اسپادکن، به‌منظور پیش‌بینی عملکرد اسپادکن لازم است. از این‌رو مدل‌های مفهومی ساده‌شده‌ای همچون روش منطقه پیش‌بینی‌شده^۱، روش برش پانچ^۲ مدل ته^۳ (۲۰۰۷)، مدل لی^۴ (۲۰۱۳) و مدل هوو^۵ (۲۰۱۴)، به‌منظور تخمین ظرفیت باربری یک اسپادکن در حال نفوذ در خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، توسعه داده‌شده‌اند (دیر و همکاران^۶، ۲۰۰۴؛ درسچر و همکاران^۷، ۱۹۹۳؛ گائو و همکاران^۸، ۲۰۱۲؛ گرویک^۹، ۱۹۷۰؛ و هانسن و همکاران^{۱۰}، ۱۹۷۰).

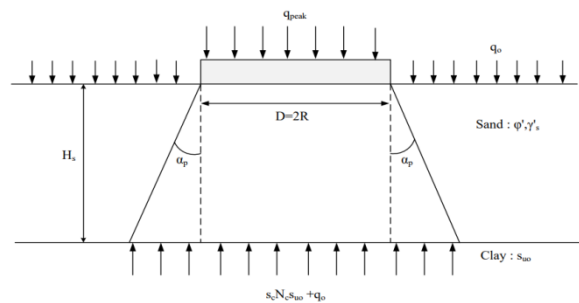


شکل ۱. (a) نفوذ پی اسپادکن در خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، (b) دیاگرام مقاومت برشی لایه رسی

¹ projected area
² punching shear
³ The et al
⁴ Lee
⁵ Hu
⁶ Dier et al
⁷ Drescher et al
⁸ Gao et al
⁹ Gerwick
¹⁰ Hansen et al

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

استخراج نفت و گاز در نواحی فراساحل با استفاده از انواع مختلف سازه دکل (متحرک و ثابت) که دربردارنده کل تجهیزات حفاری و محل اسکان خدمه هستند، انجام می شود. چندین نوع سازه دکل امروز در فراساحل مورد استفاده قرار می گیرد. انتخاب نوع خاصی از این دکل ها به هزینه استقرار، عمق مؤثر و عملیاتی آب و شرایط محیطی قابل انتظار بستگی دارد. یک سکو امکان انجام فعالیت در اعماق سطحی آب، بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر را دارا است. دکل های جکاپ مدرن می توانند تا عمق آب حدود ۱۵۰ متر فعالیت کنند. در اعماق متوسط تا خیلی عمیق، سکوه های نیمه مستغرق و کشتی های حفاری ای مورد استفاده قرار می گیرند که از نوع شناور بوده و برای حفظ پایداری شان احتیاج به لنگر است. امروزه سکوه های جکاپ در همه ی حوضه های استخراج فراساحلی در حال فعالیت است. آن ها بیشتر در خاورمیانه، جنوب شرق آسیا، خلیج مکزیک و دریای شمال متمرکز شده اند. استفاده از اسپادکن به عنوان پی سکوی حفاری جکاپ بسیار متداول است. در شرایط قرارگیری اسپادکن بر روی خاک با سیستم دولایه ای ماسه بر روی رس، پاسخ ظرفیت باربری در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور ارزیابی خطر ریسک پانچ باید هر دو پارامتر مقاومت نهایی (q_{peak}) در لایه ماسه ای و نیز مقاومت نهایی پس از نفوذ (q_{pp}) در لایه رسی مورد مطالعه قرار گیرد.



شکل ۲. مدل مفهومی برای روش projected area (PA)

محاسبه ظرفیت باربری اوج q_{peak}

روش منطقه پیش بینی شده یا بار گسترده^۱

ترزاقی و پک^۲ (۱۹۴۸)، بیان داشتند که بار پی از طریق ماسه به یک سطح باربری بزرگ تری در مرز لایه های ماسه و رس گسترده می شود که در شکل (۲) نشان داده شده است. از این رو ظرفیت باربری اوج (q_{peak}) را می توان با در نظر گرفتن یک پی مجازی قرار گرفته در مرز دولایه ماسه و رس با قطر افزایش یافته به اندازه $D+2H_s \tan \alpha_p$ ، محاسبه نمود. به طوری که H_s ارتفاع لایه ماسه، D قطر اسپادکن و α_p زاویه گسترانیده شدن بار ناشی از پی در مرز دولایه ماسه و رس، نسبت به سطح عمودی است.

q_{peak} مربوط به پی دایره ای را می توان از رابطه (۱) تخمین زد:

$$q_{peak} = \left[\left(1 + 2 \frac{H_s}{D} \tan \alpha_p \right)^2 (s_c N_c s_{u0} + q_0) \right] - \left[\left(1 + 2 \frac{H_s}{D} \tan \alpha_p \right)^2 \gamma'_s H_s \right] \quad (1)$$

به طوری که s_c ضریب شکل برای پی دایره ای است و مقدار آن $1/2$ در نظر گرفته می شود، N_c ضریب ظرفیت باربری سطحی خاک رس، s_{u0} مقاومت خاک رس در مرز بین دولایه ماسه و رس، q_0 سربار وارده بر بالای ماسه و γ'_s وزن مخصوص مؤثر ماسه است. مشکل اصلی در روش Projected area (PA) یا Load spread این است که از مقاومت برشی لایه ماسه چشم پوشی می شود.

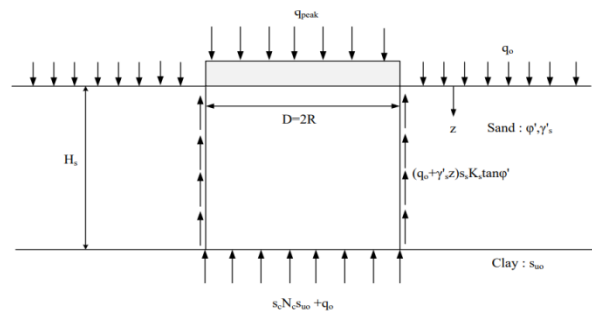
¹ Load spread

² Terzaghi and Peck

از این رو با کاربرد این روش، مقادیر ظرفیت باربری اوج کمتری نسبت به مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های سنتریفیوژ، برآورد می‌کند (ته، ۲۰۰۷؛ لی، ۲۰۰۹؛ و هوو و همکاران، ۲۰۱۴).

روش برش پانچ

در مدل برش پانچ ارائه شده توسط (هانا و میرهوف^۱ ۱۹۸۰)، فرض اساسی در نظر گرفتن یک سطح لغزش عمودی از میان ماسه، جایی که یک بلوک استوانه‌ای شکل از ماسه به درون لایه رسی زیرین برش پیدا می‌کند، بوده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. مدل مفهومی روش برش پانچ

بر اساس تعادل در جهت عمودی، مقدار ظرفیت باربری اوج را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد:

$$q_{peak} = (s_c N_c s_{u0} + q_0) + \left[2 \frac{H_s}{D} (\gamma'_s H_s + 2q_0) s_s K_s \tan \phi' \right] - \gamma'_s H_s \quad (2)$$

بخش اول معادله نماینده ظرفیت باربری خاک رس، بخش دوم بیان‌گر مقاومت برشی ماسه و بخش پایانی برای منظور کردن وزن مؤثر بلوک استوانه‌ای شکل ماسه است. s_s ضریب شکل است که برابر با ۱ فرض می‌گردد.

K_s ضریب برش پانچ است و از طریق رابطه زیر با ضریب فشار خاک پسیو (K_δ) مربوط می‌شود:

$$K_s \tan \phi' = K_\delta \tan \delta \quad (3)$$

δ زاویه اصطکاک بسیج شده در صفحه گسیختگی منحنی و در بازه $\phi'/2$ تا $3\phi'/4$ تغییر می‌کند و مقدار میانگین $(2\phi'/3)$ برای آن پیشنهاد گردید (میرهوف^۲ ۱۹۷۴).

تاکنون مطالعات عددی با روش اجزاء محدود در این زمینه انجام شده است. گیو و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۰ پدیده نفوذ اسپادکن در سه نوع خاک با استفاده از تکنیک CEL موجود در نرم‌افزار آباکوس^۴ مدل‌سازی نمودند. ایشان سه نوع خاک شامل خاک رسی تک لایه - خاک ماسه‌ای تک لایه - خاک لایه‌بندی شده ماسه بر روی رس را در نظر گرفتند. در این تحقیق انواع تغییر شکل و سرعت جابه‌جایی ذرات خاک در اعماق مختلف برای حالت‌های مختلف لایه‌بندی خاک مشاهده گردید (هانسن^۵ ۱۹۷۰). گیو و هنکه^۶ (۲۰۱۱)، پدیده نفوذ اسپادکن را با استفاده از تکنیک CEL^۷ جهت بررسی تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای بالایی، زاویه اصطکاک ماسه و مقدار مقاومت برشی

^۱ Hanna and Meyerhof

^۲ Meyerhof

^۳ Qiu et al

^۴ Abaqus

^۵ Hansen

^۶ Qiu and Henke

^۷ Coupled Eulerian-Lagrangian

خاک رسی زیرین، بر روی ظرفیت باربری اسپادکن به انجام رساندند، نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش مقدار هر کدام از پارامترهای فوق الذکر باعث افزایش مقاومت باربری می شود (هوسین و همکاران^۱، ۲۰۰۳). گائو و همکاران^۲ (۲۰۱۲)، نفوذ پیوسته پی اسپادکن در خاک لایه بندی شده در دولایه به صورت لایه رسی قوی فوقانی بر روی لایه رسی ضعیف زیرین به وسیله تحلیل اجزاء محدود تغییر شکل های بزرگ با استفاده از نرم افزار آفینا^۳، شبیه سازی نمودند. نتایج تحقیق عبارت بودند از افزایش ضرایب باربری اوج (Q_{peak}) پی اسپادکن با افزایش نسبت مقاومت لایه پایینی به لایه بالایی، افزایش ضرایب باربری اوج پی اسپادکن با افزایش اندازه قطر اسپادکن در شرایطی که نسبت مقاومت لایه های خاک کمتر از ۰.۶ باشد، همچنین ضریب باربری اوج و پتانسیل گسیختگی پانچ با افزایش ضخامت لایه بالایی افزایش می یابد (هولزی و همکاران، ۲۰۰۳). بررسی ها نشان می دهد، اکثر تحقیقات صورت گرفته پیشین، به دنبال بهبود روش های موجود در پیش بینی نفوذ اسپادکن در شرایط قرارگیری لایه ماسه ای بر روی لایه رسی بوده است. در تحقیق حاضر تمرکز، بر روی بررسی گسیختگی پانچ ناشی از نفوذ پی اسپادکن در خاک لایه ای در شرایط تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی بیشتری مانند تأثیر خصوصیات لایه های ماسه ای و رسی از جمله تراکم نسبی (ID) و ضخامت لایه ماسه ای، مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (Su_0)، گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری اسپادکن با روش کوپل لاگرانژی - اوپلری (CEL) بوده است که در تحقیقات قبل کمتر به آن ها پرداخته شده است.

روش پژوهش

امروزه روش های عددی می توانند ابزار خوبی برای تخمین ظرفیت باربری پی اسپادکن باشند. با این حال شبیه سازی فرآیند نفوذ عمیق یک پی اسپادکن در بستر دریا به دلیل مشکل همگرایی عددی ناشی از (۱) اعوجاج مش ها به دلیل تغییر شکل شدید، (۲) مصالح غیرخطی به دلیل رفتار پیچیده خاک، (۳) شرایط مرزی غیرخطی از جمله تماس اصطکاکی، احتیاج به استفاده از تکنیک هایی دارد که بتواند بر این مشکلات غلبه کند. بدین منظور در این تحقیق، شبیه سازی عددی به وسیله روش coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) انجام گرفته است. خاک به عنوان بخش اوپلری و اسپادکن هم بخش لاگرانژی تکنیک CEL در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که چندین مسئله به وسیله گئو و همکاران^۴ (۲۰۱۱) به منظور سنجش دقت روش CEL ، مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصله حاصله نشان از توانایی این روش در حل مسائل عددی دربردارنده تغییر شکل های بزرگی که به کارگیری روش های اجزاء محدود کلاسیک نتایج قابل قبولی برای آن ها به دست نمی داد، داشت (هو و همکاران^۵، ۲۰۱۴). به منظور انجام تحقیق حاضر از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این نرم افزار یک مجموعه از برنامه های مدل سازی بسیار توانمند است که مبتنی بر روش اجزاء محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل سازی غیرخطی را دارا است. این نرم افزار دارای مجموعه المان های بسیار گسترده ای است که هر نوع هندسه ای را می توان به صورت مجازی توسط این المان ها مدل کرد. همچنین دارای مدل های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک ها، پلیمرها، کامپوزیت ها، بتن تقویت شده، فوم های فبری و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می سازد. نظر به اینکه Abaqus یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده است، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل های مکانیک جامدات و سازه (تنش- تغییر مکان) نمی شود. با استفاده از این نرم افزار می توان مسائل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، آکوستیک، مکانیک خاک و پیزو الکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

¹ Hossain et al

² Gao et al

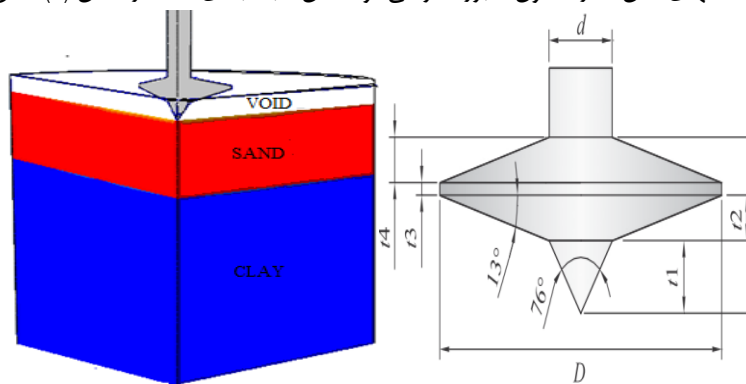
³ AFENA

⁴ Qiu et al

⁵ Hu et al

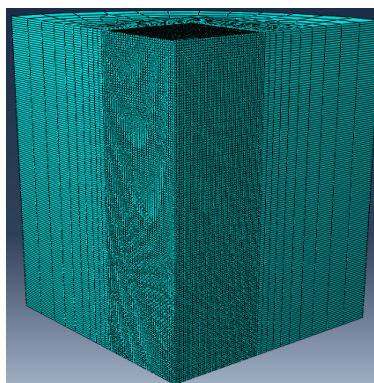
هندسه و مش بندی

هندسه خاک در یک دامنه اوپلری سه بعدی به وسیله المان‌هایی شش وجهی خطی از نوع EC3D8R مدل سازی گردید. هر المان اوپلری ۸ گره دارد و امکان اینکه چند ماده اوپلری همزمان در آن وجود داشته باشد می‌دهد. لازم به ذکر است تا این لحظه برای روش اوپلری المان دوبعدی در آباکوس وجود ندارد. با توجه به تقارن هندسی مدل و برای کاهش زمان محاسبات، فقط یک چهارم کل مدل در تحلیل ۳ بعدی مدل سازی شد. همچنین لایه‌ای با ارتفاع کم و خالی از ماده در بالای لایه ماسه‌ای گرفته شده است تا حجمی از خاک اطراف اسپادکن که در حین نفوذ به سمت بالا جریان می‌یابد، به درون لایه خالی وارد شوند. همچنین اسپادکن به عنوان جسمی صلب مدل گردیده و هندسه آن مشابه اسپادکن جکاپ "Marathon LeTourneau Design, Class 82-SDC" در نظر گرفته شده است. هندسه کل مدل در شکل (۴) و هندسه اسپادکن در شکل (۵) نشان داده شده است. نفوذ اسپادکن در خاک به صورت جابه جایی کنترل شده با یک سرعت ثابت شبیه سازی گردیده است. لازم به ذکر است عمق $d = 0$ در حالتی در نظر گرفته شده که بزرگترین سطح مقطع اسپادکن به سطح خاک می‌رسد. الگوی مش بندی مدل عددی حاضر به صورتی است که در یک فاصله افقی نزدیک به محدوده نفوذ که تغییرات بزرگتر و مهم‌تر است اندازه سلول‌ها کوچک و ثابت و از آن فاصله تا انتهای مدل اندازه سلول‌ها بزرگتر می‌شود. مدل شبکه بندی شده در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۴. هندسه کلی مدل نفوذ اسپادکن در خاک

شکل ۵. هندسه پی اسپادکن



شکل ۶. الگوی مش بندی هندسه خاک

مدل رفتاری و پارامترهای خاک

به منظور مدل سازی رفتار خاک های ماسه ای و رسی از مدل موهر-کلمب استفاده شد. مدل سازی تحت شرایط آب آزاد به وسیله تنش های مؤثر انجام گرفت. همچنین خاک ماسه ای تحت شرایط زهکشی شده و خاک رسی زهکشی نشده در نظر گرفته شد. تنش های ژئواستاتیکی ناشی از وزن مخصوص غوطه وری خاک قبل از نفوذ اسپادکن اعمال می شود، به همراه یک ضریب فشار جانبی برابر ۱ برای لایه رسی و $(1-\sin\phi')$ برای لایه ماسه ای. ضریب پواسون (ν) را برای خاک رسی برابر ۰.۴۹ و برای خاک ماسه ای برابر ۰.۳ نظر گرفته شده است. همچنین از آنجایی که سختی خاک تأثیر کمی بر مقاومت نفوذ دارد، مدول یانگ (E) خاک رسی یک مقدار معمول برابر با 350 SU ، به طوری که SU مقاومت برشی خاک رسی است و همچنین مقداری برابر با ۲۵ مگا پاسکال برای خاک ماسه ای در نظر گرفته می شود. مقاومت برشی لایه رسی به صورت خطی نسبت به عمق افزایش می یابد به طوری که دیاگرام آن در شکل b1 نشان داده شده و رابطه (۲) برای آن وجود دارد:

$$s_{ui} = s_{um} + \rho z \quad (2)$$

به طوری که s_{um} مقاومت برشی موجود در مرز بین دولایه و ρ گرادیان مقاومت برشی لایه رسی و Z عمق خاک است.

سرعت نفوذ

نفوذ پی اسپادکن در خاک به صورت جابه جایی کنترل شده با یک سرعت ثابت شبیه سازی می گردد. با توجه به اینکه نفوذ اسپادکن در خاک یک تحلیل شبه استاتیکی محسوب می شود از این رو بایستی سرعت نفوذ به اندازه کافی کم باشد تا این ویژگی تحلیل برقرار شود و از اثرات اینرسی جلوگیری شود. همچنین با توجه به اینکه سرعت نفوذ به طور مستقیم بر روی زمان تحلیل تأثیرگذار است بایستی هزینه محاسباتی نیز در انتخاب سرعت در نظر گرفته شود.

شرایط تماس

اندرکنش بین مصالح اویلری (خاک) و مصالح (لاگرانژی) اسپادکن به وسیله الگوریتم تماس عمومی^۱ تعریف می شود که از روش تماس نهایی^۲ استفاده می کند. بر اساس دستورالعمل سنام^۳ (۲۰۰۸) ضریب زبری بین اسپادکن و خاک های ماسه ای رسی (α) به ترتیب برابر ۰.۵ و ۰.۴ در نظر گرفته می شود (ایزو، ۲۰۱۲). قابل ذکر است که تماس اندرکنشی بین مصالح مختلف اویلری (لایه های ماسه و رس) تعریف نمی شود چراکه مصالح به طور مداوم تغییر شکل می یابند و لغزشی بین آنها وجود ندارد.

در این تحقیق ابتدا دو مدل آزمایشگاهی با استفاده از مدل عددی شبیه سازی و نتایج حاصله با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید و سپس تعدادی مدل عددی دیگر جهت بررسی تأثیرات پارامترهای اساسی و مؤثر در ظرفیت باربری پی اسپادکن مورد تحلیل قرار گرفت. جزئیات سناریوهای مورد بررسی در این تحقیق شامل تأثیرات قطر اسپادکن (D)، ضخامت لایه ماسه ای (H_s)، تراکم نسبی لایه ماسه ای (I_D)، مقاومت برشی موجود در مرز بین دولایه (S_{u0})، گرادیان مقاومت برشی لایه رسی (ρ) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن در جدول (۱) ارائه شده است.

¹ General Contact

² penalty contact

³ SNAME

⁴ ISO

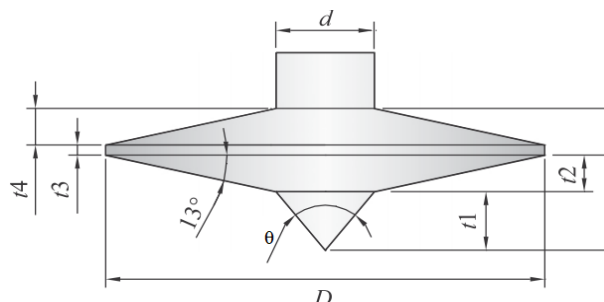
جدول ۱. سناریوهای تحقیق

تیپ اسپادکن	D (m)	I _D (%)	H _s (m)	ρ(kpa/m)	s _{u0} (kpa)	
B	۱۲	۴۳	۶	۱/۵۵	۱۱	
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۱	بررسی تأثیر ضخامت
B	۱۲	۴۳	۸	۱/۵۵	۱۱	لایه ماسه ای H _s
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۱	بررسی تأثیر مقاومت
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۵	برشی موجود در مرز
B	۱۲	۴۳	۷	۱/۵۵	۲۰	بین دولایه S _{u0}
D	۱۰	۴۳	۷	۱	۱۱	بررسی تأثیر گرادیان
D	۱۰	۴۳	۷	۱/۵۵	۱۱	مقاومت برشی لایه
D	۱۰	۴۳	۷	۲	۱۱	رسی ρ
A	۱۰	۲۰	۷	۱/۵۵	۱۱	
A	۱۰	۴۰	۷	۱/۵۵	۱۱	بررسی تأثیر تراکم
A	۱۰	۶۰	۷	۱/۵۵	۱۱	نسبی I _D

صحت سنجی و کالیبراسیون

به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده در این تحقیق، ۲ مدل آزمایشگاهی از تحقیقات تجربی صورت گرفته توسط (هو و همکاران^۱ ۲۰۱۴)، به وسیله مدل نرم افزاری حاضر در این پژوهش به صورت عددی مدل سازی و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. مدل های آزمایشگاهی مورد نظر به صورت سیستم خاک دولایه ای ماسه بر روی رس هستند که لایه خاک ماسه ای دارای تراکم نسبی برابر ۴۳ درصد، وزن مخصوص مؤثر برابر ۹۰۹۶ کیلو نیوتن بر مترمکعب و ضخامت برابر ۶ متر است. لایه خاک رسی دارای مشخصاتی از جمله مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (S_{u0}) برابر ۱۲۰۹۶ کیلو پاسکال، گرادیان مقاومت برشی برابر ۱۵۴ کیلو پاسکال بر متر و وزن مخصوص مؤثر برابر ۷۱۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب است. پی اسپادکن در این دو آزمایش دارای فرم کلی نشان داده شده در شکل (۷) و جزئیات ارائه شده در جدول (۲) است.

¹ Hu et al



شکل ۷. هندسه اسپادکن مورد استفاده در آزمایش تجربی (هو و همکاران، ۲۰۱۴)

جدول ۲. ابعاد اسپادکن مورد استفاده در آزمایش تجربی (هو و همکاران، ۲۰۱۴)

اسپادکن	t_1	t_2	t_3	t_4	D	d	θ
مدل ۱	۱/۴۴	۰/۸۹	۰/۳	۰/۸۱	۱۰	۲/۹۲	۷۶°
مدل ۲	۱/۷۳	۱/۰۷	۰/۳	۱/۰۷	۱۲	۲/۹۲	۷۶°

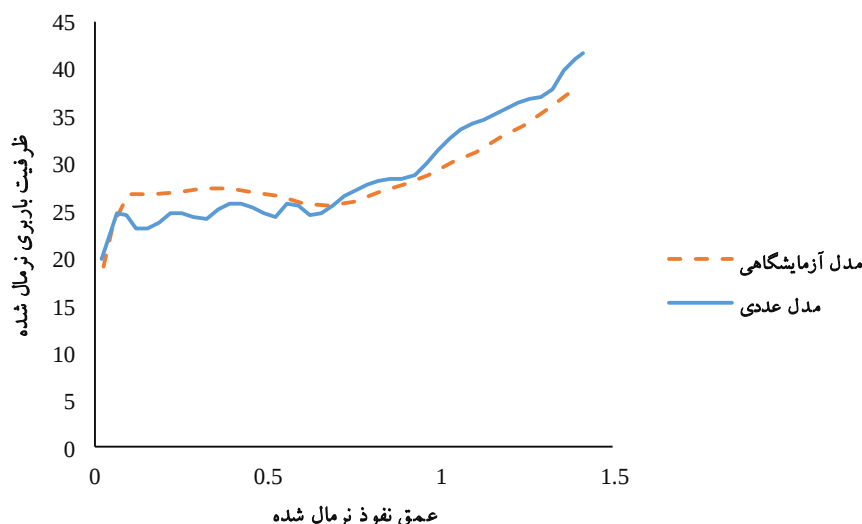
درصد خطای مقدار نفوذ پانچ محاسبه شده مربوط به هر کدام از مدل ها با اندازه مش مربوطه در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۳. مقایسه میان درصد خطای مدل آزمایشگاهی و درصد خطا برای هر مدل

اندازه مش			مدل آزمایشگاهی ۱
۰/۳	۰/۴	۰/۵	
%۷	%۱۰	%۱۲	درصد خطا
اندازه مش			مدل آزمایشگاهی ۲
۰/۳	۰/۴	۰/۵	
%۵	%۹	%۱۳	درصد خطا

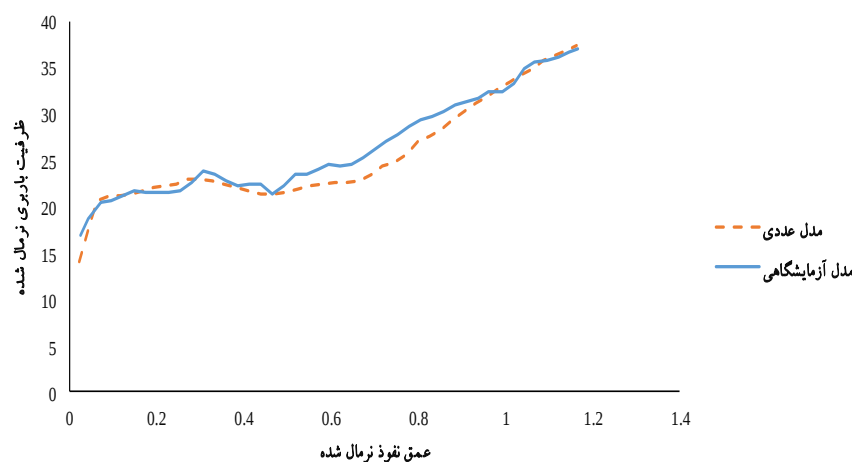
در نهایت با توجه به خروجی ها و درصد خطای به دست آمده برای مدل ها با اندازه مش های متفاوت، برای محدوده ای برابر با قطر اسپادکن و نزدیک به نفوذ، ابعاد مش ۰/۳ متر و از این فاصله تا انتهای مدل (فاصله شعاعی) اندازه مش از ۰/۷ تا ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. مورد قابل ذکر دیگر مربوط به سرعت نفوذ پی اسپادکن است که با توجه به اینکه مدل سازی حاضر از نوع تحلیل شبه استاتیکی است می بایست طوری انتخاب شود که این ویژگی شبه استاتیکی برقرار شود و اثرات اینرسی خنثی گردد، همچنین باید هزینه های محاسباتی تحلیل (زمان تحلیل) نیز به صرفه باشد، بنابراین با توجه به بازه ۰/۱ تا ۱ متر بر ثانیه که در تحقیقات مشابه برای نفوذ پی اسپادکن در نظر گرفته شده است، برای این ۲ مدل سرعت های ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲ متر بر ثانیه اعمال شد و با انجام مقایسه، سرعت ۰/۲ متر بر ثانیه نتیجه قابل قبولی به دست می داد. به طوری که برای مدل ۱ و مدل ۲ خطای بین نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری به ترتیب برابر با ۷٪ و ۵٪ است. نکته قابل ذکر، محاسبه خطا

به صورت میانگین خطای تعداد زیادی نقطه از نمودارهای نتایج آزمایشگاهی و عددی است. در نمودارهای (۸) و (۹) مقایسه صورت گرفته بین مدل های آزمایشگاهی و نرم افزاری نشان داده شده است.



شکل ۸. نمودار مقایسه نتایج آزمایش تجربی و نرم افزاری برای مدل ۱

همان گونه که از شکل (۸) مشخص است در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی پدیده نفوذ پانچ اتفاق می افتد. به طوری که برای مدل آزمایشگاهی محدوده گسیختگی حدوداً از عمق ۰/۹ متر تا عمق ۸/۵ متری اتفاق می افتد درحالی که برای مدل عددی محدوده گسیختگی از عمق حدوداً ۰/۹ سانتی متر تا عمق ۷/۳ متر اتفاق می افتد؛ بنابراین مدل عددی، محدوده گسیختگی پانچ را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کند، بعلاوه اینکه مقادیر مقاومت باربری پی اسپادکن را نیز با مقدار خطای برابر با ۷ درصد پیش بینی می کند.



شکل ۹. نمودار مقایسه نتایج آزمایش تجربی و نرم افزاری برای مدل ۲

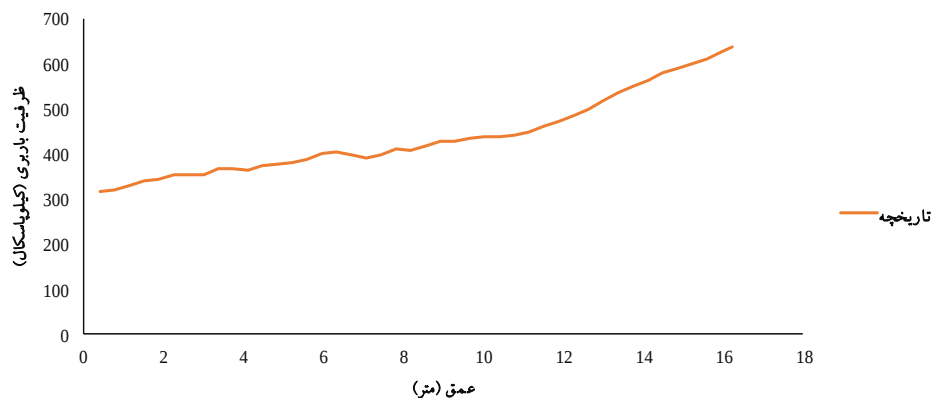
همان گونه که از شکل (۹) مشخص است همانند مدل ۱، برای مدل ۲ نیز در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی پدیده نفوذ پانچ اتفاق می افتد. به طوری که برای مدل آزمایشگاهی گسیختگی حدوداً از عمق ۰/۸ متر تا عمق ۸/۲ متری و برای مدل عددی گسیختگی از عمق حدوداً ۰/۴ متر تا عمق ۷/۴ متر اتفاق می افتد؛ بنابراین مدل عددی، محدوده گسیختگی پانچ را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کند، بعلاوه اینکه مقادیر مقاومت باربری پی اسپادکن را نیز با مقدار خطای برابر با ۵ درصد پیش بینی می کند.

همچنین به منظور انجام کالیبراسیون با تغییر ضرایب مختلف، مدل حاضر با استفاده از داده های ارائه شده مربوط به یک مورد نفوذ پایه سکوی جکاپ در بستر خلیج تایلند، کالیبره می گردد. خاک موردنظر دارای ساختار لایه ای به صورت لایه رس سخت - لایه رس نرم - لایه رس سخت هست. همچنین قطر اسپادکن برابر با ۱۱/۵ متر هست. در جدول (۴) مشخصات خاک ارائه گردیده است.

جدول ۴. مشخصات خاک موردنظر در عملیات نفوذ در خلیج تایلند

خاک	وزن مخصوص مؤثر (γ) (kN/m^3)	مقاومت برشی (s_u) (kpa)	ضخامت لایه (t) (m)
لایه اول	۸	۶۵	۹
لایه دوم	۸	۳۵	۵
لایه سوم	۸	۸۰	بی نهایت

مقادیر اندازه گیری شده میدانی در این عملیات نشان می دهد که پی های اسپادکن در فاصله اعماق ۵/۷۵ تا ۷۰/۱۵ متر، تحت پیش بارگذاری به اندازه ۳۹۴/۸ کیلو پاسکال، مستقر می شوند.



شکل ۱۰. نمودار مقاومت-عمق، مدل عددی نفوذ پی اسپادکن در خلیج تایلند

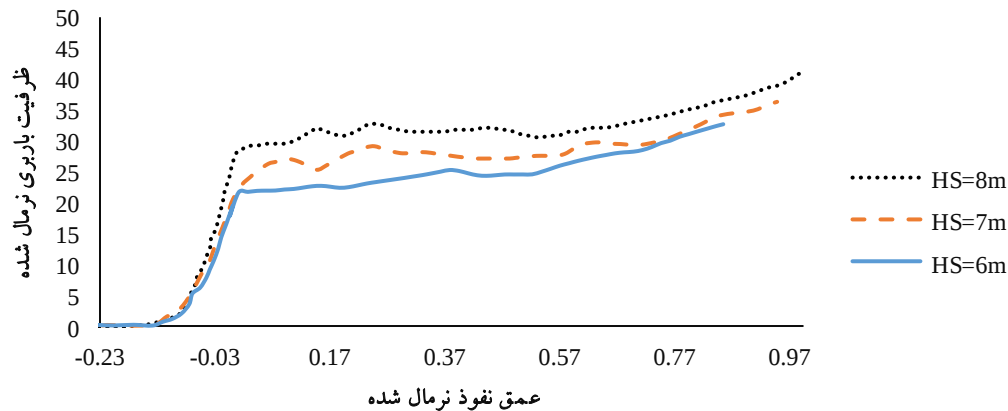
همان گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می شود، مدل عددی نتایج قابل قبولی به دست می دهد چرا که در عمقی برابر با ۶/۴ متر که نزدیک به عمق نفوذ نهایی پی های اسپادکن در مورد میدانی است، مقاومت باربری اوجی برابر با ۴۰۸ کیلو پاسکال به دست می دهد که ۳/۳٪ بیشتر از مقدار اندازه گیری شده است.

یافته ها

در این بخش نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مختلف بر روی مقاومت باربری پی اسپادکن و حجم خاک ماسه‌ای منتقل شده^۱ به درون لایه رسی توسط اسپادکن بررسی می‌گردد.

بررسی تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای

در شکل (۱۱)، تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای بر مقاومت باربری پی اسپادکن نشان داده شده است.



شکل ۱۱. تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای بر مقاومت باربری پی اسپادکن

با توجه به شکل (۱۱)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به‌طوری‌که برای تحلیل شامل لایه‌ی ماسه‌ای با ضخامت ۶ متر، گسیختگی در محدوده‌ی با عمق ۰/۴ متر تا ۶/۴ متر اتفاق می‌افتد. این محدوده برای تحلیل‌های شامل لایه ماسه‌ای با ضخامت ۷ متر و ۸ متر به ترتیب برابر ۰/۶ متر تا ۸ متر و ۰/۴ متر تا ۸ متر خواهد بود. با توجه به نمودار فوق، ضخامت لایه ماسه‌ای تأثیر مشهودی بر روی مقاومت نفوذ دارد. به‌طوری‌که هر چه لایه‌ی ماسه‌ای ضخیم‌تر باشد، مقاومت نفوذ بیشتر خواهد بود. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به‌طوری‌که فاصله ۲/۸- تا ۰، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پانچ است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت. این نتیجه در تطابق با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق آزمایشگاهی (ته و همکاران ۲۰۰۸، و تحقیق‌های عددی (جون و همکاران ۲۰۰۷ و یو و همکاران ۲۰۰۹ که بر روی خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، انجام گرفت، است که در جدول (۵) نشان داده شده است. دلیل این نتایج ناشی از مقادیر و اندازه منابع تأمین‌کننده q_{peak} (مقاومت اوج) است. به عبارتی برای مقادیر بزرگ‌تر H_s ، لایه‌ی ماسه‌ای (که مقاومت بیشتری نسبت به

¹ sand plug

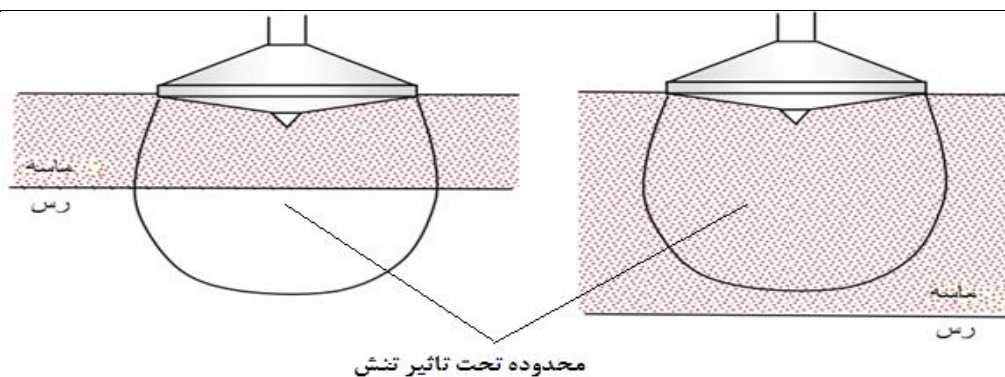
² Xu et al

³ Yu et al

لایه رسی دارد) سهم اصلی در تأمین q_{peak} دارد. برعکس، برای شرایطی که لایه ماسه‌ای نازک‌تر باشد سهم لایه رسی در مقاومت باربری غالب است و در نتیجه مقاومت کمتری بسیج می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه ماسه‌ای بخش بزرگ‌تری از محدوده تحت تأثیر تنش، در لایه ماسه‌ای خواهد بود و بخش کمتری در لایه رسی، از این رو مقاومت q_{peak} بیشتری به دست می‌آید. در شکل (۱۲) این موضوع به خوبی نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای (H_s) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

q_{peak} (kpa)	H_s (m)	
۲۲۰	۳	ته و همکاران ۲۰۰۸
۵۴۸	۵	
۱۰۵۰	۷	
۱۷۰	۷	یو و همکاران ۲۰۱۲
۳۵۶	۱۴	
۴۴۴	۷	
۱۶۲۵	۱۴	جون و همکاران ۲۰۱۴
۲۶۳	۶	
۳۰۷	۷	
۳۴۶	۸	تحقیق حاضر

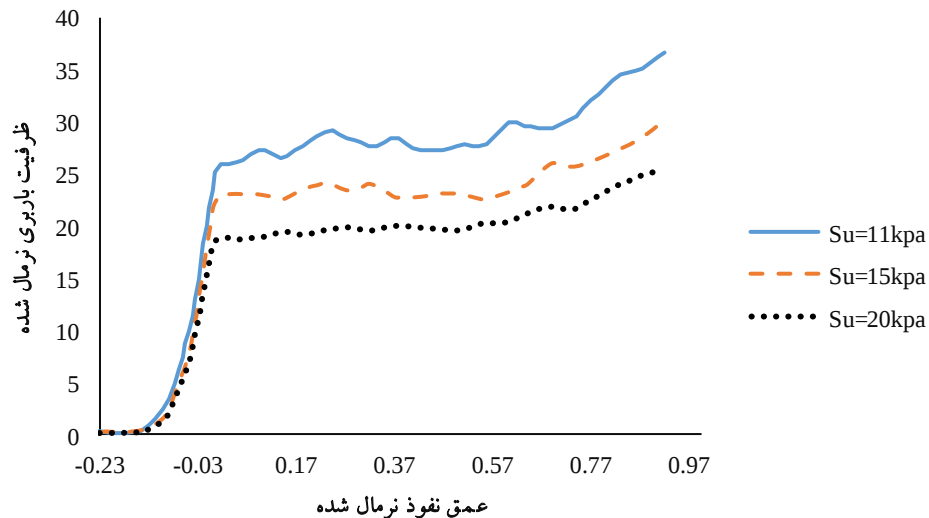


شکل ۱۲. طرح شماتیک گسترش محدوده تحت تأثیر تنش در لایه‌های خاک برای ضخامت‌های مختلف لایه ماسه‌ای

بررسی تأثیر مقاومت برشی لایه رسی

بررسی تأثیر مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (su_0) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در شکل (۱۳)، نتایج تأثیر مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن نشان داده شده است.



شکل ۱۳. تأثیر مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

با توجه به شکل (۱۳)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل su_0 برابر 11 kpa ، 15 kpa و 20 kpa به ترتیب برابر با $0/6$ متر تا 8 متر، $0/6$ متر تا $7/6$ متر، $0/6$ متر تا $6/8$ متر خواهد بود. همچنین با توجه به نمودار فوق، با افزایش مقاومت برشی su_0 ، مقاومت باربری پی افزایش می‌یابد. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله $2/8$ تا 0 ، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پانچ است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت.

با توجه به شکل (۱۳)، هرچه قدر مقاومت برشی su_0 بزرگ‌تر باشد، مقاومت باربری در طول کل عملیات نفوذ بزرگ‌تر خواهد بود. این نتیجه در تطابق با نتیجه به دست آمده از تحقیقات عددی (کیو و هنکه^۱، ۲۰۱۱؛ جون و همکاران^۲، ۲۰۰۷؛ و یو و همکاران^۳، ۲۰۰۹) که بر روی خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، انجام گرفت، است که در جدول (۶) نشان داده شده است. با توجه به اینکه بخشی از مقاومت باربری خاک توسط لایه رسی تأمین می‌شود، با افزایش مقاومت برشی این لایه، مقاومت کلی نیز افزایش می‌یابد که این در تطابق با تمامی روابط تئوری ذکر شده است.

¹ Qiu and Henke

² Xu et al

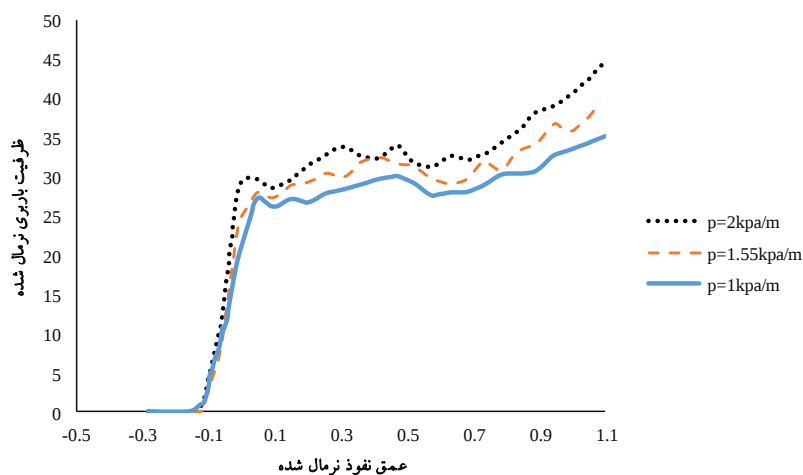
³ Yu et al

جدول ۶. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (s_{u0}) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

q_{peak} (kpa)	s_{u0} (kpa)	
۵۳۹	۳۰	کیو و هنکه ۲۰۱۱
۷۳۳	۵۰	
۱۱۹۴	۱۰۰	
۳۵۷	۱۰	یو و همکاران ۲۰۰۹
۶۰۸	۳۰	
۸۳۱	۵۰	
۴۰۴	۱۰	جون و همکاران ۲۰۰۷
۵۵۱	۲۰	
۸۰۱	۴۰	
۳۰۷	۱۱	تحقیق حاضر
۳۴۷	۱۵	
۳۹۰	۲۰	

بررسی تأثیر گرادیان مقاومت برشی لایه رسی (p) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در این بخش تأثیر گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر ظرفیت باربری پی اسپادکن مورد بررسی می‌گیرد و نتایج حاصل در قالب شکل (۱۴) ارائه می‌گردد.



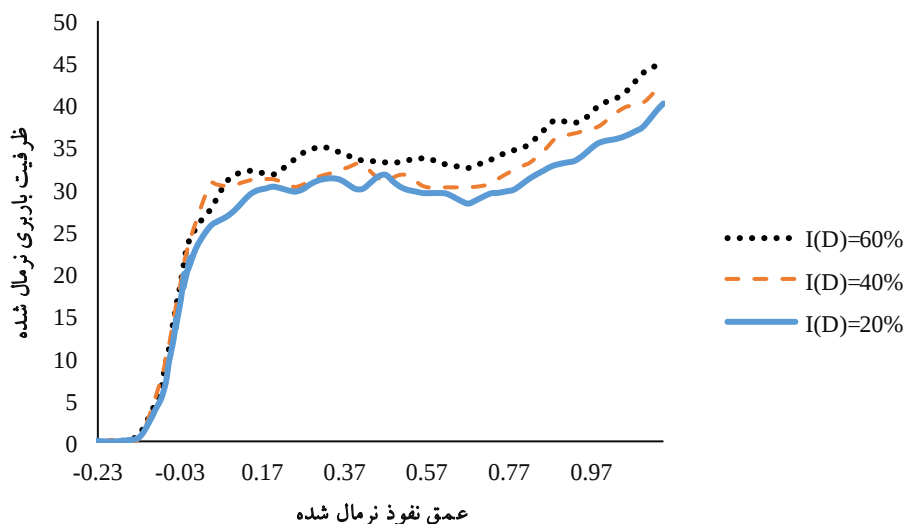
شکل ۱۴. تأثیر گرادیان مقاومت برشی لایه رسی بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

با توجه به شکل (۱۴)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پنج برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل p برابر با 1 kpa/m ، 1.55 kpa/m ، 2 kpa/m به ترتیب برابر با 0.6 متر تا 8 متر، 0.6 متر تا 8 متر، 0.4 متر تا 7.6 متر است. با توجه به نمودار فوق، با افزایش مقدار گردیان مقاومت برشی خاک رس، مقاومت باربری خاک نیز افزایش می‌یابد. همچنین در محدوده نفوذ در لایه رسی، هرچه قدر گردیان مقاومت برشی بزرگ‌تر باشد، نرخ افزایش مقاومت باربری متناظر بزرگ‌تر خواهد بود. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله $2/8$ تا 0 ، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پنج است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت.

بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای

بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای (ID) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در شکل (۱۵) نتایج بررسی تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای بر ظرفیت باربری پی نشان داده شده است.



شکل ۱۵. تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای بر ظرفیت باربری پی

با توجه به شکل (۱۵)، پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پنج برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تراکم نسبی برابر با 20% ، 40% و 60% به ترتیب برابر است با 0.9 متر تا $1/1$ متر، 0.5 متر تا $8/1$ متر، $1/1$ متر تا $7/5$ متر است. با توجه به نمودار فوق، با افزایش میزان تراکم نسبی لایه ماسه‌ای، مقاومت باربری نیز افزایش می‌یابد. هرکدام از نمودارهای فوق را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله $2/3$ تا 0 ، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پنج است. بخش سوم و

آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت.

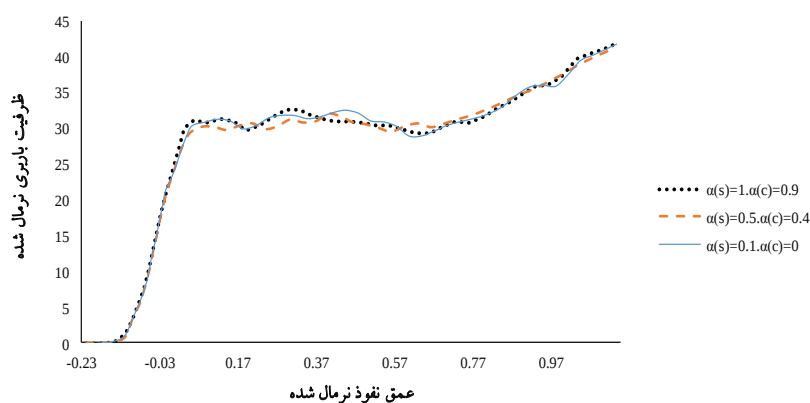
با توجه به شکل (۱۵)، با افزایش میزان تراکم نسبی، مقاومت باربری نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه در تطابق با نتیجه به‌دست‌آمده از تحقیق آزمایشگاهی (کاریگ و چوا^۱ ۱۹۹۰) و تحقیق عددی (کیو و همکاران^۲ ۲۰۱۰) که بر روی خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس، انجام گرفت، است. جدول (۶). دلیل این امر این است که با توجه به افزایش تراکم نسبی خاک ماسه‌ای و در نتیجه افزایش زاویه اصطکاک آن، سهم مقاومت صفحه برشی موجود در لایه ماسه‌ای، در تأمین مقاومت q_{peak} افزایش می‌یابد.

جدول ۶. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر تراکم نسبی خاک ماسه‌ای (I_D) بر روی ظرفیت باربری پی اسپادکن

q_{peak} (kpa)	I_D	
۳۳۱	%۲۴	کاریگ و چوا ۱۹۹۰
۵۴۳	%۸۹	
۳۷۰	%۲۰	
۳۹۴	%۵۰	کیو و همکاران ۲۰۱۰
۴۹۷	%۸۵	
۳۲۸	%۲۰	
۳۴۳	%۴۰	تحقیق حاضر
۳۶۷	%۶۰	

بررسی تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن (α) بر ظرفیت باربری پی اسپادکن

در شکل (۱۶) نتایج بررسی تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن بر ظرفیت باربری پی نشان داده شده است.



شکل ۱۶. تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن بر ظرفیت باربری پی

¹ Craig and Chua

² Qiu et al

با توجه به شکل (۱۶) پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای هر ۳ تحلیل وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تحلیل های شامل پی اسپادکن با زبری α_c (زبری بین رس و پی) و α_s (زبری بین ماسه و پی) برابر با ۰ و ۰/۱، (۰/۴ و ۰/۵) و (۰/۹ و ۱) به ترتیب برابر با ۱/۱ متر تا ۸/۱ متر، ۱/۱ متر تا ۷/۷ متر، ۰/۹ متر تا ۸/۱ متر است. همچنین با توجه به نمودار فوق، زبری بین پی اسپادکن و خاک های موجود، تأثیر خاصی بر روی مقاومت باربری ندارد. هرکدام از نمودارهای فوق را می توان به سه بخش تقسیم نمود به طوری که فاصله ۲/۳- تا ۰، طولی است که بزرگ ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می شود که این نشان دهنده وقوع پدیده نفوذ پانچ است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می رسد که دارای مقاومت افزایشی نسبت به عمق است، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچقدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایش خواهد داشت. با توجه به شکل (۱۶)، زبری پی اسپادکن آن چنان تأثیری بر روی مقاومت باربری ندارد. این نتیجه در تطابق با نتیجه تحقیق عددی (کیو و آنکه^۱، ۲۰۱۱) که در آن تحلیل تأثیر زبری پی اسپادکن را بر روی خاک های تک لایه ای رس و ماسه انجام داد، است که در جدول (۷) نشان داده شده است. دلیل این امر به خاطر نیمه متراکم بودن لایه ماسه ای و در نتیجه ایجاد اصطکاک ناچیز بین پی و خاک ماسه ای است.

جدول ۷. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر زبری بین خاک و اسپادکن (α) بر روی ظرفیت باربری آن

q (kpa)	α_c	d(m)
۳۱۸	۰/۵	
۳۲۶	rough	۱
۳۶۲	۰/۵	
۳۶۹	rough	۲
۴۰۰	۰/۵	
۴۰۷	rough	۳
کیو و هنکه ^۲ ۲۰۱۱		
q (kpa)	α_s	d(m)
۳۰۴۸	۰/۵	
۳۱۳۲	rough	۱
۳۷۲۲	۰/۵	
۳۸۴۵	rough	۱/۵
۴۴۰۳	۰/۵	
۴۶۰۲	rough	۲
q _{peak} (kpa)	α_c	α_s
۳۴۳	۰	۰/۱
۳۴۱	۰/۴	۰/۵
۳۴۲	۰/۹	۱

تحقیق حاضر

¹ Qiu and Henke

² Qiu and Henke

بحث

در تحقیق حاضر، اقدام به مطالعه عددی بررسی ظرفیت باربری پی اسپادکن سازه جکاپ فراساحلی در خاک، با سیستم دولایه‌ای ماسه بر روی رس، با روش کوپل لاگرانژی - اویلری (CEL) گردید. در این پژوهش تأثیر خصوصیات لایه‌های ماسه‌ای و رسی از جمله تراکم نسبی (ID) و ضخامت لایه ماسه‌ای، مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (Su_0)، گرا دیان مقاومت برشی لایه رسی بر روی ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی پانچ مورد مطالعه قرار گرفت در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی رفتار خاک‌های ماسه‌ای و رسی از مدل موهر-کلمب استفاده گردید.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش عددی و تکنیک CEL فرایند نفوذ پی اسپادکن در خاک لایه‌ای ماسه بر روی رس مدل‌سازی گردید. برای سیستم خاک دولایه‌ای ماسه بر روی رس، در صورتی که عملیات پیش بارگذاری در نصب سکوی جکاپ به دقت و با بررسی‌های کامل و جامع محیطی و ژئوتکنیکی انجام نگردد و میزان بارگذاری بیش از حد مجاز اعمال شود، پتانسیل گسیختگی پانچ وجود دارد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ✓ پارامترهای مرتبط با خصوصیات ژئوتکنیکی شامل مقاومت برشی لایه رسی، گرا دیان مقاومت برشی، تراکم نسبی لایه ماسه‌ای، ضخامت لایه‌ی ماسه‌ای نسبت مستقیمی با مقاومت باربری پی اسپادکن دارند. به طوری که با افزایش هر کدام از این خصوصیات، مقاومت باربری نیز افزایش می‌یابد.
- ✓ شدت و ریسک گسیختگی پانچ با افزایش ضخامت لایه ماسه‌ای و کاهش مقاومت برشی لایه رسی افزایش می‌یابد.
- ✓ الگوی گسیختگی خاک زیر پی اسپادکن در حال نفوذ، نسبت به عمق تغییر می‌کند، به گونه‌ای که در عمق‌های سطحی، گسیختگی دارای دو مولفه، برش در طول صفحه برشی تقریباً عمودی در لایه ماسه‌ای و گسیختگی برشی موضعی در لایه رسی، است.

تقدیر و تشکر

در پایان از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر که شرایط لازم برای ایجاد تحقیق را در اختیار نویسندگان قرار دادند، سپاسگزاری می‌گردد.

References

- Craig, W. H., & Chua, K. (1990). Deep penetration of spudcan foundations on sand and clay. *Geotechnique*, 40(4), 541-556. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.4.541>
- Dier, A., Carrol, B., & Abolfathi, S. (2004). Guidelines For Jack Up Rigs with Particular Reference to Foundation Integrity, Health and Safety Executive (HSE). Research Report 289, UK, 1-91. <https://www.hse.gov.uk/Research/rhtml/r289.html>
- Drescher, A., & Detournay, E. (1993). Limit load in translational failure mechanisms for associative and non- associative materials. *Geotechnique*, 43(3), 443-456. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.443>
- Gao, W., Yu, L., & Hu, Y. (2012). Large deformation FE analysis of large diameter spudcan penetration into two-layer of uniform clays. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(2), 171-177. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.02.171-177>
- Gerwick, B. C. (1986). Construction of offshore structures. John Wiley, New York. <https://doi.org/10.1201/9780849330520>
- Hanna, A. M., & Meyerhof, G. G. (1980). Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay. *Can. Geotech. J.*, 17(2), 300-303. <https://doi.org/10.1139/t80-030>
- Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. *Bulleting of the danish geotechnical institute*, 28, 5-11. <https://www.semanticscholar.org>
- Hossain, M. S., Hu, Y., & Randolph, M. F. (2003). Spudcan foundation penetration into uniform clay. *Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, May 25-30,

- Honolulu, Hawaii, USA. <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE03/All-ISOPE03/ISOPE-I-03-177/8446>
- Houlsby, G. T., & Martin, C. M., (2003). Undrained bearing capacity factors for conical footings on clay. *Geotechnique*, 53(5), 513-520. <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:e3b491f0-4a72-4881-85d0-e1b512bdc618>
- Hu, P., Stanier, S. A., Cassidy, M. J., & Wang, D. (2014). Predicting peak resistance of
- Hu, P., Stanier, S., Cassidy, M., & Wang, D. (2014). Predicting Peak Resistance of Spudcan Penetrating Sand Overlying Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001016)
- ISO. (2012). ISO 19905-1: Petroleum and natural gas industries-site specific assessment of mobile offshore units-part 1 : Jack-ups. Geneva, Switzerland : International Organization for
- Lee, K. K. (2009). Investigation of potential spudcan punch- through failure on sand overlying clay soils. PhD thesis, University of Western Australia, Perth. https://api.research-repository.uwa.edu.au/ws/portalfiles/portal/3220219/Lee_Kok_Kuen_2009.pdf
- Lee, K. K., Randolph, M. F., & Cassidy, M. J. (2013). Bearing capacity on sand overlying clay soils: A simplified conceptual model. *Geotechnique*, 63(15), 1285-1297. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.176>
- Liu, J., Yu, L., Zhou, H., & Kong, X. J. (2014). Bearing Capacity and Critical Punch-Through Depth of Spudcan on Sand Overlying Clay. *China Ocean Eng*, 28(1), 139 – 147. <https://doi.org/10.1007/s13344-014-0011-x>
- Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. *Can. Geotech. J*, 11(2), 223-229. <https://doi.org/10.1139/t74-018>
- Qiu, G., & Henke, S. (2011). Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay. *Marine Structures*, 24(4), 528–550. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.06.005>
- Qiu, G., Henke, S., & Grabe, J. (2010). 3D FE analysis of the installation process of spudcan foundations. In 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth WA, 685–690. <http://hdl.handle.net/11420/12144>
- SNAME. (2008). SNAME: Recommended practice for site specific assessment of mobile jack-up units. T & r bulletin 5-5a 1st edn, rev 3. Alexandria, VA, USA: Society of Naval Architects and Marine Engineers. <https://pdfcoffee.com/sname-5-5-and-5-5arev3-pdf-free.html>
- spudcan penetrating sand overlying clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001016)
- Standardization. <https://www.iso.org/standard/34592.html>
- Teh, K. L. (2007). Punch- through of spudcan foundation on sand overlying clay. PhD thesis, National University of Singapore. <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/28149>
- Teh, K. L., Cassidy, M. J., Leung, C. F., Chow, Y. K., Randolph, M. F., & Quah, C. K. (2008). Revealing the bearing failure mechanisms of a penetrating spudcan through sand overlying clay. *Geotechnique*, 58(10), 793–804. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.10.793>
- Teh, K. L., Leung, C. F., Chow, Y. K., & Handidjaja, P. (2009). Prediction of punch-through for spudcan penetration in sand overlying clay. *Offshore Technology Conference, OTC20060*. <https://doi.org/10.4043/OTC-20060-MS>
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. London: Chapman and Hall. <https://doi.org/10.4043/OTC-20060-MS>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. New York, John Wiley & Sons. <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1289570>
- Xu, X. (2007). Investigation of the end bearing performance of displacement piles in sand. PhD thesis, University of Western Australia. <https://research-repository.uwa.edu.au/en/publications/investigation-of-the-end-bearing-performance-of-displacement-pile>

Yu, L., Hu, Y., & Liu, J. (2009). Spudcan penetration in loose sand over uniform clay. Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31 - June 5, Honolulu, Hawaii, USA. <https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79214>



Probabilistic slope stability analysis of side wall of river under water level changes and correlation of soil random variables

Reyhaneh Haghighi¹ , Amir Malekpour Estalaki² , Mehdi Esmaeili Varaki³

¹ MSc graduated of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: rhaghighip@yahoo.com

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: malekpour@guilan.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: esmaeili@guilan.ac.ir

ABSTRACT

Considering the effect of uncertainty of random geotechnical variables, the slope stability analysis of the earthen side wall of the river were carried out in the current study taking into account the correlation between the internal friction angle and the cohesion of the soil using copulas. Additionally, the changes of water level in the river and the effect of different limit equilibrium methods on the slope stability analysis were investigated in a case study at four cross-sections of Shalmanrood in Guilan province of Iran. In this regard, a computer program was developed in MATLAB. The results showed that Frank copula and the Morgenstern-Price limit equilibrium method are appropriate for determining the probability distributions of the safety factor of the river wall. The factors of safety obtained from different limit equilibrium methods showed that the normal distribution function has a better fit to the results compared to the GEV distribution function. Decreasing the water level in the river, the value of safety factor decreases and the highest rate of decrease in the safety factor occurs when the water level declines by 20 percent from the maximum level. The rate of decrease in the safety factor diminishes as the water level drawdown changes from 20 to 40 percent.

Keywords: Copula, GeoStudio software, Limit equilibrium, Reliability, River engineering, Uncertainty

Article Type: Research Article

Article history: Received: 06 September 2023 Revised: 23 November 2023 Accepted: 30 December 2023 ePublished: 30 December 2023

1. Introduction

Stability analysis of earthen slopes has many applications in civil engineering among which the stability of earthen sloping walls of roads, the side walls of rivers, and the earthen dams are important. The earthen sloping walls of rivers are usually subjected to instability and failure caused by various factors such as floods, changes in the river water level, and hydrostatic and hydrodynamic forces. Among the mentioned factors, the change in the water level of the river has shown a significant effect on the seepage, the increased pore water pressure, and the instability of the side wall of the river. So, the increase in pore water pressure is considered as an important factor for the beginning of failure in earthen slopes (Wu et al., 2021). In investigating the stability of the earthen slopes of the rivers, the role of hydraulic and geotechnical variables as the factors of creating uncertainty in analyzes and their correlations are important from the viewpoint of increasing accuracy and reducing uncertainty in the obtained results, which is considered in the current study.

2. Methodology

The uncertainty and correlation of the random soil properties including the internal friction angle and the cohesion of the river sloping wall were investigated at four cross-sections of Shalmanrood river in Guilan province of Iran. To this end, a computer code was developed in MATLAB and five copula functions were applied to the soil properties and the calculated correlations and distributions were compared using Akaike and Bayesian information criteria to determine the best copula. Then in GeoStudio software, using three limit equilibrium methods including Bishop, Spencer and Morgenstern-Price, the slope stability was approximated. The distributions of factor of safety were obtained for three scenarios of water level including the maximum observed level and the water level decline by 20 and 40 %.

3. Results and discussion

For the maximum water level in the river cross-section 1 (on behalf of the four studied section), the distribution of factor of safety was shown in the Figures (1) and is obtained in the range of 1.4-3.6 using the limit equilibrium method.

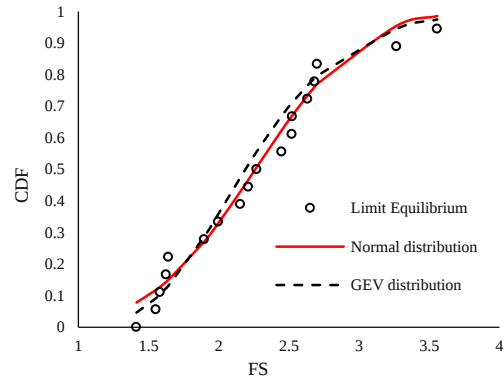


Figure 1. Distribution of the factor of safety for maximum water level in river section 1

By decreasing the water level by 20%, the factor of safety changes to 1.2-1.9 (Figure 2) and declining the water level by 40%, the range is obtained 1.06-2.8 (Figure 3).

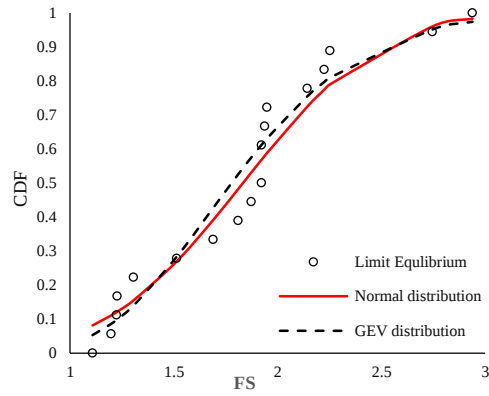


Figure 2. Distribution of the factor of safety for water level decline by 20% in river section 1

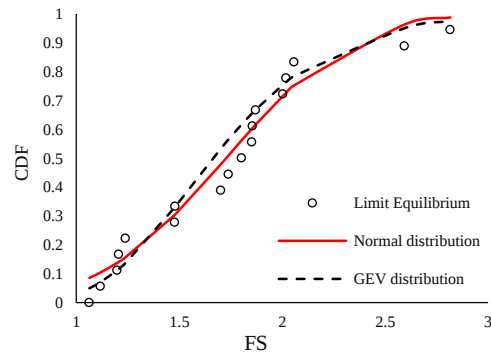


Figure 3. Distribution of the factor of safety for water level decline by 40% in river section 1

The same trends of decreasing the factor of safety by the water level decline in the river are observed in three other cross-sections. For the maximum river water level in cross-section 1, the maximum error of normal and GEV distributions were obtained equal to 7.8 and 11.4%, respectively. In addition, the error of normal and GEV distributions for water level decline by 20% were 13.4% and 13.6% respectively. Finally, the error of 9% and 14.5% were obtained for the water level decline by 40% for the normal and GEV, respectively. It is observed that normal distribution offers better performance for all water levels and the errors of both distributions increase with water level decline. This trend is also observed in the all studied cross-sections.

4. Conclusions

The performance of the Morgenstern-Price method compared to other limit equilibrium methods is not affected by the variations of the water level in the river and always offers acceptable results. Three limit equilibrium methods used (Bishop, Spencer, and Morgenstern-Price) provide similar results at lower values of the factor of safety (with lower cumulative probability, CDF). Frank copula is the best function to model the correlation of random variables affecting the studied sloping walls of the river. The highest rate of change in factor of safety is observed for the water level decline by 20%.

5. References

Wu, D., Wang, Y., Zhang, F., & Qiu, Y. (2021). Influences of pore-water pressure on slope stability considering strength nonlinearity. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/8823899>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors express their gratitude to the vice-chancellor of research and technology of University of Guilan for the support provided to advance this research.

Cite this article: Haghighi, R., Malekpour Estalaki, A., & Esmaeili Varaki, M. (2023). Probabilistic slope stability analysis on side wall of river under water level changes and correlation of soil random variables, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 41-60. DOI: 10.22126/atwe.2024.10154.1073





تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه در شرایط تغییرات سطح آب و همبستگی متغیرهای تصادفی خاک

ریحانه حقیقی^۱ , امیر ملک پور اسطلکی^۲ , مهدی اسمعیلی ورکی^۳ 

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: rhaghighip@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: malekpour@guilan.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: esmaeili@guilan.ac.ir

چکیده

تحلیل پایداری شیب‌های خاکی در مسائل مهندسی مربوط به بررسی خاک‌ریز جاده‌ها، جداره رودخانه‌ها و شیب‌های بالادست و پایین‌دست سدهای خاکی حائز اهمیت است. با توجه به تأثیر عدم قطعیت و مقادیر تصادفی متغیرهای ژئوتکنیکی مؤثر بر پایداری شیب خاکی جداره رودخانه و وجود همبستگی میان این متغیرها، در تحقیق حاضر از تحلیل احتمالاتی مشترک متغیرهای تصادفی دارای همبستگی (در این تحقیق، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک) با کاربرد توابع کاپولا در بررسی پایداری این شیب‌های خاکی استفاده شد. همچنین در انجام تحلیل‌ها تأثیر تغییرات تراز سطح آب رودخانه و تأثیر کاربرد روش‌های تعادل حدی مختلف در تعیین پایداری شیب در قالب یک مطالعه موردی در چهار مقطع از رودخانه سلمان رود استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام تحلیل‌های احتمالاتی یک برنامه رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد. نتایج نشان داد که تابع کاپولا فرانک و روش تعادل حدی مورگنسترن-پرایس ابزار مناسبی در انجام تحلیل احتمالاتی به‌منظور تعیین توزیع احتمال ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی جداره رودخانه می‌باشند. بررسی توزیع‌های احتمال ضریب اطمینان به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف تعادل حدی نشان داد که تابع توزیع نرمال در مقایسه با تابع توزیع مقادیر حدی GEV برازش بهتری بر نتایج دارد. با کاهش تراز آب در رودخانه، مقادیر ضریب اطمینان کاهش می‌یابد که بیشترین نرخ کاهش ضریب اطمینان در تغییر از تراز سطح آب حداکثر به ازای ۲۰ درصد کاهش سطح آب رخ داده و کاهش ضریب اطمینان به ازای کاهش سطح آب از ۲۰ به ۴۰ درصد با نرخ کمی کمتر ایجاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تعادل حدی، عدم قطعیت، قابلیت اطمینان، کاپولا، مهندسی رودخانه، نرم‌افزار Geostudio

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۵ شهریور ۱۴۰۲ اصلاح: ۰۲ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۹ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۹ دی ۱۴۰۲

استناد: حقیقی، ر.، ملک‌پور اسطلکی، ا.، و اسمعیلی ورکی، م. (۱۴۰۲). تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه در شرایط تغییرات سطح آب و همبستگی متغیرهای تصادفی خاک، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۴)، ۶۰-۴۱، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10154.1073



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

تجزیه و تحلیل پایداری شیب‌های خاکی کاربردهای فراوانی در مهندسی عمران دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به بررسی پایداری دیواره خاکی جاده‌ها، جداره رودخانه‌ها و سطوح شیب‌دار سدهای خاکی اشاره نمود. در صورت تخریب این شیب‌ها، پیامدهایی همچون اختلال در سیستم‌های حمل و نقل جاده‌ای، خسارت به سازه‌های واقع بر روی شیب‌های خاکی مجاور رودخانه‌ها، ورود حجم زیاد رسوبات به بستر رودخانه و کاهش قابلیت انتقال آب و همچنین خسارت‌های جانی و مالی ناشی از تخریب سدهای خاکی محتمل است. علاوه بر این، شیب‌های خاکی جداره رودخانه‌ها همواره در معرض ناپایداری و گسیختگی ناشی از عوامل مختلفی از قبیل سیل، تغییرات سطح آب رودخانه و نیروهای هیدرو استاتیک و هیدرودینامیک می‌باشند. در میان عوامل مذکور، مسئله تغییر سطح آب رودخانه‌ها تأثیر مستقیم بر پدیده‌ی نشست، افزایش بار آبی و فشار آب منفذی و در نتیجه ناپایداری جداره خاکی رودخانه داشته است، به‌طوری‌که افزایش فشار آب منفذی به‌عنوان عامل مهم و مقدمه‌ای بر آغاز گسیختگی این شیب خاکی تلقی می‌گردد (وو و همکاران،^۱ ۲۰۲۱). در بررسی پایداری شیب‌های خاکی رودخانه‌ها، نقش متغیرهای هیدرولیکی و ژئوتکنیکی به‌عنوان عوامل ایجاد عدم قطعیت در تحلیل‌ها و اعمال همبستگی و اثر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، از منظر افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت در نتایج به‌دست‌آمده حائز اهمیت است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با توجه به اهمیت تحلیل پایداری شیب‌های خاکی در بسیاری از مسائل مرتبط با مهندسی عمران، تاکنون محققان زیادی مطالعات خود را بر این حوزه معطوف نموده‌اند. در این راستا، لین و گریفتیس^۲ (۲۰۰۰) تأثیر پایین افتادگی ناگهانی تراز سطح آب در دو حالت افت سریع و آهسته را بر پایداری شیب خاکی به کمک روش اجزا محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که احتمال لغزش شیب به‌طور مستقیم با ضریب تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده خاک مرتبط است. بخشنده امنیه و همکاران (۱۳۹۱) تحلیل پایداری شیب خاکی را با استفاده از روش‌های تعادل حدی، نرم افزار Side و روش عددی تفاضل محدود (با استفاده از نرم افزار Flacslope) انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد افت تراز سطح آب با نرخ‌های مختلف امکان وقوع حالت بحرانی در شیب خاکی را ایجاد می‌نماید. بورمن و همکاران^۳ (۲۰۱۵) به ازای چند سناریوی مختلف (شامل اعمال و عدم اعمال تغییرات تراز سطح آب) عملکرد نسبی روش‌های تعادل حدی را در پایداری شیب‌ها با یکدیگر مقایسه کردند. سنائی‌راد و کاشانی (۱۳۹۵) عملکرد سه روش بهینه‌سازی را برای بررسی پایداری شیب‌های خاکی مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر سنائی‌راد و جلالوندی (۱۳۹۴) از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای تعیین سطح لغزش غیر دایره‌ای شیب‌های خاکی مسلح با ضریب اطمینان یک استفاده نمودند. نتایج کاربرد روش الگوریتم ژنتیک در تحقیق مذکور در مقایسه با نتایج سایر محققین به‌وضوح نشان داد که برای شیب‌های با خصوصیات هندسی، بارگذاری و مشخصات ژئوتکنیکی مشابه، روش مورد استفاده در تحقیق، وضعیت پایداری شیب را بحرانی‌تر به دست می‌آورد. سعید پناه و آقازاده قره‌باغ (۱۳۹۶) در تحقیق خود به بررسی پایداری شیب خاکی بالادست سد شهر چای در حالت تخلیه سریع مخزن به کمک بسته نرم‌افزاری GeoStudio پرداختند. سلماسی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از نرم‌افزارهای Seep/w و Slope/w، عملکرد زهکش‌های افقی بر پایداری شیب‌های خاکی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش طول، ضخامت و تعداد زهکش‌های افقی موجب افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب در زمان وقوع بارندگی‌های شدید و حفظ پایداری شیب می‌گردد. همچنین

¹ Wu et al

² Lane and Griffiths

³ Burman et al

به کارگیری زهکش های افقی در رقوم ارتفاعی پایین شیب، تأثیر پایداری سازی بیشتری نسبت به به کارگیری آن ها در نواحی وسط و فوقانی شیب دارد.

با توجه با تأثیر عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی و هیدرولیکی مؤثر بر پایداری شیب های خاکی، امروزه در بسیاری از موارد، استفاده از تحلیل های احتمالاتی به عنوان جایگزین روش های تحلیل عددی و سایر روش های قطعی در تحلیل پایداری شیب های خاکی مورد تأکید محققان قرار گرفته است (رهبر و محمودی اردکانی، ۱۳۹۱، پارکر و همکاران،^۱ ۲۰۰۸، ملکپور و همکاران، ۱۳۹۷).

در این راستا گریفیس و همکاران^۲ (۲۰۱۵) با استفاده از روش اجزا محدود تصادفی، پایداری شیب خاکی زهکشی نشده را با مقایسه تأثیر واریانس متغیرهای ورودی مطالعه نمودند. نتایج بررسی آن ها نشان داد که احتمال لغزش شیب به طور مستقیم با ضریب تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده خاک مرتبط است. ملکپور و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی احتمالاتی پایداری شیب خاکی در مقطع رودخانه پس از کاهش تراز سطح آب با استفاده از روش مونت کارلو پرداختند. نتایج آن ها نشان داد هرچه قوس رودخانه بیشتر باشد، با کاهش سطح آب رودخانه سرعت استهلاک فشار آب منفذی در شیب خاکی جداره رودخانه کاهش می یابد. نصیرزاده و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو با استفاده از نرم افزار Side، پایداری شیب خاکی مشرف به سرریز آزاد سد کوار شیراز را در قالب یک تحلیل احتمالاتی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه تحلیل آن ها اثبات نمود که تحلیل احتمالاتی نسبت به تحلیل قطعی تصویر روشن تری از وضعیت پایداری شیب خاکی ارائه می کند. سیاکارا و همکاران^۳ (۲۰۲۰) با استفاده از روش FORM و بسته نرم افزاری GeoStudio به تحلیل قابلیت اطمینان پایداری شیب سدهای خاکی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که عواملی همچون هدایت هیدرولیکی اشباع، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در تعیین میزان احتمال تخریب سطوح شیب دار بدنه سد بیشترین سهم را دارا می باشند.

در بسیاری از مطالعات انجام شده با محوریت تحلیل احتمالاتی پایداری شیب های خاکی، تأثیر همبستگی میان متغیرهای تصادفی مؤثر بر پایداری شیب لحاظ نگردیده است. این در حالی است که خصوصیات ژئوتکنیکی مؤثر بر پایداری شیب خاکی، به طور معمول دارای همبستگی بوده و لذا چشم پوشی از آن موجب تخمین غیرواقعی احتمال گسیختگی شیب می گردد. علاوه بر این، مطالعات ملکپور و همکاران (۱۳۹۷) حاکی از آن است که تغییرات تراز سطح آب از مهم ترین عوامل پایداری شیب های خاکی در رودخانه ها است. از این رو هدف تحقیق حاضر، بررسی تأثیر تغییرات تراز سطح آب بر پایداری شیب های خاکی جداره رودخانه در شرایط اعمال همبستگی متغیرهای ژئوتکنیکی تصادفی مؤثر با کاربرد توابع کاپولا و تحلیل احتمالاتی مشترک این متغیرها است. همچنین مقایسه عملکرد توابع کاپولای بکار رفته در تلفیق با روش های تعادل حدی (در قالب یک مطالعه موردی در رودخانه شلمان رود گیلان) از دیگر اهداف مورد نظر در تحقیق حاضر است.

رودخانه مورد مطالعه و خصوصیات شیب های خاکی جداره

در تحقیق حاضر، رودخانه شلمان رود در شرق شهرستان لنگرود استان گیلان در محدوده عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۴ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۹ دقیقه و ۵۷ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی مورد مطالعه قرار گرفت که در شکل (۱) نشان داده شده است. این حوضه از شمال به دریای خزر، از جنوب و جنوب شرق به حوضه آبریز رودخانه پلرود، از شرق

¹ Parker et al

² Griffiths et al

³ Siacara et al

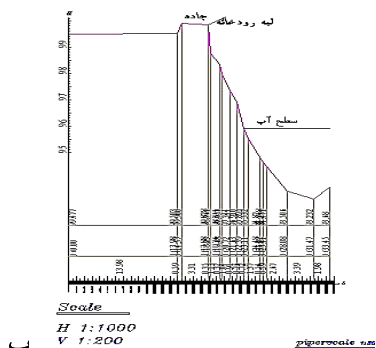
به حوضه آبریز رودخانه رودسر و از غرب و شمال غرب به حوضه آبریز رودخانه‌های شمرود و لنگرود محدود می‌شود (روح‌بخش سیکارودی، ۱۳۷۷).

نوسانات سطح آب در این رودخانه موجب تغییر فشار هیدرواستاتیک و در نتیجه تأثیر آن بر پایداری شیب خاکی جداره می‌شود. از این رو، در تحقیق حاضر تأثیر این عامل به همراه نقش عدم قطعیت و همبستگی خصوصیات تصادفی مصالح خاکی جداره رودخانه در چهار مقطع مختلف بررسی شد. خصوصیات خاک در مقاطع مورد مطالعه از اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از تحقیق ملک‌پور و همکاران (۱۳۹۷) به دست آمده و برای انجام تحلیل‌های ژئوتکنیکی به کمک بسته نرم‌افزاری GeoStudio مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

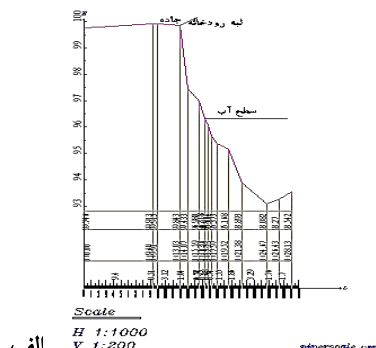


شکل ۱. نمای کلی از موقعیت جغرافیایی ۴ مقطع مورد مطالعه در شلمان‌رود (ملک‌پور و همکاران، ۱۳۹۷)

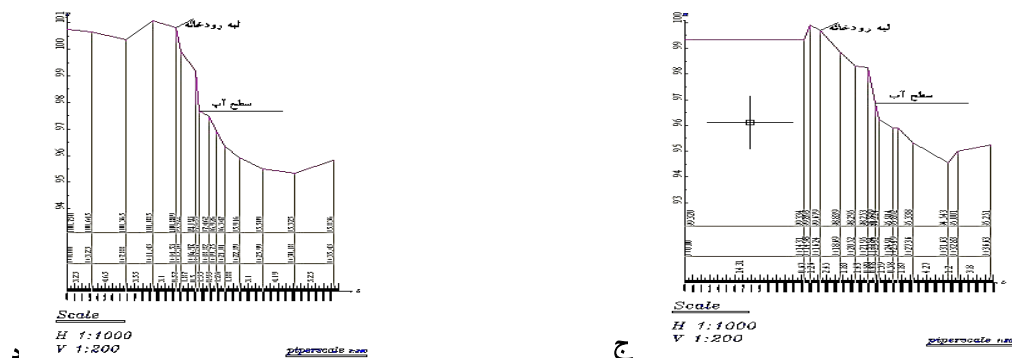
شکل (۲) خصوصیات هندسی چهار مقطع مورد مطالعه رودخانه شلمان‌رود در نرم‌افزار GeoStudio را نشان می‌دهد.



ب



الف



شکل ۲. هندسه مقاطع رودخانه شلمان رود (مقیاس ۱:۲۰۰ الف) مقطع ۱، (ب) مقطع ۲، (ج) مقطع ۳، (د) مقطع ۴ (ملک پور و همکاران، ۱۳۹۷)

روش پژوهش

با توجه به ماهیت تصادفی و تغییرات مکانی خصوصیات خاک، برای بررسی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه از توزیع‌های احتمالاتی متغیرهای ورودی به‌جای مقادیر قطعی آن‌ها در رابطه تعیین ضریب اطمینان مطابق رابطه (۱) استفاده شده که به تعیین توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان می‌انجامد.

$$FS = \frac{\sum R}{\sum F} \quad (1)$$

که در رابطه فوق FS، R و F به ترتیب ضریب اطمینان (با استفاده از روش‌های مختلف تعادل حدی)، نیروهای مقاوم و نیروهای مخرب می‌باشند. به‌منظور تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب مطابق رابطه (۱) به ازای ۱۸ نمونه خاک مربوط به شیب‌های خاکی چهار مقطع موردمطالعه در رودخانه شلمان رود، از روش‌های تعادل حدی بیشاپ، مورگنسترن-پرایس و اسپنسر (کلاتجاری و علی^۱، ۲۰۱۳) استفاده شد که در شکل (۲) نشان داده شده است.

از میان پارامترهای مقاومت برشی که در تعیین ضریب اطمینان دارای عدم قطعیت، ماهیت تصادفی و تغییرات مکانی بوده، می‌توان به دو متغیر تصادفی زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی خاک (C) اشاره نمود، که طبق تحقیق ملک پور و همکاران (۱۳۹۷) دارای بیشترین همبستگی با یکدیگر می‌باشند. بر این اساس، برای تشکیل توزیع احتمالاتی مشترک و اعمال همبستگی میان متغیرهای تصادفی نامبرده از توابع کاپولا مختلف استفاده گردید که در ادامه به توابع مذکور و روابط آن‌ها اشاره می‌شود.

تحلیل احتمالاتی مشترک پایداری شیب خاکی با استفاده از توابع کاپولا

یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای اعمال تأثیر همبستگی بین متغیرهای تصادفی ژئوتکنیکی و ایجاد توزیع احتمالاتی مشترک این متغیرها استفاده از توابع کاپولا است (صادقیان پیرمحله، ۱۴۰۰). نظریه کاپولا جهت ترکیب چند توزیع تک متغیره (حاشیه‌ای) و تبدیل آن به یک توزیع چند متغیره با در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرها توسط اسکالر^۲ (۱۹۷۳) ارائه شد. به عبارت دیگر، کاپولا $(C(u_1, u_2, \dots, u_N))$ یک تابع

¹ Kalahtejari & Ali

² Sclar

متصل کننده برای ارتباط توابع توزیع متغیرهای تصادفی $X_1, X_2, \dots, X_N$ با توابع حاشیه‌ای $F_{x1}(X_1), F_{x2}(X_2), \dots, F_{xN}(X_N)$ بوده که به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد (میراکبری و همکاران، ۱۳۹۷).

(۲)

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = C_0[F_{X_1}(x_1), F_{X_2}(x_2), \dots, F_{X_N}(x_N)]$$

در این تحقیق دو پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و میزان چسبندگی خاک به عنوان دو متغیر دارای همبستگی و مؤثر بر پایداری شیب به عنوان ورودی‌های توابع کاپولا انتخاب شدند. توابع کاپولا مورد استفاده در تحقیق حاضر عبارت‌اند از کاپولا‌های کلیتون، گامبل و فرانک (از خانواده توابع ارشمیدسی) و کاپولا‌های گوسی و تی-استیودنت از خانواده توابع گوسی) که روابط آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. روابط ریاضی و محدوده پارامتر توابع کاپولا مختلف (صادق و همکاران،^۱ ۲۰۱۷، ملک پور و همکاران، ۱۴۰۲)

نام خانواده	نام کاپولا	رابطه ریاضی	محدوده پارامتر کاپولا
	گامبل	$\exp\{-[(-\ln(u))^{\theta} + (-\ln(v))^{\theta}]^{\frac{1}{\theta}}\}$	$\theta \in (1, \infty)$
کاپولای ارشمیدسی	فرانک	$-\frac{1}{\theta} \ln[1 + \frac{(\exp(-\theta u) - 1)(\exp(-\theta v) - 1)}{\exp(-\theta) - 1}]$	$\theta \in \mathbb{R} \setminus 0$
	کلیتون	$\max(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0)^{-\frac{1}{\theta}}$	$\theta \in [-1, \infty) \setminus 0$
کاپولای بیضوی	تی-استیودنت	$\int_{-\infty}^{t_{\theta_2}^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{t_{\theta_2}^{-1}(v)} \frac{\Gamma(\frac{\theta_2+2}{2})}{\Gamma(\frac{\theta_2}{2})\pi\theta_2\sqrt{1-\theta_1^2}} (1 + \frac{x^2 - 2\theta_1 xy + y^2}{\theta_2})^{\frac{(\theta_2+2)}{2}} dx dy$	$\theta_1 \in [-1, 1] \text{ \& } \theta_2 \in (0, \infty)$
	گوسی	$\int_{-\infty}^{\theta^{-1}(u)} \int_{-\infty}^{\theta^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp(\frac{2\theta xy - x^2 - y^2}{2(1-\theta^2)}) dx dy$	$\theta \in [-1, 1]$

در روابط ارائه شده در جدول فوق، u و v توزیع‌های احتمالاتی تک متغیره، θ پارامتر کاپولا، $\emptyset$ یک توزیع استاندارد گوسی و t_{θ_2} توزیع تابع کاپولا تی-استیودنت به ازای درجه آزادی θ_2 می‌باشند.

در تحقیق حاضر به منظور سنجش و انتخاب بهترین توزیع احتمالاتی مشترک از دو معیار اطلاعاتی آکائیکه^۲ (AIC) و بیزی^۱ (BIC) برای رتبه‌بندی توزیع‌های احتمالاتی استفاده شد (به ترتیب روابط (۳) و (۴)). این معیارها تعادل بین پیچیدگی و دقت مدل را ارزیابی کرده و

^۱ Sadeh et al

^۲ Akaike Information Criterion

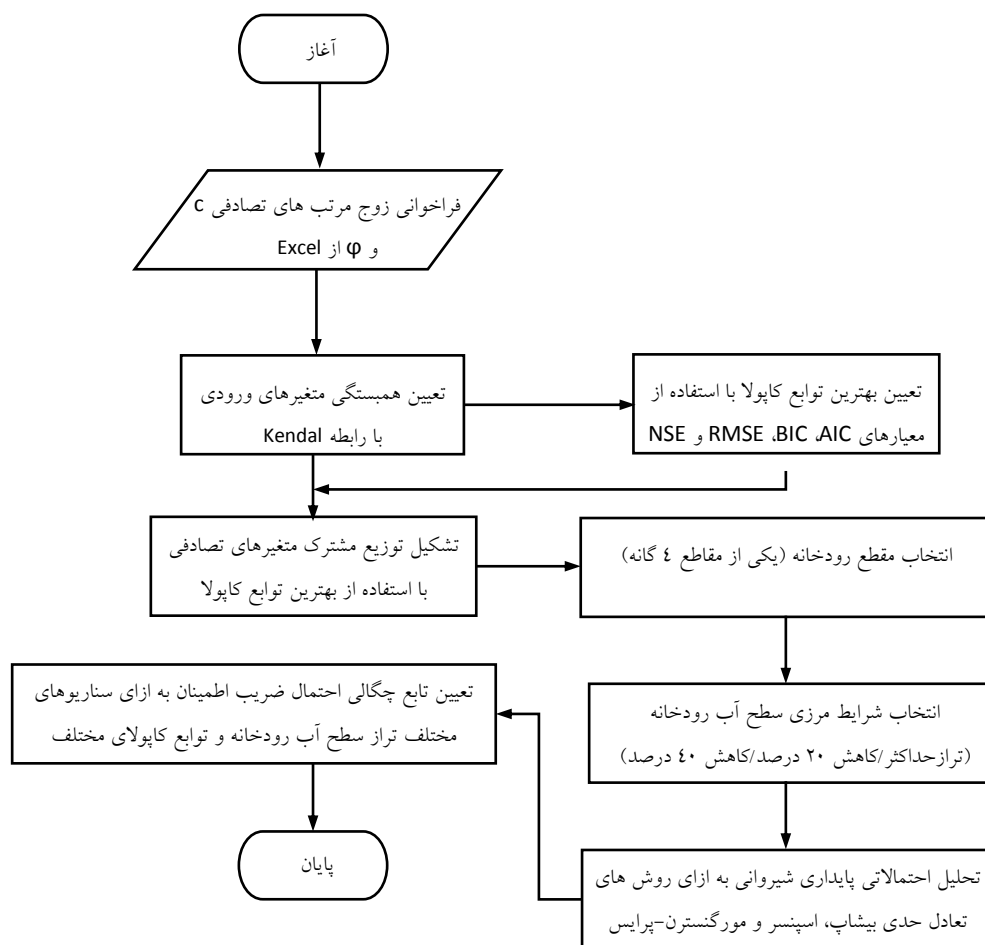
به عبارت دیگر می توان توزیع های انتخاب شده توسط این معیارها را دارای حداقل پیچیدگی به ازای دقت پیش بینی مناسب تعریف نمود (صادقیان پیرمحله، ۱۴۰۰). لازم به ذکر است هر چه مقدار معیارهای AIC و BIC به دست آمده برای یک توزیع احتمالاتی کوچک تر باشد، آن توزیع نتایج مناسب تری در مقایسه با سایر توزیع های دیگر ایجاد می کند.

$$AIC = 2k - 2\ln(\hat{L}) \quad (۳)$$

$$BIC = K\ln(n) - 2\ln(\hat{L}) \quad (۴)$$

در این روابط k تعداد پارامترهای مدل، n تعداد مشاهدات و $\hat{L}$ مقدار تابع حداکثر درست نمایی است. همچنین معیارهای رتبه بندی مذکور با استفاده از برنامه رایانه ای MvCAT (صادق و همکاران، ۲۰۱۷) محاسبه شد و نتایج خروجی آن در برنامه رایانه ای توسعه یافته در تحقیق حاضر فراخوانی گردید. شکل (۳) فلوچارت برنامه رایانه ای توسعه داده شده در تحقیق حاضر را نشان می دهد.

¹ Bayesian Information Criterion



شکل ۳. فلوچارت برنامه رایانه‌ای توسعه داده شده در تحقیق حاضر

علاوه بر دو معیار اصلی سنجش توزیع‌های احتمالاتی مشترک برازش داده شده، از دو معیار ارزیابی خطای RMSE و NSE (به ترتیب روابط (۵) و (۶)) نیز به عنوان معیارهای کمکی استفاده شد تا از صحت رتبه‌بندی حاصل از معیارهای رتبه‌بندی AIC و BIC اطمینان حاصل گردد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2}{n}} \quad (۵)$$

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (۶)$$

که در این روابط، α_i ، β_i و γ_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده، مقدار میانگین و مقادیر پیش‌بینی شده هریک از متغیرهای تصادفی بکار رفته در تحقیق است. در زمینه سناریوهای موردبررسی دو متغیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک به عنوان متغیرهای تصادفی دارای همبستگی در این تحقیق در نظر گرفته شدند. علاوه بر این تأثیر کاهش تراز سطح آب به میزان ۲۰ و ۴۰ درصد نسبت به حالت بدون تغییرات تراز سطح آب نیز موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت. توزیع‌های احتمالاتی مورد استفاده در آزمون نیکویی برازش شامل توزیع‌های نرمال و مقادیر حدی تعمیم یافته^۱ (GEV) می‌باشند.

یافته‌ها

در این بخش بر اساس روش پژوهش بکار رفته در تحقیق، نتایج تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه با کاربرد روش‌های تعادل حدی مختلف و به ازای تغییرات سطح آب رودخانه در مقاطع عرضی موردبررسی رودخانه سلمان‌رود استان گیلان ارائه می‌شود. طبق شکل (۳)، پس از اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی مصالح خاکی تشکیل دهنده جداره رودخانه، تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی با کاربرد توابع کاپولا مناسب حاصل از معیارهای AIC و BIC انجام شد. در نهایت مقادیر ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی به ازای هریک از سناریوهای موردبررسی (شامل سطح آب رودخانه، روش تعادل حدی و تابع کاپولا بکار رفته) به دست آمد و با استفاده از آزمون نیکویی برازش، توزیع‌های احتمالاتی دارای بیشترین برازش بر نتایج حاصل تعیین گردید.

تعیین همبستگی و تولید زوج مرتب متغیرهای تصادفی مؤثر بر پایداری جداره رودخانه

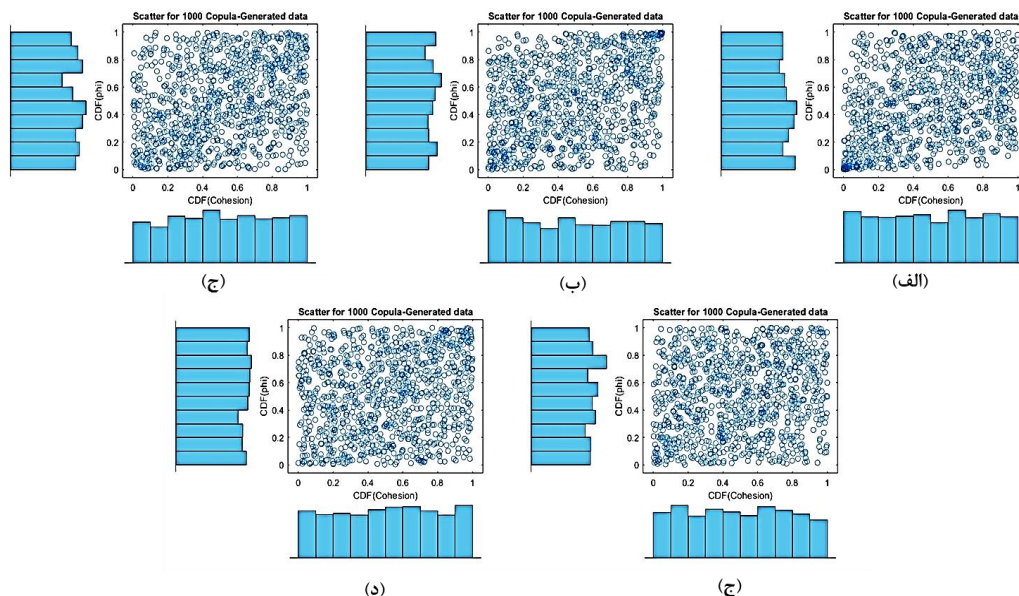
با توجه به محدودیت تعداد داده‌های مشاهداتی اولیه در مقاطع مورد مطالعه رودخانه سلمان‌رود (۱۸ زوج مرتب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برداشت شده از پژوهش ملک‌پور و همکاران (۱۳۹۷))، در تحقیق حاضر، یک برنامه رایانه‌ای برای فلوچارت ارائه شده در شکل (۳) در محیط برنامه‌نویسی MATLAB توسعه داده شد. در الگوریتم این برنامه، روشی برای رفع محدودیت تعداد داده‌های ورودی و امکان تولید داده به تعداد دلخواه (با همبستگی مشابه داده‌های اولیه) با استفاده از توابع کاپولا ارائه گردید. بر این اساس، ضریب همبستگی کندال^۲ (سن^۳، ۱۹۶۸) زوج مرتب‌های مذکور (برابر با ۰/۱۸۶۱) حاصل گردید و با کاربرد توابع کاپولای مختلف (جدول (۱))، ۱۰۰۰ زوج مرتب تصادفی تولید شد. شکل (۴) نمودارهای هیستوگرام-پراکندگی حاصل از ۱۰۰۰ زوج مرتب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک را نشان می‌دهد.

طبق شکل (۴)، بیش‌ترین همبستگی در مقادیر کم چسبندگی مربوط به تابع کاپولای کلیتون (شکل (۴-الف)) و بیش‌ترین همبستگی در مقادیر زیاد چسبندگی مربوط به تابع کاپولای گامبل (شکل (۴-ب)) است. تابع کاپولای فرانک (شکل (۴-ج)) نیز بیش‌ترین همبستگی را در مقادیر حدی ایجاد می‌کند. این در حالی است که توابع کاپولای گوسی و تی-استیودنت (به ترتیب شکل‌های (۴-ج) و (۴-د)) عملکرد یکسانی را نشان می‌دهند. با توجه به پراکندگی قابل توجه نقاط در شکل (۴)، به‌طور کلی همبستگی مثبت با مقدار کم در کلیه توابع کاپولای بکار رفته مشاهده می‌شود.

¹ Generalized Exreme Values (GEV)

² Kendall

³ Sen



شکل ۴. نمودار هیستوگرام-پراکندگی ۱۰۰۰ زوج مرتب چسبندگی-زاویه اصطکاک داخلی (الف) کاپولای کلیتون، (ب) کاپولای گامبل، (ج) کاپولای فرانک، (د) کاپولای گوسی و (ه) کاپولای تی-استیودنت

رتبه‌بندی توابع کاپولا و تعیین بهترین توزیع احتمالاتی مشترک متغیرهای تصادفی

در تحقیق حاضر برای رتبه‌بندی و تعیین بهترین توابع کاپولا از معیارهای AIC و BIC استفاده گردید. جدول (۲) نتایج رتبه‌بندی توابع کاپولای مختلف بکار رفته برای تشکیل توزیع احتمالاتی مشترک زوج مرتب‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۲. رتبه‌بندی توابع کاپولا برای دو متغیر تصادفی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک

رتبه	معیار AIC	معیار BIC
۱	فرانک	فرانک
۲	تی-استیودنت	تی-استیودنت
۳	گامبل	گامبل
۴	کلیتون	کلیتون
۵	گوسی	گوسی

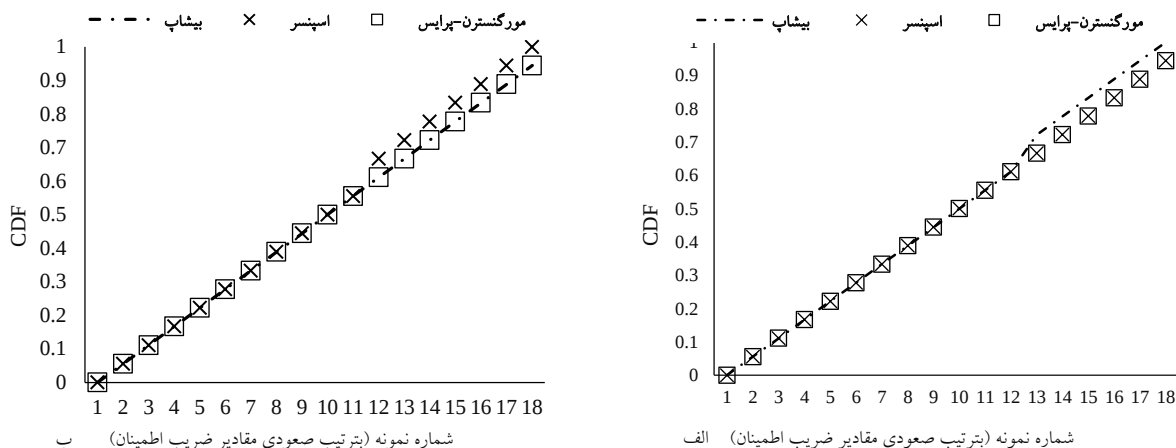
همچنین از دو ضریب ارزیابی خطا شامل RMSE و NSE به عنوان معیارهای کمکی در کنار روش های رتبه بندی توابع کاپولا استفاده گردید که نتایج ارزیابی توابع کاپولای بکار رفته با استفاده از روش های مذکور در جدول (۳) ارائه شده است. بر این اساس با توجه به دو معیار اصلی AIC و BIC، کاپولای فرانک به عنوان بهترین توزیع احتمالاتی مشترک برای زوج مرتب مذکور تعیین گردید. همچنین بر اساس روش های ارزیابی خطای بکار رفته (جدول (۳)) کاپولای تی-استیودنت و با اختلاف اندکی پس از آن کاپولای فرانک به عنوان بهترین توزیع های احتمالاتی مشترک تعیین گردیدند. در مجموع با توجه به نتایج جدول های (۲) و (۳) تابع کاپولای فرانک برای تولید زوج مرتب های تصادفی چسبندگی-زاویه اصطکاک داخلی و کاربرد در روش های تعادل حدی برای تعیین توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی جداره رودخانه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳. جذر میانگین مربعات خطا و ضریب نش-ساتکلیف به ازای توابع کاپولای مختلف بکار رفته در تحقیق حاضر

تابع کاپولا	RMSE	NSE
فرانک	۰/۱۰۸۵	۰/۹۸۸۰
تی-استیودنت	۰/۱۰۵۵	۰/۹۸۸۷
گامبل	۰/۱۱۷۷	۰/۹۸۵۹
کلیتون	۰/۱۱۸۴	۰/۹۸۵۷
گوسی	۰/۱۳۲۸	۰/۹۸۲۰

تحلیل احتمالاتی پایداری شیب خاکی جداره رودخانه بر اساس توزیع مشترک متغیرهای تصادفی

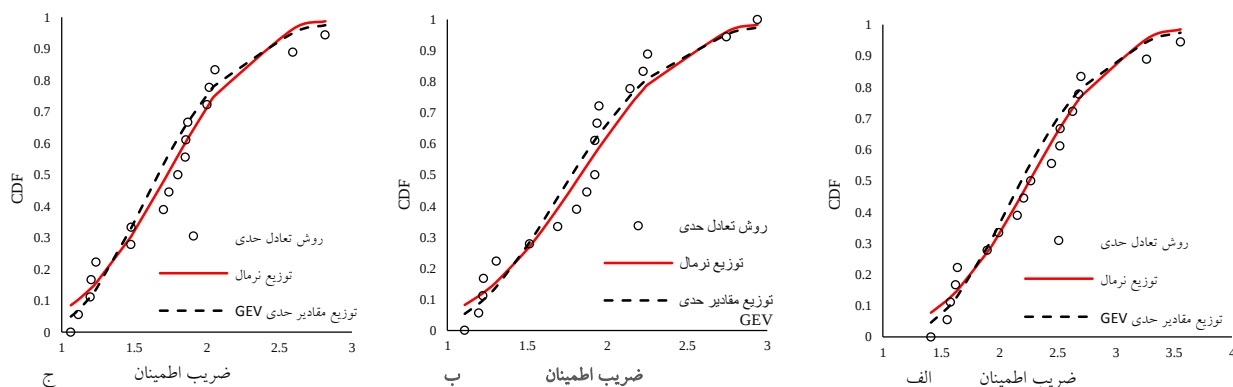
پیش از کاربرد تابع کاپولای فرانک به عنوان بهترین کاپولا جهت تولید زوج مرتب متغیرهای تصادفی، محاسبه ضریب اطمینان با مقادیر اولیه مربوط به ۱۸ نمونه خاک انجام شد. با توجه به بررسی اولیه خصوصیات هندسی و ضریب اطمینان در مقاطع مورد مطالعه، مقطع ۱ که دارای شیب خاکی بلند و کمترین ضریب اطمینان در میان مقاطع مورد مطالعه است، جهت مقایسه عملکرد روش های مختلف تعادل حدی بکار رفته در تعیین پایداری شیب انتخاب شد. شکل (۵) نتایج مقایسه عملکرد سه روش تعادل حدی را به ازای داده های ۱۸ نمونه خاک رودخانه سلمان رود به ازای دو تراز آب حداکثر (شکل (۵-الف)) و تراز آب با کاهش ۴۰ درصد (شکل (۵-الف)) نشان می دهد. با توجه به چینه بندی نمونه ها روی محور افقی به ترتیب صعودی برای مقادیر ضریب اطمینان، مشاهده می شود که به ازای کمترین مقادیر محور افقی (کمترین ضریب اطمینان) هر سه روش دارای جواب مشابه بوده و با افزایش مقادیر ضریب اطمینان، کمترین احتمال (به ازای دو تراز آب حداکثر و کاهش تراز ۴۰ درصد) توسط روش مورگنسترن-پرایس به دست می آید. از این رو، این روش که نشان دهنده شرایط بحرانی تر و روشی محافظه کارانه است در مقایسه سناریوهای دیگر تحقیق بکار گرفته شد.



شکل ۵. مقایسه ضریب اطمینان به ازای روش‌های مختلف تعادل حدی در مقطع ۱

(الف) تراز آب حداکثر (ب) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

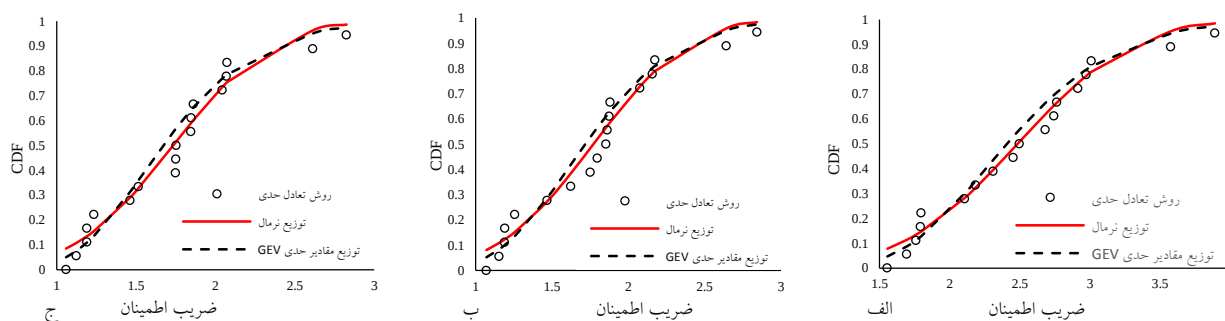
شکل (۶) توزیع احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۱ به ازای ترازهای مختلف سطح آب رودخانه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به ازای تراز آب حداکثر (شکل ۶-الف)) توزیع ضریب اطمینان به روش تعادل حدی در محدوده $۱/۴-۳/۶$ به دست می‌آید. با کاهش تراز آب به میزان ۲۰ درصد (شکل ۶-ب)) محدوده ضریب اطمینان به $۱/۱-۲/۹$ تغییر می‌کند. همچنین به ازای کاهش تراز آب به میزان ۴۰ درصد (شکل ۶-ج)) محدوده ضریب اطمینان حاصل $۱/۰۶-۲/۸$ به دست می‌آید. برای بررسی میزان برازش مدل‌های احتمالاتی دو توزیع نرمال و توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV)، بر مقادیر حاصل از روش تعادل حدی برازش داده شد. به ازای حداکثر تراز آب رودخانه حداکثر خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب $۷/۸$ و $۱۱/۴$ درصد حاصل گردید. این در حالی است که به ازای کاهش تراز آب ۲۰ درصد، خطای توزیع‌های نرمال و GEV به ترتیب $۱۳/۴$ و $۱۳/۶$ درصد و به ازای کاهش تراز آب ۴۰ درصد، به ترتیب خطای ۹ و $۱۴/۵$ درصد به دست آمد.



شکل ۶. مقایسه توزیع‌های احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۱ (مقادیر محاسبه‌شده، تابع نرمال، تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداکثر (ب) کاهش تراز آب ۲۰ درصد (ج) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

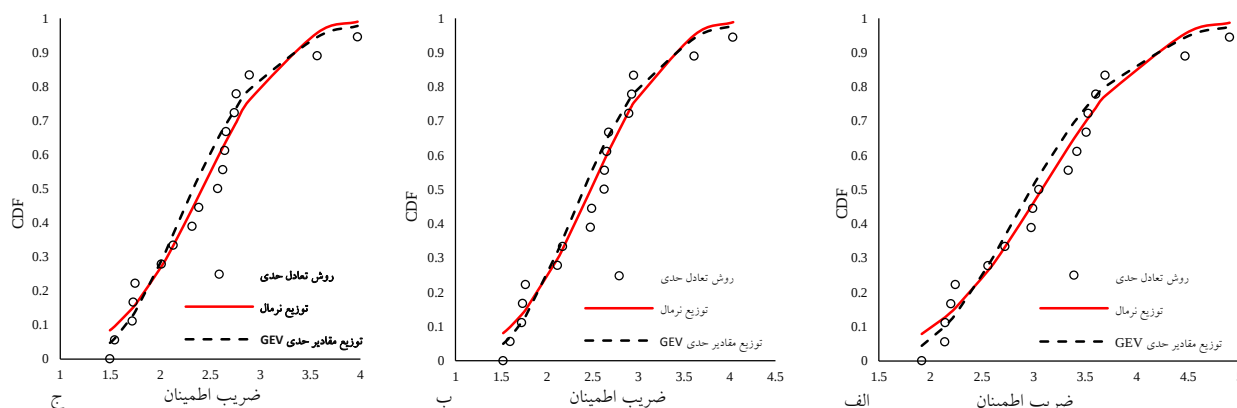
شکل (۷) توزیع احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۲ به ازای ترازهای مختلف سطح آب رودخانه را نشان می‌دهد. طبق نتایج شکل (۷-الف) به ازای تراز آب حداکثر، توزیع ضریب اطمینان به روش تعادل حدی در محدوده $۱/۵۶-۳/۹$ به دست می‌آید. با کاهش تراز آب به میزان ۲۰ درصد (شکل (۷-ب)) ضریب اطمینان در محدوده $۱/۰۷-۲/۸$ بوده و به ازای کاهش تراز آب به میزان ۴۰ درصد (شکل (۷-ج)) محدوده ضریب اطمینان حاصل $۱/۰۶-۲/۸$ است. همچنین به ازای حداکثر تراز آب رودخانه حداکثر خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب $۷/۸$ و $۱۰/۹$ درصد به دست آمد. این در حالی است که به ازای کاهش تراز آب ۲۰ درصد، خطای توزیع‌های نرمال و GEV به ترتیب $۹/۵$ و $۱۳/۹$ درصد و به ازای کاهش تراز آب ۴۰ درصد، به ترتیب خطای $۱۲/۳$ و $۱۷/۸$ درصد حاصل می‌شود.



شکل ۷. مقایسه توزیع‌های احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۲ (مقادیر محاسبه‌شده، تابع نرمال، تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداکثر (ب) کاهش تراز آب ۲۰ درصد (ج) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

شکل (۸) توزیع‌های احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۳ به ازای سه تراز سطح آب بررسی‌شده را نشان می‌دهد. نتایج شکل (۸-الف) بیانگر این است که به ازای تراز آب حداکثر، تغییرات ضریب اطمینان با روش تعادل حدی در محدوده $۱/۹-۴/۹$ حاصل می‌گردد. کاهش تراز آب به میزان ۲۰ درصد در مقطع ۳ موجب تغییرات ضریب اطمینان در محدوده $۱/۵۲-۴/۰۳$ می‌شود (شکل (۸-ب)). در این مقطع با کاهش تراز آب به میزان ۴۰ درصد (شکل (۸-ج)) تغییرات ضریب اطمینان به روش تعادل حدی در محدوده $۱/۵-۳/۹۷$ به دست آمد.

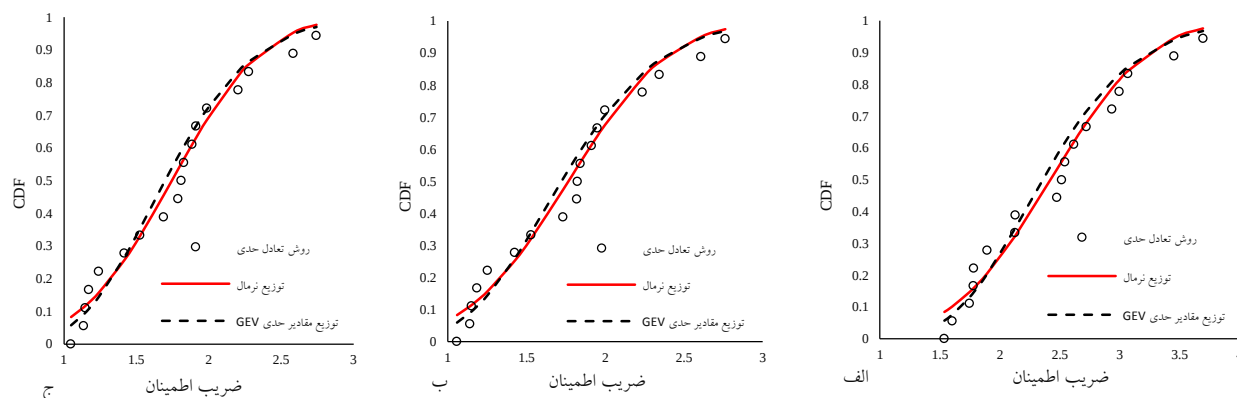


شکل ۸. مقایسه توزیع‌های احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۳ (مقادیر محاسبه‌شده، تابع نرمال، تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداکثر (ب) کاهش تراز آب ۲۰ درصد (ج) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

به ازای حداکثر تراز آب رودخانه در مقطع ۳، حداکثر خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب ۷/۸ و ۱۱/۷ درصد حاصل گردید. در مقطع ۳ به ازای کاهش تراز آب ۲۰ درصد، خطای توزیع‌های نرمال و GEV به ترتیب ۱۱ و ۱۵/۷ درصد و به ازای کاهش تراز آب ۴۰ درصد، به ترتیب خطای ۹/۳ و ۱۴/۷ درصد تعیین گردید.

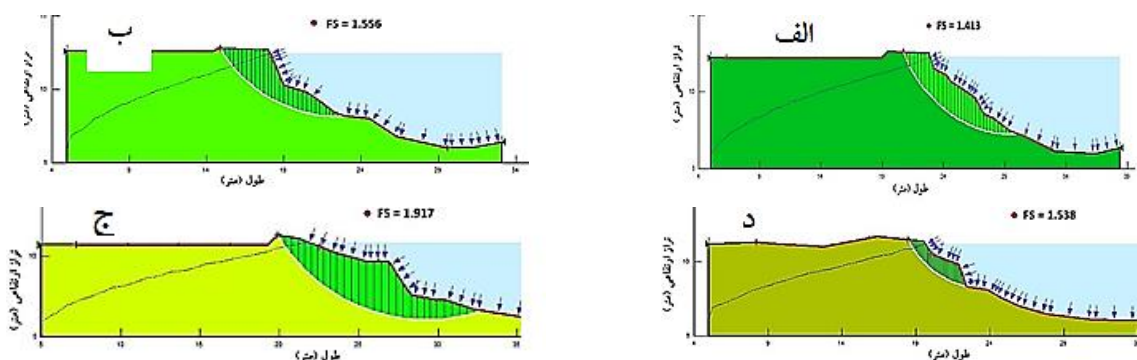
شکل (۹) توزیع‌های احتمال ضریب اطمینان در مقطع ۴ را نشان می‌دهد. طبق شکل (۹-الف)، تغییرات ضریب اطمینان به روش تعادل حدی به ازای تراز آب حداکثر در محدوده ۳/۷-۱/۵۴ به دست آمد. کاهش تراز آب به میزان ۲۰ درصد در این مقطع موجب کاهش مقادیر ضریب اطمینان به ۲/۷-۱/۱ می‌شود (شکل (۹-ب)). در این مقطع با کاهش تراز آب به میزان ۴۰ درصد (شکل (۹-ج)) محدوده تغییرات ضریب اطمینان ۲/۷-۱/۰۵ است.



شکل ۹. مقایسه توزیع‌های احتمالاتی ضریب اطمینان در مقطع ۴ (مقادیر محاسبه‌شده، تابع نرمال، تابع مقادیر حدی GEV)

(الف) تراز آب حداکثر (ب) کاهش تراز آب ۲۰ درصد (ج) کاهش تراز آب ۴۰ درصد

به ازای حداکثر تراز آب رودخانه در مقطع ۴، حداکثر خطای توزیع نرمال و GEV به ترتیب ۸/۸ و ۱۳/۲ درصد به دست آمد. در این مقطع، به ازای کاهش تراز آب ۲۰ درصد، خطای توزیع‌های نرمال و GEV به ترتیب ۹/۵ و ۱۳/۱ درصد و به ازای کاهش تراز آب ۴۰ درصد، به ترتیب خطای ۹/۱ و ۱۳/۰۲ درصد محاسبه گردید. در مرحله بعد بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار GeoStudio سطوح لغزش بحرانی به همراه ضریب اطمینان در چهار مقطع رودخانه مورد مطالعه به دست آمد که نتایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰ - سطوح لغزش بحرانی در چهار مقطع مورد مطالعه (الف) مقطع ۱، (ب) مقطع ۲، (ج) مقطع ۳، (د) مقطع ۴

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر چهار مقطع مقادیر ضریب اطمینان بر روی سطح لغزش بحرانی بزرگ‌تر از یک بوده و تغییرات آن از ۱/۴۱۳ در مقطع اول (شکل (۱۰-الف)) تا ۱/۹۱۷ در مقطع سوم (شکل (۱۰-ج)) است که بیانگر عدم وقوع لغزش به ازای سناریوهای موردبررسی در هر چهار مقطع است. همچنین نکته قابل‌ملاحظه این است که رابطه معکوس میان مقدار ضریب اطمینان و زاویه شیب خاکی مشاهده می‌شود. از این‌رو بیشترین مقادیر ضریب اطمینان در شکل‌های (۱۰-ج) و (۱۰-د) که داری کمترین شیب جداره می‌باشند به دست می‌آید. علاوه بر این، در شکل (۱۰-ج) به ازای بیشترین ضریب اطمینان، بزرگ‌ترین دایره لغزش در میان مقاطع مختلف مشاهده می‌شود.

بحث

در تحقیق حاضر، با توجه به اینکه در صورت تخریب شیب خاکی جداره رودخانه، ورود رسوبات و کاهش قابلیت عبور جریان در آبراهه محتمل است، پایداری این شیب‌ها در قالب تحلیل احتمالاتی با اعمال همبستگی متغیرهای تصادفی (با استفاده از توابع کاپولا) موردبررسی قرار گرفت. بر این اساس یک مطالعه موردی در رودخانه سلمان‌رود استان گیلان در چهار مقطع (ایستگاه) مختلف و با توسعه یک برنامه رایانه‌ای در محیط MATLAB انجام شد. زوج مرتب‌های متغیرهای تصادفی تولیدشده در برنامه رایانه‌ای (زاویه اصطکاک داخلی-چسبندگی خاک) به نرم‌افزار GeoStudio منتقل گردید و پایداری شیب با استفاده از روش‌های تعادل حدی مختلف تحلیل شد. سپس مجدداً برنامه رایانه‌ای توسعه‌یافته در تحقیق جهت تعیین توزیع‌های احتمال ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی و تعیین مدل‌های احتمالاتی قابل‌برازش بر آن‌ها مورداستفاده قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که تابع کاپولا فرانک و روش تعادل حدی مورگنسترن-پرایس ابزار مناسبی در انجام تحلیل احتمالاتی به‌منظور تعیین توزیع احتمال ضریب اطمینان پایداری شیب خاکی جداره رودخانه می‌باشند. در این زمینه، عملکرد روش مورگنسترن-پرایس نسبت به روش‌های تعادل حدی دیگر تحت تأثیر تغییرات سطح آب رودخانه نبوده و همواره نتایج قابل‌قبولی ایجاد می‌نماید. همچنین تابع توزیع نرمال در مقایسه با تابع توزیع مقادیر حدی GEV برازش بهتری بر توزیع‌های احتمال ضریب اطمینان حاصل از روش‌های تعادل حدی مختلف دارد. سه روش تعادل حدی بکار رفته (بیشاپ، اسپنسر و مورگنسترن-پرایس) در مقادیر کم ضریب اطمینان (دارای احتمال تجمعی CDF کمتر) نتایج مشابهی ارائه می‌نمایند. در توزیع‌های احتمال ضریب اطمینان به‌دست‌آمده، با کاهش تراز آب در رودخانه، خطای ناشی از برازش هر دو توزیع نرمال و GEV بر توزیع احتمال ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش سطح آب در رودخانه، مقادیر ضریب اطمینان کاهش می‌یابد که بیشترین نرخ کاهش ضریب اطمینان در تغییر از تراز سطح آب حداکثر به ازای ۲۰ درصد کاهش سطح آب رخ‌داده و کاهش ضریب اطمینان به ازای کاهش سطح آب از ۲۰ به ۴۰ درصد با نرخی کمتر ایجاد می‌شود. در انتها جهت ادامه تحقیق پیشنهاد می‌شود که تأثیر سرعت تغییرات سطح آب ناشی از ورود هیدرو گراف‌های سیلاب به رودخانه بر تحلیل احتمالاتی پایداری شیب جداره خاکی موردبررسی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

در انتها، نویسندگان ضمن تشکر از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه گیلان، از حمایت انجام‌شده جهت پیشبرد این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی خود را ابراز می‌نمایند.

منابع

- بخشنده امنیه، حسن، طایی سمیرمی، سعید، و رحیمی، مرتضی. (۱۳۹۱). تحلیل پایداری شیب‌های سنگی مشرف به نیروگاه سد سردشت با در نظر گرفتن اثر کلیواژ توده سنگ. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۵(۲و۱)، ۱۷-۲۶.
https://www.jiraeg.ir/article_68308.html
- روح بخش سیکارودی، حسینعلی. (۱۳۷۷). بررسی هیدروکلیمای حوضه آبریز رودخانه‌ی شلمان‌رود (سیکارود) با تأکید بر سیل‌خیزی منطقه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. <https://elmnet.ir/doc/10769692-5135>
- رهبر، داوود، و محبوبی اردکانی، احمدرضا. (۱۳۹۱). ارزیابی پایداری شیب‌ها با استفاده از روش تحلیل تغییر شکل گسسته DDA و روندیابی موقعیت خط لغزش. هفتمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، زاهدان، ایران. <https://civilica.com/doc/206591>
- سعید پناه، ایرج، و آقازاده قره باغ، بهمن. (۱۳۹۶). بررسی پایداری شیروانی بالادست سدهای خاکی در حالت تخلیه سریع مخزن (مطالعه موردی سد شهرچای). مجله پژوهش آب ایران، ۱۱(۳)، ۳۷-۴۷. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10553.html
- سلماسی، فرزین، حسین‌زاده دلیر، علی، و نوروزی سرکارآباد، رضا. (۱۳۹۸). بررسی عملکرد زهکشهای افقی در افزایش پایداری شیبهای خاکی در بارندگیهای شدید با شبیه‌سازی عددی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۱(۳)، ۴۹۱-۵۰۲.
<http://doi.org/10.22060/CEEJ.2018.13739.5468>
- سنائی‌راد، علی، و جلالوندی، مهدی. (۱۳۹۴). استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی طول مسلح کننده های شیب های خاکی مسلح. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۷(۳)، ۵۳-۶۰. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.556>
- سنائی‌راد، علی، و کاشانی، علیرضا. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی پایداری شیروانی‌های خاکی با فرض سطح لغزش غیردایره ای با استفاده از الگوریتم های بهینه‌سازی رقابت استعماری. کرم رشتاب و بازیخت فلزات، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۸(۲)، ۲۰۷-۲۱۶.
<https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.656>
- صادقیان پیرمحله، نیما. (۱۴۰۰). تحلیل احتمالاتی پدیده فرسایش درونی در سد های خاکی با کاربرد توابع کاپولا، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان. گیلان، ایران. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9684bd4d1e3f7773a32d4f700ccc342e>
- ملک‌پور، امیر، نیکنام یوسفی، حامد، و اسمعیلی ورکی، مهدی. (۱۳۹۷). تحلیل پایداری شیب پس از کاهش سطح آب در مقطع رودخانه با بررسی کرنش و روش احتمالاتی مونت کارلو. نشریه دانش آب و خاک، ۲۸(۲)، ۱-۱۳. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_7819.html
- نصیرزاده قورچی، رضا، امینی، مهدی، و معاریان، حسین. (۱۳۹۸). بررسی پایداری شیب‌ها به کمک نتایج تحلیل‌های احتمالاتی (مثال موردی: شیب مشرف به سرریز آزاد سد کوار شیراز). نشریه زمین شناسی مهندسی، ۱۳(۲)، ۳۷۱-۳۹۸. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.2.371>
- ملک پور اسطلکی، امیر، صادقیان، نیما، و فرخی، محمد جواد. (۱۴۰۲). تحلیل احتمالاتی دو متغیره تغییرات زمانی فشار آب منفذی در حین فرآیند تحکیم پی سازه. مجله تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، ۲۴(۹۰)، ۹۱-۱۱۳.
<https://doi.org/10.22092/IDSER.2023.363197.1551>
- میراکبری، مریم، مصباح‌زاده، طیبیه، و محسنی ساروی، محسن. (۱۳۹۷). تحلیل دومتغیره دوره بازگشت توفان گرد و غبار براساس تئوری کاپولا در استان یزد. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۲(۴۰)، ۱۱۵-۱۲۳.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1397.12.40.13.0>

References

- Bakhshndeh Amieh, H., Taei Semiromi, S., & Rahimi, M. (2012). Stability analysis of large rock slopes for Sardasht dam hydraulic power plant trenches considering rock cleavage. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 5(1 & 2), 17-26. https://www.jiraeg.ir/article_68308.html [In Persian]
- Burman, A., Acharya, S.P., Sahay, R. R. & Maity, D. (2015). A comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method. *Asian Journal of Civil Engineering* 16(4), 467-492. <https://www.researchgate.net/publication/274076368>
- Griffiths, D. V., Huang, J., & Fenton, G. A. (2015). Probabilistic slope stability analysis using RFEM with non-stationary random fields. In *Geotechnical safety and risk*, IOS Press ,704-709. <https://www.researchgate.net/publication/313575886>
- Kalatehjari, R., & Ali, N. (2013). A review of three-dimensional slope stability analyses based on limit equilibrium method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 119-134. <https://www.researchgate.net/publication/236174492>
- Lane, P. A., & Griffiths, D. V. (2000). Assessment of stability of slopes under drawdown conditions. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(5), 443-450. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(443\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(443))
- Malekpour, A., Niknam Yousefi, H., & Esmaili Varaki, M. (2018). Slope stability analysis after decline of water level at the river meander considering strain and Monte-Carlo probabilistic method. *Water and Soil Science*, 28(2), 1-13. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_7819.html [In Persian]
- Malekpour Estalaki, A., Sadeghian, N., & Farrokhi, M. J. (2023). Bivariate probabilistic analysis of temporal variations of pore water pressure during consolidation process in structural foundation. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 24(90), 91-113. <https://doi.org/10.22092/IDSER.2023.363197.1551> [In Persian]
- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., & Mohseni saravi, M. (2018). Bivariate analysis of return period of dust storm based on copula theory in Yazd province. *Jwmseir*, 12(40), 115-124. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1397.12.40.13.0> [In Persian]
- Nassirzadeh Goorchi, R., Amini, M., & Memarian H. (2019). Assessment of slope stabilization based on probabilistic analysis results (case study: slope facing spillway of Kavar Dam in Shiraz). *Journal of Engineering Geology*, 13(2), 371-398. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.2.371> [In Persian]
- Parker, C., Simon, A. R., & Thome, R. (2008). The effect of variability in bank material peroperties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. *Geomorphology*, 101(4), 533-543. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.007>
- Rahbar, D. & Mahboubi Ardakani. (2012). Evaluating the stability of the slopes using the DDA discrete deformation analysis method and trending the position of the slip line. 7th National Civil Eng. Conference, Zahedan, Iran. <https://civilica.com/doc/206591> [In Persian]
- Roohbakhsh Sikaroody, H. (1998). Investigating the hydroclimate of the Shalman River (Sikaroud) catchment area with an emphasis on flooding in the area. MSc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. <https://elmnet.ir/doc/10769692-5135> [In Persian]

- Sadegh, M., Rango, E., & AghaKouchak, A. (2017). Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework. *Water Resources Research*, 53(6), 5166-5183. <https://doi.org/10.1002/2016WR020242>
- Sadeghian, N. (2021). Probability analysis of internal erosion phenomenon in earthen dams using copula functions. MSc. Thesis, University of Gilan, Gilan, Iran. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9684bd4d1e3f7773a32d4f700ccc342e>
- Saeedpanah, I., & Aghazadeh Garebaqh, B. (2017). Evaluation of the Upstream Slope Stability in Earth Dams under Rapid Drawdown Conditions (Case Study Shaharchay Dam). *Iranian Water Researches Journal*, 11(3), 37-47. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10553.html [In Persian]
- Salmasi, F., Dalir, A. H., & Sarkarabad, R. N. (2019). Investigation of the performance of horizontal drains in increasing slope stability in intense rainfall conditions by numerical simulation. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(3), 491-502. <http://doi.org/10.22060/CEEJ.2018.13739.5468> [In Persian]
- Sanaeirad, A., & Jalalvandi, M. (2015). Using genetic algorithm for design length of reinforcers in slope reinforced. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 47(3), 55-62. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.556> [In Persian]
- Sanaeirad, A., & Kashani, A. (2016). Slope stability optimization with non-circular slip surface and using firefly algorithm, simulate annealing and imperialistic competitive algorithm. *Amirkabir J Sci Res Civ Environ Eng (ASJR-CEE)*, 48(2), 207-216. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.656> [In Persian]
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Siacara, A. T., Beck, A. T., & Futai, M. M. (2020). Reliability anlysis of rapid drawdown of an earth dam using direct coupling, *Computers and Geotechnics*, 118, 103336. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103336>
- Sklar, A. (1973). Random variables, joint distribution functions, and copulas. *Kybernetika*, 9(6), 449-460. <https://www.kybernetika.cz/content/1973/6/449/paper.pdf>
- Wu, D., Wang, Y., Zhang, F., & Qiu, Y. (2021). Influences of pore-water pressure on slope stability considering strength nonlinearity. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/8823899>



Investigation of hydraulic conditions and determination of the discharge coefficient of the combined structure of semi-circular-rectangular weir and sliding gate using a laboratory model

Sanaz Mesbah Gharehtapeh¹ , Hossein Khozaymehnezhad^{2✉} , Mehdi Dastourani³

¹ M.Sc. Student in Water structures, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran. E-mail: mesbahsanaz@gmail.com

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: Hkhozaymeh@birjand.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: mdastourani@birjand.ac.ir

ABSTRACT

The present study was carried out to determine the discharge coefficient of a combined structure of a semi-circular-rectangular weir and a sliding gate in a rectangular laboratory flume with a width of 0.3, a length of 10 and height of meters. The experiments were carried out in two conditions: one with a constant gate opening and varying flow rates, and the other with varying gate openings and constant flow rates, at slopes of 0.002 and 0.004. At the end, the discharge coefficient is obtained with the existing relations. Furthermore, using Buckingham theory, a general relationship was developed to investigate the effect of various dimensionless parameters on the flow coefficient. The results of the experiments show that the discharge coefficient first decreases and then increases with the increase of the Y/D parameter. Also, no significant changes have been made in the discharge coefficient by changing the slope of the floor. And with the reduction of the H_g/D parameter, the discharge coefficient is almost fixed and tends to a constant number of 0.74. The comparison of the results of the present study with those of other similar researches indicates a consistency in the findings.

Keywords: Sliding gate, Combined weir, water transfer channel and flow measurement.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 11 September 2023 Revised: 17 November 2023 Accepted: 23 December 2023 ePublished: 23 December 2023

1. Introduction

The overflow structure is used to organize and control the water level in open canals and relaxation ponds. Composite sharp edge overflows are designed in different ways and are made up of several openings in such a way that when there is a shortage of water, The flow only passes through the main section of the spillway and more discharge is created on it, and during the flood, with the increase of the discharge, the upper section also starts working, and as a result, it prevents the return of water and the increase of the water level upstream of the spillway. In this situation, the measurement is done with more accuracy (Boss, 1988). Due to the ability to control the water level and the ease of construction and measurement of flow intensity, sharp edge spillways and sliding gates have been widely investigated. On the other hand, most of the overflows in their upstream cause the formation of a region with relatively still water, which creates favorable conditions for sediments and waste materials to settle in the water, which is considered one of the defects of this structure. With the combination of overflow and gate, the difficulties and disadvantages of using each one alone can be reduced so that materials with sedimentation properties are easily emptied from the gate part and mineral and floating materials are emptied from the overflow (Negm et al, 2002).

2. Methodology

The experiments of this research were carried out in the hydraulic laboratory channel of the Faculty of Agriculture of Birjand University. The channel used in this experiment has a rectangular cross section with a width of 0.3 meters, a length of 10 meters, a height of 0.5 meters and a maximum flow rate of 30 liters per second. The current research was carried out in the form of establishing flow with constant opening of the gate and different flow rates, as well as establishing flow with opening of different gates and constant flow rate in two slopes of 0.004 and 0.002 to determine the flow coefficient.

In order to carry out the present experiment, a semi-circular-rectangular overflow structure and a sliding gate is made of galvanized sheet and installed in the test section. Figure (1) shows a simple schematic of the combined flow measurement structure. The characteristics of semi-circular-rectangular overflow and sliding gate are as follows.

Overall height (H): 30 cm

Overall width (B): 30 cm

Length of rectangular overflow crown (W_{rw}): 19.7 cm

Semicircular overflow diameter (d): 10 cm

Rectangular overflow height (H_{rw}): 10 cm

The height of the semi-circular overflow (radius) (H_{cw}): 5 cm

Maximum gate opening (H_g): 5.7 cm

Gate width (Wg): 14.7 cm

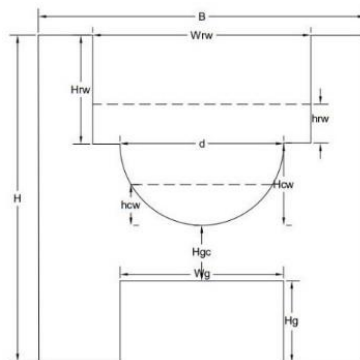


Figure 1. A simple schematic of the composite structure and geometric parameters

2.1. Dimensional analysis

By including all effective parameters and dimensional analysis by Buckingham's method and considering ρ , v and y as repeated variables, the general equation of dimensionless parameters is obtained as follows after simplification.

$$f_3\left(\frac{H_g}{D}, \frac{y}{D}, \frac{h_{rw}}{D}, \frac{h_{cw}}{D}, F_r, S\right) \quad (1)$$

In the present study, dimensionless parameters H_g/D , y/D and S were investigated.

3. Results and discussion

According to the collected data and the hydraulic and geometrical parameters of the structure, the discharge coefficient of the structure was investigated. The flow coefficient of the combined structure was calculated in two states of constant gate and different flow rates, and constant flow rate and different gates.

Also, in order to control some of the experiments, the discharge coefficient of the combined structure was investigated in two slopes of 0.004 and 0.002. In all these researches, the discharge coefficient of the combined structure was between 0.6 and 0.8.

4. Conclusion

The test results show that the discharge coefficient depends on whether the gate is submerged or not and the height of the upstream water. Also, the flow coefficient in the conditions of water passing through the gate decreases with the increase of Y/D parameter, and the flow coefficient increases with the increase of Y/D when water passes through the gate and semi-circular-rectangular overflow. By changing the slope of the floor, the discharge coefficient has not changed significantly and with the decrease of H_g/D , the discharge coefficient is almost fixed and tends to a constant number of 0.74.

5. References

- Boss, M. G. (1988). Discharge Measurement Structures. ILRI Pub. Wageningen, USA.
- Negm, A.-A. M., Al-Brahim, A. M., & Alhamid, A. A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 359–365. <https://doi.org/10.1080/00221680209499950>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors thank Birjand University for providing the facilities to conduct the laboratory experiments of this paper

Cite this article: Mesbah Gharehtapeh, S., Khozaymehnezhad, H., & Dastourani, M. (2023). Determining the discharge coefficient in the combined model of rectangular semi-circular spillway and sliding gate, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 61-79. DOI: 10.22126/atwe.2024.10111.1098



بررسی شرایط هیدرولیکی و تعیین ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز نیم دایره ای-مستطیلی و دریچه کشویی با استفاده از مدل آزمایشگاهی

ساناز مصباح قره تپه^۱، حسین خزیمه نژاد^۲✉، مهدی دستورانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: mesbahsanaz@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: Hkhozeymeh@birjand.ir

^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: mdastourani@birjand.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر به منظور تعیین ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز نیم دایره ای-مستطیلی و دریچه کشویی در یک کانال آزمایشگاهی مستطیلی به عرض ۰/۳، طول ۱۰ متر و عرض ۰/۵ متر انجام شد. آزمایش ها در دو وضعیت، برقراری جریان با بازشدگی ثابت دریچه و دبی های مختلف و برقراری جریان با بازشدگی های مختلف دریچه و دبی های ثابت در دو شیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴ انجام شد. در انتها با استفاده از روابط موجود، ضریب دبی به دست آمد. همچنین با استفاده از تئوری باکینگهام یک رابطه کلی جهت بررسی تأثیر پارامترهای بی بعد مختلف بر ضریب دبی جریان توسعه داده شد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که ضریب دبی با افزایش پارامتر Y/D ، ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. همچنین با تغییر شیب کف، تغییرات قابل ملاحظه ای در ضریب دبی ایجاد نشده است و با کاهش پارامتر Hg/D ، ضریب دبی تقریباً ثابت شده و به عدد ثابت ۰/۷۴ میل می کند. بررسی نتایج پژوهش حاضر با نتایج سایر پژوهش هایی مشابه، نشان از تطابق نتایج دارند.

واژه های کلیدی: دریچه کشویی، سرریز مرکب، کانال انتقال آب، اندازه گیری جریان.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۰ شهریور ۱۴۰۲ اصلاح: ۲۶ آبان ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۲ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۲ دی ۱۴۰۲

استناد: مصباح قره تپه، س.، خزیمه نژاد، حسین، و دستورانی، م. (۱۴۰۲). بررسی شرایط هیدرولیکی و تعیین ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز نیم دایره ای-مستطیلی و دریچه کشویی با استفاده از مدل آزمایشگاهی، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۴)، ۷۹-۶۱ شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10111.1098



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

استفاده از سرریزها، فلوم‌ها و دریچه‌ها از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری دبی جریان است. از اصلی‌ترین دلایل استفاده از سرریزها به‌عنوان وسایل اندازه‌گیری جریان، داشتن رابطه دبی-اشل ساده است. سرریزها به علت دقت اندازه‌گیری دبی در شرایط متفاوت جریان شکل-های مختلفی دارند که هر یک کاربرد ویژه خود را دارد. در کانال‌های روباز اندازه‌گیری دبی جریان از مهم‌ترین کاربرد سرریزها است. لذا با توجه به حساس بودن این کار، باید سازه‌های مطمئن و با بازدهی بالا انتخاب شود. سرریزهای لبه تیز مرکب اکثراً برای محاسبه دامنه‌ای گسترده از جریان استفاده و با دقت بیشتری در کانال‌های روباز به کار گرفته می‌شوند. سرریزهای لبه تیز مرکب به شکل‌های مختلف طراحی و از چندین دهانه تشکیل شده‌اند به نحوی که در زمان کم‌آبی، جریان فقط از روی مقطع اصلی سرریز عبور و دبی بیشتری روی آن ایجاد می‌شود و در هنگام سیلاب با افزایش دبی، مقطع بالایی هم شروع به کار می‌کند و در نتیجه مانع برگشت آب و افزایش سطح آب بالادست سرریز می‌شود که در این شرایط، اندازه‌گیری با دقت بیشتری صورت می‌گیرد (باس^۱، ۱۹۸۸). به دلیل قابلیت کنترل سطح آب و سهولت ساخت و اندازه‌گیری شدت جریان در سرریزهای لبه‌تیز و دریچه‌های کشویی، بررسی‌های وسیعی روی آن‌ها صورت گرفته است. از طرف دیگر اکثر سرریزها در بالادست خود سبب تشکیل منطقه‌ای دارای آب نسبتاً ساکن می‌شوند که این امر موجب ایجاد شرایطی مساعد برای ته‌نشینی رسوبات و مواد زائد در آب می‌گردد که از عیب‌های این سازه محسوب می‌شود. با ترکیب سرریز و دریچه می‌توان دشواری‌ها و معایب استفاده جداگانه هر یک از این سازه‌ها به‌تنهایی را کم کرد به نحوی که مواد با خاصیت ته‌نشینی به‌آسانی از بخش دریچه خارج و مواد معدنی و شناور به گونه مناسب‌تری از بخش سرریز تخلیه شوند (نجم و همکاران^۲، ۲۰۰۲).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

برگمن^۳ (۱۹۶۳) در مورد سرریزهای مرکب با فشردگی جانبی، اولین مطالعات تجربی خود را انجام داد. وی ظرفیت جریان روی سه مدل سرریز لبه‌تیز مرکب با فشردگی جانبی در یک کانال را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج به‌صورت یک معادله تجربی، به‌منظور ارزیابی دبی جریان برحسب بار هیدرولیکی نسبت به دهانه مثلی، بار هیدرولیکی نسبت به تاج افقی دهانه مستطیلی و عرض دهانه مستطیلی سرریز ارائه شد. پیرادین و همکاران^۴ (۲۰۰۷) بر روی سرریز لبه تیز مرکب مثلی- مثلی پژوهشی انجام دادند و برای محاسبه دبی جریان معادله‌ای ارائه کردند. یاسی و عباسپور^۵ (۲۰۰۵) با بررسی جریان در سرریز لبه‌تیز مرکب مثلی-مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه در حالت فشردگی و بدون فشردگی جانبی به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع سطح آب روی سرریز و در محدوده تداخل جریان در مرز سرریزهای مثلی و مستطیلی، ضریب دبی جریان به‌طور متناوب افزایش و کاهش می‌یابد. جان و همکاران^۶ (۲۰۰۶) طی پژوهشی بر روی چهار نوع سرریز لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی، مستطیلی-مستطیلی، مثلی-مستطیلی، مثلی-مستطیلی، مثلی-مستطیلی، مثلی-مستطیلی و دوزنقه‌ای و بهره‌گیری از مجموع دبی سرریزهای ساده با ساختار خطی به‌عنوان دبی کل سرریز مرکب به این نتیجه رسیدند که ناپیوستگی در ناحیه دو سرریز، در رابطه دبی-اشل این‌گونه سرریزها وجود دارد. ظهیری^۷ (۲۰۱۱) توانست توزیع عرضی سرعت بر روی سرریز مرکب، به کمک ایده شباهت هیدرولیک کانال‌های مرکب با هیدرولیک سرریزهای مرکب و مدل ریاضی شبه دوبعدی را حل کند. او با محاسبه دبی جریان در سرریزهای مرکب مختلف و مقایسه آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی، به این نتیجه رسید که مدل پیشنهادی، دقت بیشتری در تخمین دبی نسبت به روابط متداول سرریزهای لبه تیز دارد. حسینی و همکاران (۱۳۹۰) طی پژوهشی بر روی جریان هم‌زمان از روی سرریز لبه تیز بدون فشردگی و زیر دریچه کشویی در کانال دایره‌ای به این نتیجه رسیدند که ضریب

¹ Boss² Negm et al³ Bergmann⁴ Piratheepan et al⁵ Yasi & Abbaspour⁶ Jan et al⁷ Zahiri

دبی با زیاد شدن میزان گشودگی دریچه در دبی ثابت، زیاد می‌شود. اسماعیلی و فتحی مقدم (۱۳۸۵) طی پژوهشی بر روی سیستم ترکیبی سرریز مستطیلی-دریچه در کانال‌های دایره‌ای آب و فاضلاب به این نتیجه رسیدند که ضریب شدت جریان سرریز-دریچه در مقابل نسبت‌های بی‌بعد پارامترهای هیدرولیکی از رویه معینی پیروی نمی‌کند. رضویان و همکاران (۱۳۸۶) طی پژوهشی بر روی سرریز مستطیلی با فشردگی جانبی و دریچه مستطیلی بدون فشردگی، خصوصیات جریان را مورد بررسی قرار دادند و ضریب دبی با خطای متوسط ۴ درصد بیان کردند. مارتینز و همکاران^۱ (۲۰۰۵) وضعیت جریان را بر روی سرریز لبه تیز مثلثی - مثلثی بررسی کردند و با اثبات پیوستگی رابطه دبی-اشل روی این سرریز در تمامی عمق‌های جریان، آن را برای استفاده در حوضه‌های کوهستانی و سدهای رسوب‌گیر پیشنهاد دادند. جلیل و سرهان^۲ (۲۰۱۳) به بررسی ضریب جریان در مدل ترکیبی سرریز-دریچه در حالت قرارگیری مورب در آبراهه پرداختند. آنان نتیجه گرفتند با کاهش زاویه قرارگیری، ضریب دبی کاهش می‌یابد، اما به علت افزایش طول سازه، میزان دبی عبوری افزایش می‌یابد. آلتین-ساکاریا^۳ و کوک پینار^۴ (۲۰۱۳) طی پژوهشی بر روی سیستم ترکیبی سرریز-دریچه مستطیلی به این نتیجه رسیدند که می‌توان برای محاسبه دبی عبوری، رابطه‌ای با استفاده از روش بهینه-سازی به دست آورد. حسان و همکاران^۵ (۲۰۱۵) دبی جریان عبوری آب را در سرریز مرکب و دریچه بررسی و ارزیابی کردند. در این زمینه سرریز مرکب مستطیلی و دوزنقه‌ای با هر یک از دریچه‌های مستطیلی، قوسی و مثلثی ترکیب شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با افزایش ارتفاع آب روی سرریز مرکب، دبی جریان عبوری افزایش می‌یابد. افزایش پهنای قسمت‌های مختلف سرریز مرکب و همچنین افزایش فاصله میان سرریز مرکب و دریچه، میزان دبی جریان عبوری را کاهش می‌دهد. خاسف و عباس^۶ (۲۰۱۳) با بررسی ضریب دبی در مدل سرریز مرکب مستطیلی-دوزنقه‌ای-مستطیلی با دریچه نیم‌دایره‌ای در آزمایشگاه نشان دادند که ضریب دبی با افزایش دبی و ارتفاع آب در بالادست سرریز افزایش و با افزایش فاصله مسدود بین سرریز و دریچه کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش ارتفاع سرریز مستطیلی پایینی در فاصله ثابت بین سرریز مستطیلی و دریچه، میزان ضریب دبی کاهش می‌یابد. اسعدی‌نیا و همکاران (۱۴۰۳) طی پژوهشی بر روی سیستم ترکیبی سرریز مثلثی-مستطیلی و دریچه به این نتیجه رسیدند که با افزایش $\frac{y}{D}$ (عمق بی‌بعد جریان در بالادست سازه) ضریب دبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و به سمت ۰/۷ میل می‌کند. بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد؛ تاکنون پژوهشی در مورد محاسبه ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز مرکب نیم‌دایره‌ای-مستطیلی و دریچه کشویی صورت نگرفته است؛ بنابراین در این پژوهش با استفاده از انجام آزمایش، ضریب دبی جریان در شرایط متفاوت هیدرولیکی تعیین گردید.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش

آزمایش‌های این پژوهش در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام شده است. کانال مورد استفاده در این پژوهش، شیب پذیر و دارای سطح مقطع مستطیلی است. این کانال با عرض ۰/۳ متر، طول ۱۰ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و حداکثر دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، دارای دبی‌سنج الکترومغناطیس است. دیوارهای کانال از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر که امکان رؤیت جریان را فراهم می‌کند؛ تشکیل شده است. در شکل (۱) نمای کلی کانال به نمایش گذاشته شده است.

¹ Martinez et al

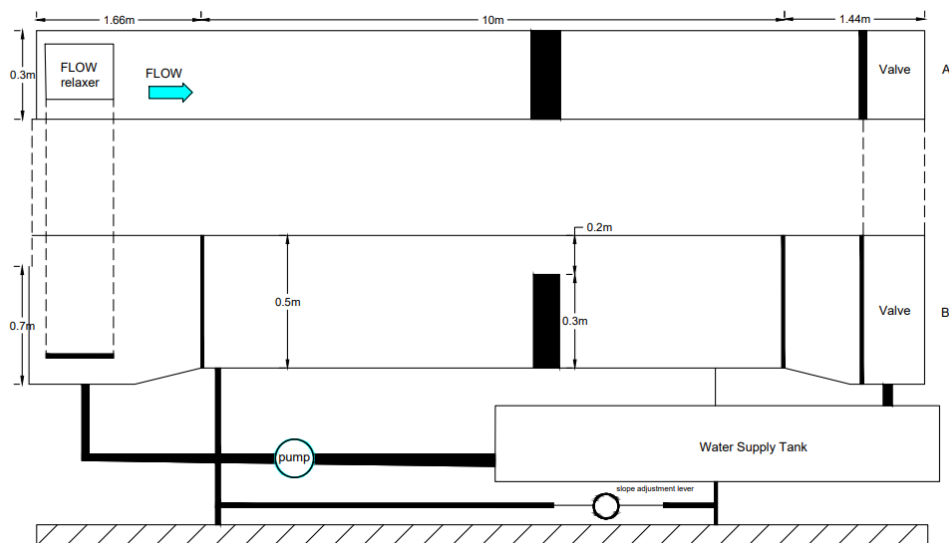
² Jalil and Sarhan

³ Altin-Sakarya

⁴ Kokpinar

⁵ Hassan et al

⁶ Khassaf & Abbas



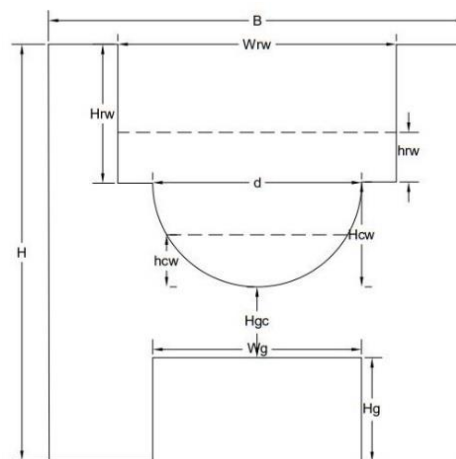
شکل ۱. شماتیک ساده‌ای از کانال آزمایشگاهی و سازه ترکیبی (الف) پلان کانال (ب) مقطع طولی

جهت انجام آزمایش‌ها در این پژوهش حاضر یک سازه ترکیبی سرریز مرکب نیم‌دایره‌ای- مستطیلی و دریچه کشویی از جنس ورق گالوانیزه ساخته و در مقطع آزمایش نصب شد. در شکل (۲) شماتیک ساده‌ای از سازه ترکیبی اندازه‌گیری جریان نشان داده شده است. مشخصات سرریز مرکب نیم‌دایره‌ای- مستطیلی و دریچه کشویی به شرح زیر است:

- ارتفاع کلی (H): ۳۰ سانتی‌متر؛
- عرض کلی (B): ۳۰ سانتی‌متر؛
- طول تاج سرریز مستطیلی (W_{rw}): ۱۹/۷ سانتی‌متر؛
- قطر سرریز نیم دایره‌ای (d): ۱۰ سانتی‌متر؛
- ارتفاع سرریز مستطیلی (H_{rw}): ۱۰ سانتی‌متر؛
- ارتفاع سرریز نیم دایره‌ای (شعاع) (H_{cw}): ۵ سانتی‌متر؛
- حداکثر بازشدگی دریچه (H_g): ۷/۵ سانتی‌متر؛
- عرض دریچه (W_g): ۱۴/۷ سانتی‌متر.



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) شماتیک ساده‌ای از سازه ترکیبی و پارامترهای هندسی ب) نمای کلی سازه ترکیبی در کانال

پژوهش حاضر به دو صورت برقراری جریان با بازشدگی ثابت دریچه و دبی‌های مختلف و همچنین برقراری جریان با بازشدگی مختلف دریچه و دبی‌های ثابت انجام شد. روند آزمایش‌ها بدین صورت بود که با چرخاندن اهرم تنظیم شیب، نشانگر، روی صفحه مدرج حرکت می‌کند و با ثابت کردن اهرم، شیب قابل محاسبه است. در آغاز شیب کانال ثابت روی 0.02 تنظیم شده و سپس با روشن کردن پمپ، آب به درون کانال آزمایشگاهی منتقل می‌شود. آب در آغاز وارد حوضچه آرام‌کننده جریان شده، آنگاه با عبور از مقطع‌های مختلف کانال، با گذشتن از دریچه انتهایی، به درون مخزن ریزش می‌کند. به منظور اندازه‌گیری شدت جریان از دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت 0.1 لیتر بر ثانیه استفاده شده است. با تنظیم بازشدگی دریچه و یکنواختی جریان، آزمایش آغاز شده و رخدادهای جریان بررسی شد. به منظور ثبت نتایج در دبی‌ها و بازشدگی‌های مختلف میزان بار آب روی سرریزها از ارتفاع سنج سوزنی با دقت 0.1 میلی‌متر و میزان بار آب روی دریچه از مبدأ بالای دریچه توسط خط‌کش اندازه‌گیری می‌شد. با پایان آزمایش‌ها به منظور محاسبه ضریب دبی به کمک رابطه‌های (۱ تا ۳)، رابطه نهایی محاسبه ضریب دبی (رابطه ۵) به دست می‌آید. سپس شیب آبراهه را بر روی 0.04 تنظیم کرده و همین مراحل دوباره تکرار شد.

مبانی تئوری

برای به دست آوردن دبی عبوری از سرریز لبه تیز نیم‌دایره‌ای فرض شده که دبی عبوری از روی سرریز بحرانی بوده و عمق آب روی سرریز بحرانی است با توجه به چنین فرضی معادله به دست آمده با استفاده از ضریب دبی که برای سرریز در نظر گرفته می‌شود؛ اصلاح شده و معادله (۱) برقرار می‌شود (سوامی، ۱۹۸۸ به نقل از حیدرپور و همکاران، ۱۳۹۲):

$$Q_{cw} = C_{tc} \left(\sqrt{\frac{g A_{cw}^3}{T}} \right) \quad (1)$$

دبی عبوری از سرریز مستطیلی برابر است با:

$$Q_{rw} = \frac{2}{3} C_{tr} \sqrt{2g} W_{rw} h_{rw}^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

دبی عبوری از دریچه کشویی مستطیلی برابر است با:

$$Q_g = C_{tg} (w_g \times H_g) \sqrt{2gH_d} \quad (۳)$$

ضریب دبی با توجه به پژوهش‌های، عمادی و پسرکلو (۱۳۹۷)، ظهیری و همکاران (۲۰۱۴) در هر سه مقطع یکسان در نظر گرفته می‌شود؛ به عبارتی:

$$Q_T = C_t \left(\sqrt{\frac{gA_{cw}^3}{T}} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} W_{rw} h_{rw}^{\frac{3}{2}} + (w_g \times H_g) \sqrt{2gH_d} \right) \quad (۴)$$

لذا ضریب دبی ترکیبی با داشتن دبی عملی (Q_a) و دبی تئوری (Q_T) از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$C_t = \frac{Q_a}{Q_T} = \frac{Q_a}{\sqrt{\frac{gA_{cw}^3}{T}} + \frac{2}{3} \sqrt{2g} W_{rw} h_{rw}^{\frac{3}{2}} + (w_g \times H_g) \sqrt{2gH_d}} \quad (۵)$$

در ادامه پژوهش برای شناسایی پارامترهای بی‌بعد از تئوری باکینگهام استفاده شد. به‌طور کلی پارامترهایی که در سازه ترکیبی بر ضریب دبی اثرگذارند را می‌توان به‌صورت رابطه (۶) نوشت:

$$f_1(y, v, B, D, \rho, \mu, S, H, g, H_g, W_g, C_t, H_{cw}, H_{gc}, H_{rw}, W_{rw}, H_d, d) \quad (۶)$$

که در آن Y عمق آب بالادست، v سرعت جریان روی تاج سرریزها و عبوری از دریچه، D ارتفاع کانال، B عرض کانال، ρ جرم واحد حجم سیال، μ ضریب دینامیکی سیال، S شیب کانال، H ارتفاع سازه، g شتاب ثقل است؛ سایر متغیرها در شکل (۲) نشان داده شده است. با استفاده از تحلیل ابعادی و قضیه باکینگهام اگر پارامترهای جرم واحد حجم سیال (ρ)، سرعت جریان روی تاج سرریزها و عبوری از دریچه (V) و عمق آب بالادست (y) به‌عنوان پارامترهای تکراری در نظر گرفته شوند؛ رابطه (۶) به رابطه (۷) تبدیل می‌شود:

$$f_2\left(R_e, \frac{B}{y}, \frac{D}{y}, s, \frac{H}{y}, \frac{H_g}{y}, \frac{W_g}{y}, F_r, \frac{H_{gc}}{y}, \frac{W_{rw}}{y}, \frac{H_{cw}}{y}, \frac{H_{rw}}{y}, C_t, \frac{H_d}{y}, \frac{d}{y}\right) \quad (۷)$$

در فرآیند بی‌بعد کردن پارامترها، عدد بدون بعد رینولدز (R_e) نیز تولید می‌شود. در آزمایش‌های پژوهش حاضر، به دلیل اینکه عدد رینولدز بزرگ‌تر از حد جریان متلاطم بوده (بیش از ۲۵۰۰) می‌توان از تأثیر آن چشم‌پوشی کرد. همچنین با حذف پارامترهای ثابت که به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی ثابت در نظر گرفته شده‌اند و پارامترهای بی‌تأثیر، رابطه نهایی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$f_3\left(\frac{H_g}{D}, \frac{y}{D}, \frac{h_{rw}}{D}, \frac{h_{cw}}{D}, F_r, s\right) \quad (۸)$$

در پژوهش حاضر پارامترهای بی‌بعد $\frac{H_g}{D}$ و $\frac{y}{D} \cdot S$ موردبررسی قرار گرفتند. در جدول (۱) دامنه تغییر این پارامترها نشان داده شده است:

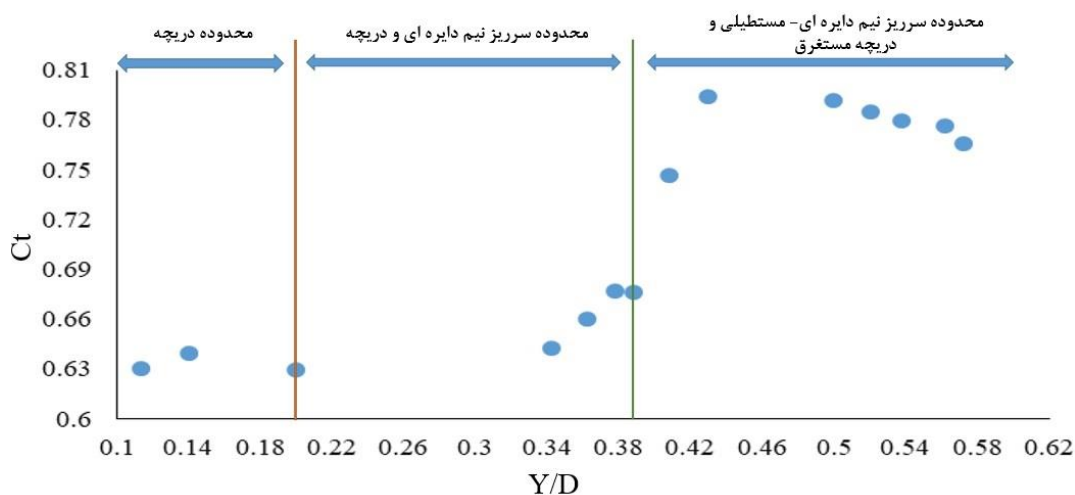
جدول ۱. پارامترهای بی‌بعد موردبررسی و دامنه تغییر آن‌ها در پژوهش حاضر

متغیر	مقادیر
S	۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴
$\frac{y}{D}$	$0/056 < \frac{y}{D} < 0/57$
$\frac{H_g}{D}$	$0/01 < \frac{H_g}{D} < 0/15$

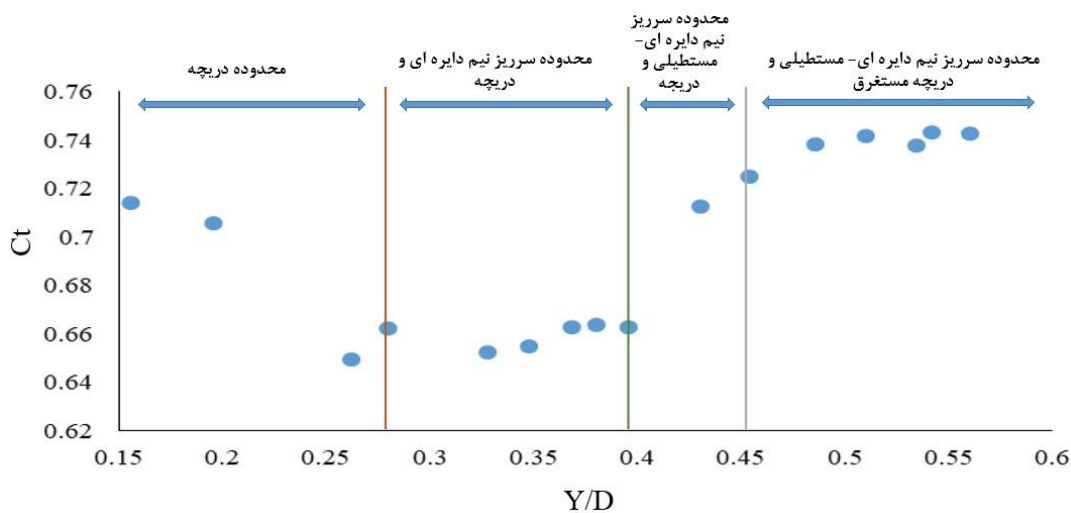
یافته‌ها

تعیین ضریب دبی سازه در دبی‌های متفاوت و بازشدگی ثابت دریچه

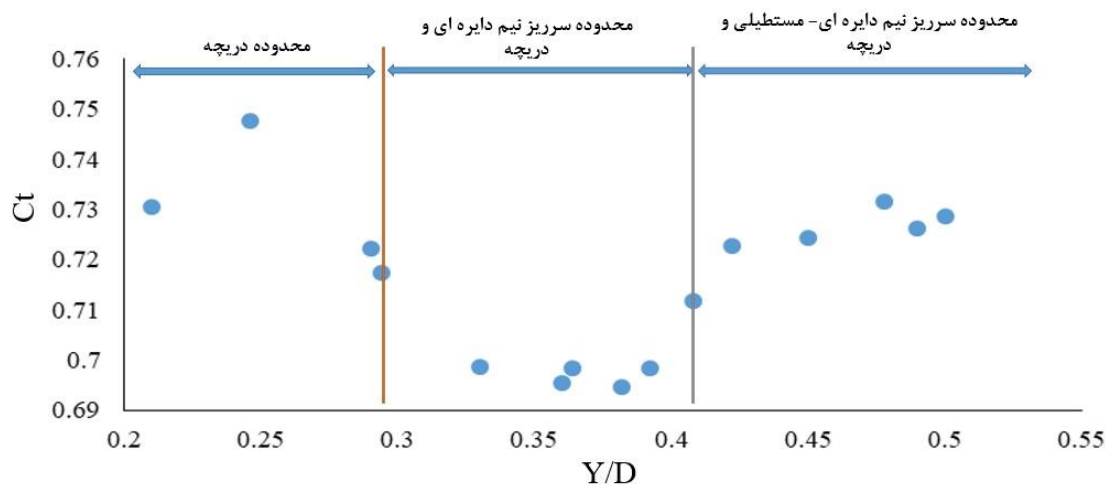
در بازشدگی‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵، ۷، ۷/۵ سانتی‌متر دریچه و دبی‌های مختلف، ضریب دبی سازه ترکیبی پژوهش حاضر محاسبه شد. به‌عنوان نمونه، نمودار ضریب دبی نسبت به $\frac{y}{D}$ در بازشدگی ۱، ۴/۵ و ۷/۵ سانتی در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل ۳. ضریب دبی در بازشدگی ۱ سانتی‌متری دریچه با دبی‌های متفاوت

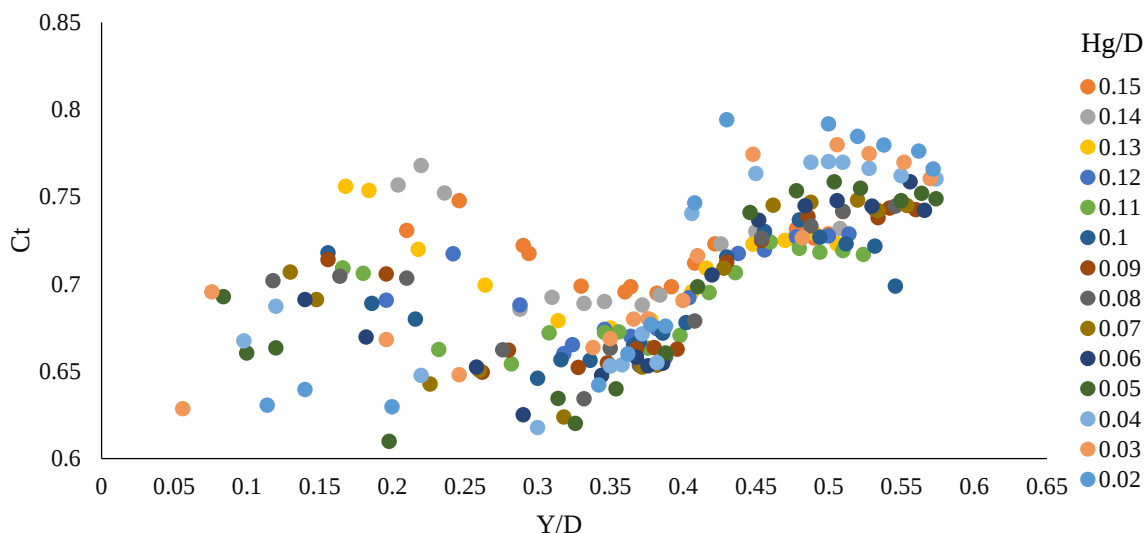


شکل ۴. ضریب دبی در بازشدگی ۴/۵ سانتی‌متری دریچه با دبی‌های متفاوت



شکل ۵. ضریب دبی در بازشدگی ۷/۵ سانتی‌متری دریاچه با دبی‌های متفاوت

در حالت بازشدگی ثابت دریاچه و دبی‌های متفاوت چهار محدوده مشاهده می‌شود که این محدوده‌ها در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. در محدوده اول که جریان تنها از دریاچه عبور می‌کند؛ روند نمودارها در همه بازشدگی‌ها در این قسمت کاهشی است؛ یعنی با افزایش $\frac{Y}{D}$ ضریب دبی در این ناحیه در حال کاهش است. در محدوده دوم که جریان از دریاچه و سرریز نیم‌دایره‌ای عبور می‌کند؛ روند نمودارها در همه بازشدگی‌ها در این محدوده به روند کاهشی خود در محدوده پیشین ادامه می‌دهد؛ یعنی همچنان با افزایش $\frac{Y}{D}$ ضریب دبی کاهش می‌یابد که با نتایج حاصل‌شده از پژوهش بلوچی و زینی‌وند (۱۳۹۱)، محبی کند سری و همکاران (۲۰۱۵) و اسعدی‌نیا و همکاران (۱۴۰۳) همخوانی دارد. همان‌طور که در نتایج پژوهش‌های یادشده نیز اشاره شده است؛ در شرایطی که ویژگی‌های هندسی سازه ترکیبی مانند بازشدگی دریاچه، قطر سرریز نیم‌دایره و طول تاج سرریز مستطیلی (که در روابط ۱ تا ۳ دیده می‌شوند)؛ در طی یک آزمایش ثابت باشند؛ بنا بر رابطه‌های یادشده ضریب دبی تنها به دبی جریان و بار آب در بالادست سازه بستگی دارد؛ اما همان‌طور که در این رابطه‌ها مشاهده می‌شود؛ دبی جریان و بار آب هرکدام تأثیر متفاوتی بر ضریب دارند؛ به‌عنوان مثال در محدوده اول که تنها جریان از دریاچه عبور می‌کند بار آب با توان ۰/۵ در رابطه ظاهر شده و به همین دلیل تأثیر تغییرپذیری‌های بار آب از دبی جریان کمتر بوده و لذا با افزایش بار آب، ضریب دبی کاهش می‌یابد. در محدوده دوم، بخش از جریان از سرریز نیم‌دایره عبور می‌کند و تأثیرگذاری بار آب در سرریز نیم‌دایره متفاوت با دریاچه است به‌گونه‌ای که بار آب - که در پارامتر سطح مقطع سرریز نیم‌دایره مستتر است؛ با توان ۱ در رابطه ظاهر می‌شود؛ اما در این محدوده با توجه به اینکه عمده جریان از دریاچه عبور می‌کند و بخش کمی از جریان از سرریز نیم‌دایره عبور می‌کند؛ روند محدوده اول با شیب کمتری در محدوده دوم هم تکرار می‌شود. در محدوده سوم، روند کاهشی نمودارها در بازشدگی‌های مختلف تا حدودی متوقف‌شده و نمودارها در این محدوده به‌طور کلی روندی افزایشی دارند؛ این بدان معناست که با ادامه روند افزایش $\frac{Y}{D}$ ، ضریب دبی در بیشتر دبی‌ها اندکی افزایش می‌یابد. در این محدوده، جریان افزون بر دریاچه از سرریز نیم‌دایره و مستطیلی هم عبور می‌کند و بار آب روی سرریزهای نیم‌دایره - که همان‌طور که گفته شد در پارامتر سطح مقطع سرریز نیم‌دایره مستتر است؛ و مستطیلی به ترتیب با ضریب‌های ۱ و ۱/۵ در رابطه‌ها ظاهر می‌شوند و لذا افزایش بار آب، باعث افزایش ضریب دبی می‌شود؛ نتایج به‌دست‌آمده در این وضعیت، با نتایج زونگ‌فو و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد. در محدوده چهارم، روند نمودارها در همه بازشدگی‌ها در این حالت با آغاز یک‌روند افزایشی ادامه یافته و در نهایت به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که با استغراق دریاچه و افزایش $\frac{Y}{D}$ ، ضریب دبی تا حدودی ثابت شده است. در شکل (۵) محدوده چهارم به دلیل محدود بودن حداکثر و حداقل دبی پمپ آزمایشگاه وجود ندارد. برای بررسی بهتر و دقیق‌تر این روندها نتایج مربوط به همه بازشدگی‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.

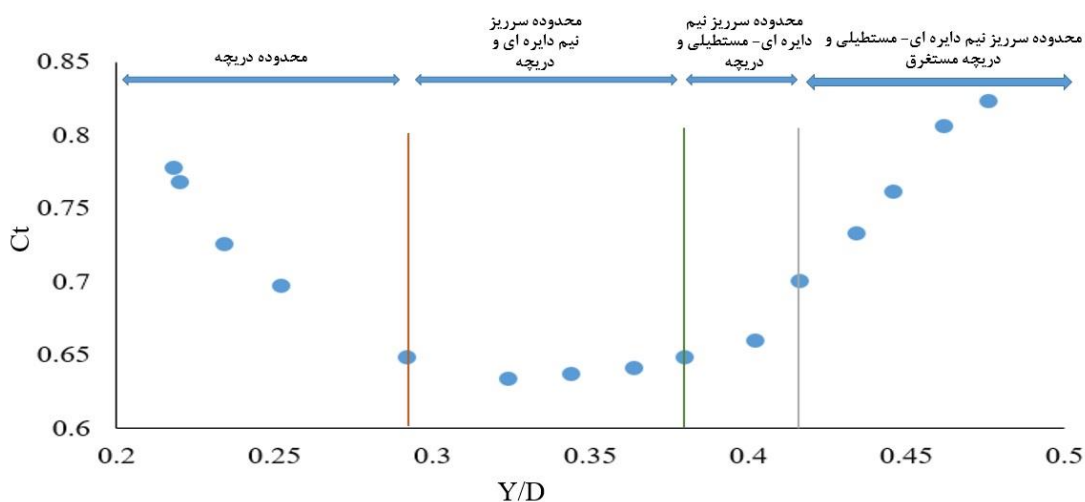


شکل ۶. ضریب دبی در تمام بازشدگی دریچه با دبی‌های متفاوت

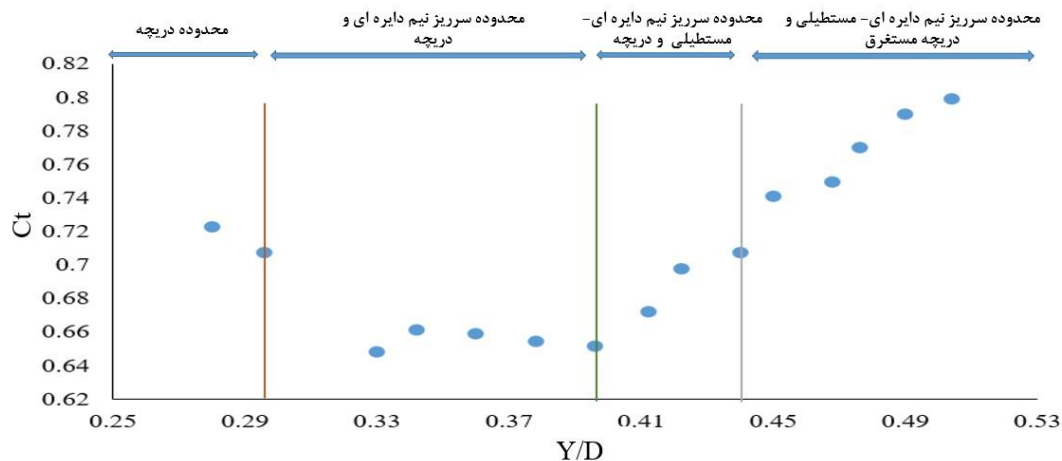
با افزایش بار آب بالادست سازه یا همان عمق جریان، به دلایلی که در بخش پیشین توضیح داده شد؛ ضریب دبی در محدوده‌ای که جریان از دریچه و سرریز نیم‌دایره عبور می‌کند؛ کاهش می‌یابد و در شرایطی که همه ظرفیت سازه ترکیبی برای عبور جریان استفاده می‌شود؛ ضریب دبی روند افزایشی پیدا کرده و در نهایت در همه بازشدگی‌های بی‌بعد دریچه به سمت عدد ثابت میل می‌کند. از شکل (۶) نتیجه می‌شود که به‌طور کلی ضریب دبی سازه بین ۰/۶ تا ۰/۷۹ است اما با افزایش دبی و در پی آن افزایش سطح آب بالادست، ضریب دبی تا حدودی ثابت و بین ۰/۷ تا ۰/۷۶ قرار می‌گیرد.

تعیین ضریب دبی سازه در بازشدگی‌های متفاوت و دبی ثابت

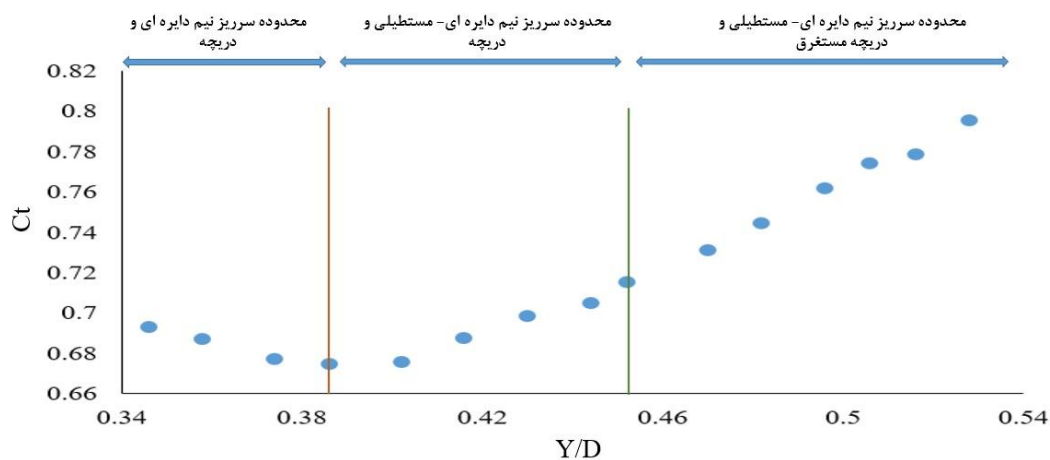
در اینجا برای تحلیل بهتر، نمودارهای ضریب دبی برحسب $\frac{y}{D}$ و $\frac{H_g}{D}$ در دبی‌های ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار می‌گیرند.



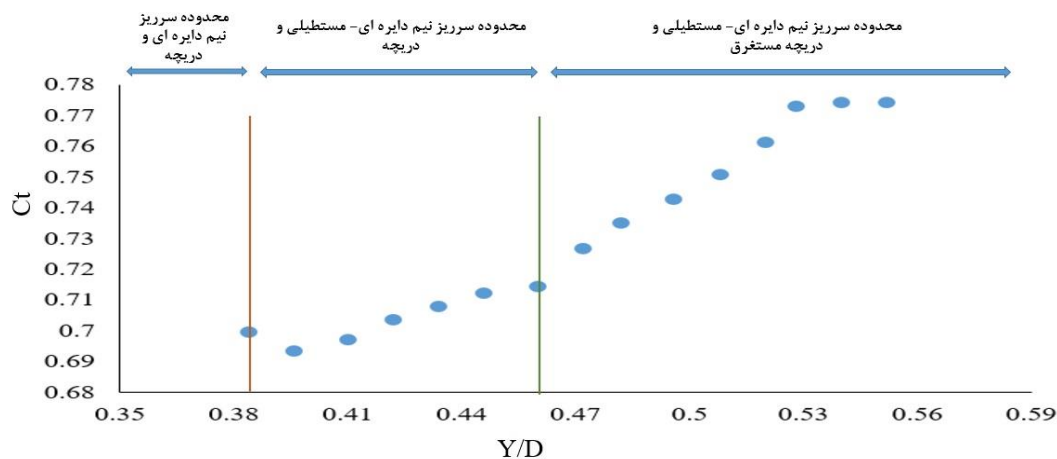
شکل ۷. ضریب دبی در دبی ۷ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{y}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف دریچه



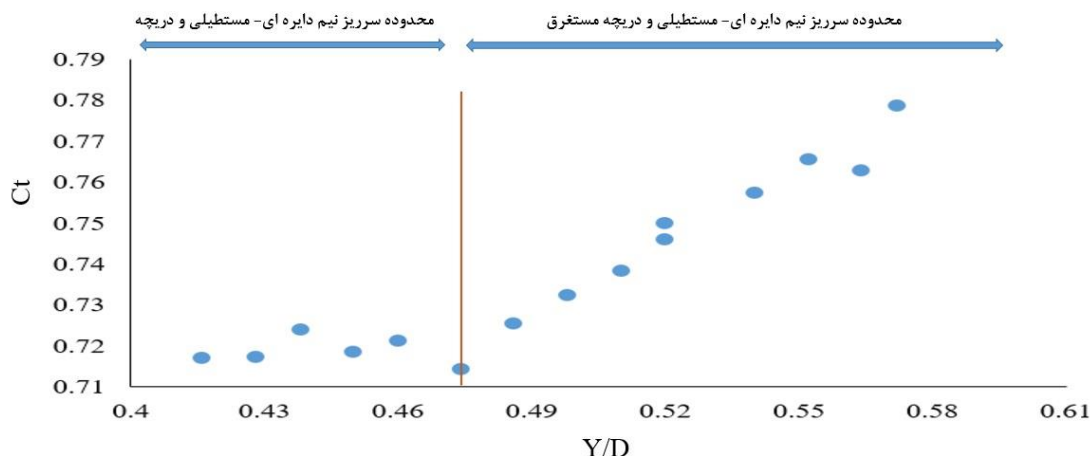
شکل ۸. ضریب دبی در دبی ۹ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{Y}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف درجه



شکل ۹. ضریب دبی در دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{Y}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف درجه

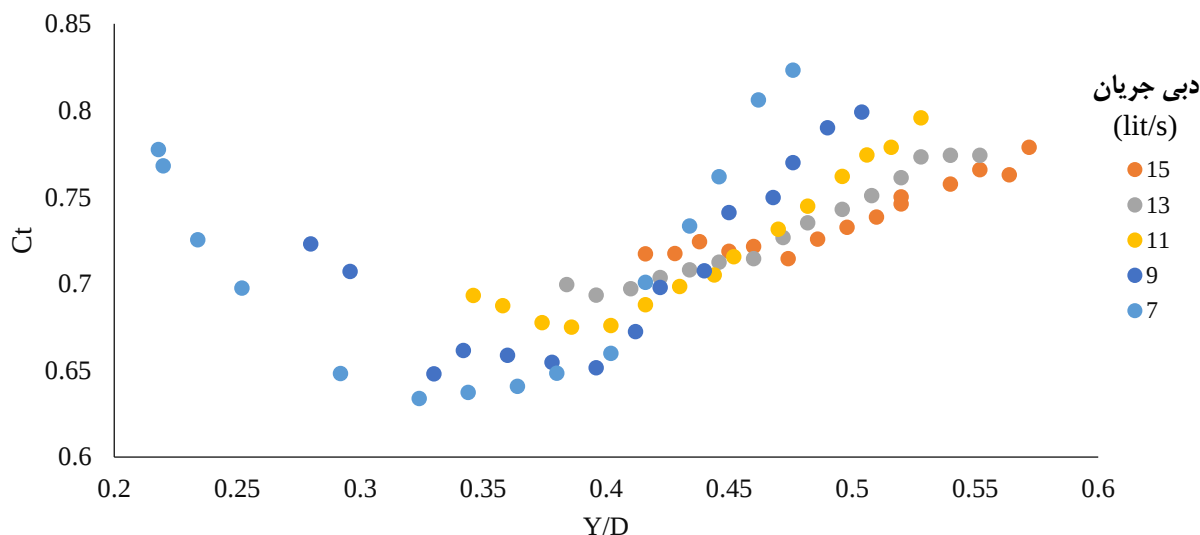


شکل ۱۰. ضریب دبی در دبی ۱۳ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{Y}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف درجه



شکل ۱۱. ضریب دبی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{Y}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف دریچه

با افزایش بازشدگی دریچه سهم عبور جریان از دریچه بیشتر شده و همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد با افزایش بازشدگی دریچه ضریب دبی جریان در برابر افزایش بار آب روند کاهشی دارد. همان‌طور که در شکل‌های (۷) و (۸) -مربوط به دبی‌های ۷ و ۹ لیتر بر ثانیه- مشخص است؛ شرایط جریان به‌گونه‌ای است که محدوده ۱ در نمودارها دیده می‌شود؛ یعنی در شماری از آزمایش‌ها جریان تنها از دریچه عبور می‌کند؛ اما در دبی‌های بالاتر محدوده ۱ وجود ندارد. در شکل‌های (۹) و (۱۰) -مربوط به دبی ۱۱ و ۱۳ لیتر بر ثانیه- آغاز نمودارها از محدوده ۲ است؛ در محدوده ۲ همان‌طور که پیش‌تر گفته شد باوجود عبور بخشی از جریان از سرریز نیم‌دایره کماکان سهم دریچه در عبور جریان بیشتر است؛ لذا با افزایش بار آب بالادست، کماکان ضریب دبی روند کاهشی دارد. در شکل (۱۱) آغاز نمودار از محدوده سوم است. در محدوده سوم و چهارم روند کاهشی ضریب دبی متوقف و وارد روند افزایشی شده و در نهایت همان‌طور که در ادامه در شکل (۱۱) مشاهده خواهد شد به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. در شکل (۱۲) تمام دبی‌های ثابت با بازشدگی‌های مختلف، برای تحلیل و درک بهتر نشان داده شده است.

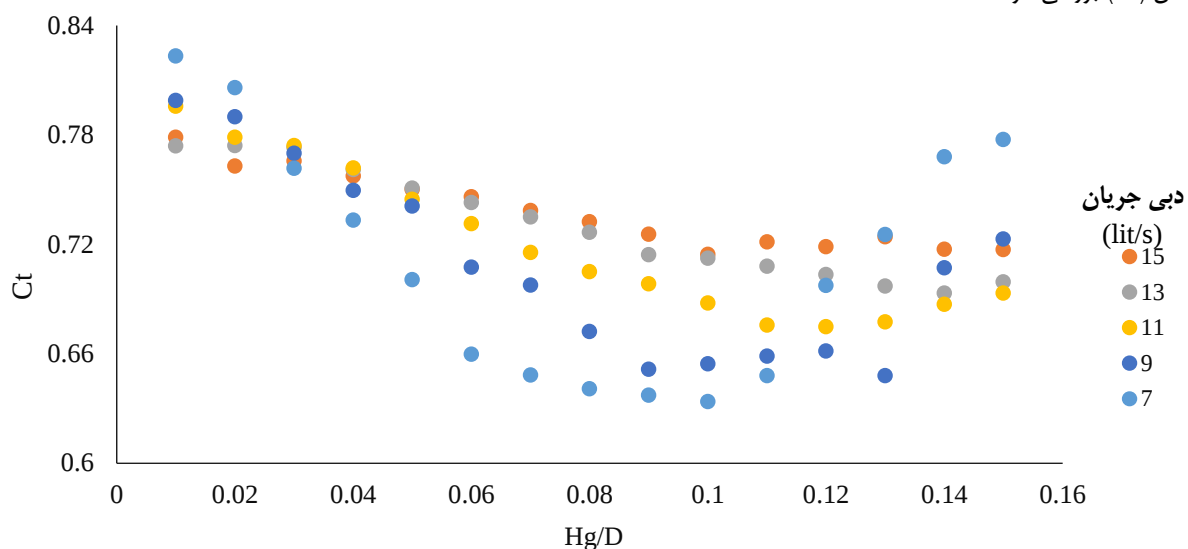


شکل ۱۲. ضریب دبی در دبی ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{Y}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف دریچه

همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود ضریب دبی بین عدد ۰/۶۳ و ۰/۸۲ است و ضریب دبی با افزایش سطح آب بالادست و دبی، تغییرات کمی دارد و بین ۰/۷ تا ۰/۷۳ متغیر است.

بررسی تأثیر پارامتر $\frac{H_g}{D}$ بر ضریب سازه دبی

نتایج این بخش را می‌توان از روی نمودار ضریب دبی در دبی ۹، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{H_g}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف دریچه در شکل (۱۳) بررسی کرد.

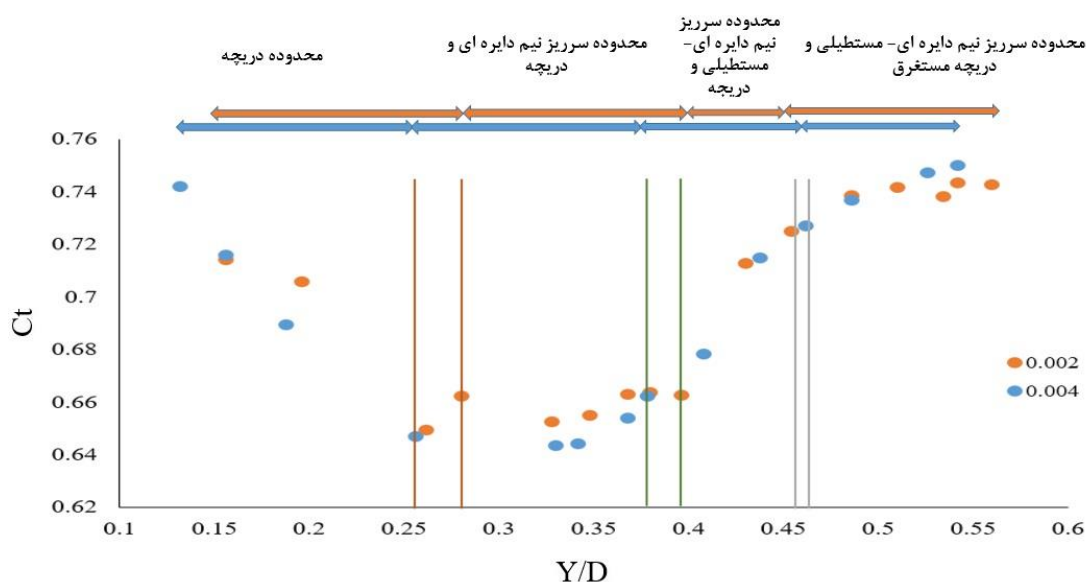


شکل ۱۳. ضریب دبی در دبی ۹، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ لیتر بر ثانیه برحسب $\frac{H_g}{D}$ با بازشدگی‌های مختلف دریچه

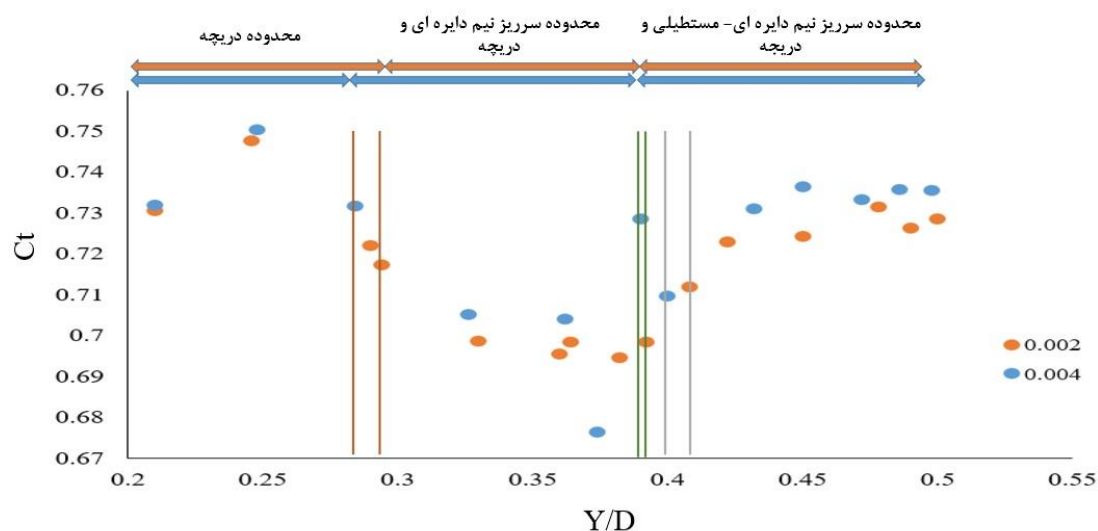
در شکل (۱۳) از چپ به راست بازشدگی‌ها از ۰/۰۱ (بازشدگی بسیار کم) تا ۰/۱۵ (بازشدگی کامل دریچه) تغییر می‌کند. برابر شکل مشاهده می‌شود که با افزایش میزان بازشدگی دریچه، ضریب دبی به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. در دبی‌های ۷ و ۹ لیتر بر ثانیه با افزایش بازشدگی بی‌بعد دریچه تا بازشدگی $(H_g/D=0/1)$ و برای دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه تا $(H_g/D=0/12)$ روند ضریب دبی جریان کاهشی است. در این محدوده بیشتر جریان از سرریزها عبور می‌کند؛ اما از این میزان به بعد سهم سرریزها کم شده و تا جایی که در بازشدگی‌های بیشتر جریان تنها از دریچه عبور می‌کند (عمده بخشی که روند ضریب دبی در آن افزایشی است) و همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد؛ هنگامی که جریان تنها از دریچه برقرار است ضریب دبی جریان میزان بالاتری دارد به عبارتی با افزایش بازشدگی، ضریب دبی افزایش می‌یابد. در دبی‌های ۱۳ و ۱۵ لیتر بر ثانیه شرایط جریان به‌گونه‌ای است که در بازشدگی بالا نیز عموماً جریان تنها از دریچه عبور نمی‌کند و لذا روند این دو دبی با دبی‌های ۷، ۹ و ۱۱ لیتر بر ثانیه متفاوت است. در مجموع نتایج نشان داد هرچه ارتفاع آب بالادست بیشتر شود ضریب دبی به عدد ثابت ۰/۷۴ میل می‌کند. در نتیجه پر شدن ظرفیت سازه با افزایش دبی و کاهش بازشدگی دریچه رابطه مستقیم دارد.

بررسی تأثیر شیب کف کانال بر ضریب دبی سازه

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) برای بررسی بهتر آزمایش‌های انجام‌شده، آزمایش را در بازشدگی‌های ۴/۵ و ۷/۵ سانتی‌متر در شیب ۰/۰۰۴ تکرار کرده و نتایج قابل‌مشاهده است. باید توجه داشت که در پژوهش حاضر تمام آزمایش‌ها در شیب ۰/۰۰۲ انجام‌شده است.



شکل ۱۴. بررسی ضریب دبی در بازشدگی ۴/۵ سانتی‌متر در دو شیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴



شکل ۱۵. بررسی ضریب دبی در بازشدگی ۷/۵ سانتی‌متر در دو شیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۴

همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود تغییر در شیب فلوم، تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در ضریب دبی سازه دبی ایجاد نکرده است. بررسی منبع‌هایی در این زمینه نیز نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی تأثیر شیب فلوم را به‌عنوان پارامتر مؤثر بر ضریب دبی جریان تأیید نکرده است؛ در رابطه‌های نظری سازه‌های دریاچه و سرریز نیز شیب مقطع جریان دیده نشده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد؛ یکی از علت‌های انجام برخی از آزمایش‌های این پژوهش در شیب ۰/۰۰۴، کنترل روندها و اطمینان از دقت و درستی داده‌ها بوده است.

بررسی و مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج سایر پژوهشگران

نتایج پژوهش حاضر در جدول (۲) نشان داده شده است که می‌توان آن را با نتایج سایر پژوهش‌ها برای انواع مدل‌ها که در جدول ذکر شده است مقایسه کرد. اختلاف بازه ضریب دبی در پژوهش‌های جدول را می‌توان به تفاوت داشتن بین نوع سرریزها نسبت داد. به‌طور کلی بازه مشترک در همه پژوهش‌های قیدشده در جدول برای اکثر سازه‌های سرریز مرکب با دریچه ضریب دبی را می‌توان ۰/۷ در نظر گرفت.

جدول ۲. محدوده ضریب دبی پژوهشگران مختلف

منبع	موضوع	محدوده ضریب دبی
پسرکلو و عمادی (۱۳۹۷)	مطالعه هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی سرریز -دریچه با سرریز مرکب دایره-دوزنقه‌ای-مستطیلی	$0.38 < C_d < 0.78$
حیدرپور و همکاران (۱۳۹۳)	تعیین ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز نیم دایره‌ای و دریچه کشویی در کانال دایره‌ای	$0.64 < C_d < 0.7$
اسعدی نیا و همکاران (۱۴۰۳)	تعیین ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز مرکب مثلی-مستطیلی و دریچه کشویی	$0.6 < C_d < 0.9$
پژوهش حاضر	تعیین ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز مرکب نیم دایره‌ای-مستطیلی و دریچه کشویی	$0.6 < C_d < 0.8$

بحث

به‌منظور تعیین ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز نیم‌دایره‌ای-مستطیلی و دریچه کشویی تحقیقی بر روی فلوام آزمایشگاهی انجام شد. آزمایش‌های این پژوهش در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام شده است. کانال مورد استفاده در این پژوهش، شیب پذیر و دارای سطح مقطع مستطیلی است. این کانال با عرض ۰/۳ متر، طول ۱۰ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و حداکثر دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، دارای دبی‌سنج الکترومغناطیس است. دیوارهای کانال از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر که امکان رؤیت جریان را فراهم می‌کند؛ تشکیل شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که در سازه ترکیبی سرریز مرکب نیم دایره‌ای-مستطیلی و دریچه کشویی، ضریب دبی به مستغرق شدن یا نشدن دریچه و ارتفاع آب بالادست بستگی دارد. همچنین ضریب دبی در شرایط عبور آب از دریچه با افزایش پارامتر $\frac{Y}{D}$ کاهش می‌یابد و ضریب دبی با عبور آب از دریچه و سرریز نیم دایره‌ای-مستطیلی با افزایش $\frac{Y}{D}$ افزایش می‌یابد. با تغییر شیب کف، ضریب دبی تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در آن ایجاد نشده است و با کاهش $\frac{H_g}{D}$ ، ضریب دبی تقریباً ثابت شده و به عدد ثابت ۰/۷۴ میل می‌کند. در استفاده از سازه ترکیبی سرریز نیم‌دایره‌ای-مستطیلی و دریچه کشویی و دیگر سازه‌های ترکیبی نظیر سازه مورد استفاده در این پژوهش باید توجه داشت که زمانی که از تمام ظرفیت سازه ترکیبی برای عبور جریان استفاده می‌شود ضریب دبی به سمت عدد ثابتی میل می‌کند و بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان یک سازه مطمئن اندازه‌گیری دبی جریان در کنار بهره‌وری از سایر مزایای آن نظیر سهولت در عبور اجسام شناور و رسوبات بالادست سازه استفاده نمود. یکی از مشکلاتی که در پژوهش‌های نظیر پژوهش حاضر می‌تواند بروز کند؛ اثر مقیاس است که با کوچک شدن ابعاد مختلف مدل شامل فلوام و سازه اندازه‌گیری جریان و بنابراین کوچک شدن اعماق جریان عبوری از سازه اندازه‌گیری به‌ویژه سرریز، بیشتر هم می‌شود. در چنین شرایطی امکان تأثیرگذاری نیروی لزجت و کشش سطحی دور از انتظار نیست؛ لذا حتی‌الامکان باید مراقبت شود که با انتخاب ابعاد مناسب مدل آزمایشگاهی این خطا اتفاق نیفتد.

منابع

- اسعدی‌نیا، محمد، خزیمه نژاد، حسین، و قاسم اکبری، محمد. (۱۴۰۳). تعیین ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی و دریاچه کشویی. انجمن هیدرولیک ایران نشریه هیدرولیک، ۱۹(۱)، ۶۶-۵۱. https://jhyd.iha.ir/article_176090.html
- اسماعیلی، کاظم، و فتحی‌مقدم، منوچهر. (۱۳۸۵). ضریب دبی در مدل سرریز-دریاچه، همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی اهواز، اهواز، ایران. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1012884.html>
- بلوچی، بهنام، و زینی‌وند، مهدی. (۱۳۹۱). بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در سازه ترکیبی سرریز-روزنه در شرایط سیلابی. نشریه دانش آب و خاک. ۲۲(۲)، ۱۶۴-۱۵۲. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_828_22.html
- پسرکلو، مهسا، و عمادی، علیرضا. (۱۳۹۷). مطالعه هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی سرریز-دریاچه با سرریز مرکب دایره‌ای-دو زنگه‌ای-مستطیلی. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۹(۷۱)، ۹۹-۱۱۲. https://idser.areeo.ac.ir/article_113411.html
- حسینی، یاسین، رضویان، سید حسین، و حیدرپور، منوچهر. (۱۳۹۰). بررسی جریان همزمان از زیر یک دریاچه کشویی و روی یک سرریز لبه تیز بدون فشردگی در کانال دایره‌ای. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، رشت، ایران. <https://civilica.com/doc/140682>
- حیدرپور، منوچهر، رضویان، سید حسین، و حسینی، یاسین. (۱۳۹۳). تعیین ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز نیم‌دایره‌ای و دریاچه کشویی در کانال دایره‌ای. مجله پژوهش آب ایران، ۷(۱۳)، ۱۵۵-۱۴۹. https://iwj.sku.ac.ir/article_10973.html
- رضویان، سیدحسین، و حیدرپور، منوچهر. (۱۳۸۶). بررسی ضریب دبی در مدل ترکیبی سرریز-دریاچه لبه‌تیز. ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد، ایران. <https://civilica.com/doc/71821>
- ظهیری، عبدالرضا. (۱۳۹۱). مدل ریاضی شبه دوبعدی تخمین دبی در سرریزهای لبه تیز مرکب. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۹(۳)، ۴۲-۲۷. https://jwsc.gau.ac.ir/article_992.html
- مجبی کندسری، مهدیه، مفتاح هلقی، مهدی، دهقانی، امیراحمد، و ظهیری، عبدالرضا. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری سازه سرریز لبه تیز مثلثی در پلان، پنجمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، ایران. <https://civilica.com/doc/521302>
- یاسی، مهدی، و عباس‌پور، اکرم. (۱۳۸۴). ارزیابی جریان بر روی سرریز لبه‌تیز مرکب "مثلثی-مستطیلی". مجله علمی کشاورزی، ۲۸(۲)، ۱۸۲-۱۶۵. <https://www.sid.ir/paper/24824/fa>

References

- Altan-Sakarya, A. B., & Kökpınar, M. A. (2013). Computation of discharge for simultaneous flow over weirs and below gates (H-weirs). *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.09.007>
- Asadiniya, M., Khozaymehnezhad, H., & Qasem-Akbari, M. (2024). Determining the discharge coefficient in the combined triangular-rectangular overflow model and sliding gate. *Iranian Hydraulic Association, Hydraulic Journal*, 19(1), 51-66. https://jhyd.iha.ir/article_176090.html [In Persian]
- Balouchi, B., & Zinivand, M. (2012). Experimental Investigation on Discharge Coefficient for Combined Structure of Weir Gate under Flood Conditions. *J. Water and Soil Science*. 22(2), 152-164. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_828_22.html [In Persian]
- Boss, M. G. (1988). *Discharge Measurement Structures*. ILRI Pub. Wageningn, USA. <https://edepot.wur.nl/333324>
- Bergmann, M. (1963), "Specal Weirs", USBR, Water Measurment Manual. Water Resources Research Laboratory Publisher. https://books.google.com/books?id=o_dRAAAAMAAJ&printsec=frontcover&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- Esmaeili, K., & Fathi- Moghadam, M. (2006). Flow coefficient in overflow-valve model, national conference on management of irrigation and drainage networks in Ahvaz, Ahvaz, Iran. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1012884.html> [In Persian]
- Hassan, F.A., Khassaf, S.I., & Hassan, A.O. (2015). Determining the Coefficient of Discharge due to Flow over Combined Weir and below Gates, Kufa Journal of Engineering. 7(1), 115-128. https://www.researchgate.net/publication/311821799_Determining_the_coefficient_of_discharge_due_to_flow_over_composite_weir_and_below_gate
- Hosseini, Y., Razaviyan, S. H., & Heydarpour, M. (2010). Investigating the simultaneous flow under a sliding valve and over a sharp edge weir without compression in a circular channel, 10th Iran Hydraulic Conference, Rasht, Iran. <https://civilica.com/doc/140682> [In Persian]
- Heydarpour, M., Razaviyan, S. H., & Hosseini, Y. (2013). Determining the flow coefficient in the combined model of semi-circular overflow and sliding valve in a circular channel. Iranian Journal of Water Research, 7 (13), 149-155. https://iwrij.sku.ac.ir/article_10973.html [In Persian]
- Jalil, SH., & Sarhan, SA. (2013). Experimental study of combined oblique weir and gate structure. Engineering and Applied Sciences. 8(4), 306-315. https://www.researchgate.net/publication/286515635_Experimental_study_of_combined_oblique_weir_and_gate_structure
- Jan, C.D., Chang, C.J., & Lee, M.H. (2006). Discussion of “Design and Calibration of a Compound Sharp-Crested Weir” by J. Martínez, J. Reca, M. T. Morillas, and J. G. López. Journal of Hydraulic Engineering, 132(8), 868-871. https://www.researchgate.net/publication/245297443_Discussion_of_Design_and_Calibration_of_a_Compound_Sharp-Crested_Weir_by_J_Martinez_J_Reca_M_T_Morillas_and_J_G_Lopez
- Khassaf, S.I., & Abbas, H.A. (2013). Study the free flow over compound weir and below semicircular gate. Int. J. Science Engineering Research, 4(10), 1486-1491. <https://www.ijser.org/paper/Study-The-Free-Flow-Over-Compound-Weir-and-Below-Semi-Circular-Gate.html>
- Martínez, J., Reca, J., Morillas, M. T., & López, J. G. (2005). Design and Calibration of a Compound Sharp-Crested Weir. Journal of Hydraulic Engineering, 131(2), 112-116. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%2907733-9429%282005%29131%3A2%28112%29>
- Mohebbi, M., Meftah Halaghi, M., Dehghani, A., & Zahiri, A. (2015). Experimental Study of Discharge Coefficient of Triangular-in-plan weir structure. 5th National Conference Sustainable Architecture, Theran, Iran. <https://civilica.com/doc/521302> [In Persian]
- Negm, A.-A. M., Al-Brahim, A. M., & Alhamid, A. A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. Journal of Hydraulic Research, 40(3), 359-365. <https://doi.org/10.1080/00221680209499950>
- Piratheepan, M., Winston, N. E. F., & Pathirana, K. P. P. (2007). Discharge Measurements in Open Channels using Compound Sharp-Crested Weirs. Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, 40(3), 31. https://www.researchgate.net/publication/279848764_Discharge_Measurements_in_Open_Channels_using_Compound_Sharp-Crested_Weirs
- Pesarakloo, M., & Emadi, A. (2017). Hydraulic study of flow in a combined overflow-valve structure with a circular-trapezoidal-rectangular composite overflow. Irrigation and Drainage Engineering Research 19(71), 112-99. https://idser.areeo.ac.ir/article_113411.html [In Persian]
- Razaviyan, S. H., and Heydarpour, M. (2006). Investigating the flow coefficient in the combined overflow model - sharp edge valve. 6th Iranian Hydraulic Conference, Shahrekord, Iran. <https://civilica.com/doc/71821> [In Persian]
- Yasi, M. and Abbaspour. A. (2005). Flow over sharp-crested, truncated-triangular weirs. The Scientific Journal of Agriculture (SJA), 28(2), 165-182. <https://www.sid.ir/paper/24824/fa> [In Persian]

- Zahiri, A. R. (2011). A pseudo-two-dimensional mathematical model for estimation of discharge in compound sharp edge spillways. *Water and Soil Conservation Research (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 19(3), 27-42. https://jwsc.gau.ac.ir/article_992.html [In Persian]
- Zahiri, A., Tang, X., & Azamatulla, H. (2014). Mathematical modeling of flow discharge over compound sharp-crested weirs. *J. Hydro-Environ. Res.* 8: 3. 194-199.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570644314000033>
- Zong, F., Zhen, C., Wen-Hong, D., & Yue-Jun, C. (2018). Discharge Coefficient of Combined Orifice-Weir Flow. *Water journal.* 10(6), 699. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/6/699>



Intermittent water optimized supply considering consumption pattern change in water distribution network

Arman Haghighi¹ , Elham Darvishi² , Ehsan Roshani³

¹ M. Sc Student of Water structure, Department of Water Science and Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: armanhaghighi75@gmail.com

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: e.darvishi@razi.ac.ir

³ Research Officer, National Research Council Canada, Canada. E-mail: ehsan_ro@yahoo.com

ABSTRACT

The lack of pressure causes some subscribers in water distribution networks to not be able to receive the required water. Alternate delivery of water can be used in existing networks to solve the problem. In this research, water delivery for 6 districts of TazeAbad water distribution network was optimized in 12, 8 and 6 hours with the aim of providing the required water and high distribution uniformity by using single-objective and double-objective coordinated search algorithm. In the hydraulic model, the pressure-based hydraulic analysis method and the transmitter method were used to determine the flow rate of the nodes and the results were compared. In different scenarios, the possibility of delivering water in 4, 3 and 2 times was checked.

In all scenarios, the percentage of water supply using the emitter method is more than the pressure-based method, but the distribution uniformity is less. Hydraulic analysis using the emitter method showed an increase in water extraction during delivery hours, which is consistent with the field data of other researches. In TazeAbad network, if water is delivered in 2 shifts, the maximum flow rate in the network is more than the maximum flow rate of the existing conditions of the network. But if water is delivered in 3 and 4 times, the maximum flow rate will be closer to the maximum flow rate of the network. But the percentage of supply will decrease, in other words, the subscribers will receive less water. The results of measuring the amount of water consumed by Fan et al. in 225 Chinese villages also showed that the amount of water consumed will decrease significantly with the reduction of water delivery hours.

In TazeAbad network, water delivery in 8 hours was chosen as the best option. In this case, the ratio of supplied water to required water will be around 70% and the uniformity of distribution will be around 87%. Also, the maximum flow rate in the water distribution network is almost equal to the maximum flow rate in the current conditions.

Keywords: Intermittent supply, water distribution network, Consumption Pattern, Harmony Search, Emitter method.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 13 September 2023 Revised: 22 November 2023 Accepted: 29 December 2023 ePublished: 29 December 2023

1. Introduction

Climate change and population increase have caused an increase in consumption in the existing water distribution networks, as a result, an increase in the discharge in the pipes and a decrease in the pressure in the nodes. The decrease in pressure makes some consumers unable to receive the required water. To solve this problem, long-term and short-term solutions have been proposed. Replacing pipes with pipes with a larger diameter is one of the solutions. But it requires considerable time and money. Intermittent supply of water can be used in existing networks to solve the problem. Bozorg-Haddad and et al (2016) With the aim of maximizing water supply resilience and mechanical reliability, multi-objective optimization of alternate water delivery in urban water distribution networks was carried out using the HBMO algorithm and the Epanet simulator model using the demand-based analysis method for two water distribution networks. Their results showed that consumer welfare may be in conflict with the objective of mechanical reliability.

TazeAbad network has a large pressure drop during peak hours. The reason for this is the low diameter of the main pipes, which cause a large drop in the pressure as the consumption increases and the discharge increases. In this study, in order to improve justice and increase water supply in this network, optimal intermittent supply of water was done for 6 areas of this network.

2. Methodology

The Intermittent supply of water is usually done based on pressure-based hydraulic analysis. In case, the consumers will also store the needs of other hours. In other words, the consumption pattern in continuous supply cannot be used for Intermittent supply. In this research, the Emitter method is used for the hydraulic analysis of the network. In this hydraulic analysis, the amount of water delivered to the node is a function of pressure.

Intermittent supply for 6 areas of the water distribution network of TazeAbad city was optimized in 12, 8 and 6 hours with the aim of supplying the required water and high two-objective by using single-objective and two-objective Harmony Search algorithm. In the hydraulic model, the pressure-based hydraulic analysis method and the Emitter method were used to determine the discharge of the nodes and the results were compared. In different scenarios, the possibility of supplying water in 4, 3 and 2 time intervals was investigated.

3. Results and discussion

In all scenarios, the results of pressure-based hydraulic analysis method are located in all areas of Tazehabad city during peak hours. In this method, despite the high distribution uniformity coefficient, the amount of water delivered to consumers is less than their needs in the hour of supply. At present, in TazeAbad distribution network, consumers receive more water at the existing pressures than the pressure-based method.

In the Emitter method, in all scenarios, the distribution uniformity is lower than the pressure-based method. But in this method, the supply percentage is much higher. So that more than 95% of customers' demands have been met in 12-hour supply.

By reducing the water supply time, the percentage of supply has decreased in both methods. In the single-objective algorithm, the ratio of supplied water to the required water is more than the double-objective algorithm. But the uniformity of the distribution has increased in the double-objective algorithm. In all scenarios, water delivery in the pressure-based method was in one time interval for all areas, but in the Emitter method, water was usually delivered in 2 time intervals.

In TazeAbad network, if water is supplied in 2 shifts, the maximum discharge in the network is more than the maximum discharge of the existing conditions of the network. But if water is supplied in 3 and 4 time intervals, the maximum discharge will be closer to the maximum discharge of the network. The difference between the maximum and minimum network discharges in the two-objective algorithm was lower than the single-objective algorithm. The supply of water in 4 time intervals has had the least changes in discharge and consumption coefficients.

4. Conclusions

According to the scenarios reviewed in TazeAbad network, water supply in 8 hours was chosen as the best option. In this case, the ratio of supplied water to required water will be around 70% and the uniformity of distribution will be around 87%. The maximum discharge in the water distribution network is almost equal to the maximum discharge in the current conditions. Also, the range of discharge changes and consumption coefficients is lower than the current conditions. In other words, pressure changes in the network will be less than the current conditions.

5. References

Bozorg Haddad, O., Ghajarnia, N., Solgi, M., Loáiciga, H. A., & Mariño, M. (2016). A DSS-based honeybee mating optimization (HBMO) algorithm for single-and multi-objective design of water distribution networks. In *Metaheuristics and optimization in civil engineering*, 199-233, Springer, Cham. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-26245-1_10

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Haghighi, A., Darvishi, E., & Roshani, E. (2023). Intermittent water optimized supply considering consumption pattern change in water distribution network, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 80-93. DOI: 10.22126/ATWE.2024.9839.1066



تأمین بهینه نوبتی آب در شبکه توزیع با در نظر گرفتن تغییر الگوی مصرف

آرمان حقیقی^۱، الهام درویشی^۲، احسان روشنی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: armanhaghighi75@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: e.darvishi@razi.ac.ir

^۳ مدیر ارشد تحقیق، انجمن ملی تحقیقات کانادا، کانادا. رایانامه: ehsan_ro@yahoo.com

چکیده

کمبود فشار موجب می شود که برخی مشترکین در شبکه های توزیع آب امکان دریافت آب مورد نیاز را نداشته باشند. تحویل نوبتی آب می تواند در شبکه های موجود برای حل مشکل به کار رود. در این تحقیق تحویل آب برای ۶ ناحیه شبکه توزیع آب شهر تازه آباد به صورت ۱۲، ۸ و ۶ ساعته باهدف تأمین آب مورد نیاز و یکنواختی توزیع بالا با استفاده از الگوریتم جستجوی هماهنگ تک هدفه و دو هدفه بهینه شد. در مدل هیدرولیکی از روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار و روش گسیلنده برای تعیین دبی گره ها استفاده و نتایج باهم مقایسه شدند. در سناریوهای مختلف امکان تحویل آب در ۴، ۳ و ۲ نوبت بررسی شد.

در تمام سناریوها درصد تأمین آب به روش گسیلنده بیش از روش مبتنی بر فشار است اما یکنواختی توزیع کمتر است. تحلیل هیدرولیکی به روش گسیلنده افزایش برداشت آب در ساعات تحویل را نشان داد که این نتایج منطبق بر داده های میدانی تحقیقات دیگر است. در شبکه تازه آباد چنانچه در ۲ نوبت آب تحویل داده شود، حداکثر دبی در شبکه بیش از حداکثر دبی شرایط موجود شبکه است. اما در صورت تحویل آب در ۳ و ۴ نوبت حداکثر دبی به حداکثر دبی شبکه نزدیک تر خواهد شد. اما درصد تأمین کاهش خواهد یافت به عبارتی مشترکین حجم آب کمتری برداشت می کنند. نتایج اندازه گیری حجم آب مصرفی توسط فن و همکاران در ۲۲۵ روستای چین نیز نشان داد که با کاهش ساعت تحویل آب حجم آب مصرفی کاهش چشمگیری خواهد داشت.

در شبکه تازه آباد، تحویل آب در ۸ ساعت به عنوان بهترین گزینه انتخاب شد. در این حالت نسبت آب تأمین شده به آب مورد نیاز حدود ۷۰ درصد و یکنواختی توزیع حدود ۸۷ درصد خواهد بود. همچنین حداکثر دبی در شبکه توزیع آب تقریباً برابر حداکثر دبی در شرایط فعلی است.

واژه های کلیدی: شبکه توزیع آب، تحویل نوبتی، الگوی مصرف، جستجوی هارمونی، روش گسیلنده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۲ شهریور ۱۴۰۲ اصلاح: ۰۱ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۸ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۸ دی ۱۴۰۲

استناد: حقیقی، آ.، درویشی، آ.، و روشنی، ا. (۱۴۰۲). تأمین بهینه نوبتی آب در شبکه توزیع با در نظر گرفتن تغییر الگوی مصرف، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب،

۱۰.۲۲۱۲۶/ATWE.۲۰۲۴.۹۸۳۹.۱۰۶۶ (۴)۳، ۸۰-۹۳، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.9839.1066



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

تغییر اقلیم و افزایش جمعیت موجب افزایش مصرف در شبکه‌های توزیع آب و به دنبال آن افزایش سرعت جریان در لوله‌ها و کاهش فشار در گره‌ها شده است. کاهش فشار موجب می‌شود که برخی مشترکین امکان دریافت آب موردنیاز را نداشته باشند. برای حل این مشکل راه‌حل‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت وجود دارد. تعویض لوله‌ها با لوله‌ها با قطر بزرگ‌تر یکی از راهکارها است؛ اما نیازمند صرف زمان و هزینه قابل توجه است. تحویل نوبتی آب می‌تواند در شبکه‌های موجود برای حل مشکل به کار رود.

در تحویل نوبتی آب مشترکین به صورت مقطعی به آب دسترسی دارند. به عبارتی تنها در ساعات مشخصی از شبانه‌روز امکان تأمین آب را دارند. محققین در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب در حالت تحویل نوبتی از دو روش مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فشار استفاده کرده‌اند.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بزرگ‌حداد و همکاران^۱ (۲۰۱۶) باهدف پیشینه کردن تاب‌آوری تأمین آب و اعتمادپذیری مکانیکی، بهینه‌سازی چندهدفه تحویل نوبتی آب در شبکه‌های توزیع آب شهری را با استفاده از الگوریتم HBMO و مدل شبیه‌ساز Epanet به روش تحلیل مبتنی بر تقاضا برای دو شبکه توزیع آب انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ممکن است رفاه مصرف‌کنندگان با هدف قابلیت اطمینان مکانیکی در تعارض باشد.

سلگی و همکاران (۱۳۹۶) با هدف پیشینه‌سازی تعداد تأمین‌ها و رعایت قیودات در زمان بهره‌برداری از شبکه توزیع آب برنامه زمانی تأمین نوبتی آب در یک شبکه دو حلقه‌ای را با استفاده از الگوریتم HBMO و تحلیل مبتنی بر تقاضا بهینه کردند. در پژوهش آن‌ها یکنواختی توزیع آب با عنوان عدالت و تأمین یک مقدار حداقل از آب با عنوان انصاف تعریف شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از مدل تهیه‌شده امکان توزیع عادلانه آب با رعایت انصاف در شرایط تنش آبی بسیار شدید وجود دارد.

سلگی و همکاران^۲ (۲۰۱۵) یک مدل بهینه‌سازی را برای یافتن زمان‌بندی بهینه تأمین متناوب در شرایط مختلف کمبود آب با در نظر گرفتن اصول برابری و عدالت و به حداکثر رساندن تعداد گره‌های در یک شبکه توزیع آب با فشار مطلوب ارائه دادند. برنامه زمانی در یک شبکه دو حلقه‌ای را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل (HBMO) متصل به شبیه‌ساز هیدرولیکی بهینه کردند. نتایج نشان داد که مدل بهینه‌سازی، برنامه زمانی بهینه‌ای برای تأمین متناوب آب با رعایت اصول برابری و عدالت را در بین همه گره‌های شبکه حتی در صورت کمبود شدید آب ارائه می‌دهد.

سلطان جلیلی و همکاران^۳ (۲۰۱۳) جیره‌بندی آب در شبکه‌های توزیع آب شهری را مورد مطالعه قرار دادند. بهینه‌سازی با الگوریتم HBMO و با هدف تأمین آب با فشار کافی، مطلوبیت تأمین و رضایت مصرف‌کنندگان انجام شده است. مدل هیدرولیکی بر اساس تحلیل مبتنی بر تقاضا انجام شده است. آن‌ها مدل را برای یکی از زون‌های شهر تهران اجرا و نتایج را ارائه کردند.

تابش و همکاران (۱۳۹۹) بهینه‌سازی تأمین نوبتی آب را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تحلیل مبتنی بر فشار با هدف پیشینه‌سازی یکنواختی توزیع آب در شبکه و قابلیت اطمینان انجام دادند. آن‌ها با محاسبه برگشت‌پذیری به‌عنوان معیار کارایی به ارزیابی عملکرد سیستم پرداختند. مقایسه نتایج تحلیل مبتنی بر فشار با نتایج تحلیل مبتنی بر تقاضا نشان داد که در حالت اول تابع هدف در حدود ۲۰ درصد بیشتر از حالت دوم است.

اندی و کلکار^۴ (۲۰۰۹) میزان مصرف خانگی را در دو حالت دائم و نوبتی بررسی کردند. آن‌ها در چهار شهر کشور هندوستان با جمع‌آوری داده‌های مصرف آب قبل و بعد از تحویل نوبتی نشان دادند که میزان مصرف خانگی به کفایت تأمین آب بستگی دارد. به عبارتی در صورت تأمین فشار مناسب در حالت تحویل نوبتی آب، مصرف در مقایسه با حالت تحویل دائم تغییر محسوس نداشته است.

در روش تحلیل مبتنی بر فشار حداکثر دبی تأمین‌شده در گره برابر دبی تقاضا خواهد بود؛ اما بر اساس نتایج اندی و کلکار (۲۰۰۹) در تحویل نوبتی آب، در صورت وجود فشار مناسب مشترکین آب موردنیاز ساعات دیگر را نیز ذخیره می‌کنند؛ بنابراین تحلیل مبتنی بر فشار امکان شبیه‌سازی واقعی شبکه توزیع آب در حالت تحویل نوبتی را نخواهد داشت. در این پژوهش با استفاده از روش گسیلنده تحلیل هیدرولیکی شبکه

¹ Bozorg-Haddad et al

² Solgi et al

³ Soltanjalili et al

⁴ Andey and Kelkar

توزیع انجام شده است. این روش امکان برداشت بیشتر آب در ساعت تحویل را فراهم می کند. نتایج این روش با روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار مقایسه شده است.

روش پژوهش

روش تحلیل شبکه

روش دوم تحلیل مبتنی بر فشار^۱ (PDA) صریحاً رابطه بین فشار و تأمین تقاضا را در برمی گیرد. در این روش هنگامی که فشار گره به سطح خاصی کاهش یابد که تحت عنوان فشار مطلوب شناخته شود، تقاضای گره فقط می تواند تا حدی تأمین شود. زمانی که فشار گره به حداقل فشار شبکه برسد تأمین تقاضای گره ناچیز و یا صفر خواهد شد (لیو و همکاران^۲، ۲۰۱۱).

روابط مختلفی برای توصیف رابطه دبی و فشار توسط محققین ارائه شده است. چنگ و همکاران^۳ (۲۰۱۹) روابط مختلف دبی و فشار را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که رابطه ارائه شده توسط واگنر و همکاران^۴ (۱۹۸۸) مطابقت بیشتری با داده های آزمایشگاهی دارد. معادله ارائه شده توسط واگنر و همکاران (۱۹۸۸) مطابق رابطه (۱) است.

(۱)

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

در این رابطه q^{avl} و q^{req} به ترتیب دبی مورد نیاز و دبی موجود در گره و p^{avl} ، p^{req} و p^{min} به ترتیب فشار مورد نیاز، فشار موجود و فشار حداقل گره می باشند. بر اساس این رابطه چنانچه فشار بیش از فشار مورد نیاز گره باشد، دبی برداشتی از گره برابر دبی مورد تقاضا خواهد بود. در صورتی که در شبکه های با فشار بالا افزایش فشار موجب افزایش مصرف آب خواهد شد.

در زمان تحویل نوبتی آب، مصرف در گره ها بیش از تحویل پیوسته آب در همان ساعت خواهد بود. مشترکین در مدت محدود تحویل، آب بیشتری مصرف می کنند و مقداری آب را برای ساعات دیگر ذخیره خواهند کرد. به همین دلیل روش مبتنی بر فشار برای تحویل پیوسته مناسب خواهد بود (اندی و کلکار، ۲۰۰۹)

در روش گسیلنده^۵ مقدار آب برداشتی تابعی از فشار خواهد بود اما برخلاف روش مبتنی بر فشار محدودیت برداشت آب وجود نخواهد داشت. رابطه گسیلنده به صورت رابطه (۲) خواهد بود (کانتری راوی و همکاران^۶، ۲۰۱۹). در این رابطه ضریب گسیلنده K_e تابعی از تقاضای گره خواهد بود. به عبارتی هر چه دبی تقاضا بیشتر باشد این ضریب بزرگ تر و دبی برداشتی بیشتر است.

$$q_{avl} = K_e P_{avl}^n \quad (2)$$

$$K_e = \frac{q_j^{req}}{(p_j^{req} - p_j^{min})^\gamma} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{n_j} n_j = 1.88 - 2 \quad (4)$$

P_{avl} فشار در گره (متر آب) و q_{avl} دبی قابل برداشت در گره (لیتر بر دقیقه) است. هر چه دبی تقاضا در گره زیاد (ضریب گسیلنده بزرگ تر) باشد دبی برداشتی در زمان تحویل نوبتی افزایش خواهد یافت.

¹ Pressure Dependent Analysis

² Liu et al

³ Chang et al

⁴ Wagner et al

⁵ Emitter

⁶ Conety Ravi et al

توابع هدف

۱- درصد تأمین

هدف از شبکه‌های توزیع آب تأمین آب موردنیاز مصرف‌کنندگان با کیفیت و فشار مناسب است. مجموع آب تأمین شده در شبکه در یک شبانه‌روز به مقدار آب موردنیاز شبکه در یک شبانه‌روز به‌عنوان تابع هدف در مدل بهینه‌ساز به کار خواهد رفت (معادله (۵)).

$$OF = \frac{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{NN} q_j^s}{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{NN} q_j^{req}} \quad (5)$$

q^{req} دبی موردنیاز هر گره، q^s دبی تأمین شده هر گره و NN تعداد گره‌های شبکه است. مقدار این تابع هدف بین صفر و یک متغیر خواهد بود.

۲- یکنواختی توزیع

بهینه‌سازی با هدف افزایش درصد تأمین آب موجب افزایش تعداد گره‌های با مصرف پایین خواهد شد. به همین منظور تابع یکنواختی توزیع آب در شبکه به‌صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود (ایلیا- آیزا و همکاران^۱، ۲۰۱۸؛ گتتیپاتی و ناندوری^۲، ۲۰۱۴).

$$UC = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{NN} |s_p - s_{ave}|}{s_{ave} \times NN} \quad (6)$$

$$s_p = \frac{q_p^s}{q_p^{req}} \quad (7)$$

در این روابط q_p^s دبی تأمین شده در گره p ، q_p^{req} دبی موردنیاز در گره p و s_{ave} متوسط s_p در تمام گره‌ها است. مقدار این تابع هدف بین صفر و یک متغیر است.

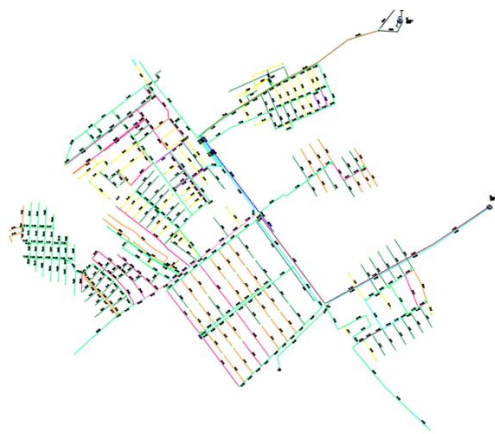
شبکه تازه‌آباد

مطابق شکل (۱) بعد از دریافت ازبیلت شبکه توزیع آب شهر تازه‌آباد از شرکت آب و فاضلاب کرمانشاه، به مدت دو هفته فشارسنجی شبکه انجام شد. با استفاده داده‌های فشار و نرم‌افزار واترجمز، شبکه توزیع کالیبره شد. شکل (۲) الگوی مصرف شبکه توزیع تازه‌آباد را نشان می‌دهد. در این شبکه کمترین ضریب مصرف ۰/۴۵ در ساعت ۴ و بیشترین ضریب برابر ۱/۴ در ساعت ۱۲ است؛ بنابراین بیشترین فشارها در ساعت ۴ و کمترین فشارها در ساعت ۱۲ است.

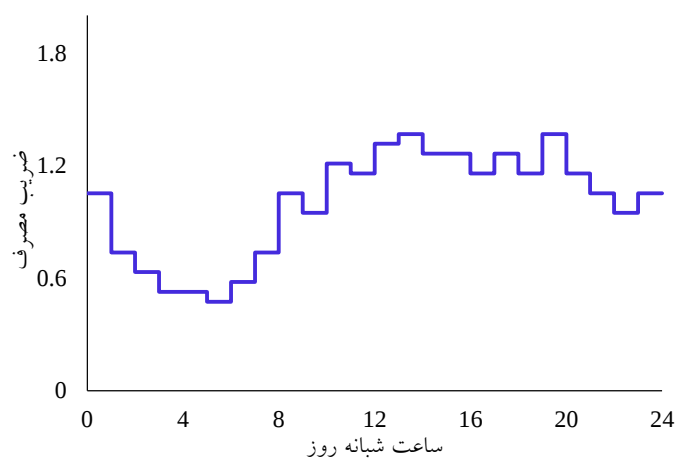
طول خطوط لوله در شبکه توزیع آب شهر تازه‌آباد حدود ۴۰ کیلومتر است. باوجود کوچک بودن شبکه توزیع و پر بودن مخزن برخی نواحی شبکه دارای فشار پایین و در برخی ساعات فشار حدود صفر است. علت این مشکل افت در برخی لوله‌های است که نیاز به نصب لوله‌های با قطر بالاتر در شبکه است. برای حل موقت این مشکل تحویل نوبتی آب برای شبکه پیشنهاد داده می‌شود. بر اساس جانمایی شیرآلات در شبکه توزیع آب تازه‌آباد به ۶ ناحیه مطابق شکل (۳) تقسیم شده است؛ بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم برابر ۶ خواهد بود.

¹ Ilaya-Ayza et al

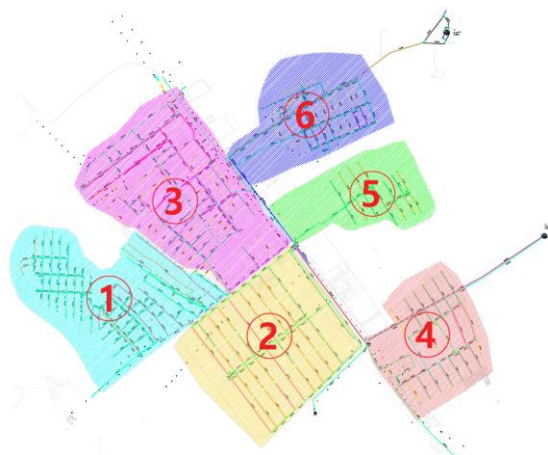
² Gottipati & Nanduri



شکل ۱. جانمایی شبکه توزیع آب تازه آباد



شکل ۲. تغییرات ضریب الگوی مصرف شبکه تازه آباد



شکل ۳. تقسیم بندی نواحی شبکه توزیع آب تازه آباد

الگوریتم جستجوی هماهنگ

با توجه به پیچیدگی شبکه‌های توزیع آب، در بهینه‌سازی مسائل مربوط به آن‌ها از الگوریتم‌های فرا کاوشی استفاده می‌شود. از میان الگوریتم‌های فرا کاوشی، الگوریتم جستجوی هماهنگ^۱ در بهینه‌سازی مسائل شبکه‌های توزیع آب نتایج بهتری را ارائه کرده‌اند. این الگوریتم اولین بار توسط گییم و همکاران^۲ (۲۰۰۱) معرفی شد و از موسیقی الهام گرفته است. با توجه به اینکه در هر تکرار تنها یک جواب جدید ایجاد می‌شود، زمان اجرای کمتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر لازم دارد.

مراحل این الگوریتم به قرار زیر است:

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

با توجه به توابع هدف، الگوریتم جستجوی هماهنگ تک هدفه و چند هدفه در این پژوهش به‌کاررفته است. در الگوریتم تک هدفه درصد تأمین تابع هدف است و در الگوریتم دو هدفه علاوه بر درصد تأمین، یکنواختی توزیع نیز تابع هدف خواهد بود.

سناریوها

به‌منظور تحویل بهینه نوبتی آب در شبکه توزیع آب تازه‌آباد سه سناریو طراحی شده است. در هر سناریو به دو روش هیدرولیکی مبتنی بر فشار و گسیلنده مدل هیدرولیکی به‌صورت تک هدفه و دو هدفه اجرا شده است. مدت‌زمان تحویل آب به هر ناحیه در سناریو اول ۱۲ ساعت، در سناریو دوم ۸ ساعت و در سناریو سوم ۶ ساعت بوده است. نتایج هر سناریو به تفکیک ارائه و موردبحث قرار گرفته است. در تمامی این سناریوها ساعت تحویل آب متغیر تصمیم است.

یافته‌ها

سناریو اول (تحویل ۱۲ ساعته)

این سناریو مدت‌زمان تحویل آب به هر ناحیه ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است. نسبت دبی تأمین‌شده به دبی موردنیاز و یکنواختی توزیع هر دو به‌عنوان تابع هدف موردبررسی قرار گرفت. نتایج این سناریو برای هر دو روش تحلیل در جدول (۱) آمده است. نتایج روش PDA در هر دو الگوریتم یکسان است اما در الگوریتم دو هدفه به روش گسیلنده در مقایسه با الگوریتم تک هدفه نسبت دبی تأمین‌شده به دبی موردنیاز کاهش و یکنواختی توزیع افزایش یافته است. به عبارتی افزایش یکنواختی توزیع آب در گر‌ها موجب کاهش درصد تأمین کل شبکه شده است.

جدول ۱. نتایج سناریو اول (تحویل ۱۲ ساعته)

الگوریتم	روش تحلیل هیدرولیکی	Supply Required	UC	ساعت تحویل آب					
				ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵	ناحیه ۶
تک هدفه	PDA	۰/۵۴۶۸	۰/۹۳۱۵	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴
	Emitter	۱/۰۰۸	۰/۷۶۸	۰-۱۲	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۰-۱۲	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴
دو هدفه	PDA	۰/۵۴۶۸	۰/۹۳۱۵	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴	۱۲-۲۴

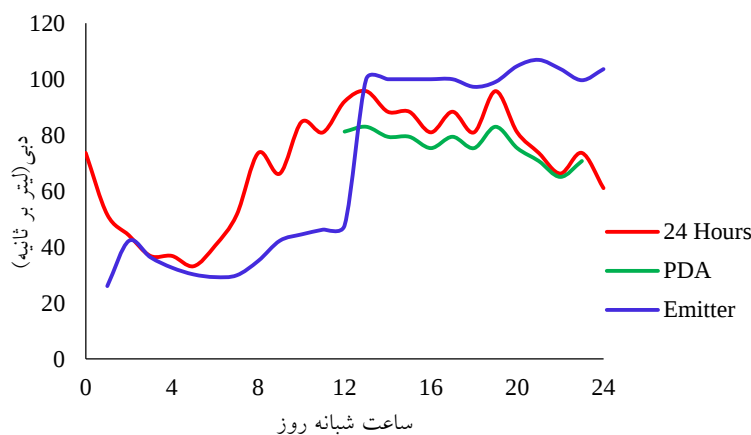
^۱ Harmony Search

^۲ Geem et al

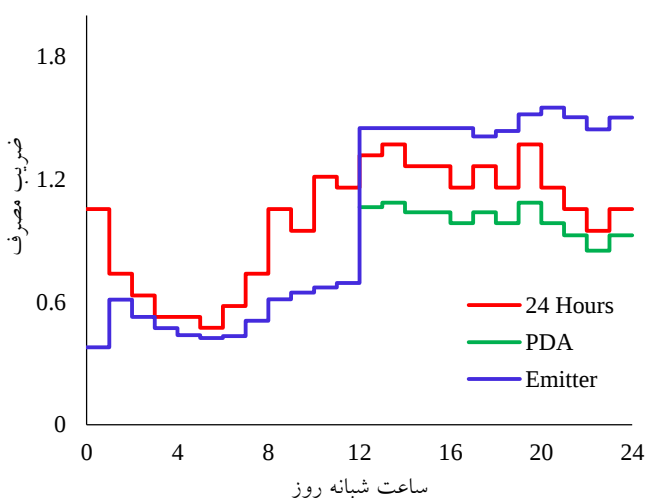
Emitter ۰/۹۸۷ ۰/۷۹ ۰-۱۲ ۱۲-۲۴ ۱۲-۲۴ ۱۲-۲۴ ۰-۱۲ ۱۲-۲۴

در شکل (۴) تغییرات دبی با زمان برای هر دو روش تحلیل هیدرولیکی و حالت تأمین ۲۴ ساعته با استفاده از الگوریتم دو هدفه ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می شود در روش گسیلنده از ساعت ۱۲ ظهر تا ۱۲ شب، دبی بیش از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. در روش مبتنی بر فشار محدوده تغییرات دبی از ۶۵ تا ۸۳ لیتر بر ثانیه و در روش گسیلنده دبی از ۲۶ تا ۱۰۷ لیتر بر ثانیه متغیر است.

شکل (۵) تغییرات ضریب مصرف نسبت به زمان را نشان می دهد. در روش تحلیل مبتنی بر فشار ضرایب کمتر از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. در روش تحلیل مبتنی بر فشار ضرایب از ۰/۸۵ تا ۱/۰۸ متغیر است و همواره کمتر از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. در حالی که در روش گسیلنده ضرایب در محدوده ۰/۳۸ و ۱/۵۵ قرار دارد.



شکل ۴. تغییرات دبی با زمان در تحویل ۱۲ ساعته با الگوریتم دو هدفه



شکل ۵. تغییرات ضریب دبی با زمان در تحویل ۱۲ ساعته با الگوریتم دو هدفه

سناریو دوم (تحویل ۸ ساعته)

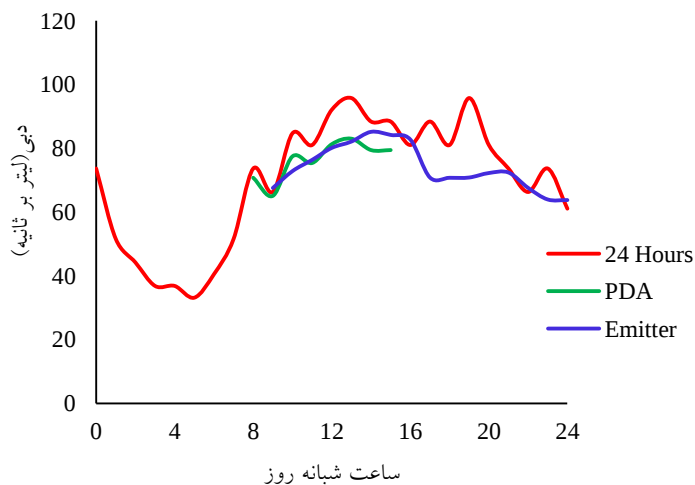
در این سناریو مدت زمان تحویل آب به هر ناحیه ۸ ساعت است. نتایج این سناریو برای هر دو روش تحلیل در جدول (۲) آمده است. نتایج روش PDA در هر دو الگوریتم یکسان است و در این روش آب به تمام نواحی در ساعت ۸ تا ۱۶ (ساعت اوج مصرف) تحویل داده شده است؛ که موجب کاهش درصد تأمین کل شبکه شده است.

درروش گسیلنده با هر دو روش تحلیل هیدرولیکی به سه ناحیه از ساعت ۸ تا ۱۶ و سه ناحیه دیگر از ساعت ۱۶ تا ۲۴ آب تحویل داده شده است. با الگوریتم دو هدفه در مقایسه با الگوریتم تک هدفه درصد تأمین یکسان و یکنواختی توزیع افزایش یافته است. میزان توابع هدف در این سناریو نسبت به سناریو تحویل ۱۲ ساعته کاهش زیادی داشته است. به عبارتی با تحویل ۸ ساعته آب تعداد قابل توجه از مشترکین امکان برداشت آب کافی را نخواهند داشت که موجب نارضایتی آن‌ها خواهد شد. این نتایج منطبق بر داده‌های میدانی فن و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۴ است. با کاهش تعداد ساعت تحویل آب حجم آب برداشتی توسط مشترکین ۲۲۵ روستا در چین کاهش پیدا کرده است.

جدول ۲. نتایج سناریو دوم

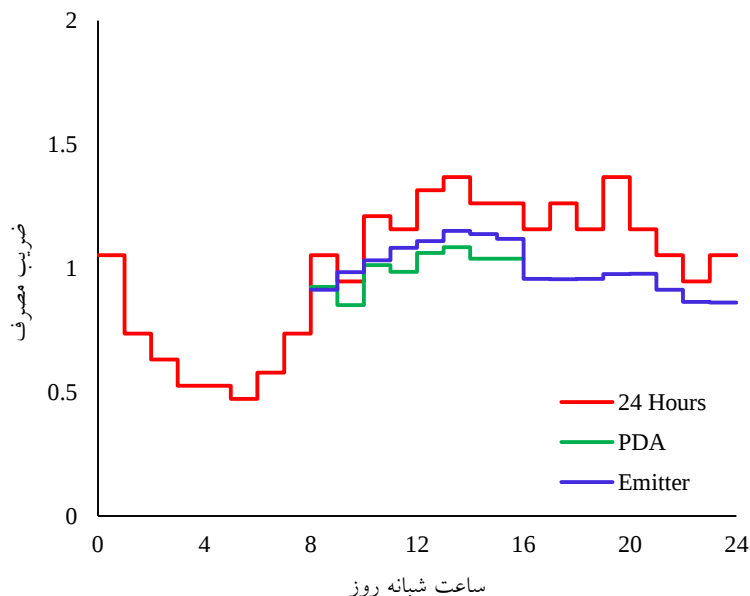
الگوریتم	روش تحلیل هیدرولیکی	Supply Required	UC	ساعت تحویل آب					
				ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵	ناحیه ۶
تک هدفه	PDA	۰/۳۶۴	۰/۹۳۱	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶
	Emitter	۰/۷۰۵	۰/۸۶۹	۱۶-۲۴	۱۶-۲۴	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶	۱۶-۲۴
دو هدفه	PDA	۰/۳۶۴	۰/۹۳۱	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶	۸-۱۶
	Emitter	۰/۷۰۵	۰/۸۷۲	۱۶-۲۴	۱۶-۲۴	۸-۱۶	۸-۱۶	۱۶-۲۴	۸-۱۶

در شکل (۶) تغییرات دبی با زمان برای هر دو روش و حالت تأمین ۲۴ ساعته در الگوریتم دو هدفه ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو روش دبی کمتر از حالت تحویل پیوسته است. درروش مبتنی بر فشار محدوده تغییرات دبی از ۶۵ تا ۸۳ لیتر بر ثانیه و درروش گسیلنده دبی از ۶۴ تا ۸۵ لیتر بر ثانیه متغیر است. به عبارتی محدوده تغییرات دبی برای هر دو روش یکسان است. شکل (۷) تغییرات ضریب مصرف نسبت به زمان را نشان می‌دهد. درروش تحلیل مبتنی بر فشار ضرایب کمتر از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. درحالی‌که درروش گسیلنده ضرایب بیش از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. درروش تحلیل مبتنی بر فشار ضرایب از ۰/۸۵ تا ۱/۰۸۵ متغیر است و همواره کمتر از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. همچنین در روش گسیلنده ضرایب در محدوده ۰/۸۶ و ۱/۱۵ قرار دارد.



شکل ۶. تغییرات دبی با زمان در تحویل ۸ ساعته

¹ Fan et al



شکل ۷. تغییرات ضریب دبی با زمان در تحویل ۸ ساعته

سناریو سوم (تحویل ۶ ساعته)

نتایج این سناریو برای هر دو روش تحلیل هیدرولیکی در جدول (۳) آمده است. در روش تحلیل هیدرولیکی PDA آب به تمام نواحی از ساعت ۱۲ تا ۱۸ تحویل داده شده است. در این روش باوجود بالا بودن یکنواختی توزیع، درصد تأمین کمتر از ۳۰ درصد است و به عبارتی کمتر از ۳۰ درصد نیاز شبکه تأمین شده است.

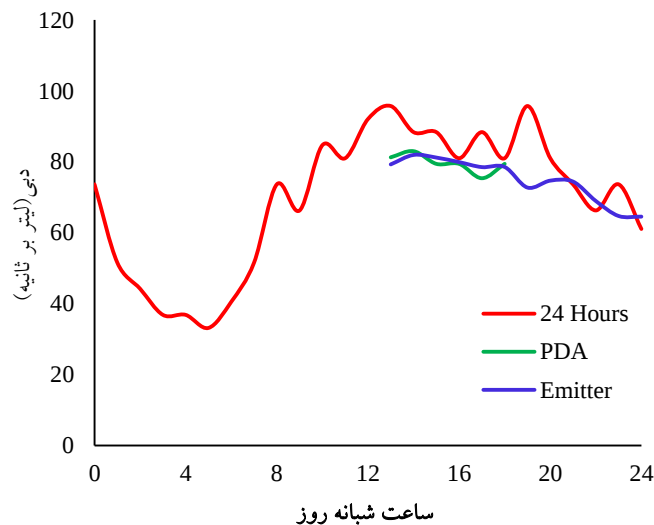
در روش گسیلنده به نصف نواحی شبکه از ساعت ۱۲ تا ۱۸ و نصف دیگر از ساعت ۱۸ تا ۲۴ آب تحویل داده شده است. در الگوریتم دو هدفه به روش گسیلنده در مقایسه با الگوریتم تک هدفه درصد تأمین کاهش و یکنواختی توزیع افزایش یافته است. به عبارتی الگوریتم دوهدفه با افزایش یکنواختی توزیع، درصد تأمین را کاهش داده است.

جدول ۳. نتایج سناریو سوم

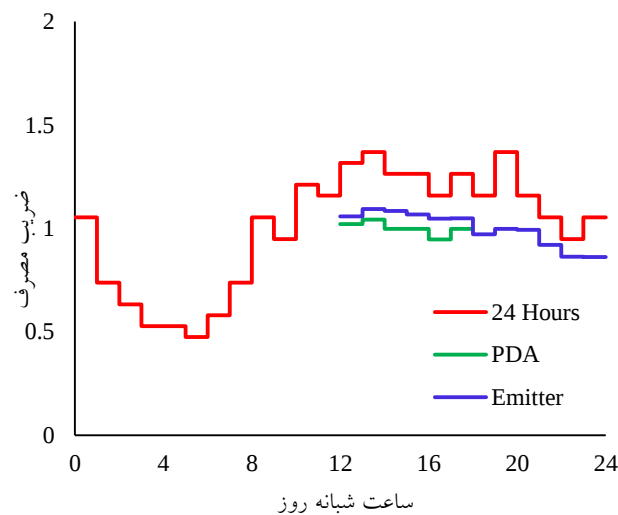
الگوریتم	روش تحلیل هیدرولیکی	Supply Required	UC	ساعت تحویل آب					
				ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵	ناحیه ۶
تک هدفه	PDA	۰/۲۸۴۶	۰/۹۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸
	Emitter	۰/۵۴۴	۰/۸۵۷۷	۱۸-۲۴	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۸-۲۴	۱۸-۲۴	۱۲-۱۸
دو هدفه	PDA	۰/۲۸۴۶	۰/۹۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸
	Emitter	۰/۵۳۶	۰/۸۵۹	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۸-۲۴	۱۲-۱۸	۱۸-۲۴	۱۸-۲۴

در شکل (۸) تغییرات دبی با زمان برای هر دو روش و حالت تأمین ۲۴ ساعته برای الگوریتم دو هدفه ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می شود در هر دو روش دبی کمتر از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. محدوده تغییرات دبی در روش مبتنی بر فشار بین ۸۱ تا ۹۶ لیتر بر ثانیه و در روش گسیلنده ۶۴ تا ۸۲ لیتر بر ثانیه است.

شکل (۹) تغییرات ضریب مصرف نسبت به زمان با الگوریتم دو هدفه را نشان می‌دهد. در هر دو روش تحلیل هیدرولیکی ضرایب کمتر از حالت تأمین ۲۴ ساعته است. در روش تحلیل مبتنی بر فشار ضرایب از ۰/۹۵ تا ۱/۰۴ متغیر است. درحالی‌که در روش گسیلنده ضرایب در محدوده ۰/۸۶ و ۱/۰۹ قرار دارد. در این سناریو برای هر دو حالت محدوده تغییرات دبی و فشار کمتر از تحویل ۲۴ ساعته است.



شکل ۸. تغییرات دبی با زمان در تحویل ۶ ساعته



شکل ۹. تغییرات ضریب دبی با زمان در تحویل ۶ ساعته

بحث

در تحلیل تحویل نوبتی آب در شبکه‌های توزیع آب از روش مبتنی بر فشار استفاده می‌شود. این روش در تحویل ۲۴ ساعته قابل اعتماد است؛ اما در تحویل نوبتی مشترکین علاوه بر برداشت آب مورد نیاز ساعت تأمین، برای ساعات دیگر نیز اقدام به ذخیره آب خواهند کرد. در این پژوهش با روش مبتنی بر فشار و گسیلنده تحویل نوبتی بهینه شده است. تحویل آب به شبکه تازه‌آباد به صورت تحویل ۱۲، ۸ و ۶ ساعته بهینه شده است.

نتیجه گیری

در روش PDA درصد تأمین بسیار کمتر از روش گسیلنده است درحالی که یکنواختی توزیع بیشتر از روش گسیلنده است. در این روش آب در یک نوبت به کل شبکه تحویل داده شده است. با این حال دبی تحویلی به شبکه کمتر از شرایط فعلی است. به عبارتی این روش امکان شبیه سازی شبکه در شرایط معمول را ندارد.

در روش گسیلنده تحویل آب به شبکه در تمام سناریوها در دو نوبت است. در تحویل ۸ و ۶ ساعته تحویل در ساعات کم مصرف انجام نشده است. در الگوریتم تک هدفه و تحویل ۱۲ ساعته حداکثر دبی در شبکه بیش از حداکثر وضعیت فعلی شبکه است؛ اما در تحویل ۸ و ۶ ساعته حداکثر دبی به حداکثر مصرف فعلی شبکه بسیار نزدیک است. همچنین تغییرات دبی نیز کمتر از تغییرات دبی در وضعیت فعلی شبکه است. به عبارتی فشار در گره ها و سرعت جریان در لوله ها به شرایط فعلی نزدیک تر است؛ اما میزان آب تحویلی به شبکه نسبت به حالت ۱۲ ساعته کاهش یافته است.

بر اساس نتایج می توان گفت برای شهر تازه آباد با توجه به دبی وضعیت فعلی و میزان آب تحویلی، در صورت تحویل نوبتی بهتر است به صورت ۸ ساعته انجام شود. در این صورت حدود ۷۰ درصد آب مورد نیاز تأمین خواهد شد و حداکثر دبی در شبکه به حداکثر دبی موجود نزدیک خواهد بود.

منابع

- تابش، مسعود، صفایی بروجنی، رضا، شیرزاد، اکبر، و شکوهی، میثم. (۱۳۹۹). بهینه سازی سامانه های تأمین آب نوبتی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار. مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۳)، ۲۵-۱۲.
<https://doi.org/10.22093/wwj.2019.108365.2553>
- سلگی، محمد، بزرگ حداد، امید، و قاسمی ابیازنی، پریرسا. (۱۳۹۶). بهره برداری بهینه از شبکه های توزیع آب شهری تحت شرایط کمبود به روش تأمین نوبتی. مجله آب و فاضلاب، ۲۸(۳)، ۱۲-۱. <https://doi.org/10.22093/wwj.2016.17571>

References

- Andey, S., & Kelkar, P. (2009). Influence of intermittent and continuous modes of water supply on domestic water consumption. *Water Resour. Manage*, 23(12), 2555–2566.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11269-008-9396-8>
- Tabesh, M., Safaiee Broujeni, R., Shirzad, A., & Shokoohi, M. (2020). Optimization of Intermittent Water Supply Systems Using Particle Swarm Optimization Algorithm and Pressure Driven Hydraulic Analysis. *Journal of Water and Wastewater, Ab va Fazilab*, 31(3), 12-25. <https://doi.org/10.22093/wwj.2019.108365.2553> [In Persian]
- Solgi, M., bozorg haddad, O., & Ghasemi Abiazani, P. (2017). Optimal Intermittent Operation of Water Distribution Networks under Water Shortage. *Journal of Water and Wastewater, Ab va Fazilab*, 28(3), 1-12. <https://doi.org/10.22093/wwj.2016.17571> [In Persian]
- Bozorg Haddad, O., Ghajarnia, N., Solgi, M., Loáiciga, H. A., & Mariño, M. (2016). A DSS-based honeybee mating optimization (HBMO) algorithm for single-and multi-objective design of water distribution networks. In *Metaheuristics and optimization in civil engineering*, 199-233, Springer, Cham. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-26245-1_10
- Chang, D., Lee, H., Yoo, D., & Kim, J. (2019). Quantification of the head-outflow relationship for pressure-driven analysis in water distribution networks. *KSCE J. Civ. Eng*, 23, 3353–3363.
<https://doi.org/10.1007/s12205-019-1883-3>
- Conety Ravi, S., Thurvas Renganathan, N., Perumal, S., & Paez, D. (2019). Analysis of water distribution network under pressure-deficient conditions through emitter setting. *Drink. Water Eng. Sci*, 12(1), 1-13. <http://dx.doi.org/10.5194/dwes-12-1-2019o>

- Fan, L., Liu, G., Wang, F., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2014). Domestic water consumption under intermittent and continuous modes of water supply. *Water resources management*, 28(3), 853-865. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0520-7>
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *SIMULATION*, 76(2), 60-68. <http://dx.doi.org/10.1177/003754970107600201>
- Gottipati, P. V., & Nanduri, U. V. (2014). Equity in water supply in intermittent water distribution networks. *Water and Environment Journal*, 28(4), 509-515. <http://dx.doi.org/10.1111/wej.12065>
- Ilaya-Ayza, A. E., Martins, C., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2018). Gradual transition from intermittent to continuous water supply based on multi-criteria optimization for network sector selection. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 330, 1016-1029. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cam.2017.04.025>
- Liu, J. G. Yu, & D. Savic. (2011). Deficient-network Simulation Considering Pressure-dependent Demand. *ICPTT*, 886-900. [https://doi.org/10.1061/41202\(423\)94](https://doi.org/10.1061/41202(423)94)
- Solgi, M., Bozorg Haddad, O., Seifollahi-Aghmiuni, S., & Loáiciga, H. A. (2015). Intermittent operation of water distribution networks considering equanimity and justice principles. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 6(4), 04015004. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000198](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000198)
- Solgi, M., Bozorg-Haddad, O., Seifollahi-Aghmiuni, S., Ghasemi-Abiazani, P., & Loáiciga, H. A. (2016). Optimal operation of water distribution networks under water shortage considering water quality. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 7(3), 04016005. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000233](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000233)
- Soltanjalili, M. J., Bozorg Haddad, O., & Marino, M. A. (2013). Operating water distribution networks during water shortage conditions using hedging and intermittent water supply concepts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 644-659. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000315](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000315)
- Suribabu, C. R., & Sivakumar, P. (2023). Analysis of Intermittent Water Distribution Networks Using a Dummy Emitter Device at Each Demand Node. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 14(3), 06023003. <http://dx.doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1222>
- Wagner, J. M., Shamir, U., & Marks, D. H. (1988). Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:3\(276\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(276))



Evaluation of triangle algorithm for estimation of actual evapotranspiration of pistachio in Kerman plain

Ameneh Mianabadi¹ , Mojdeh Salimifard² , Maryam Salajegheh³

¹ Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. E-mail: ammianabadi@gmail.com

² Ph. D Student of Agrometeorology, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: mozhdehsalimi18@gmail.com

³ Ph. D Student of Agrometeorology and Expert of Meteorology of Kerman, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: m.salajegheh@yahoo.com

ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the key components of water balance and irrigation planning. Thus, the accurate estimation of this component and the water consumption of plants can improve the management of water use and increase the efficiency of water consumption. Due to the limitation of tools for measuring evaporation-transpiration, remote sensing methods can be used for this purpose. In this paper, the triangular algorithm was used to estimate evapotranspiration in the Kerman Plain in the growing seasons of 2020 (1399) and 2021 (1400). The results of this method were presented as the spatial distribution map of Evapotranspiration. To validate the results of the algorithm, the actual evapotranspiration obtained using the triangular method for a pistachio orchard, which was under irrigation management, was compared to the values obtained by the FAO-56 method. The results showed that the amount of evapotranspiration for pistachio was estimated with acceptable accuracy ($r=0.73$ and $RMSE=1.8$, $ME=-1.6$, $nRMSE=0.4$). However, the NSE less than zero (-1.3) shows that the observed (FAO-56) mean is a better predictor than the Triangle algorithm. The values obtained from the triangular algorithm were lower than the values of FAO 56, which could be due to the uncertainty of the algorithm, uncertainty in the measured data, or due to the time difference between the date of the selected images and the date of irrigation.

Keywords: NDVI, Landsat, LST, Remote Sensing.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 29 September 2023 Revised: 08 December 2023 Accepted: 28 December 2023 ePublished: 28 December 2023

1. Introduction

Evapotranspiration is one of the key components of water balance and irrigation planning. Thus, the accurate estimation of this component and the water consumption of plants can improve the management of water use and increase the efficiency of water consumption. Due to the limitation of tools for measuring evaporation-transpiration, remote sensing methods can be used for this purpose. There are several remote sensing algorithms for actual evaporation estimation including SEBAL, SEBS, Metric, etc. In this study we used the triangle method which only was used by Salimifard et al. (2022) in Mashhad Plain. They evaluated the results for the agricultural products, i.e., wheat and maize. The aim of this study is to evaluate the triangle method for a horticultural crop, i.e., pistachio in Kerman Plain.

2. Methodology

The study area is Kerman Plain in which pistachio is one of the most important agricultural products. Due to water scarcity in this plain, determining the water requirement of the crops is crucial for agricultural activities. Accordingly, it is important to have an appropriate estimation of actual evapotranspiration in the plain. In this paper, the triangular algorithm was used to estimate actual evapotranspiration in the Kerman Plain in the growing seasons of 2020 (1399) and 2021 (1400). For this purpose, the Landsat 8 satellite images with less than 10% cloudiness were used. The variables such as NDVI, LST, etc., were calculated by using the JAVA programming language in the Google Earth Engine code (GEE) system environment. The required meteorological data of Kerman station were acquired from IRIMO. The triangular algorithm is based on the two-dimensional spatial plot of normalized LST and normalized NDVI, which were calculated using bands 10, 5, and 4 of the Landsat 8 in the GEE. Estimation of the wet and dry edges was conducted by MATLAB code. The actual evapotranspiration obtained using the triangular method for a pistachio orchard, which was under irrigation management, was compared to the values obtained by the FAO-56 method. The results were evaluated by correlation coefficient (r), Root Mean Square Error (RMSE), and Mean Error (ME).

3. Results and discussion

The results showed that the amount of evapotranspiration for pistachio was estimated with acceptable accuracy ($r=0.73$ and $RMSE=1.8$, $nRMSE=0.4$, $ME=-1.6$). However, the NSE less than zero (-1.3) shows that the observed (FAO-56) mean is a better predictor than the Triangle

algorithm. The values obtained from the triangular algorithm were lower than the values of FAO 56, which was in line with the results of the previous studies for both Agricultural and horticultural crops. This underestimation could be due to the uncertainty of the algorithm, uncertainty in the measured data, or due to the time difference between the date of the selected images and the date of irrigation. Moreover, inappropriate quality of water and soil in Kerman Plain and the uncertainty of plant coefficients used are among the factors that can underestimate evapotranspiration values by the algorithm.

4. Conclusions

In this study, the triangular algorithm was used to estimate actual evapotranspiration in Kerman plain using remote sensing data. Actual evapotranspiration values obtained from the triangular algorithm were lower than FAO 56 values, which might be due to the uncertainty of the algorithm, uncertainty in the measured data, uncertainty of plant coefficients, or due to the time difference between the date of the selected images and the date of irrigation. To have a better evaluation of the remote sensing algorithms, it can be suggested to develop and apply a micro lysimeter in the farms and orchards, or to use the soil water balance of the farms and orchards. These may help to choose the more appropriate algorithm for the given study area, leading to providing the more proper and applicable advices for the farmers for managing the shortage of the water resources. Furthermore, it may help to update the crop coefficients which may lead to better estimation of evapotranspiration.

5. References

Salimi Fard, M., Sanainejad, S.H., & Rashki, A. (2022). Actual evapotranspiration estimation by Triangle algorithm and landsat 8 data (Case study: Mashhad plain-Khorasan Razavi province). Journal of RS and JIS for natural Resources, Ready to Publish.
<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.695287>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors are grateful to Dr. Ehsan Mohammadi for his guidance and providing information about the pistachio garden under study.

Cite this article: Mianabadi, A., Salimifard, M., & Salajegheh, M. (2023). Evaluation of triangle algorithm for estimation of actual evapotranspiration of pistachio in Kerman plain, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 94-115. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10064.1069

Publisher: Razi University

© The Author(s).





ارزیابی الگوریتم مثلی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی پسته در دشت کرمان

آمنه میان‌آبادی^۱، مؤده سلیمی فرد^۲، مریم سلاجقه^۳

^۱ نویسنده مسئول، استادیار گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. رایانامه: ammianabadi@gmail.com
^۲ دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: mozhdehsalimi18@gmail.com
^۳ دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی و کارشناس اداره کل هواشناسی کرمان، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: m.salajegheh@yahoo.com

چکیده

تبخیر-تعرق یکی از مؤلفه‌های کلیدی بیلان آب و برنامه‌ریزی آبیاری است. بنابراین برآورد دقیق این مؤلفه می‌تواند باعث بهبود مدیریت بهره‌برداری از آب و افزایش راندمان مصرف آب شود. با توجه به محدودیت ابزار اندازه‌گیری تبخیر-تعرق، روش‌های سنجش‌ازدور می‌تواند به این منظور استفاده شود. در این مقاله از الگوریتم مثلی برای تخمین تبخیر-تعرق در دشت کرمان در فصل‌های رشد ۱۳۹۹ (۲۰۲۰) و ۱۴۰۰ (۲۰۲۱) استفاده و نتایج آن به‌صورت نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر-تعرق ارائه شد. برای صحت‌سنجی نتایج الگوریتم، مقدار تبخیر-تعرق واقعی به‌دست‌آمده با استفاده از روش مثلی برای یک باغ پسته که دارای شرایط مدیریت‌شده (بدون تنش) بود، با مقادیر حاصل از روش فائو ۵۶ مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق برای این باغ پسته با دقت قابل‌قبولی تخمین زده‌شده است (ضریب همبستگی ۰/۷۳، میانگین خطا ۱/۶- میلی‌متر در روز، جذر میانگین مربعات خطا ۱/۸ میلی‌متر در روز و $nRMSE$ برابر ۰/۴). اگرچه مقدار منفی ضریب نش-ساتکلیف (۱/۳-) نشان می‌دهد که میانگین مقادیر حاصل از فائو ۵۶ پیش‌بینی بهتری از الگوریتم مثلی ارائه می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده از الگوریتم مثلی کمتر از مقادیر فائو ۵۶ بود که می‌تواند به دلیل عدم قطعیت موجود در الگوریتم، عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده و یا اختلاف‌زمانی بین تاریخ تصاویر انتخابی و تاریخ آبیاری باشد.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح زمین، سنجش‌ازدور، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، لندست.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۷ مهر ۱۴۰۲ اصلاح: ۱۷ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۷ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۷ دی ۱۴۰۲

استناد: میان‌آبادی، آ.، سلیمی‌فرد، م.، و سلاجقه، م. (۱۴۰۲). ارزیابی الگوریتم مثلی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی پسته در دشت کرمان، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۴)، ۹۴-۱۱۵. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10064.1069



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

آب و منابع آبی یکی از عناصر مهم در توسعه اجتماعی-اقتصادی کشورها است که با توجه به رشد جمعیت و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و به تبع آن افزایش تقاضا، اهمیت آن در سال‌های اخیر و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دوچندان شده است؛ بنابراین جهت ارزیابی منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب، بررسی بیلان آب در حوضه‌های آبریز در مقیاس‌های زمانی مختلف از اهمیت بسیاری برخوردار است. در مناطق خشک به دلیل نوسانات و ناهنجاری‌های بارش، تعیین مؤلفه‌های بیلان آب به‌ویژه تبخیر-تعرق یکی از مسائل و دغدغه‌های اصلی کشاورزان و متخصصین هیدرولوژی است. از سوی دیگر با توجه به اهمیت فعالیت‌های کشاورزی و تولید غذا در مناطق خشک و نیمه‌خشک و کمبود آب که ازجمله مهم‌ترین محدودیت‌های اکولوژیکی در این مناطق است، مدیریت صحیح و برداشت پایا از منابع آبی و داشتن برنامه آبیاری از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های مختلفی برای تخمین میزان تبخیر-تعرق وجود دارد که به دودسته کلی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مستقیم شامل اندازه‌گیری تبخیر-تعرق با استفاده از ابزاری چون تشت تبخیر، برج شار همبستگی پیچکی و لایسیمتر می‌باشند. روش‌های غیرمستقیم اغلب بر پایه داده‌های سنجش‌ازدور بوده و برخلاف روش‌های مستقیم که مقدار تبخیر-تعرق را به‌صورت نقطه‌ای ارائه می‌کنند، مقدار این متغیر را به‌صورت پهنه‌های مکانی در اختیار قرار می‌دهند.

برای تخمین تبخیر-تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از الگوریتم‌های مختلفی همچون SEBI (مننتی و همکاران^۱، ۱۹۹۳)، SEBAL (باستیاانسن و همکاران^۲، ۱۹۹۸a,b)، S-SEBI (رورینک و همکاران^۳، ۲۰۰۰)، SEBS (سو^۴، ۲۰۰۲) و METRIC (آلن و همکاران^۵، ۲۰۰۷) به‌عنوان مدل‌های تک‌جزئی و S-TSEB (شاتلوورث و همکاران^۶، ۱۹۸۵) و P-TSEB (کاستاس و همکاران^۷، ۱۹۹۹؛ نورمن^۸ و همکاران، ۱۹۹۵) به‌عنوان مدل‌های دوجزئی استفاده می‌شود. پیش از استفاده از این مدل‌ها باید توانایی، کاربردها و محدودیت‌های آن‌ها را برای مناطق مختلف و در شرایط آب و هوایی متفاوت بررسی نمود. اگرچه بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که مدل‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور می‌تواند توزیع منطقی از تبخیر-تعرق در مناطق مختلف داشته باشد، اما در بعضی موارد، مقدار تبخیر-تعرق در مقیاس پیکسل دقت مناسبی را نشان نمی‌دهد (گائو^۹ و همکاران، ۲۰۰۸)؛ بنابراین این الگوریتم‌ها برای هر منطقه و برای انواع کشت‌های زراعی و باغی باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

اغلب الگوریتم‌ها و مدل‌های ارائه‌شده برای تخمین تبخیر-تعرق نیازمند داده‌های زمینی شامل دمای هوای نزدیک سطح زمین، سرعت باد، کمبود فشار بخار و ارتفاع گیاه می‌باشند که به دلیل عدم وجود داده کافی در مقیاس‌های وسیع مکانی، امکان استفاده از این الگوریتم‌ها برای تخمین پهنه مناسبی از تبخیر-تعرق با محدودیت روبه‌رو می‌شود (تانگ و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۰). برای غلبه بر این محدودیت، الگوریتم‌هایی ارائه‌شده است که تنها متکی بر داده‌های ماهواره‌ای هستند. از آن جمله می‌توان به روش مثلثی Ts-VI¹¹ اشاره نمود. این روش توسط جیانگ^{۱۲} و اسلام^{۱۳} (۱۹۹۹، ۲۰۰۱، ۲۰۰۳) توسعه و بهبود یافت. روش مثلثی بر مبنای معادله پریستلی-تیلور و بر اساس روابط فیزیکی میان پارامتر کسر تبخیر و پارامترهای سطحی مانند دمای سطح زمین، رطوبت خاک و میزان پوشش گیاهی است (جیانگ و اسلام، ۱۹۹۹).

¹ Menenti et al

² Bastiaanssen et al

³ Roerink et al

⁴ Su

⁵ Allen et al

⁶ Shuttleworth et al

⁷ Kustas et al

⁸ Norman et al

⁹ Gao et al

¹⁰ Tang et al

¹¹ Surface Temperature-Vegetation Index

¹² Jiang

¹³ Islam

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات مختلفی در سرتاسر جهان برای بررسی کاربردی بودن این روش در تخمین تبخیر-تعرق صورت گرفته است که اغلب با نتایج قابل قبولی همراه بوده‌اند. لو و همکاران^۱ (۲۰۱۵) از روش مثلی برای تخمین تبخیر-تعرق در امریکا استفاده و نتایج حاصل را با نتایج داده‌های به‌دست‌آمده از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری مقایسه کردند. ضریب تبیین ۵۴/۵ تا ۶۹/۶ درصد و میانگین مربع ریشه خطا ۴۰/۳ وات بر مترمربع نشان از عملکرد قابل قبول مدل داشت. استیسن و همکاران^۲ (۲۰۰۸) از الگوریتم مثلی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در حوضه رودخانه سنگال استفاده کردند. در مقایسه با روش‌های مستقیم برای کسر تبخیر، مقادیر $RMSE^3$ و R^2 برابر ۰/۱۳ و ۰/۶۳ و برای تبخیر-تعرق $RMSE$ و R^2 به ترتیب ۴۱/۴۵ میلی‌متر و ۰/۶۶ حاصل شد. راسموسن و همکاران^۴ (۲۰۱۴) در شمال چین با استفاده از روش مثلی و تصاویر مودیس مقدار تبخیر-تعرق واقعی را محاسبه نمودند که در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده و سایر الگوریتم‌های سنجش‌ازدور نتایج خوبی را به همراه داشت. دتوماس و همکاران^۵ (۲۰۱۴) در اسپانیا الگوریتم مثلی را استفاده کرده و با حذف مناطق با ارتفاع و شیب‌های متفاوت و با در نظر گرفتن شاخص سطح برگ (LAI) به‌جای شاخص NDVI نتایج بهتری نسبت به الگوریتم اولیه به دست آوردند ($R^2=0.77$, $RMSE=0.11$ برای تصاویر لندست). ژانگ و همکاران^۶ (۲۰۱۶) روش مثلی را در اردن جهت تخمین تبخیر-تعرق واقعی ارائه دادند. ایشان ابتدا منطقه مورد مطالعه را بر اساس توپوگرافی منطقه به چند ناحیه ارتفاعی تقسیم نموده و سپس تبخیر-تعرق واقعی را در هر ناحیه بر اساس شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی ($NDVI^7$) و دمای سطح زمین تخمین زدند. این روش بخش زیادی از خطاهای ناشی از تغییرات دمای سطح زمین را که ناشی از تغییرات توپوگرافی منطقه است، کاهش داد.

سان و همکاران^۸ (۲۰۰۸) روش جدیدی برای تعیین رابطه Ts-VI بر مبنای اطلاعات خاک و پوشش گیاهی پیکسل‌ها و با کمک پیکسل‌های مجاور ارائه نمودند تا بتوانند دمای پوشش گیاهی و خاک را جداگانه تخمین بزنند. ایشان این روش را در یک مزرعه در اقلیم نیمه‌خشک در شمال چین با استفاده از تصاویر مودیس ارزیابی نموده و توانستند تخمین دقیقی از دمای خاک و پوشش گیاهی فراهم کنند. وانگ و همکاران^۹ (۲۰۱۱) از رابطه Ts-VI و تصاویر مودیس برای تخمین رطوبت خاک استفاده کرده و شاخص کمبود آب را با آن محاسبه نمودند. نتایج آن‌ها در منطقه نیمه‌خشک آریزونا نشان از دقت قابل قبول روش مثلی در تخمین رطوبت خاک داشت. تانگ و همکاران (۲۰۱۱) در منطقه نیمه خشکی در جنوب غرب آمریکا با استفاده از تصاویر مودیس و الگوریتم مثلی به تخمین تبخیر-تعرق واقعی پرداختند. در مقایسه با داده‌های برج شار همبستگی پیچکی، نتایج به‌دست‌آمده قابل قبول بوده ($RMSD=54W/m^2$) و به دلیل سادگی الگوریتم استفاده از آن پیشنهاد شده است، اما توصیه شده است که این الگوریتم برای هر منطقه مورد ارزیابی قرار گیرد. لی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۴) با استفاده از تصاویر AATSR و WiDAS با استفاده از الگوریتم مثلی تبخیر-تعرق واقعی را در منطقه نیمه خشکی در شمال چین تخمین زدند. نتایج آن‌ها نشان داد که تصاویر WiDAS-که توان تفکیک بالاتری دارند، تخمین بهتری از تبخیر-تعرق ارائه می‌دهند. همچنین در مقایسه با الگوریتم SEBI، روش مثلی تبخیر-تعرق را کمتر برآورد می‌کند. میناکاپیلی و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۶) در اقلیم مدیترانه‌ای سیسیل با استفاده از الگوریتم بهبودیافته مثلی و تصاویر مودیس و MSG-SEVIRI مقدار تبخیر-تعرق را تخمین زدند و در مقایسه با داده‌های برج شار همبستگی پیچکی نتایج قابل قبولی به دست آوردند. کارلسون^{۱۲} و پتروپولوس^{۱۳} (۲۰۱۹) روش ساده‌شده مثلی را که نیاز به داده کمتری دارد، ارائه نمودند. کوی و همکاران^۱ (۲۰۲۰)

¹ Luo et al

² Stisen et al

³ Root Mean Square Error

⁴ Rasmussen et al

⁵ de Tomás et al

⁶ Zhang et al

⁷ Normalized Difference Vegetation Index

⁸ Sun et al

⁹ Wang et al

¹⁰ Li et al

¹¹ Minacapilli et al

¹² Carlson

¹³ Petropoulos

با توجه به اینکه در برخی از روزها به دلیل وجود ابرناکی نمی‌توان مقادیر تبخیر-تعرق را داشت، با استفاده از هوش مصنوعی به پر کردن خلأ مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم مثلی پرداختند. کوی و همکاران (۲۰۲۱) با ترکیب الگوریتم مثلی و مدل شاتلوورث-والاس مقادیر تبخیر-تعرق را در منطقه آبیاری شده در حوضه "های‌هه"^۲ چین محاسبه کردند. مقدار RMSE در مدل ترکیبی نسبت به مدل اصلی حدود ۳۰ درصد کاهش داشت. مقدار اریبی مدل نیز از ۲۳ درصد به ۵/۵ درصد کاهش یافت. ژو و همکاران (۲۰۲۳) نیز از روش مثلی در حوضه قدم^۳ در فلات تبت که تعداد ایستگاه‌های بسیار کمی دارد، استفاده نموده و با تصاویر مودیس مقدار تبخیر-تعرق واقعی را برای این حوضه تخمین زدند.

در ایران الگوریتم مثلی تنها توسط سلیمی‌فرد و همکاران (۱۴۰۱) برای تخمین تبخیر-تعرق در دشت مشهد استفاده شده است که با نتایج خوبی همراه بوده است (ضرایب تبیین بالای ۷۰ درصد و RMSE حدود ۱/۵ میلی‌متر در روز).

دشت کرمان یکی از دشت‌های بحرانی کشور است که برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی در آن امکان فرونشست زمین در این دشت را افزایش داده است. همچنین در سال‌های اخیر به دلیل کاهش منابع آب زیرزمینی در این دشت، اغلب کشاورزان با مشکل تأمین آب برای محصولات زراعی و باغی خود روبه‌رو بوده‌اند؛ بنابراین در اغلب موارد کشاورزان مجبور به مصرف کمتر آب و کاهش حجم آبیاری زمین‌های خود شده‌اند. با توجه به این مسئله تخمین دقیق‌تر تبخیر-تعرق جهت بهره‌وری مناسب از منابع آبی موجود به‌ویژه آب‌های زیرزمینی اهمیت بیشتری می‌یابد؛ بنابراین با توجه به کمبود مطالعات موجود در زمینه کاربرد این روش در ایران، در این پژوهش از روش فوق برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی در دشت کرمان استفاده شد. از آنجاکه در مطالعه سلیمی‌فرد و همکاران (۱۴۰۱)، ارزیابی الگوریتم برای دو محصول زراعی ذرت و گندم انجام شده است، در این مطالعه برای ارزیابی الگوریتم از یک محصول باغی استفاده شد. با توجه به اهمیت پسته به‌عنوان یکی از محصولات مهم باغی کرمان، این محصول برای ارزیابی انتخاب شد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

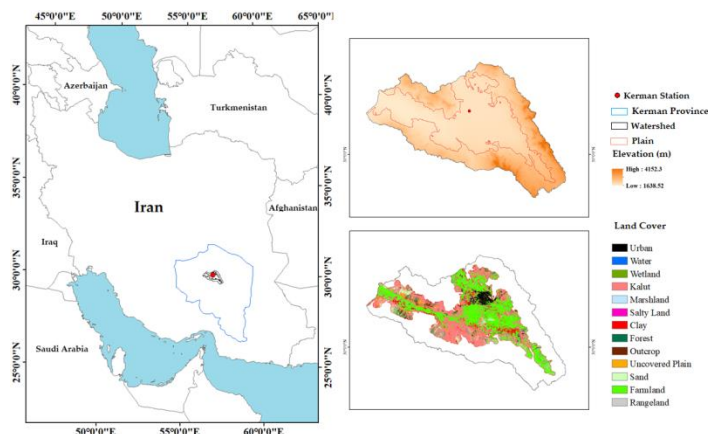
دشت کرمان با مساحتی حدود ۲۶۵۰ کیلومترمربع در حوضه آبریز کرمان در استان کرمان قرار دارد. بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی کرمان، این دشت دارای متوسط بارش سالانه ۱۳۶ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۶ درجه سلسیوس است (میان‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه در ایستگاه کرمان با استفاده از معادله هارگریوز-سامانی معادل ۲۵۶۰ میلی‌متر برآورد شده و اقلیم آن خشک است (میان‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۹). ارتفاع دشت کرمان بین حدود ۱۶۰۰ تا ۴۱۵۰ متر متغیر است (شکل ۱). نقشه کاربری اراضی دشت کرمان با استفاده از نقشه کاربری اراضی ایران که توسط دانشگاه خواجه نصیر طوسی و با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۴^۲ تهیه شده است (قربانیان و همکاران، ۲۰۲۰) استخراج گردید. مطابق شکل (۱) بر اساس این طبقه‌بندی، کاربری اراضی اصلی دشت کرمان شامل اراضی کشاورزی است.

¹ Cui et al

² Haihe

³ Qaidam

⁴ Sentinel-2



شکل ۱. موقعیت، تغییرات ارتفاع و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مورد نیاز

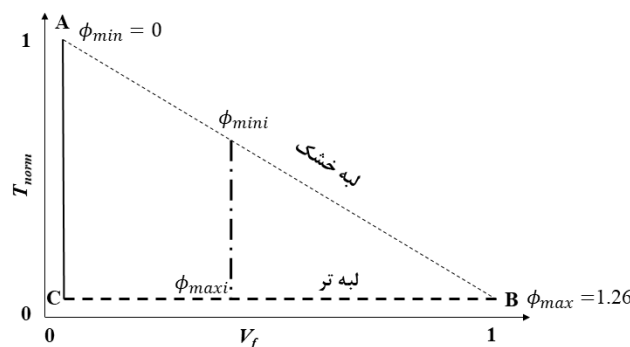
برای تخمین تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم مثلی، در این پژوهش از تصاویر لندست ۸ که دارای توان تفکیک مکانی متوسطی است برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ استفاده شد. باندهای مرئی و مادون قرمز این ماهواره دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و باند حرارتی آن دارای تفکیک مکانی ۱۰۰ متر است. این قدرت تفکیک مکانی مناسب می‌تواند تغییرات دمای سطح زمین را که ناشی از تغییرات پوشش گیاهی است، به خوبی نمایش دهد. برای سایر متغیرهای مورد نیاز (دمای هوا، بارش، سرعت باد، رطوبت و...) از داده‌های شبکه‌بندی شده جهانی و از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه (ایستگاه کرمان) استفاده شد. تاریخ‌های استفاده‌شده در این مطالعه که بر اساس موجودیت تصاویر به‌ویژه با در نظر گرفتن شرایط ابرناکی منطقه و در طی فصل رشد انتخاب شد، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. تاریخ تصاویر لندست مورد استفاده در این مطالعه

شماره تصاویر	تاریخ میلادی تصویر	تاریخ شمسی تصویر
۱	۲۰۲۰/۷/۵	۱۳۹۹/۴/۱۵
۲	۲۰۲۰/۷/۲۱	۱۳۹۹/۴/۳۱
۳	۲۰۲۰/۸/۲۲	۱۳۹۹/۶/۱
۴	۲۰۲۰/۹/۷	۱۳۹۹/۶/۱۷
۵	۲۰۲۰/۹/۲۳	۱۳۹۹/۷/۲
۶	۲۰۲۱/۳/۱۸	۱۳۹۹/۱۲/۲۸
۷	۲۰۲۱/۴/۳	۱۴۰۰/۱/۱۴
۸	۲۰۲۱/۶/۶	۱۴۰۰/۳/۱۶
۹	۲۰۲۱/۶/۲۲	۱۴۰۰/۴/۱
۱۰	۲۰۲۱/۸/۹	۱۴۰۰/۵/۱۸
۱۱	۲۰۲۱/۸/۲۵	۱۴۰۰/۶/۳
۱۲	۲۰۲۱/۹/۲۶	۱۴۰۰/۷/۴

الگوریتم مثلثی

اساس الگوریتم مثلثی پراکندگی فضایی شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در نمودار حاصل از پراکنش این دو متغیر که به شکل مثلث است، دو ضلع بالایی و پایینی مثلث به ترتیب به‌عنوان لبه خشک و تر شناخته می‌شود. اجرای این الگوریتم منوط به اعمال این فرض است که تمام پیکسل‌های منطقه دارای شرایط رطوبت خاک و پوشش گیاهی متنوع و دارای ارتفاع یکسانی از سطح دریا باشند. فرض تنوع رطوبت خاک و پوشش گیاهی برای توسعه لبه خشک و تر در این الگوریتم ضروری است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶). فرض ارتفاع یکسان از سطح دریا باعث می‌شود که اثر تغییرات توپوگرافی بر تغییرات دمای سطح زمین حذف‌شده و تغییرات دما بر مبنای میزان تبخیر از سطح خاک در نظر گرفته شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ کارلسون، ۲۰۰۷).



شکل ۲. نمودار شماتیک الگوریتم مثلثی

در شکل (۲) خطوط AB و CB به ترتیب لبه خشک و لبه تر را نشان می‌دهد. در لبه خشک میزان پوشش گیاهی حداقل (یا صفر) و میزان دمای سطح زمین حداکثر است. در لبه تر پوشش گیاهی حداکثر و دمای سطح زمین کمترین مقدار است. در لبه تر به دلیل وجود رطوبت کافی مقدار تبخیر-تعرق حداکثر است.

اولین مرحله برای تخمین تبخیر-تعرق، محاسبه مقادیر NDVI است. این شاخص که معیاری برای میزان پوشش روی زمین و شاخصی برای سنجش خشک‌سالی است، برای سنجنده لندست با استفاده از بازتاب^۱ باندهای ۴ و ۵ تصاویر و به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{b5 - b4}{b5 + b4} \quad (1)$$

پس از محاسبه شاخص، باید مقادیر به‌دست‌آمده با استفاده از رابطه زیر نرمال‌سازی شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶):

$$V_f = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (2)$$

در این معادله، V_f میزان کسری از پوشش گیاهی، NDVI شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی برای هر پیکسل، $NDVI_{min}$ حداقل مقدار NDVI و $NDVI_{max}$ حداکثر مقدار NDVI در کل منطقه مورد مطالعه است.

¹ Reflectance

پس از محاسبه و نرمال سازی NDVI، داده های دمای سطح زمین که از تصاویر باند ۱۰ لندست ۸ حاصل می شود نیز باید نرمال سازی شود. نرمال سازی دمای سطح زمین با رابطه زیر انجام می شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶):

$$T_{norm} = \frac{T_s - T_{wet}}{(T_s)_{max} - T_{wet}} \quad (3)$$

در این معادله T_{norm} دمای نرمال شده سطح زمین برای هر پیکسل، T_s دمای سطح زمین در هر پیکسل، T_{wet} دمای لبه مرطوب و $(T_s)_{max}$ حداکثر دمای سطح زمین در کل منطقه مورد مطالعه می باشد.

پس از محاسبه دو متغیر T_{norm} و V_f در مراحل قبلی، مقادیر این متغیرها برای کل پیکسل های موجود در تصاویر برای هرروز در برابر هم رسم شد تا شکلی مشابه شکل (۲) حاصل شده و مقدار پارامتر ϕ محاسبه گردد (تانگ و همکاران، ۲۰۱۰).

$$\phi_i = \frac{T_{maxi} - T_{normi}}{T_{maxi} - T_{mini}} (\phi_{maxi} - \phi_{mini}) + \phi_{mini} \quad (4)$$

در این رابطه، ϕ_i مقدار پارامتر ترکیبی برای پیکسل i ، مقدار دمای سطح زمین نرمال شده برای پیکسل i ، T_{mini} برابر T_{wet} ، ϕ_{maxi} مقدار پارامتر ترکیبی برای پیکسل i در لبه مرطوب و ϕ_{mini} مقدار پارامتر ترکیبی برای پیکسل i در لبه خشک است ($\phi_{mini} = 1.26V_f$). برای همه پیکسل ها مقدار ثابت ۱/۲۶ است.

برای به دست آوردن T_{maxi} (دمای ماکزیمم در هر پیکسل)، بعد از رسم داده های T_{norm} و V_f ، داده های V_f به بازه هایی با فاصله ۰/۰۲ تقسیم و در هریک از این بازه ها مقدار حداکثر دمای سطح مشخص شد. سپس بین کلیه دماهای حداکثر مشخص شده و مقدار V_f رابطه رگرسیونی خطی ساده مطابق معادله (۵) برقرار شد (تانگ و همکاران، ۲۰۱۰). در این معادله، T_{maxi} حداکثر دمای سطح برای هر بازه و b و a ضرایب رگرسیونی می باشند.

$$T_{maxi} = a * V_{fi} + b \quad (5)$$

در مرحله بعد میزان کسر تبخیر لحظه ای (EF) محاسبه می شود. این پارامتر به صورت نسبت شار گرمای نهان به انرژی در دسترس تعریف و با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$EF = \phi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (6)$$

در این معادله ضریب سایکرومتری (γ) برابر ۰/۰۶ و شیب فشار بخار آب اشباع (Δ) با استفاده از داده میانگین دمای هوا (T) و با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta = 0.2(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.000116 \quad (7)$$

در نهایت میزان تبخیر-تعرق واقعی (AET) در هر پیکسل با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$AET = [EF(R_n - G)] / L \quad (8)$$

مقادیر تابش خالص (R_n)، شار گرمای خاک (G) و میزان گرمای نهان تبخیر (L) با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی و داده‌های ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (بیشت و همکاران^۱، ۲۰۰۵، تیزرا و همکاران^۲، ۲۰۰۹؛ گاد و همکاران^۳، ۲۰۱۰؛ داسیلوا و همکاران^۴، ۲۰۱۶).

$$R_{n,over} = (1-\alpha)R_{SW} - R_{emi} + \varepsilon_0 R_{LW} \quad (۹)$$

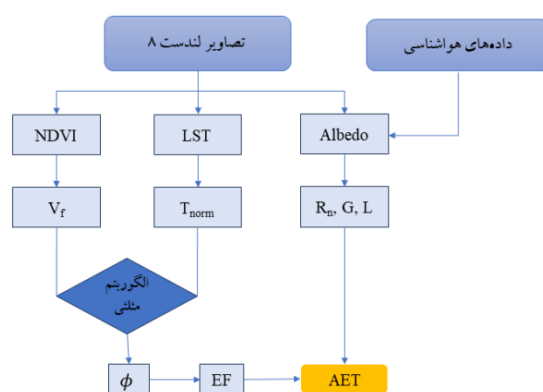
$$R_n = \frac{2R_{n,over}}{\pi \sin \left[\pi \left(\frac{D-2a}{2D} \right) \right]} \quad (۱۰)$$

$$G = R_n \times (T_s - 273.16) \times (0.0038 + 0.0074 \cdot \alpha) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4) \quad (۱۱)$$

$$L = 2.51 - 2.361 \times 10^{-3} \times T \quad (۱۲)$$

در روابط فوق، $R_{n,over}$ ، R_{SW} ، R_{emi} ، R_{LW} و R_n به ترتیب میزان تابش خالص لحظه‌ای، تابش طول‌موج کوتاه رسیده به سطح زمین، تابش طول‌موج بلند خروجی از سطح زمین، تابش طول‌موج بلند رسیده به سطح زمین و تابش خالص روزانه برحسب وات بر مترمربع می‌باشد. α میزان آلبیدو سطحی، ε_0 گسیلمندی حرارتی سطحی، D طول روز، a فاصله زمانی بین زمان گذر ماهواره (در منطقه کرمان ساعت ۱۱/۵ صبح در تابستان و ۱۰/۵ صبح در زمستان) و زمان دریافت حداکثر تابش خالص توسط سطح زمین (ساعت ۱۲:۳۰ ظهر به وقت محلی (بیشت و همکاران، ۲۰۰۵)) و T میانگین دمای هوا برحسب درجه سلسیوس است.

تمامی مراحل انجام فرآیند تخمین تبخیر-تعرق با الگوریتم مثلی با زبان برنامه‌نویسی جاوا در محیط Google Earth Engine و تعیین لبه خشک و تر و ضرایب a و b در معادله ۵ در محیط برنامه‌نویسی MATLAB انجام شد. فلوچارت مراحل انجام الگوریتم مثلی در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل انجام الگوریتم مثلی

¹ Bisht et al

² Teixeira et al

³ Gad et al

⁴ daSilva et al

روش فائو ۵۶

در این مطالعه میزان صحت تخمین تبخیر-تعرق به روش مثلی برای یک باغ پسته موردبررسی قرار گرفت. به دلیل عدم وجود ابزار اندازه‌گیری مناسب برای تخمین تبخیر-تعرق، از روش فائو ۵۶ (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) برای صحت سنجی روش استفاده شد. در این روش مقدار تبخیر-تعرق هر گیاه را می‌توان با رابطه زیر به دست آورد:

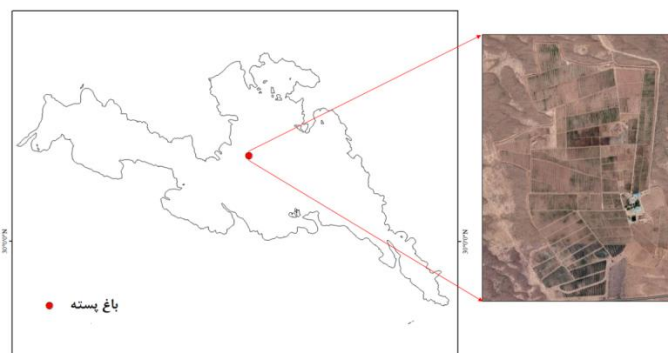
$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (۱۳)$$

در این معادله، ET_c تبخیر-تعرق واقعی گیاه (در این مطالعه پسته)، K_c ضریب گیاهی و ET_o تبخیر-تعرق پتانسیل (مرجع) است که در این مطالعه با روش فائو-پنمن-مونتیث (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) و با استفاده از اطلاعات ایستگاه هواشناسی کرمان برای روزهای مورد مطالعه و با نرم‌افزار REF-ET محاسبه شد (معادله (۱۴)).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.15} U_2 (e_a - e_s)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (۱۴)$$

در این معادله U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری است. مقادیر ضریب گیاهی برای همه گیاهان در گزارش فائو ۵۶ (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) ارائه شده است. همچنین ضریب گیاهی گیاهان زراعی و باغی کشور توسط فرشی و همکاران (۱۳۷۶) نیز تخمین زده شده است که در این مطالعه از این مقادیر برای پسته استفاده شد. مقادیر ضریب گیاهی پسته در مراحل مختلف رشدی در دشت کرمان برای تاریخ‌های مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

برای صحت‌سنجی مقادیر تبخیر-تعرق، یک باغ پسته با شرایط مدیریتی مناسب و برنامه آبیاری مشخص انتخاب شد. موقعیت مکانی این باغ در شکل (۴) نشان داده شده است. سپس مقادیر تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده با الگوریتم مثلی برای محل باغ با مقدار تبخیر-تعرق محاسبه‌شده با روش فائو ۵۶ مقایسه شد. آبیاری باغ پسته موردبررسی در سال ۱۳۹۹ در تاریخ ۲۹ فروردین آغاز شده و در شیفتهای مختلف با دور آبیاری بین ۱۹ تا ۲۲ روز انجام شده است. در سال ۱۴۰۰ اولین آبیاری در تاریخ ۸ اردیبهشت و دور آبیاری برای هر شیفته بین ۱۸ تا ۳۱ روز متغیر بوده است.



شکل ۴. موقعیت مکانی باغ پسته انتخابی (دارای مدیریت آبیاری) در دشت کرمان

جدول ۲. مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل و ضرایب گیاهی پسته برای روزهای مورد مطالعه

تاریخ تصویر (میلادی)	تبخیر-تعرق پتانسیل (میلی‌متر)	ضریب گیاهی پسته
۲۰۲۰/۷/۵	۱۲/۴	۰/۵۹
۲۰۲۰/۷/۲۱	۱۴/۷	۰/۶
۲۰۲۰/۸/۲۲	۱۰/۸	۰/۶
۲۰۲۰/۹/۷	۱۱/۴	۰/۶
۲۰۲۰/۹/۲۳	۱۰/۳	۰/۵۸
۲۰۲۱/۳/۱۸	۱۰/۸	۰/۴
۲۰۲۱/۴/۳	۱۲	۰/۴
۲۰۲۱/۶/۶	۱۰/۳	۰/۴۹
۲۰۲۱/۶/۲۲	۹/۹	۰/۵۶
۲۰۲۱/۸/۹	۹	۰/۶
۲۰۲۱/۸/۲۵	۱۰/۱	۰/۶
۲۰۲۱/۹/۲۶	۱۱/۸	۰/۵۸

معیارهای خطا سنجی

در این مطالعه از معیارهای آماری ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Oi} - \overline{ET_O})(ET_{Mi} - \overline{ET_M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{Oi} - \overline{ET_O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{Mi} - \overline{ET_M})^2}} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Mi} - ET_{Oi})^2}{n}} \quad (16)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{(ET_{Omax} - ET_{Omin})} \quad (17)$$

$$ME_j = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Mi} - ET_{Oi})}{n} \quad (18)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{Oi} - ET_{Mi})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{Oi} - \overline{ET_O})^2} \quad (19)$$

در معادلات فوق ET_{Oi} مقادیر تبخیر-تعرق روش فائو ۵۶، ET_{Mi} مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم مثلی و n تعداد روزهای موردبررسی (۱۲ روز) است.

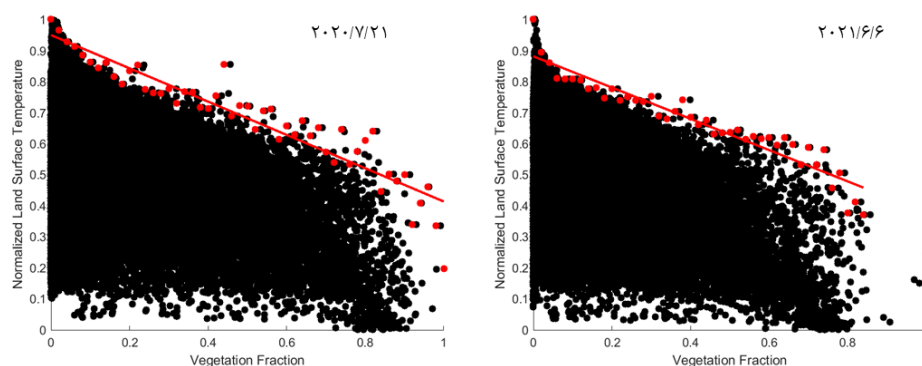
یافته‌ها

تعیین ضرایب معادله لبه خشک

ضرایب معادله لبه خشک (معادله ۵) برای تاریخ‌های تعیین‌شده به شرح جدول (۴) به دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب تبیین بالای این معادلات نشان‌دهنده رابطه قابل قبول برای تعیین لبه خشک برای تصاویر موردنظر است. در شکل (۵) نمودار دوبعدی T_{norm} در برابر V_f برای دو روز از روزهای مورد مطالعه (۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶) به عنوان نمونه ارائه شده است.

جدول ۴. ضرایب معادله لبه خشک برای تاریخ‌های مشخص‌شده

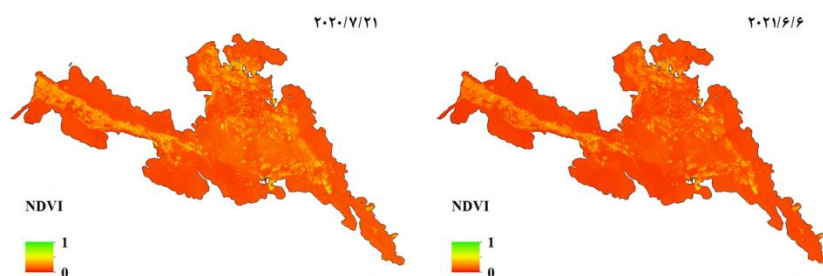
تاریخ تصویر (میلادی)	a	b	(R^2 ضریب تبیین)
۲۰۲۰/۷/۵	-۰/۳۳۱۵	۰/۹۱۲۷	۰/۸۴۸۲
۲۰۲۰/۷/۲۱	-۰/۵۳۶۲	۰/۹۴۹۷	۰/۸۷۸۶
۲۰۲۰/۸/۲۲	-۰/۴۵۶۱	۰/۹۱۴۳	۰/۸۶۳۶
۲۰۲۰/۹/۷	-۰/۴۴۵۴	۰/۸۸۰۰	۰/۷۲۲۲
۲۰۲۰/۹/۲۳	-۰/۴۰۳۶	۰/۸۴۴۸	۰/۸۸۴۸
۲۰۲۱/۳/۱۸	-۰/۲۴۱۵	۰/۸۹۵۰	۰/۸۵۳۸
۲۰۲۱/۴/۳	-۰/۲۱۴۶	۰/۹۳۱۳	۰/۸۷۸۰
۲۰۲۱/۶/۶	-۰/۵۰۳۲	۰/۸۸۱۱	۰/۹۰۴۲
۲۰۲۱/۶/۲۲	-۰/۵۴۹۸	۰/۹۲۳۱	۰/۸۰۴۴
۲۰۲۱/۸/۹	-۰/۵۴۲۷	۰/۹۱۳۷	۰/۹۱۳۰
۲۰۲۱/۸/۲۵	-۰/۳۸۳۲	۰/۸۱۴۶	۰/۸۹۳۲
۲۰۲۱/۹/۲۶	-۰/۴۱۴۵	۰/۹۴۰۵	۰/۸۹۴۰



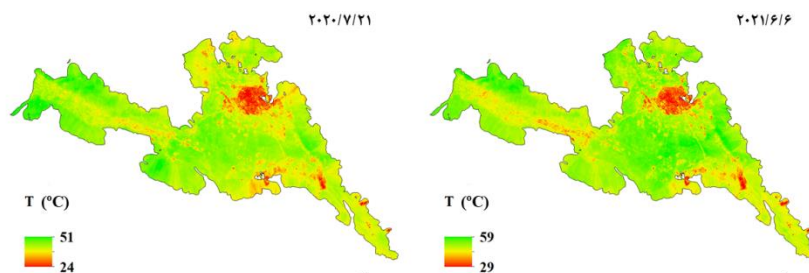
شکل ۵. نمودار دوبعدی T_{norm} در برابر V_f برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶ (خط قرمز لبه خشک را نشان می‌دهد).

توزیع مکانی متغیرها

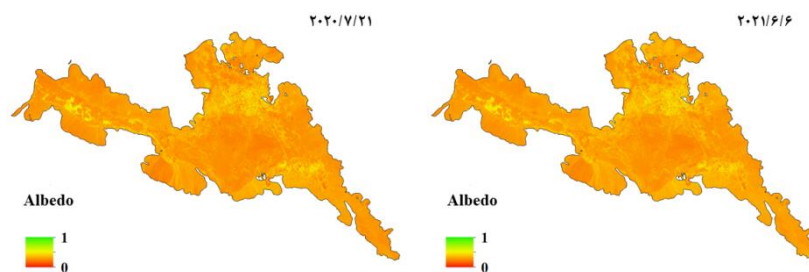
اشکال (۶) تا (۱۱) توزیع مکانی متغیرهای NDVI، دما، آلبدو، تابش خالص، شارگرمای خاک و تبخیر-تعرق واقعی را در دشت کرمان برای تاریخ‌های ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶ نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که مقادیر این متغیرها برای مناطق مختلف به‌ویژه مناطق دارای پوشش گیاهی با توزیع قابل‌قبولی تخمین زده شده است. چراکه همان‌طور که ملاحظه می‌شود تفکیک بین اراضی کشاورزی و اراضی بایر و مناطق شهری مشهود است.



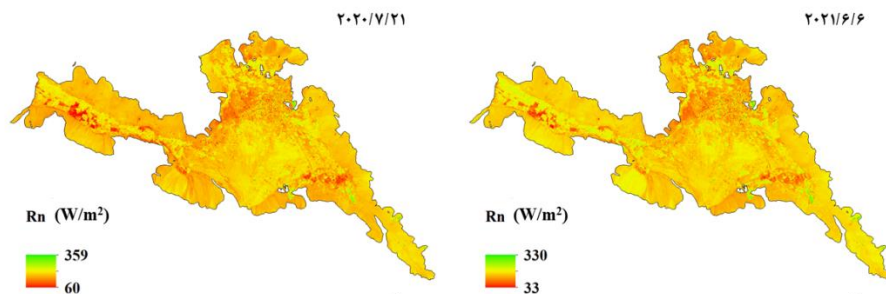
شکل ۶. توزیع مکانی NDVI برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



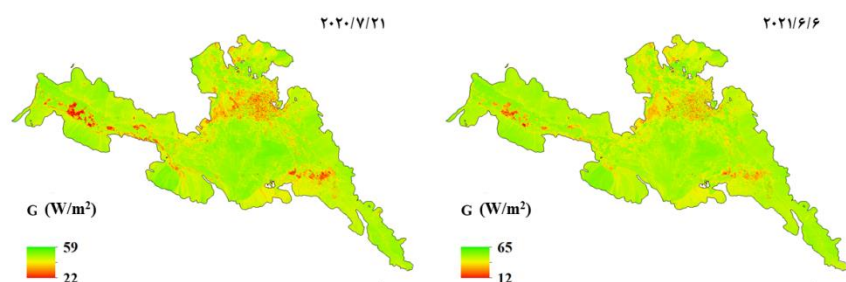
شکل ۷. توزیع مکانی دمای سطح زمین برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



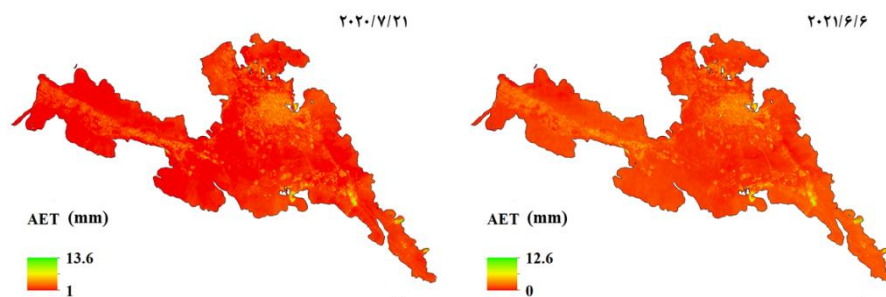
شکل ۸. توزیع مکانی آلبدو برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



شکل ۹. توزیع مکانی تابش خالص برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



شکل ۱۰. توزیع مکانی شار گرمای خاک برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



شکل ۱۱. توزیع مکانی تبخیر-تعرق واقعی به‌دست‌آمده از الگوریتم مثلی برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶

ارزیابی نتایج تخمین تبخیر-تعرق

جدول (۵) مقدار تبخیر-تعرق را با استفاده از روش مثلی و روش فائو ۵۶ برای باغ پسته موردبررسی نشان می‌دهد. در جدول (۶) نیز معیارهای خطا سنجی ارائه شده است. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، ضریب همبستگی 0.73 برای پسته به‌دست‌آمده است. مقادیر RMSE، nRMSE و ME نیز به ترتیب $1/8$ میلی‌متر در روز، 0.29 و $-1/6$ میلی‌متر در روز است. بر اساس مقادیر جدول (۵) الگوریتم مثلی تا حدود زیادی توانسته است روند تغییرات تبخیر-تعرق را برای پسته به‌خوبی تبیین کند؛ اما مقدار تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده با الگوریتم مثلی کمتر از مقدار حاصل از روش فائو ۵۶ است. مقدار منفی ضریب نش-ساتکلیف ($-1/3$) نشان از عدم قطعیت تخمین تبخیر-تعرق واقعی در الگوریتم مثلی است. باید توجه داشت که مقدار ET_c به‌دست‌آمده از رابطه فائو ۵۶ حداکثر مقدار تبخیر-تعرقی است که گیاه می‌تواند در شرایط

بدون تنش داشته باشد و در صورتی که گیاه در معرض تنش‌های مختلف از جمله تنش خشکی یا شوری قرار گیرد، مقدار تبخیر-تعرق از این مقدار کمتر خواهد شد (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). اگرچه باغ انتخابی تحت مدیریت آبیاری بوده است، اما باید این نکته را در نظر گرفت که تاریخ انتخابی برای تصاویر ماهواره‌ای در اغلب موارد هم‌زمان با تاریخ آبیاری باغ فوق نبوده و بنابراین هرچه از روز آبیاری می‌گذرد، مقدار تبخیر-تعرق واقعی از مقدار حداکثر کمتر می‌شود. مطالعات گذشته در مورد پسته نیز مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم‌های سنجش‌ازدور را کمتر از مقادیر فائو ۵۶ تخمین زده است (رحیم زادگان و همکاران، ۲۰۱۹؛ دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). به‌عنوان مثال رحیم‌زادگان و همکاران (۲۰۱۹) با مقایسه تبخیر-تعرق واقعی باغ پسته‌ای در سمنان با الگوریتم سبال و روش فائو ۵۶، مقدار RMSE را ۲/۵ میلی‌متر در روز به دست آورده‌اند. مطالعه سلیمی‌فرد و همکاران (۱۴۰۱) در مشهد نیز نشان می‌دهد که الگوریتم مثلی برای گندم و ذرت نیز مقادیر تبخیر-تعرق واقعی کمتری نسبت به روش فائو ۵۶ ارائه می‌دهد (RMSE برابر ۱/۶۷ و میانگین مطلق خطا برابر ۱/۴۸ میلی‌متر در روز). بر این اساس می‌توان گفت که عدم قطعیت الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری تخمین تبخیر-تعرق و نیز عدم قطعیت در داده‌های اندازه‌گیری شده نیز می‌تواند عاملی برای عدم تطابق کامل این دو روش باشد.

بر اساس نظرات کارشناسان و کشاورزان محلی یکی از مشکلات عمده کشاورزی در کرمان کیفیت نامناسب آب‌و خاک به‌ویژه شوری است و بنابراین حتی اگر آبیاری کامل انجام شود و گیاه تحت تنش خشکی نباشد، کیفیت نامناسب آب‌و خاک عملکرد محصولات و تبخیر-تعرق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سال‌های اخیر به دلیل افت شدید منابع آب زیرزمینی و عدم دسترسی به آب کافی، کشاورزان ناچار به کم‌آبیاری باغ‌ها و مزارع خود شده‌اند. طی مصاحبه با چند باغدار و زارع در کرمان، مشخص شد که باغ‌های پسته در کرمان هر ۳۰ تا ۳۲ روز آبیاری می‌شوند؛ بنابراین در بسیاری از زمین‌های کشاورزی در دشت کرمان مقدار تبخیر-تعرق کمتر از مقادیر استاندارد است و محصولات کشاورزی تحت تنش قرار دارند. بر اساس نظرات آن‌ها به‌عنوان مثال کاهش عملکرد پسته و کوچک شدن مغز پسته‌ها و در نتیجه کاهش کیفیت آن‌ها در سال‌های اخیر به‌وضوح مشاهده می‌شود. به دلیل عدم وجود وسایل اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق در ایران و یا هزینه‌بر بودن آن‌ها، امکان بررسی دقیق‌تر روش‌های سنجش‌ازدوری وجود ندارد؛ اما با توجه به اینکه میزان و روند تغییرات تابش خالص، شار گرمای خاک و دمای سطح زمین تخمین زده‌شده در روزهای موردبررسی مطابق جدول (۷) در بازه قابل‌قبول و منطقی قرار دارد (مقبلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ داسیلوا و همکاران، ۲۰۱۶) به نظر می‌رسد که مقادیر تبخیر-تعرق نیز می‌تواند قابل‌قبول باشد.

جدول ۵. مقادیر تبخیر-تعرق واقعی پسته به روش مثلی و فائو ۵۶ در دشت کرمان

تاریخ تصویر (میلادی)	تبخیر-تعرق به روش مثلی (میلی‌متر)	تبخیر-تعرق به روش فائو ۵۶ (میلی‌متر)
۲۰۲۰/۷/۵	۶	۷/۳
۲۰۲۰/۷/۲۱	۵/۶	۸/۸
۲۰۲۰/۸/۲۲	۵/۵	۶/۵
۲۰۲۰/۹/۷	۴/۸	۶/۸
۲۰۲۰/۹/۲۳	۵/۵	۶
۲۰۲۱/۳/۱۸	۲/۸	۴/۳
۲۰۲۱/۴/۳	۲/۶	۴/۸
۲۰۲۱/۶/۶	۴/۵	۵
۲۰۲۱/۶/۲۲	۴/۶	۵/۵
۲۰۲۱/۸/۹	۳/۹	۵/۴
۲۰۲۱/۸/۲۵	۴/۶	۶/۱
۲۰۲۱/۹/۲۶	۳/۹	۶/۸

جدول ۶. معیارهای خطا سنجی الگوریتم مثلثی برای باغ پسته موردبررسی در دشت کرمان

گیاه	r	RMSE (میلی متر در روز)	nRMSE	NSE	ME (میلی متر در روز)
پسته	۰/۷۳	۱/۸	۰/۴	-۱/۳	-۱/۶

جدول ۷. مقادیر حداقل و حداکثر تابش خالص، شار گرمای خاک و دمای سطح زمین برای دشت کرمان

تاریخ تصویر (میلادی)	تابش خالص (وات بر مترمربع)		شار گرمای خاک (وات بر مترمربع)		دمای سطح زمین (درجه سلسیوس)	
	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
۲۰۲۰/۷/۵	۵۸	۳۵۰	۲۰	۵۹	۱۴	۵۲
۲۰۲۰/۷/۲۱	۶۰	۳۵۹	۲۲	۵۹	۲۴	۵۱
۲۰۲۰/۸/۲۲	۴۸	۳۴۳	۱۹	۵۷	۲۶	۵۲
۲۰۲۰/۹/۷	۴۲	۳۵۹	۱۷	۵۰	۲۲	۵۱
۲۰۲۰/۹/۲۳	۵۰	۳۷۴	۱۴	۴۸	۱۸	۴۵
۲۰۲۱/۳/۱۸	۴۵	۳۸۷	۱۸	۴۳	۲/۵	۴۰
۲۰۲۱/۴/۳	۴۵	۳۹۴	۱۳	۴۸	-۶	۴۶
۲۰۲۱/۶/۶	۳۳	۳۳۰	۱۲	۶۵	۲۹	۵۹
۲۰۲۱/۶/۲۲	۴۰	۳۵۶	۱۰	۶۰	۲۵	۵۵
۲۰۲۱/۸/۹	۲۹	۳۵۱	۱۳	۵۸	۲۵	۵۳
۲۰۲۱/۸/۲۵	۵۵	۳۷۵	۲۰	۵۸	۲۳	۵۵
۲۰۲۱/۹/۲۶	۳۵	۳۵۸	۱۲	۵۰	۲۴	۵۰

بحث

با توجه به اینکه دشت کرمان به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی یکی از دشتهای بحرانی کشور است، در آن امکان فرونشست زمین در این دشت را افزایش داده است. اخیراً به دلیل کاهش منابع آب زیرزمینی در این دشت، کشاورزان با مشکل تأمین آب برای محصولات زراعی و باغی خود مواجه شدند. در نتیجه کشاورزان مجبور به مصرف کمتر آب و کاهش حجم آبیاری زمینهای خود شده‌اند. با توجه به این مسئله تخمین دقیق‌تر تبخیر-تعرق جهت بهره‌وری مناسب از منابع آبی موجود به‌ویژه آبهای زیرزمینی اهمیت بیشتری می‌یابد؛ بنابراین با توجه به کمبود مطالعات موجود در زمینه کاربرد این روش در ایران، در این پژوهش از روش فوق برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی در دشت کرمان استفاده شد. در این مطالعه برای ارزیابی الگوریتم از یک محصول باغی استفاده شد. با توجه به اهمیت پسته به‌عنوان یکی از محصولات مهم باغی کرمان، این محصول برای ارزیابی انتخاب شد.

نتیجه‌گیری

بر اساس معیارهای خطا سنجی، الگوریتم مثلی تخمین قابل قبولی از تبخیر-تعرق واقعی ارائه داده است (ضریب همبستگی 0.73 ، میانگین خطا $1/6$ - میلی‌متر در روز، جذر میانگین مربعات خطا $1/8$ میلی‌متر در روز و $nRMSE$ برابر 0.29). با این حال مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به‌دست‌آمده از الگوریتم مثلی کمتر از مقادیر فائو 56 بود که در مطالعات پیشین نیز این کم‌بر آورد در سایر الگوریتم‌ها مشاهده شده است. باید توجه داشت که مقادیر تبخیر-تعرق فائو 56 حداکثر مقدار تبخیر-تعرق را برای شرایطی که گیاه تحت مدیریت مناسب قرار دارد و هیچ‌گونه تنش شوری و یا آبی ندارد، ارائه می‌دهد. عدم قطعیت در الگوریتم مثلی، عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده، عدم تطابق تاریخ آبیاری با تاریخ تصاویر ماهواره‌ای، کیفیت نامناسب آب‌و‌خاک در دشت کرمان و عدم قطعیت ضرایب گیاهی استفاده‌شده از جمله عواملی است که می‌تواند بر کم‌بر آورد مقادیر تبخیر-تعرق توسط الگوریتم مثلی (و سایر الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری) مؤثر باشد و پیشنهاد می‌شود که بررسی این عدم قطعیت‌ها در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

در صورت امکان پیشنهاد می‌شود که با همکاری مراکز تحقیقاتی اقدام به تهیه و ساخت چند دستگاه میکرو لایسیمتر ساده در باغ‌هایی که مدیریت مناسبی بر روی آن‌ها اعمال می‌شود، شده و مقایسه بهتری بین خروجی الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری و مقادیر واقعی تبخیر-تعرق صورت گیرد. بدین صورت می‌توان از الگوریتم‌های مختلف برای محاسبه تبخیر-تعرق استفاده و با مقایسه با مقادیر میکرو لایسیمتری بهترین الگوریتم را برای تخمین تبخیر-تعرق انتخاب نمود. همچنین به دست آوردن بیلان آب خاک در باغ‌ها و مزرعه‌های مورد مطالعه می‌تواند مقدار تبخیر-تعرق واقعی را به دست بدهد که با کمک آن نیز می‌توان مقدار تبخیر-تعرق روش‌های سنجش‌ازدوری را صحت‌سنجی کرد. با داشتن مقادیر دقیق تبخیر-تعرق می‌توان توصیه‌های مناسبی برای میزان آب مصرفی و بهبود عملکرد و بهره‌وری آب به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت آب روبه‌رو هستند، ارائه نمود. همچنین می‌توان با داشتن مقدار دقیق تبخیر-تعرق در وسعت دشت، مقدار دقیق‌تری برای ضرایب گیاهی به دست آورد تا نیاز آبیاری گیاهان با دقت بیشتری تعیین شود. در حال حاضر برای طراحی‌های سیستم‌های آبیاری در باغ‌ها و مزرعه‌های مختلف از ضرایب گیاهی و نیاز خالص آبیاری به‌دست‌آمده از مطالعات قدیمی استفاده می‌شود و با توجه به شرایط تغییر اقلیم و کم‌آبی اکثر دشت‌های کشور، این مقادیر دقت لازم را برای مطالعات جدید نداشته و باید به‌روز شوند.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر احسان محمدی بابت راهنمایی‌های ایشان و فراهم کردن اطلاعات مربوط به باغ پسته مورد مطالعه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- دستورانی، محمدتقی، پورمحمدی، سمانه، و رحیمیان، محمدحسن. (۱۳۹۱). تخمین تبخیر-تعرق واقعی باغات پسته منطقه اردکان به کمک سنجش از دور. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۶(۱)، ۱-۱۳. <https://doi.org/10.22092/jwra.2012.118947>
- سلیمی فرد، مزده، ثنایی نژاد، سیدحسین، و راشکی، علیرضا. (۱۴۰۱). تخمین تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم مثلی و داده‌های لندست ۸ (مطالعه موردی: دشت مشهد- استان خراسان رضوی). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، انتشار آنلاین، <https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.695287>

References

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395–406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395))
- Allen, R., Pereira, Raes, L. D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome, Italy. <https://www.researchgate.net/publication/235704197>
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, Feddes, M., R. A. & Holtslag, A. A. M. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213(1–4), 198–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & van der Wal, T. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 212–229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)
- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., & Jiang, L. (2005). Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 97(1), 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.014>
- Carlson, T. (2007). An Overview of the “Triangle Method” for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. *Sensors*, 7(8), 1612–1629. <https://doi.org/10.3390/s7081612>
- Carlson, T.N., & Petropoulos, G.P. (2019). A new method for estimating of evapotranspiration and surface soil moisture from optical and thermal infrared measurements: the simplified triangle. *International Journal of Remote Sensing*, 40, 7716–7729. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1601288>
- Cui Y., Jia, L., & Fan, W. (2021). Estimation of actual evapotranspiration and its components in an irrigated area by integrating the Shuttleworth-Wallace and surface temperature-vegetation index schemes using the particle swarm optimization algorithm. *Agriculture and Forest Meteorology*, 307, 108488. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108488>
- Cui Y., Ma, S., Yao, Z., Chen, X., Luo, Z., Fan, W., & Hong, Y. (2020). Developing a Gap-Filling Algorithm Using DNN for the Ts-VI Triangle Model to Obtain Temporally Continuous Daily Actual Evapotranspiration in an Arid Area of China. *Remote Sensing*, 12, 1121. <https://doi.org/10.3390/rs12071121>
- DaSilva, B. B., Braga, A. C., Braga, C. C., De Oliveira, L. M. M., Montenegro, S. M. G. L., & Barbosa Junior, B. (2016). Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1), 3–8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>
- Dastoorani, M., Poormohammadi, S., & Rahimian, M. H. (2012). Estimation of Actual

- Evapotranspiration in Ardakan Pistachio Orchards Using Remote Sensing. *Journal of Water Research in Agriculture*, 26(1), 1-13. <https://doi.org/10.22092/jwra.2012.118947> [In Persian]
- De Tomás, A., Nieto, H., Guzinski, R., Salas, J., Sandholt, I., & Berliner, P. (2014). Validation and scale dependencies of the triangle method for the evaporative fraction estimation over heterogeneous areas. *Remote Sensing of Environment*, 152, 493–511. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.028>
- Gad, H. E., & El-Gayar, S. M. (2010). Climate parameters used to evaluate the evapotranspiration in delta central zone of Egypt. Fourteenth International Water Technology Conference, IWTC14, (February), 529–548. <https://www.researchgate.net/publication/267803552>
- Gao, Y., & Long, D. (2008). Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on SWAT. *Hydrological Processes*, 22(25), 4850–4869. <https://doi.org/10.1002/hyp.7104>
- Ghorbanian, A., Kakooei, M., Amani, M., Mahdavi, S., Mohammadzadeh, A., & Hasanlou, M. (2020). Improved land cover map of Iran using Sentinel imagery within Google Earth Engine and a novel automatic workflow for land cover classification using migrated training samples. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167, 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.013>
- Jiang, L., & Islam, S. (1999). A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, 26(17), 2773–2776. <https://doi.org/10.1029/1999GL006049>
- Jiang, L., & Islam, S. (2001). Estimation of surface evaporation map over Southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2), 329–340. <https://doi.org/10.1029/2000WR900255>
- Jiang, L., and & Islam, S. (2003). An intercomparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11), 2221–2236. <https://doi.org/10.1080/01431160210154821>
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00005-2)
- Li, Z., Jia, L., & Lu, J. (2014). On Uncertainties of the Priestley-Taylor/LST-Fc Feature Space Method to Estimate Evapotranspiration: Case Study in an Arid/Semiarid Region in Northwest China. *Remote Sensing*, 7(1), 447–466. <https://doi.org/10.3390/rs70100447>
- Luo, T., Jutla, A., & Islam, S. (2015). Evapotranspiration estimation over agricultural plains using MODIS data for all sky conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 36(5), 1235–1252. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1009648>
- Menenti, M., & Choudhury, B. (1993). Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range. *Proceeding*, 10A1407587, 561–568. https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002169795909661
- Mianabadi, A., Shirazi, P., Ghahraman, B., Coenders-Gerrits, A. M. J., Alizadeh, A. & Davary, K. (2019). Assessment of short- and long-term memory in trends of major climatic variables over Iran: 1966–2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1–2), 677–691. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2410-z>
- Minacapilli M., Consoli, S., Vanella, D., Ciraolo, G., & Motisi, A. (2016). A time domain triangle method approach to estimate actual evapotranspiration: Application in a Mediterranean region using MODIS and MSG-SEVIRI products. *Remote Sensing of Environment*, 174, 10–23.

- <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.018>
- Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3–4), 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Rahimzadegan, M., & Janani, A. (2019). Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 217, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.018>
- Rasmussen, M. O., Sørensen, M. K., Wu, B., Yan, N. Qin, H., & Sandholt, I. (2014). Regional-scale estimation of evapotranspiration for the North China Plain using MODIS data and the triangle-approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.017>
- Roerink, G. J., Su, Z., & Menenti, M. (2000). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147–157. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8)
- Salimi Fard, M., Sanajnejad, S.H., & Rashki, A. (2022). Actual evapotranspiration estimation by Triangle algorithm and landsat 8 dara (Case study: Mashhad plain-Khorasan Razavi province). *Journal of RS and JIS for natural Resources*, Ready to Publish. <https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.695287> [In Persian]
- Shuttleworth, W. J., & Wallace, J. S. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(469), 839–855. <https://doi.org/10.1002/qj.49711146910>
- Stisen, S., Sandholt, I., Nørgaard, A., Fensholt, R., & Jensen, K. H. (2008). Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration — Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1242–1255. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.013>
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85–100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Sun, Z., Wang, Q., Matsushita, B., Fukushima, T., Ouyang, Z., & Watanabe, M. (2008). A New Method to Define the VI-Ts Diagram Using Subpixel Vegetation and Soil Information: A Case Study over a Semiarid Agricultural Region in the North China Plain. *Sensors*, 8(10), 6260–6279. <https://doi.org/10.3390/s8106260>
- Tang, R., Li, Z. L., & Tang, B. (2010). An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 540–551. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.012>
- Tang, R., Li, Z., & Chen, K. (2011). Validating MODIS-derived land surface evapotranspiration with in situ measurements at two AmeriFlux sites in a semiarid region. *Journal of Geophysical Research*, 116(D4), D04106. <https://doi.org/10.1029/2010JD014543>
- Teixeira, A. H. d. C., Bastiaanssen, W. G. M. Ahmad, M. D., & Bos, M. G. (2009). Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: Application to the regional scale. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3–4), 477–490. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.014>
- Wang, W., Huang, D., Wang, X. G., Liu, Y. R., & Zhou, F. (2011). Estimation of soil moisture using

- trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1699–1712. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1699-2011>
- Zhang, H., Gorelick, S., Avisse, N., Tilmant, A., Rajsekhar, D., & Yoon, J. (2016). A New Temperature-Vegetation Triangle Algorithm with Variable Edges (TAVE) for Satellite-Based Actual Evapotranspiration Estimation. *Remote Sensing*, 8(9), 735. <https://doi.org/10.3390/rs8090735>
- Zhu W., Wang, Y., & Jia, S. (2023). A remote sensing-based method for daily evapotranspiration mapping and partitioning in a poorly gauged basin with arid ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 616, 128807. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128807>



Productivity of water and energy use of potato in sprinkler irrigation systems (Case study: Dehgolan Plain, Kurdistan Province)

Roya Niazmand¹ , Arman Moghadamnia² , Peyman Tahmasebi³ , Saman Nikmehr⁴ ,

Eisa Maroufpoor⁵

¹ MS.c graduated of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran. E-mail. roya.niazmand1@gmail.com

² MS.c graduated of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran. E-mail. arman.moghadamnia@gmail.com

³ Ph.D student of Irrigation, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail. peymantahmasebi99@gmail.com

⁴ Assistant Professor Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran. E-mail. s.nikmehr@uok.ac.ir

⁵ Corresponding Author, Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran. E-mail. e.maroufpoor@uok.ac.ir

ABSTRACT

One of the challenges of sustainable agricultural development is the proper use of water resources and other agricultural inputs to increase productivity. One of the solutions to this problem is the use of modern irrigation systems. The aim of this study was to evaluate the water and energy use productivity indices of potato production in Dehgolan plain, Kurdistan province. In this research, 19 farms were randomly selected with a total area of 177 hectares. The farms were classified into three groups: CE (solid set sprinkler irrigation system with mobile sprinkler and electric power source), CD (solid set sprinkler irrigation system with mobile sprinkler and diesel fuel power source), and WE (wheel move sprinkler irrigation system with electric power source). The amount of water consumed by the farms was measured using an ultrasonic flow meter. At the end of the irrigation season, the amount of electricity consumed by each farm was obtained from the regional electricity company of the province. In farms that used diesel fuel for motor pumps, the monthly diesel consumption was recorded. The yield was also measured by sampling method. The average water use productivity of the mentioned farms was 1.4, 3.5 and 1.4 kg/m³, respectively, and the energy use productivity index was 0.4, 0.2 and 0.4 kg/MJ, respectively. The average energy efficiency index was 1.4, 0.7 and 1.4, respectively. The average specific energy index was 2.7, 5.7 and 2.5 MJ/kg, respectively. In general, based on the studied indices, the status of CD farms is unfavorable and their net energy input is negative.

Keywords: Energy Use Productivity, Inlet Energy, Potato, Sprinkler Irrigation, Water Use Productivity

Article Type: Research Article

Article history: Received: 02 October 2023 Revised: 06 December 2023 Accepted: 30 December 2023 ePublished: 30 December 2023

1. Introduction

Agriculture, while being a supplier of energy, is also its most important consumer. Agriculture is also the largest consumer of water. The optimal use of the two main inputs of agriculture, namely water and energy resources, in the agricultural sector is one of the important priorities of the country's water and agriculture industry (Ahmad & Khan, 2009). One of the most important programs for agricultural development in the country should be to increase the productivity of water and energy consumption. So far, about 2.9 million hectares in Iran have been covered by pressurized irrigation systems, which has led to an improvement in the water productivity index from 0.87 kg/m³ in 2005 to 1.32 kg/m³ in 2015, and the target is 1.6 kg/m³ in 2025. The Dehgolan plain, with an area of 84,982 square kilometers, is located to the east of the city of Sanandaj. The Dehgolan prohibited aquifer is the only source of agricultural water in the region. The solid set sprinkler irrigation system is the most common irrigation system in the region, and in some areas, farmers also use the wheel-move sprinkler irrigation system. In addition, due to the annual decline in the groundwater level, the energy consumption for pumping water has also increased; therefore, it seems necessary to study the water productivity indices as well as the electricity consumption efficiency and the total energy consumption in the mentioned plain. The main objective of this research is to evaluate the water and energy productivity indices of the important potato crop in farmers' fields, with solid set sprinkler and wheel-move sprinkler irrigation systems. In addition, an attempt was made to study both electric and diesel fuel sources.

2. Methodology

A study involving 19 farms with a combined area of 177 hectares investigated water and energy use in irrigation systems. The farms were divided into three categories: solid set sprinkler systems with mobile sprinklers powered by electricity (CE), solid set sprinkler systems with

mobile sprinklers powered by diesel fuel (CD), and wheel move sprinkler systems powered by electricity (WE). To measure flow rate, an ultrasonic flow meter was used on each farm. Electricity consumption data was obtained from the regional electricity company at the conclusion of the irrigation season. Farms using diesel-powered pumps had their monthly diesel consumption documented. The yield was also measured by sampling method. Other necessary and complementary information about the studied farms was collected from farmers, including the amount of potato tuber planted in the farm, fertilizers used, pesticides used, required labor force, and agricultural machinery required in the planting, cultivation, and harvesting stages. At last, to evaluate the productivity of the studied farms, the following indices were used: electricity and energy consumption productivity, water productivity, energy efficiency, and specific energy.

3. Results and discussion

An analysis of various water and energy efficiency indicators revealed that farms using solid set sprinkler systems with mobile sprinklers powered by diesel fuel (CD farms) performed the worst. These farms exhibited the lowest average water use productivity (1.4 kg/m^3), energy use productivity (0.2 kg/MJ), and energy efficiency (0.7), while having the highest average specific energy consumption (5.7 MJ/kg). This suggests that CD farms have a negative net energy input, meaning they consume more energy than they produce.

4. Conclusions

This study evaluated water and energy use productivity indices for potato production in farmers' fields of Dehgolan plain, Kurdistan province, Iran. The fields were classified into three groups: CE (solid set sprinkler irrigation system with electric power source), CD (solid set sprinkler irrigation system with diesel fuel energy source), and WE (wheel move sprinkler irrigation system with electric power source). The average energy consumption of CE, CD, and WE farms was 111413, 213931, and 118431 MJ/ha, respectively. The water use productivity indices of CE and WE farms were equal and 17% higher than those of CD farms. The energy use efficiency and productivity of the mentioned farms were also equal and twice those of CD farms. The net energy input of the mentioned farms was 41587, -75931, and 52569 MJ/ha, respectively. In other words, the energy input from CD farms that use diesel engines is negative. In general, based on the studied indices, the status of farms with solid set and wheel move sprinkler irrigation systems that use electric energy is acceptable compared to the national average. However, it is necessary to prioritize the electrification of agricultural wells of farms that use diesel fuel in the country's planning programs.

5. References

Ahmad, A., & Khan, S. (2009). On comparison of water and energy productivities in pressurized irrigation systems. *Energy*, 10(6.93), 4-29. <http://mssanz.org.au/modsim09/>

6. Declaration of interest

The authors report no declarations of interest.

7. Acknowledgment

In the end, Kurdistan University for the financial support of this research in the form of a thesis, as well as the regional electricity company of Kurdistan province for cooperation in preparing the electricity consumption data of the studied farms, are appreciated and thanked.

Cite this article: Niazmand, R., Moghadamnia, A., Tahmasebi, P., Nikmehr, S., & Maroufpoor, E. (2023). Productivity of water and energy use of potato in sprinkler irrigation systems (Case study: Dehgolan Plain, Kurdistan Province), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 116-137. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10298.1106





بهره وری مصرف آب و انرژی محصول سیب زمینی در سامانه های آبیاری بارانی

(مطالعه موردی: دشت دهگلان استان کردستان)

رویا نیازمند^۱، آرمان مقدم نیا^۲، پیمان طهماسبی^۳، سامان نیک مهر^۴، عیسی معروف پور^۵

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران. رایانامه: roya.niazmand1@gmail.com

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران. رایانامه: arman.moghadamnia@gmail.com

^۳ دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: peymantahmasebi99@gmail.com

^۴ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران. رایانامه: s.nikmehr@uok.ac.ir

^۵ نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران. رایانامه: e.maroufpoor@uok.ac.ir

چکیده

یکی از چالش های توسعه پایدار کشاورزی، استفاده درست از منابع آب و سایر نهاده های کشاورزی به منظور افزایش بهره وری است که یکی از راهکارهای آن استفاده از سامانه های نوین آبیاری است. هدف از این مطالعه، ارزیابی شاخص های بهره وری مصرف آب و انرژی محصول سیب زمینی در دشت دهگلان استان کردستان بوده است. در پژوهش حاضر، ۱۹ مزرعه به صورت تصادفی، به مجموع مساحت ۱۷۷ هکتار، انتخاب شدند. مزارع در سه گروه CE (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبپاش متحرک با منبع تأمین انرژی برق)، CD (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبپاش متحرک با منبع انرژی دیزلی) و WE (سامانه آبیاری بارانی لوله چرخ دار با منبع تأمین انرژی برق)، دسته بندی شدند. حجم آب مصرفی مزارع، به وسیله دی سنج اولتراسونیک اندازه گیری گردید. در پایان فصل آبیاری، میزان برق مصرفی هرکدام از مزارع از شرکت برق منطقه ای استان، دریافت شد. در مزارعی که از سوخت دیزل برای موتور پمپ ها، استفاده می شد، میزان گازوئیل مصرفی ماهانه ثبت می گردید. میزان عملکرد محصول نیز، از طریق کیل گیری اندازه گیری شد. متوسط میزان بهره وری مصرف آب مزارع مذکور به ترتیب ۴/۱، ۳/۵ و ۴/۱ کیلوگرم بر مترمکعب و شاخص بهره وری مصرف انرژی نیز به ترتیب ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۴ کیلوگرم بر مگاژول بود. متوسط شاخص کارایی مصرف انرژی نیز به ترتیب ۱/۴، ۰/۷ و ۱/۴ بود. متوسط شاخص انرژی ویژه نیز به ترتیب ۵/۷، ۲/۷ و ۲/۵ مگاژول بر کیلوگرم بوده است. به طور کلی، بر اساس شاخص های مورد مطالعه، وضعیت مزارع CD نامطلوب و انرژی خالص دریافتی از آن ها، منفی است.

واژه های کلیدی: آبیاری بارانی، انرژی ورودی، بهره وری مصرف آب، سیب زمینی، کارایی مصرف انرژی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۰ مهر ۱۴۰۲ اصلاح: ۱۵ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۹ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۹ دی ۱۴۰۲

استناد: نیازمند، ر.، مقدم نیا، آ.، طهماسبی، پ.، نیک مهر، س.، و معروف پور، ع. (۱۴۰۲). بهره وری مصرف آب و انرژی محصول سیب زمینی در سامانه های آبیاری بارانی

(مطالعه موردی: دشت دهگلان استان کردستان). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۳(۴)، ۱۳۷-۱۱۶. شناسه دیجیتال:

10.22126/ATWE.2024.10298.1106



مقدمه

کشاورزی با تولید مواد غذایی، ایجاد شغل، حفظ سرمایه‌های ملی، کمک به تولید ناخالص داخلی و گسترش صادرات غیرنفتی، نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی و رونق اقتصادی دارد (ناصری و نیکان فر، ۱۳۹۷). آب و انرژی، ورودی‌های اصلی سامانه تولید کشاورزی است. در هر کشوری که مجموعه توأمان آب، غذا، انرژی، از بهره‌وری مطلوب و صرفه اقتصادی برخوردار باشد، از امنیت غذایی پایداری برخوردار است؛ اما آب و انرژی هر دو منابع محدود می‌باشند و کمبود آن‌ها نه تنها در کشورهای در حال توسعه بلکه حتی در کشورهای توسعه‌یافته نیز چالش بزرگی است (احمد و خان^۱، ۲۰۰۹).

کشاورزی، همچنان که عرضه‌کننده انرژی است، مهم‌ترین مصرف‌کننده انرژی (السوراجبی و همکاران^۲، ۲۰۱۹) نیز است. انرژی‌های مصرفی در حوزه کشاورزی به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند (تبار و همکاران^۳، ۲۰۱۰). انرژی‌های مستقیم شامل تمام انرژی‌هایی است که در عملیات کاشت، داشت و برداشت محصولات زراعی به صورت مستقیم در مزرعه مصرف می‌شود (سینگ^۴، ۲۰۰۰). انرژی‌های غیرمستقیم شامل، انرژی‌های مصرفی در تولید، بسته‌بندی و انتقال کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، ساخت ماشین‌آلات کشاورزی و سایر مواد صنعتی مصرفی در کشاورزی است (ازکان و همکاران^۵، ۲۰۰۴). یکی از نهاده‌های ورودی در بخش انرژی‌های مستقیم، میزان برق مصرفی چاه‌های کشاورزی برای انتقال و توزیع آب در مزرعه است، به طوری که امروزه کشاورزی پس از بخش‌های خانگی و صنعتی، سومین مصرف‌کننده برق در کشور و پس از بخش حمل‌ونقل، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده گازوئیل در کشور است. در سال ۱۴۰۱، چاه‌های کشاورزی با مصرف ۴۵۶۲۴ میلیون کیلووات‌ساعت، بیش از ۱۴/۴ درصد برق مصرفی کشور را به خود اختصاص داده‌اند؛ بنابراین بررسی میزان بهره‌وری انرژی در بخش کشاورزی و ارائه راهکارهایی جهت بهبود آن، از اهمیت بالایی برخوردار است.

همچنین کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است. در سال ۱۳۹۹، میزان مصارف آب کشور، ۹۲/۷ میلیارد مترمکعب گزارش شده که در حدود ۸۹ درصد آن متعلق به بخش کشاورزی است. در شرایط کنونی، سرانه منابع آب تجدید پذیر کشور به ازای هر نفر در سال، کمتر از ۱۳۰۰ مترمکعب است که بر اساس شاخص فالکن‌مارک، کشور در وضعیت تنش آبی قرار دارد (بی‌نام، ۱۴۰۱). ۵۲ درصد آب کشاورزی از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود (بی‌نام، ۱۴۰۲a). بر اثر اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی، حجم کسری آبخوان‌های کشور به بیش از ۱۳۶ میلیارد مترمکعب و متوسط افت سالیانه آبخوان‌های کشور به ۵۵ سانتیمتر رسیده است. از ۶۰۹ دشت کشور، ۴۱۰ دشت به عنوان ممنوعه یا ممنوعه بحرانی دسته‌بندی شده‌اند (بی‌نام، ۱۴۰۲a). برای رسیدن به شرایط تعادل آب قابل برنامه‌ریزی با مصارف فعلی، حداقل باید مصرف آب بخش کشاورزی حدود ۱۵ میلیارد مترمکعب کاهش یابد.

بنابراین، استفاده بهینه از دو ورودی اصلی کشاورزی یعنی منابع آب و انرژی در بخش کشاورزی، از اولویت‌های مهم صنعت آب و کشاورزی کشور است. یکی از مهم‌ترین برنامه‌های توسعه کشاورزی کشور بایستی افزایش بهره‌وری مصرف نهاده‌های آب و انرژی باشد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

از راهکارهای مناسب افزایش تولید در واحد سطح و یا به عبارتی، بهبود بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی، کاربرد روش‌های مکانیزه و سامانه‌های پیشرفته آبیاری است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۶). سامانه‌های آبیاری کارآمد، منجر به کاهش مصرف ۳۰ الی ۷۰ درصد آب آبیاری و افزایش ۲۰ الی ۹۰ درصد عملکرد محصول می‌شوند (ساکن^۶، ۲۰۱۸). تاکنون در ایران حدود ۲/۹ میلیون هکتار تحت پوشش سامانه‌های آبیاری تحت فشار قرار گرفته (پایگاه اطلاع‌رسانی دولت، ۱۴۰۲b) که منجر به بهبود شاخص بهره‌وری آب از ۰/۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۳۸۴ به ۱/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۳۹۴ شده و مقدار هدف آن، ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۴۰۴ است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۶)، در صورتی که این مقدار در کشورهای پیشرفته، در حدود ۲/۵ تا ۳ کیلوگرم بر مترمکعب است؛ بنابراین در صورت استفاده بهینه و صحیح از منابع آب، امکان افزایش بهره‌وری آب تا دو برابر وضع موجود امکان پذیر است. بهبود بهره‌وری آب از طریق افزایش عملکرد محصول در واحد سطح، افزایش راندمان کاربرد آب آبیاری و یا بهبود هر دو عامل امکان پذیر است. متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری سامانه‌های آبیاری تحت فشار، ۶۶/۶ درصد و سامانه‌های آبیاری بارانی

¹ Ahmad and Khan

² Elsoragby et al

³ Tabar et al

⁴ Singh

⁵ Ozkan et al

⁶ Saccon

۶۲/۱ درصد، گزارش شده است. از میان سامانه های آبیاری بارانی، روش لوله چرخدار و کلاسیک ثابت، به ترتیب بیشترین (۶۶/۹ درصد) و کمترین (۵۲/۱ درصد) راندمان کاربرد آب آبیاری را داشته اند (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵)؛ اما فاصله میان راندمان کاربرد سامانه های آبیاری بارانی اجرا شده تا میزان راندمان پتانسیل و یا قابل حصول آن ها، ۸۵ درصد، (علی^۱، ۲۰۱۰) زیاد و قابل توجه (حدود ۲۳ درصد) است. در صورتی که این سامانه ها، از راندمان کاربرد مطلوبی برخوردار نباشند، علاوه بر اتلاف فراوان منابع آب و کاهش عملکرد محصول، از مصرف انرژی بیش تری هم برخوردار خواهند بود. با بررسی مصرف انرژی سامانه های آبیاری تحت فشار در مناطقی از استرالیا گزارش شد، اگرچه، این سامانه ها راهکاری برای کاهش مصرف آب آبیاری هستند، اما مصرف انرژی را تا حدود ۱۶۳ درصد افزایش می دهند. کشاورزی هنگامی از بهره وری مطلوب آب و انرژی برخوردار است که سامانه آبیاری آن، علاوه بر عملکرد هیدرولیکی مطلوب از مصرف انرژی کارآمد نیز برخوردار باشد (سانچز ساتیل و کانو ارتگا^۲، ۲۰۲۱).

مطالعات فراوانی در رابطه با میزان بهره وری مصرف آب و انرژی گزارش شده است. به عنوان مثال، بوگری و همکاران (۱۳۹۹)، به بررسی بهره وری مصرف آب و انرژی در سامانه های مختلف کشت گندم و ذرت، در شمال استان خوزستان، پرداختند. یافته های نتایج نشان داد که در سامانه های مختلف مدیریت کشت، میزان بهره وری مصرف آب و انرژی به ترتیب، در محدوده ۰/۵۴ تا ۱/۶۸ کیلوگرم در مترمکعب و ۰/۱۱۷ تا ۰/۱۹۳ کیلوگرم بر مگاژول، متغیر بوده است. همچنین، عزیزی و همکاران (۱۴۰۱) طی پژوهشی، میزان انرژی ورودی نظام های زراعی سیب زمینی و گندم آبی را در شهرستان بروجرد استان لرستان، به ترتیب ۹۲۶۴۵/۷۳ و ۴۵۲۱۵/۳۳ مگاژول در هکتار گزارش کردند. در تحقیقی اللی و همکاران^۳ (۲۰۱۷) میزان انرژی مصرفی و شاخص های مختلف انرژی را برای محصولات پیاز و سیب زمینی، در استان الحجاب کشور مراکش، محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که میزان انرژی مصرفی برای پیاز و سیب زمینی به ترتیب، ۱۰۷۴۸۳ و ۷۴۲۷۰ مگاژول در هکتار بوده است. همچنین شاخص کارایی مصرف انرژی نیز به ترتیب، ۱/۵۴ و ۰/۷۸ و شاخص بهره وری انرژی به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۴۵ کیلوگرم بر مگاژول بوده است. الهی و همکاران^۴ (۲۰۱۹) میزان شاخص های کارایی مصرف انرژی، انرژی مخصوص و بهره وری انرژی محصول گندم در استان پنجاب کشور هند را به ترتیب، ۱/۴، ۹/۲۷ مگاژول بر کیلوگرم و ۰/۱۰ کیلوگرم بر مگاژول، گزارش نمودند.

از دشت های حاصلخیز استان کردستان، دشت دهگلان به مساحت ۹۸۲/۸۴ کیلومترمربع است که در موقعیت شرقی شهر سنندج قرار دارد. در آبخوان ممنوعه دهگلان ۹۶۵ حلقه چاه فعال وجود دارد. مقایسه تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان طی دوره ۳۰ ساله (۱۳۶۶-۱۳۹۶) نشان می دهد که میزان افت سالانه آبخوان ۱/۳۳ متر است که بیش از ۲ برابر متوسط کشوری است. همچنین با محاسبه بیلان آب زیرزمینی، کسری تجمعی آبخوان طی دوره مذکور ۱۷/۴ میلیون مترمکعب است (بایزیدی و کاک، ۱۴۰۰). نتایج مطالعات نشان می دهد که در بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۴۰۰، دشت دهگلان به میزان ۱۲ تا ۳۲ سانتی متر دچار فرونشست شده است. به عبارتی سالانه در دشت مذکور به طور متوسط ۶ سانتی متر فرونشست رخ داده است که دلیل آن افت سطح آب های زیرزمینی ذکر شده است (قهرودی تالی و همکاران، ۱۴۰۲). آبخوان ممنوعه دهگلان، تنها منبع تأمین آب کشاورزی منطقه است. سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت (آبپاش متحرک)، رایج ترین سامانه آبیاری منطقه است و همچنین در برخی مناطق، کشاورزان از سامانه آبیاری بارانی لوله چرخدار استفاده می کنند. مطالعات انجام شده روی سامانه های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت و لوله چرخدار دشت دهگلان نشان می دهد که این سامانه ها از عملکرد هیدرولیکی پایینی برخوردار هستند. فاریابی و همکاران^۵ (۲۰۲۰) متوسط راندمان کاربرد سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت و لوله چرخدار را در دشت دهگلان به ترتیب ۴۴٪ و ۵۶٪ و معروف پور و همکاران^۶ (۲۰۱۹) مقدار آن را برای سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت ۵۴٪ گزارش کرده اند. منبع تأمین انرژی ایستگاه های پمپاژ چاه های منطقه، برای انتقال و توزیع آب در سامانه های مذکور، الکتریسیته و در برخی موارد سوخت دیزل است. همچنین باتوجه به افت سالیانه سطح ایستایی آبخوان، انرژی مصرفی برای پمپاژ آب نیز افزایش یافته است (بیات و همکاران^۷، ۲۰۲۲)؛ بنابراین بررسی شاخص های بهره وری آب و همچنین بهره وری انرژی برق مصرفی ایستگاه های پمپاژ و انرژی مصرفی کل در دشت مذکور ضروری به نظر می رسد. یکی از محصولات عمده دشت دهگلان، محصول سیب زمینی است که متوسط سطح زیر کشت آن در حدود ۴۰۰۰ هکتار است و بعد از گندم بیشترین درصد سطح زیر کشت را دارد. سیب زمینی یکی از محبوب ترین گیاهان خوراکی در دنیا بوده (کووالچیک^۸، ۲۰۱۹) و با تولید

¹ Ali

² Sánchez-Sutil and Cano-Ortega

³ Allali et al

⁴ Ilahi et al

⁵ Faryabi et al

⁶ Maroufpour

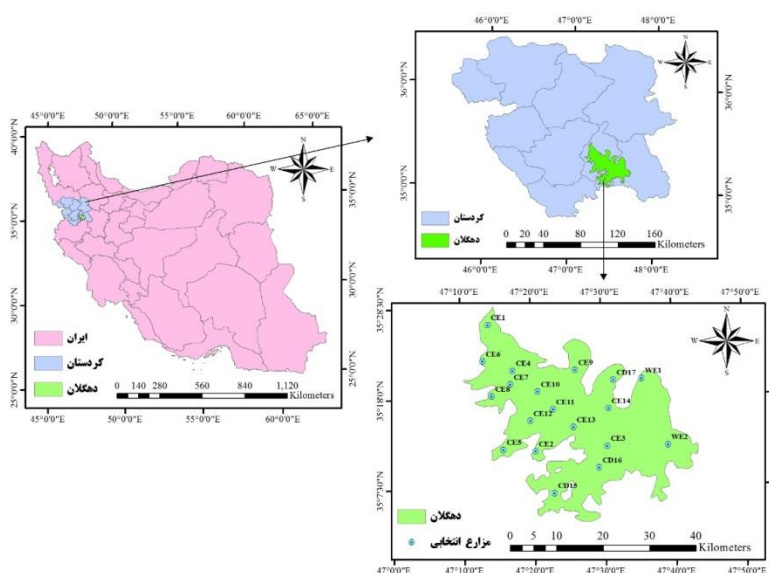
⁷ Bayat et al

⁸ Kowalczyk

تولید سالانه ۳۷۰ میلیون تن، سومین محصول پرمصرف دنیا است (سازمان فائو^۱، ۲۰۲۱)؛ بنابراین هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب و انرژی محصول سیب‌زمینی در مزارع کشاورزان با سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبپاش متحرک و لوله‌چرخ‌دار است. همچنین سعی شد که هر دو منبع انرژی الکتریکی و سوخت دیزل مورد مطالعه قرار گیرد.

روش پژوهش

این تحقیق در مزارع کشاورزان دشت دهگلان استان کردستان انجام شد. دشت دهگلان در ۴۵ کیلومتری شرق شهر سنندج با عرض جغرافیایی ۳۵ تا ۳۵/۵ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷/۲ تا ۴۷/۷ درجه شرقی و متوسط ارتفاع آن از سطح دریا، ۱۹۸۲ متر است. بر اساس دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰، متوسط بارندگی سالیانه دشت، ۳۶۹ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه آن ۱۰/۲ درجه سانتی‌گراد است. در شکل (۱)، موقعیت استان کردستان، موقعیت دشت دهگلان در استان و همچنین موقعیت مزرعه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی استان کردستان، دشت دهگلان و مزرعه‌های مورد مطالعه در دشت دهگلان

مزرعه‌های مورد مطالعه

در دشت مذکور، ۱۹ مزرعه به‌طور تصادفی و پراکنده، از بین مزارع کشاورزان انتخاب شد. در مزارع انتخابی، محصول مورد کشت سیب‌زمینی و سامانه آبیاری بارانی آن، کلاسیک ثابت آبپاش متحرک و یا لوله‌چرخ‌دار بود. مشخصات مزرعه‌های مورد مطالعه در جدول (۱) ذکر شده است. علاوه بر ملاحظات ذکر شده، همکاری کشاورز از مسائل مهمی است که لازم بود، مورد توجه قرار گیرد. منبع آب آبیاری مزارع مورد مطالعه، آبخوان ممنوعه دهگلان است که کشاورزان برای بهره‌برداری از آن، از موتورپمپ‌های چاه‌های عمیق استفاده می‌کنند. منبع تأمین انرژی موتورپمپ‌ها، انرژی الکتریکی و یا سوخت دیزل بود. در جدول (۲) برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب مزارع مورد مطالعه ذکر شده است. کیفیت آب آبیاری مزارع مورد مطالعه، بر اساس طبقه‌بندی ویلکوکس، در کلاس C_2S_1 قرار دارد که از کیفیت مطلوبی برای کشاورزی برخوردار است. برای صدمات ناشی از املاح آب آبیاری بر روی برگ‌ها، حداکثر غلظت مجاز سدیم و کلر ۱۰ - ۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر ذکر شده است (بی‌نام، ۱۳۸۳) که مقادیر آن‌ها در آب آبیاری مزارع مورد مطالعه بسیار کمتر است.

¹ FAOSTAT

جدول ۱. مشخصات مزارع مورد مطالعه محصول سیب زمینی در دشت دهگلان استان کردستان

منبع انرژی	نوع سامانه آبیاری	مساحت (هکتار)	نام مزارع
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۵	CE1
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۷	CE2
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۱۵	CE3
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۴	CE4
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۴	CE5
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۳	CE6
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۳	CE7
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۱۰	CE8
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۱۱	CE9
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۸	CE10
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۱۵	CE11
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۱۵	CE12
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۲۲	CE13
برق	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۱۶	CE14
دیزل	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۷	CD15
دیزل	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۳	CD16
دیزل	کلاسیک ثابت - آبیاش متحرک	۵	CD17
برق	لوله چرخ دار	۴	WE1
برق	لوله چرخ دار	۲۰	WE2

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری مزارع مورد مطالعه در دشت دهگلان استان کردستان

نوع مزارع	هدایت الکتریکی (ds/m)	اسیدیته (pH)	سدیم	کلسیم	منیزیم	نی کربنات	کربنات	کلر	نسبت جذب سدیم
برحسب میلی اکی‌والان در لیتر									
CE1	۰/۴۸۸	۶/۶۵	۴/۰۴	۲/۷	۱/۷	۱/۶۳	۰	۰/۶۲	۲/۷۲
CE2	۰/۴۳۶	۶/۸۸	۲/۱۲	۰/۱۶	۳/۲	۱/۳۴	۰	۰/۷۱	۱/۶۴
CE3	۰/۴۹۳	۷/۴۵	۳/۵۸	۱/۳	۳	۱	۰	۰/۸۹	۲/۴۴
CE4	۰/۴۵۴	۷/۵۶	۰/۸۲	۲/۲	۱/۴	۱/۴۲	۰	۰/۹۳	۰/۶۱
CE5	۰/۳۸۶۷	۶/۹	۲/۸۴	۰/۲	۳/۸	۰/۸۳	۰	۰/۶۶	۲/۰۱
CE6	۰/۴۸۰	۷/۳۲	۲/۵۶	۱/۹	۲/۱	۱/۲۱	۰	۰/۵۳	۱/۸۱
CE7	۰/۴۲۸	۷/۱	۳/۵۹	۰/۷	۳	۱/۲۹	۰	۰/۶۶	۲/۶۴
CE8	۰/۴۴۳	۷/۲۱	۱/۸۱	۰/۱	۳/۶	۱/۲۹	۰	۰/۵۳	۱/۳۳
CE9	۰/۴۹۸	۶/۸	۱/۲۶	۱/۸	۳	۱/۶۷	۰	۰/۶۶	۰/۸۱
C1E0	۰/۴۱۴	۶/۹	۲/۷۴	۰/۸۵	۳/۶	۱/۳	۰	۰/۶۶	۱/۸۴
CE11	۰/۴۱۵	۷/۱	۰/۱۵۷	۴/۴	۰	۱/۴۱۷	۰	۰/۶۲	۰/۱۶
CE12	۰/۴۰۵	۶/۶۴	۰/۱۳۷	۱	۳	۱/۴۸۵	۰	۰/۷۱	۰/۱۴
CE13	۰/۴۳۵	۷/۰۵	۰/۰۹۵	۱/۱	۲/۵	۱/۳۳۸	۰	۰/۸۴	۰/۰۷
CE14	۰/۳۶۹	۶/۸۱	۰/۰۱۰	۰/۶	۲/۵	۱/۲۵۰	۰	۰/۶۲	۰/۰۸
CD15	۰/۴۲۰	۷	۰/۰۹۹	۱/۷	۲	۱/۲۹۲	۰	۰/۸۲	۰/۰۷
CD16	۰/۴۴۵	۷/۱	۰/۱۵۷	۱/۸	۱/۹	۱/۲۸۶	۰	۰/۵۸	۰/۱۲
CD17	۰/۴۱۵	۷/۱	۰/۱۲۰	۱/۲	۱/۳	۱/۲۵۸	۰	۰/۷۷	۰/۱۱
WE1	۰/۴۸۸	۶/۶۵	۰/۱۷۶	۲/۷	۱/۷	۱/۵۲۶	۰	۰/۶۲	۰/۱۲
WE2	۰/۴۸۹	۷/۲	۰/۰۸۹	۱/۷	۲/۵	۱/۲۹۲	۰	۰/۶۷	۰/۰۶

روش انجام کار

مساحت هر کدام از مزرعه‌های مورد مطالعه، به وسیله دستگاه GPS (Etrex Vista, Garmin, Lenexa, USA) بادقت زیر ۳ متر در حالت سیستم تقویت منطقه وسیع، تعیین گردید. برای اندازه‌گیری حجم آب مصرفی مزارع مورد مطالعه، از دستگاه دی‌سنج اولتراسونیک (UF5000, Adak, Tabriz, Iran) استفاده گردید. با استفاده از دستگاه مذکور، دی‌سنجی الکتروپمپ (دی‌سنج ورودی به مزرعه) در بازه‌های زمانی متفاوت اندازه‌گیری می‌گردید و با ثبت مدت‌زمان آبیاری، حجم آب مصرفی در هر آبیاری محاسبه می‌شد. در پایان فصل آبیاری، میزان برق مصرفی هر کدام از مزارع مورد مطالعه به تفکیک دوره‌ها از شرکت برق منطقه‌ای استان دریافت شد. در مزارعی که از سوخت دیزل برای موتورپمپ‌ها، استفاده می‌شد میزان گازوئیل مصرفی ماهانه ثبت می‌گردید. همچنین در مزارع سامانه آبیاری بارانی لوله چرخ‌دار، از سوخت بنزین برای موتور آن جهت جابه‌جایی لوله آبیاری، استفاده می‌شد که حجم مصرفی ماهیانه آن یادداشت می‌گردید. برای اندازه‌گیری عملکرد محصول سیب‌زمینی از روش کیل‌گیری به روش کادر اندازی، در ابعاد ۱/۵ متر در ۱/۵ متر استفاده شد (لاوسن و کیلینگ^۱، ۱۹۹۹). برای این منظور سعی گردید که در نقاط مختلف مزرعه، عمل کیل‌گیری انجام شود. همچنین میزان عملکرد محاسباتی، با میزان عملکرد کل مزرعه (فروش کشاورز) تدقیق شد.

¹ Lawson and Keeling

همچنین از کشاورزان، سایر اطلاعات موردنیاز و تکمیلی مزارع مورد مطالعه، شامل میزان غده سیب زمینی کشت شده در مزرعه، کود مصرفی، سموم مصرفی، نیروی کارگری موردنیاز، ماشین های کشاورزی موردنیاز در مراحل کاشت، داشت و برداشت گردآوری شد. در جدول (۳) معادل های انرژی ورودی و خروجی تمامی فعالیت های انجام شده در مراحل مختلف کشاورزی، ذکر شده است.

جدول ۳. معادل های انرژی برای نهاده های ورودی و خروجی مزارع مورد مطالعه (کیتانی و همکاران^۱، ۱۹۹۹)

مشخصه	واحد	معادل انرژی (مگاژول بر واحد)
الف) انرژی ورودی		
نیروی انسانی	ساعت	۱/۹۶
ماشین آلات	ساعت	۶۲/۷
سوخت دیزلی	لیتر	۵۰/۲۳
نیتروژن	کیلوگرم	۶۶/۱۴
فسفات	کیلوگرم	۱۲/۴۴
پتاسیم	کیلوگرم	۱۱/۱۵
گوگرد	کیلوگرم	۱/۱۲
کود حیوانی	کیلوگرم	۰/۳
کودهای میکرو	کیلوگرم یا لیتر	۱۲۰
علف کش ها	لیتر	۲۳۸
آفت کش ها	لیتر	۱۰۱/۲
قارچ کش ها	لیتر	۲۱۶
آب آبیاری	مترمکعب	۱/۰۲
الکتریسیته	کیلووات ساعت	۱۱/۹۳
بذر سیب زمینی	کیلوگرم	۳/۶
ب) انرژی خروجی		
سیب زمینی	کیلوگرم	۳/۶

شاخص های ارزیابی

برای ارزیابی میزان بهره وری مزارع مورد مطالعه، از شاخص های زیر (کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹) استفاده شد.

الف) بهره وری مصرف آب: نسبت عملکرد محصول به مقدار آب ورودی به مزرعه است (رابطه ۱).

$$\text{بهره وری مصرف آب} = \frac{\text{میزان عملکرد محصول}}{\text{آب ورودی به مزرعه}} \quad (۱)$$

که در این رابطه، میزان عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم یا تن در هکتار و حجم آب ورودی به مزرعه بر حسب مترمکعب در هکتار است.

ب) بهره وری برق مصرفی و انرژی ورودی: این شاخص (رابطه ۲)، رابطه کمی بین عملکرد محصول به ازای واحد انرژی مصرفی را نشان می دهد (سیج^۲، ۱۹۹۹).

^۱ Kitani et al

^۲ Sage

$$(۲) \quad \text{میزان عملکرد محصول} = \frac{\text{بهره‌وری برق و انرژی مصرفی}}{\text{برق مصرفی یا انرژی ورودی}}$$

که در این رابطه، میزان عملکرد برحسب کیلوگرم یا تن در هکتار، میزان برق مصرفی و انرژی ورودی به ترتیب، برحسب کیلووات‌ساعت در هکتار و مگاژول در هکتار است.

(ج) کارایی مصرف انرژی: از نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی، به دست می‌آید (رابطه ۳).

$$(۳) \quad \text{کارایی مصرف انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}}$$

در رابطه مذکور، میزان انرژی ورودی و خروجی برحسب مگاژول در هکتار، محاسبه می‌گردد. همچنین میزان انرژی خروجی از رابطه (۴)، حاصل می‌شود. معادل انرژی در جدول (۳)، گزارش شده‌اند.

$$(۴) \quad \text{معادل انرژی} \times \text{عملکرد محصول} = \text{انرژی خروجی}$$

(د) انرژی ویژه: از نسبت انرژی ورودی به میزان عملکرد محصول، حاصل می‌شود. در واقع این شاخص، نشان‌دهنده این امر است که برای تولید یک کیلوگرم محصول، چه میزان انرژی مصرف شده است.

$$(۵) \quad \text{انرژی ویژه} = \frac{\text{انرژی ورودی}}{\text{میزان عملکرد محصول}}$$

انرژی ورودی برحسب مگاژول در هکتار و عملکرد محصول، برحسب کیلوگرم در هکتار است.

یافته‌ها

میزان برق و انرژی ورودی (مصرفی) مزارع مورد مطالعه

در جدول (۴)، متوسط برق مصرفی گیاه سیب‌زمینی در واحد هکتار برای مزارع مورد مطالعه برای یک فصل زراعی نشان داده شده است. متوسط برق مصرفی مزارع CE، ۵۶۴۵kwh/ha است. در مزارع مذکور، مزرعه CE1 دارای بیش‌ترین برق مصرفی (۷۱۳۹kwh/ha) و مزرعه CE14 دارای کم‌ترین برق مصرفی (۴۵۹۰kwh/ha) بود. میزان برق مصرفی مزارع به عوامل هیدرولیکی مؤثر همچون عمق سطح ایستایی در موقعیت مزرعه، فاصله چاه از مزرعه، وضعیت توپوگرافی مزرعه و راندمان الکتروپمپ در نقطه کار آن بستگی دارد. همچنین میزان دبی چاه متناسب با اراضی تحت پوشش و در نتیجه مدت‌زمان آبیاری مزرعه در طول فصل زراعی یکی دیگر از عوامل مؤثر بر میزان برق مصرفی محصول است. میانگین گازوئیل مصرفی مزارع CD، ۲۹۹۱ لیتر در هکتار بود که معادل برق مصرفی ۸۸۹۸kwh/ha در طی فصل رشد گیاه سیب‌زمینی است. به عبارتی، میزان برق مصرفی مزارع CD بیش از ۱/۵ برابر مزارع CE است. قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۴) راندمان کل ۱۷ دستگاه موتورپمپ دیزلی مزارع کشاورزان شهرستان همدان را در بازه ۵ تا ۲۴/۳ درصد و به‌طور متوسط ۱۴/۷ درصد گزارش کردند. رضوانی و همکاران (۱۳۸۹) متوسط بازده انرژی ایستگاه‌های پمپاژ برقی را در مزارع کشاورزان شهرستان همدان، ۴۶/۴ درصد گزارش کردند. به عبارتی راندمان موتورپمپ‌های دیزلی به‌مراتب کم‌تر از راندمان الکتروپمپ‌ها می‌باشد. از دلایل پایین بودن راندمان موتورپمپ‌های دیزلی، می‌توان به فرسوده بودن موتور، فرسوده بودن پمپ، عدم ایجاد فونداسیون مناسب، عدم تناسب موتور با پمپ و استفاده نکردن از حداکثر توان موتور را ذکر نمود. متوسط برق مصرفی مزارع WE، ۵۸۵۵kwh/ha است. به عبارت دیگر، میزان برق مصرفی مزارع WE، در حدود ۳ درصد بیش از مزارع CE است. متوسط فشار کارکرد آبیاری در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت آبیاری متحرک (مزارع CE)، ۴۰ متر و در سامانه آبیاری بارانی لوله‌چرخ‌دار (مزارع WE)، ۳۵ متر است. بر همین اساس، فواصل لوله‌های فرعی (بال‌ها) در مزارع CE، در محدوده ۲۲ متر و در مزارع WE، فواصل جابه‌جایی لوله‌چرخ‌دار، ۱۵ متر است؛ بنابراین اگرچه ماشین

آبیاری لوله‌چرخ‌دار از فشار کارکرد کم‌تر و در نتیجه مصرف انرژی کم‌تری برخوردار است، اما مدت‌زمان آبیاری و یا به عبارتی مدت‌زمان کارکرد الکتروپمپ در این سامانه بیش‌تر از سامانه کلاسیک آبپاش متحرک است که در نهایت منجر به اندکی برق مصرفی بیش‌تر گردیده است.

متوسط انرژی مصرفی و یا به عبارتی متوسط انرژی کل ورودی به مزارع CE، ۱۱۱۴۱۳ مگاژول در هکتار است. بیش‌ترین مصرف انرژی مربوط به مزرعه CE12 (۱۲۶۶۸۶ Mj/ha) و کم‌ترین مصرف انرژی مربوط به مزرعه CE6 (۹۱۶۰۲ Mj/ha) بود. متوسط انرژی مصرفی مزارع CD، ۲۱۳۹۳۱ و مزارع WE، ۱۱۸۴۳۱ مگاژول در هکتار است. به عبارتی بیش‌ترین مصرف انرژی مربوط به مزارع CD است که از سوخت دیزل استفاده می‌کنند. پس از تبدیل میزان برق مصرفی مزارع به معادل انرژی ورودی (جدول ۳)، ملاحظه می‌شود که در مزارع CE و WE، در حدود ۶۰ درصد و در مزارع CD ۵۰ درصد انرژی ورودی مربوط به مصرف برق است. همچنین در مزارع CD، علاوه بر برق مصرفی، سایر نهاده‌های مصرفی دیگر نیز بیش‌تر از مزارع CE و WE بود. شاید یکی از دلایل آن باشد که کشاورز برای جبران برخی کاستی‌ها، به دلیل کارکرد نامطلوب و ناپایدار موتور دیزلی و متعاقباً عملکرد نامطلوب سامانه آبیاری، اقدام به مصرف بیش‌تر نهاده‌های کشاورزی می‌کند که منجر به مصرف انرژی بیش‌تر به ترتیب در حدود ۱/۹ و ۱/۸ برابر مزارع CE و WE شده است. میزان کل انرژی مصرفی سیب‌زمینی در استان همدان، در تحقیقی ۶۰۷۸۳ (قادر زاده و پیرمحمدیانی، ۱۳۹۸) و در تحقیق دیگری، ۹۲۲۹۶ (همدانی و همکاران، ۲۰۱۱) مگاژول در هکتار گزارش شد. فیض‌بخش و همکاران (۱۳۹۸) این مقدار را برای استان گلستان، ۸۳۰۰۰ و ایزدخواه شیشوان و همکاران (۱۳۸۹) برای استان آذربایجان شرقی، در کشت متداول و مکانیزه، به ترتیب ۶۰۷۸۳ و ۵۲۶۳۵ مگاژول در هکتار، اعلام کردند. میزان مصرف نهاده‌های مربوط در مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت به عوامل فراوانی از جمله رقم سیب‌زمینی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، طول دوره رشد، پارامترهای اقلیمی، نوع سامانه آبیاری، نوع و موقعیت منبع آب آبیاری، منبع تأمین انرژی و غیره بستگی دارد. حسین‌پناهی و کافی (۱۳۹۱) میزان انرژی مصرفی محصول سیب‌زمینی را بدون احتساب انرژی برق مصرفی، در دشت دهگلان طی سال‌های زراعی ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷، در مزارع تجاری کشاورزان، ۹۳۳۳۱ و در مزارع سنتی کشاورزان، ۴۴۲۸۰ مگاژول در هکتار گزارش نمودند.

جدول ۴. میزان نهاده‌های مصرفی محصول سیب‌زمینی و عملکرد آن در مزارع کشاورزان دشت دهگلان

مزارع WE	مزارع CD	مزارع CE	شرح
۵۸۵۵	۸۸۹۸	۵۶۴۵	برق مصرفی (kwh/ha)
۱۱۸۴۳۱	۲۱۳۹۳۱	۱۱۱۴۱۳	انرژی ورودی (Mj/ha)
۰/۶	۰/۵	۰/۶	نسبت انرژی برق به انرژی ورودی
۱۱۵۷۰	۱۰۹۲۱	۱۰۳۱۸	حجم آب مصرفی (m ³ /ha)
۰/۵۱	۰/۸۲	۰/۵۵	نسبت برق مصرفی به حجم آب مصرفی (kwh/m ³)
۴۷۵۰۰	۳۸۳۳۳	۴۲۵۰۰	عملکرد (kg/ha)
۱۷۱۰۰۰	۱۳۸۰۰۰	۱۵۳۰۰۰	انرژی خروجی (Mj/ha)
۵۲۵۶۹	-۷۵۹۳۱	۴۱۵۸۷	انرژی خالص (Mj/ha)

حجم آب مصرفی مزارع مورد مطالعه

متوسط حجم آب مصرفی در مزارع CE، ۱۰۳۱۸ مترمکعب در هکتار بود به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان حجم آب مصرفی در مزارع مذکور، به ترتیب مربوط به مزرعه CE5، با مصرف ۱۱۴۴۶ m³/ha و مزرعه CE11، به میزان ۹۳۷۱ m³/ha است. متوسط حجم آب مصرفی در مزارع CD، ۱۰۹۲۱ و در مزارع WE، ۱۱۵۷۰ مترمکعب در هکتار بود (جدول ۴). حجم آب مصرفی مزارع CE و CD که هر دو دارای سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت هستند تفاوت چندانی ندارد، اما میزان مصرف مزارع WE، با سامانه آبیاری لوله‌چرخ‌دار، در حدود ۱۰٪ بیش‌تر از مزارع با آبیاری بارانی کلاسیک ثابت است. نتیجه به‌دست‌آمده با مقایسه برق مصرفی مزارع WE نسبت به مزارع CE

مطابقت دارد. میزان حجم آب مصرفی به عواملی همچون دانش کشاورزان در مورد آبیاری سیب‌زمینی که منجر به مدت‌زمان آبیاری و تعداد آبیاری متفاوت محصول در طی فصل کشت می‌گردد، مساحت اراضی، میزان دسترسی به آب و تجهیزات آبیاری بستگی دارد. نیاز خالص آبی سیب‌زمینی در دشت دهگلان، بر اساس سامانه نیاز آبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور در سال انجام پژوهش، ۶۸۹۴ مترمکعب در هکتار برآورد می‌شود که با احتساب راندمان کاربرد ۴۹٪ برای هر دو سامانه آبیاری تحت‌فشار (فاریابی و همکاران، ۲۰۲۰؛ معروف پور و همکاران، ۲۰۱۹)، حجم ناخالص آب موردنیاز آن، ۱۴۰۶۹ مترمکعب در هکتار خواهد شد. متوسط حجم آب مصرفی گیاه سیب‌زمینی در مزارع مورد مطالعه، ۱۰۵۴۵ مترمکعب در هکتار بود؛ بنابراین تمامی مزارع مورد مطالعه مورد در شرایط کم آبیاری بوده‌اند. قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۷) نیز متوسط آب مصرفی محصول سیب‌زمینی را در دشت بهار همدان، ۸۲۳۳/۲ مترمکعب در هکتار گزارش نمودند که کم‌ترین مقدار آن، ۴۹۲۰ و بیش‌ترین مقدار آن، ۱۳۳۷۴ مترمکعب در هکتار بوده است. آنان گزارش نمودند که مزارع در شرایط کم‌آبیاری بوده‌اند.

در جدول (۴)، میزان برق مصرفی به ازای هر مترمکعب آب مصرفی در مزارع مورد مطالعه نشان داده شده است. متوسط برق مصرفی برای هر مترمکعب آب مصرفی در مزارع CE، $۰/۵۵ \text{ kwh/m}^3$ ، در مزارع CD، $۰/۸۲ \text{ kwh/m}^3$ و در مزارع WE، $۰/۵۱ \text{ kwh/m}^3$ است. به عبارتی میزان برق مصرفی برای هر مترمکعب آب مصرفی در مزارع CD که از موتور دیزل استفاده می‌کردند در حدود ۱/۵ برابر بیش‌تر از مزارع CE و WE است که قبلاً نیز به آن اشاره شده بود.

عملکرد و میزان انرژی خروجی مزارع مورد مطالعه

متوسط عملکرد سیب‌زمینی در مزارع CE، CD و WE به ترتیب ۴۲۵۰۰، ۳۸۳۳۳ و ۴۷۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). عملکرد مزارع WE، در حدود ۲۴٪ و ۱۲٪ به ترتیب بیش‌تر از مزارع CD و CE بوده است. همچنین عملکرد مزارع CE، ۱۱٪ بیش‌تر از مزارع CD است. تمامی مزارع در شرایط کم آبیاری بوده‌اند و میزان تنش کم‌آبی در مزارع WE کم‌تر از سایر مزارع بوده است. همچنین بر اساس مطالعات انجام‌شده، میزان شاخص‌های ارزیابی عملکرد هیدرولیکی از جمله یکنواختی توزیع آب در سامانه آبیاری بارانی لوله چرخ دار بیش‌تر از سامانه کلاسیک ثابت آبیاری متحرک است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵؛ فاریابی و همکاران، ۲۰۲۰) که با میزان عملکرد غده آن مطابقت دارد. بر اساس سالنامه‌های کشاورزی استان، متوسط عملکرد محصول سیب‌زمینی دشت دهگلان، در سال‌های ۱۴۰۰، ۱۳۹۹ و ۱۳۹۸ به ترتیب ۴۰۰۰۳، ۳۹۰۰۰ و ۳۶۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار بوده است. عملکرد مذکور برای تمامی سامانه‌های آبیاری منطقه مورد مطالعه است. مولایی و همکاران (۱۳۹۴) در یک طرح تحقیقاتی، عملکرد محصول سیب‌زمینی را در آبیاری کامل با روش بارانی در منطقه اصفهان، ۱۴۵۹۰ کیلوگرم بر هکتار گزارش کردند اما سلیمانی پور و همکاران (۱۳۹۰) مقدار آن را در سامانه آبیاری بارانی برای منطقه فریدن اصفهان، ۲۶۱۵۲ کیلوگرم بر هکتار گزارش کردند.

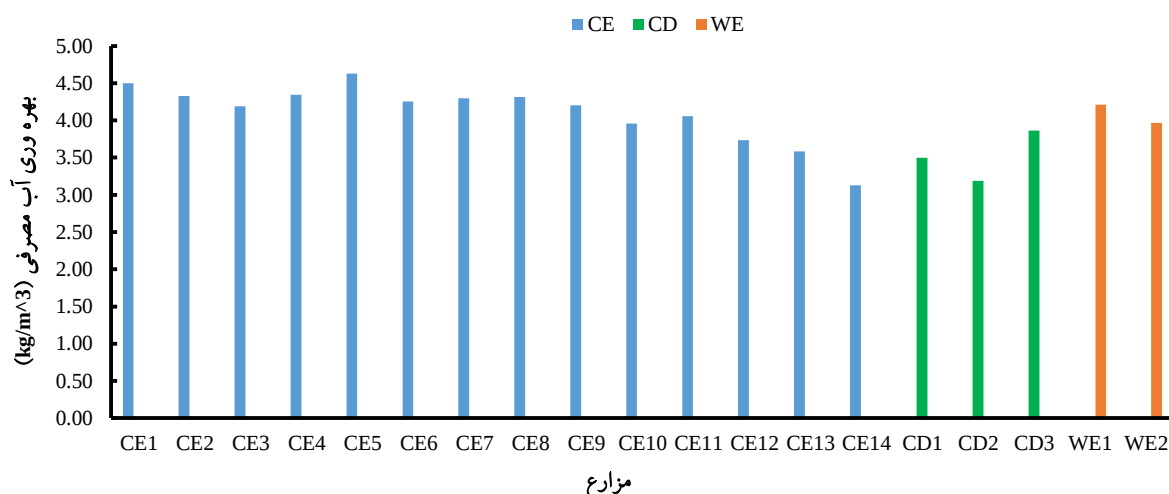
در جدول (۴)، میزان انرژی خروجی و انرژی خالص آن برای محصول سیب‌زمینی در مزارع مورد مطالعه ذکر شده است. میزان انرژی خالص دریافتی از محصول سیب‌زمینی، از مزارع CE، CD و WE به ترتیب ۴۱۵۸۷، ۷۵۹۳۱- و ۵۲۵۶۹ مگاژول در هکتار است. به عبارتی انرژی دریافتی از مزارع CD که از موتور دیزل استفاده می‌کنند، منفی است. حسین‌پناهی و کافی (۱۳۹۰) میزان انرژی خالص دریافتی محصول سیب‌زمینی را با سامانه‌های آبیاری بارانی و جویچه‌ای، در مزارع تجاری و سنتی، به ترتیب ۳۴۹۱۳ و ۱۸۱۷۵ مگاژول در هکتار ذکر کردند. زاهدی و همکاران (۱۳۹۴) مقدار انرژی خالص دریافتی از مزارع سیب‌زمینی کشاورزان اصفهان را، ۳۵۲۸۴ مگاژول در هکتار اعلام نمودند. میزان انرژی خالص دریافتی در تحقیقی در استان اصفهان، برای گیاه ریحان، ۱۷۷۳۷۷- مگاژول در هکتار گزارش گردید (پهلوان و همکاران^۱، ۲۰۱۲).

شاخص بهره‌وری مصرف آب

در شکل (۲) میزان شاخص بهره‌وری آب مزارع مورد مطالعه برای محصول سیب‌زمینی، برحسب کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی نشان داده شده است. در مزارع مورد مطالعه، مزرعه CE5 با عملکرد ۵۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و حجم آب مصرفی ۱۱۴۴۵/۷، بیش‌ترین

¹ Pahlavan et al

بهره‌وری آب مصرفی (۴/۶ کیلوگرم بر مترمکعب) و مزارع CE14 با عملکرد ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و حجم آب مصرفی ۹۵۹۱ مترمکعب (۳/۱ کیلوگرم بر مترمکعب) و CD2 با عملکرد ۳۵۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۰۹۸۲ مترمکعب آب مصرفی (۳/۲ کیلوگرم بر مترمکعب) دارای کم‌ترین بهره‌وری آب مصرفی بودند. در مزارع مورد مطالعه متوسط میزان بهره‌وری آب مزارع CE، CD و WE به ترتیب ۴/۱، ۳/۵ و ۴/۱ کیلوگرم در مترمکعب بود. به عبارتی میزان بهره‌وری آب مزارع CE و WE باهم برابر هستند. در مزارع WE، هر دو عامل عملکرد و آب مصرفی در حدود ۱۲٪ بیشتر از مزارع CE بود و در نهایت شاخص بهره‌وری آب مصرفی آن‌ها باهم برابر شد. همچنین میزان بهره‌وری آب مزارع مذکور در حدود ۱۷٪ بیشتر از مزارع CD است. سامانه آبیاری در هر دو مزارع CD و CE کلاسیک ثابت و حتی مزارع CD از تنش آبی کم‌تری هم نسبت به مزارع CE برخوردار بودند، اما به نظر می‌رسد که سامانه آبیاری مزارع مذکور از عملکرد هیدرولیکی ضعیف‌تری، از لحاظ یکنواختی پخش و میزان تلفات برخوردار بوده است که از دلایل آن می‌توان به عملکرد ضعیف و ناپایدار موتورهای دیزلی در تأمین فشار سامانه اشاره کرد. در صورتی که سامانه آبیاری از فشار کارکرد مطلوب برخوردار نباشد، منجر به عدم هم‌پوشانی مطلوب پاشش آبپاش‌ها می‌گردد که متعاقباً، یکنواختی توزیع ضعیف آب در مزرعه را به دنبال دارد (معروف‌پور و همکاران، ۲۰۱۹) که منجر به کاهش عملکرد محصول خواهد شد. میزان بهره‌وری آب محصول سیب‌زمینی در کشور از ۰/۹ تا ۶/۲ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بوده است که متوسط آن برای انواع سامانه‌های آبیاری، حدود ۳/۶ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شده است (حسن‌پناه و همکاران، ۱۳۹۸). میزان بهره‌وری آب محصول سیب‌زمینی در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت، در دشت قهاوند همدان، ۲/۵ کیلوگرم بر مترمکعب (قدیمی فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۸۳) و در دشت کبودرآهنگ همدان، ۳/۲ کیلوگرم بر مترمکعب (فیروزآبادی^۱، ۲۰۱۲) گزارش شده است. همچنین قدیمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۷) میزان شاخص مذکور را برای محصول سیب‌زمینی در دشت بهار همدان، در شرایط تنش آبی مزارع در محدوده ۳/۷ تا ۱۰/۲ و به‌طور متوسط ۶/۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نمودند. میزان بهره‌وری آب محصول سیب‌زمینی در سامانه آبیاری بارانی در منطقه فریدن اصفهان، ۴/۹ کیلوگرم بر مترمکعب (سلیمانی پور و همکاران، ۱۳۹۰) و شهرستان اصفهان، ۳/۶ کیلوگرم بر مترمکعب (سالامی و همکاران، ۱۳۹۵)، گزارش شده است.



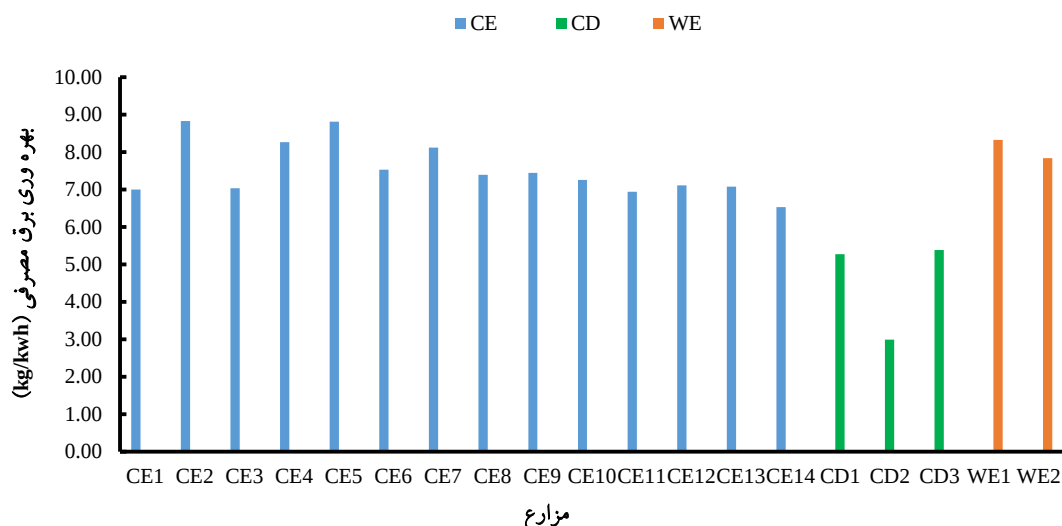
شکل ۲. میزان شاخص بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) محصول سیب‌زمینی در مزارع مورد مطالعه دشت دهگلان استان کردستان

شاخص بهره‌وری برق مصرفی و انرژی ورودی

در شکل (۳)، مقادیر شاخص بهره‌وری برق مصرفی محصول سیب‌زمینی برحسب کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت، در مزارع مورد مطالعه نشان داده شده است. این شاخص بیانگر میزان تولید سیب‌زمینی به ازای هر کیلووات‌ساعت برق مصرفی است. شاخص بهره‌وری برق مصرفی مزارع CE، در بازه ۶/۵ تا ۸/۸، مزارع CD در بازه ۵/۴ تا ۷/۸ و مزارع WE در بازه ۸/۳ تا ۸ کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت بود. متوسط شاخص مذکور در مزارع CE، CD و WE به ترتیب ۷/۵، ۴/۶ و ۸ کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت است. در مزارع CD به دلیل

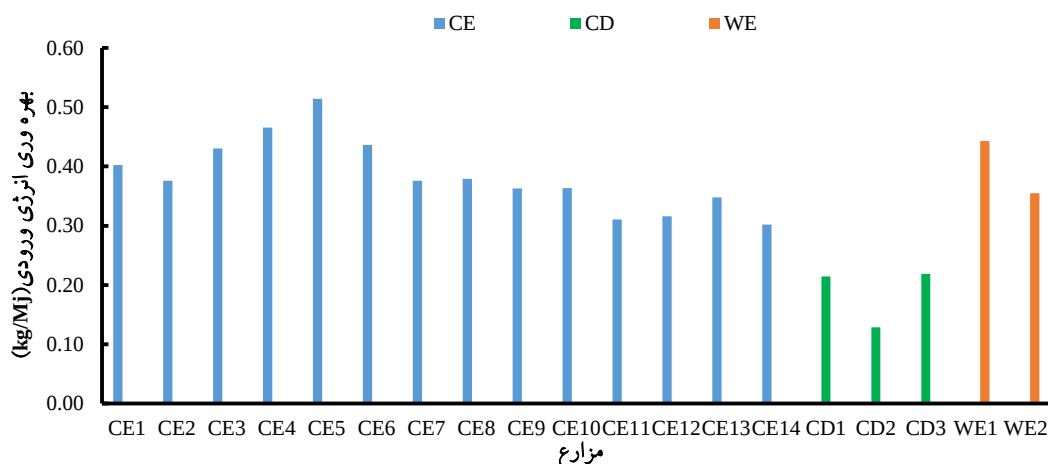
¹ Firouzabadi et al

راندمان پایین موتورهای دیزلی و درنهایت برق مصرفی زیاد در این مزارع، این شاخص از مقدار بسیار کم‌تری برخوردار است. غلامی و همکاران (۱۳۹۴) میزان شاخص بهره‌وری انرژی برق مصرفی را در سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در دشت قزوین برای شرایط پمپاژ از چاه، برای محصول گندم در بازه ۲/۶۲ تا ۹، برای جو ۲/۰۹ تا ۷/۷۹، ذرت دانه‌ای ۱/۰۹ تا ۸/۶۴ و یونجه ۰/۳۴ تا ۳/۷۴ کیلوگرم در کیلووات‌ساعت، گزارش کردند. علی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) میزان بهره‌وری انرژی برق مصرفی (پمپاژ و توزیع آب) سامانه آبیاری عقربه‌ای را برای محصول ذرت بذری در استان خراسان رضوی، ۰/۸۳۸ کیلوگرم بر کیلووات ساعت گزارش نمودند. از عوامل مهم و مؤثر بر میزان بهره‌وری انرژی مزارع، نوع منبع تأمین آب است که به‌صورت قابل‌توجهی بر میزان برق مصرفی محصول مؤثر است. میزان برق مصرفی برای محصولاتی که از سامانه آبیاری سطحی استفاده می‌کنند و برداشت آن‌ها از کانال آبیاری شبکه است صفر است.



شکل ۳. بهره‌وری برق مصرفی (کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت) محصول سیب‌زمینی مزارع مورد مطالعه در دشت دهگلان استان کردستان

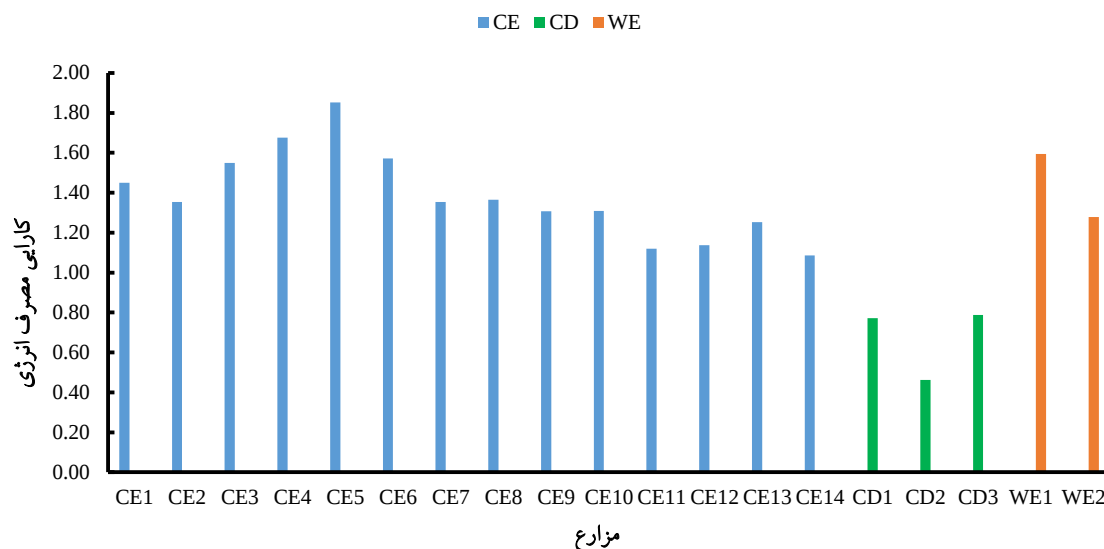
در شکل (۴)، مقادیر شاخص بهره‌وری مصرف انرژی محصول سیب‌زمینی به تفکیک مزارع مورد مطالعه نشان داده شده است. شاخص بهره‌وری انرژی مزارع CE در بازه ۰/۳ تا ۰/۵ با متوسط مقدار ۰/۴ کیلوگرم بر مگاژول بوده است. متوسط مقدار شاخص مذکور در مزارع CD، ۰/۲ و در مزارع WE، ۰/۴ است. به عبارتی شاخص بهره‌وری انرژی مزارع CE و WE که از انرژی الکتریکی برای پمپاژ استفاده می‌کنند، برابر و دو برابر مزارع CD است؛ بنابراین برق‌دار کردن چاه‌های کشاورزی، کمک شایانی به اقتصاد کشور خواهد بود. قادرزاده و پیرمحمدیانی (۱۳۹۸) میزان شاخص بهره‌وری انرژی محصول سیب‌زمینی را برای استان همدان، ۰/۶۷ و در تحقیقی دیگر مقدار آن برای محصول سیب‌زمینی در استان همدان، ۰/۷۴ کیلوگرم در مگاژول، محاسبه گردید (دکامین، ۱۴۰۰).



شکل ۴. بهره‌وری انرژی ورودی (کیلوگرم بر مگاژول) محصول سیب‌زمینی مزارع مورد مطالعه در دشت دهگلان استان کردستان

شاخص کارایی مصرف انرژی

میزان شاخص کارایی مصرف انرژی برای محصول سیب زمینی دشت دهگلان استان کردستان، در شکل (۵)، آورده شده است. دامنه تغییرات شاخص مذکور برای مزارع انتخابی از $0/5$ (CD2) تا $۱/۹$ (CE5) بوده است. متوسط شاخص کارایی مصرف انرژی، برای مزارع CE، CD و WE به ترتیب برابر با $۱/۴$ ، $۰/۷$ و $۱/۴$ بود. به عبارتی میزان کارایی مصرف انرژی مزارع CE و WE باهم برابر و دو برابر کارایی مصرف انرژی مزارع CD است. مقادیر شاخص کارایی مصرف انرژی کمتر از یک، بیانگر منفی بودن انرژی خالص سامانه است که در مزارع CD اتفاق می افتد. رضوانی و همکاران (۱۳۸۹) و قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۴) میزان تلفات سوخت گازوئیل را در ایستگاه های پمپاژ مزارع کشاورزان استان همدان، به ترتیب $۳/۹$ و $۴/۸$ لیتر در ساعت گزارش نمودند. شاخص کارایی مصرف انرژی، جهت تولید سیب زمینی در استان گلستان، $۰/۷۱$ گزارش شده است (فیض بخش و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین، مقدار اندازه گیری شده ی این شاخص، برای محصول سیب زمینی تحت آبیاری جویچه ای، در جنوب مصر، برابر با $۱/۴۲$ بوده است (عبدالقادر^۱ و همکاران^۱، ۲۰۲۲). همچنین میزان کارایی مصرف انرژی، برای محصول سیب زمینی، در مناطق جامو و کشمیر کشور هندوستان، $۱/۸$ گزارش شده است (خار و ظفر^۲، ۲۰۲۳).



شکل ۵. میزان شاخص کارایی مصرف انرژی محصول سیب زمینی در مزارع مورد مطالعه در دشت دهگلان استان کردستان

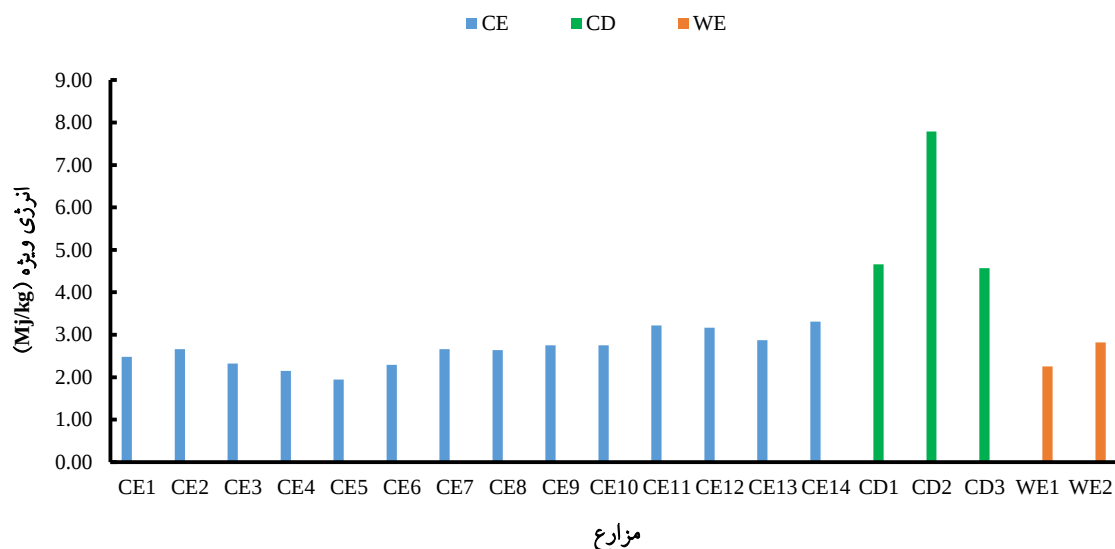
شاخص انرژی ویژه

شکل (۶)، نشان دهنده ی مقادیر شاخص انرژی ویژه ی محصول سیب زمینی مزارع منتخب دشت دهگلان است. شاخص مذکور عکس شاخص بهره وری انرژی است و نشان می دهد که برای تولید هر کیلوگرم غده سیب زمینی چند مگاژول انرژی مصرف شده است. هر چه مقدار شاخص مذکور کمتر باشد بیانگر عملکرد بهتر سامانه است. کمترین میزان شاخص مذکور $۰/۸$ (مزرعه WE1) و بیشترین مقدار آن $۰/۵$ (CE5) مگاژول بر کیلوگرم بوده است. مقادیر متوسط این شاخص برای مزارع CE، CD و WE به ترتیب $۲/۷$ ، $۵/۷$ و $۲/۵$ مگاژول بر کیلوگرم، بوده است. به عبارتی میزان مصرف انرژی برای تولید هر کیلوگرم غده سیب زمینی در مزارع CD بیش از دو برابر مزارع با انرژی الکتریسیته است. همچنین کمترین مقدار انرژی مصرفی در واحد تولید، مربوط به مزارع WE با سامانه آبیاری لوله چرخ دار است. میزان شاخص انرژی ویژه، برای تولید سیب زمینی در کشت بوم های بهاره (آبیاری سنتی) و پاییزه (آبیاری مدرن) به ترتیب، $۲/۷۶$ و $۱/۹۵$ بوده است (شاه حسینی و همکاران، ۱۳۹۹). میزان انرژی ویژه برای محصول سیب زمینی، در مناطق جامو و کشمیر کشور هندوستان، ۲

¹ Abdelkader et al

² Khar and Zaffar

مگاژول در کیلوگرم، گزارش شده است (خار و ظفر، ۲۰۲۳). میزان این شاخص برای محصول سیب‌زمینی تحت آبیاری سطحی، در جنوب مصر، برابر با $2/54 \text{ Mj/ha}$ بوده است (عبدالقادر و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۶. میزان شاخص انرژی ویژه (مگاژول بر کیلوگرم) محصول سیب‌زمینی در مزارع مورد مطالعه در دشت دهگلان استان کردستان

بحث

موضوع اصلی این پژوهش، ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب و انرژی محصول سیب‌زمینی در دشت دهگلان استان کردستان بوده است. در این پژوهش شاخص‌های بهره‌وری آب و انرژی محصول سیب‌زمینی در مزارع کشاورزان دشت دهگلان استان کردستان مورد ارزیابی قرار گرفت. مزارع ذکر شده، در سه گروه CE (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با منبع تأمین انرژی برق)، CD (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با منبع تأمین انرژی سوخت دیزلی) و WE (سامانه آبیاری بارانی لوله چرخ‌دار با منبع تأمین انرژی برق)، دسته‌بندی شدند. در پایان فصل آبیاری، میزان برق مصرفی هرکدام از مزارع از شرکت برق منطقه‌ای استان، دریافت شد.

نتیجه‌گیری

متوسط انرژی مصرفی مزارع CE، CD و WE به ترتیب ۱۱۱۴۱۳، ۲۱۳۹۳۱ و ۱۱۸۴۳۱ مگاژول در هکتار بود. مقادیر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب مزارع CE و WE باهم برابر و ۱۷٪ بیش از مزارع CD بود. همچنین بهره‌وری و کارایی مصرف انرژی مزارع مذکور باهم برابر و دو برابر مزارع CD بود. میزان انرژی خالص دریافتی مزارع مذکور نیز به ترتیب ۴۱۵۸۷، ۷۵۹۳۱- و ۵۲۵۶۹ مگاژول در هکتار بود. به عبارتی انرژی دریافتی از مزارع CD که از موتور دیزل استفاده می‌کنند، منفی است. به‌طور کلی بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه، وضعیت مزارع با آبیاری بارانی کلاسیک ثابت و لوله‌چرخ‌دار که از انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند نسبت به متوسط کشوری قابل قبول است اما لازم است برق‌دار کردن چاه‌های کشاورزی مزارعی که از سوخت دیزل استفاده می‌کنند، در الویت کاری برنامه‌ریزان کشور قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

در پایان از دانشگاه کردستان برای حمایت مالی این پژوهش در قالب پایان نامه و همچنین از شرکت برق منطقه ای استان کردستان برای همکاری در تهیه اطلاعات برق مصرفی مزارع مورد مطالعه، تقدیر و تشکر به عمل می آید.

منابع

- ایزدخواه شیشوان، موسی، تاج بخش شیشوان، مهدی، و حسن زاده قورت تپه، عبدالله. (۱۳۸۹). ارزیابی و مقایسه کارایی انرژی دو نظام کشت متداول و مکانیزه در مزارع سیب زمینی استان آذربایجان شرقی. پژوهش های زراعی ایران، ۸(۲)، ۲۸۴-۲۹۷.
<https://doi.org/10.22067/gsc.v8i2.7526>
- بایزیدی، مطلب، و کاک، مهری. (۱۴۰۰). تغییرات حجم ذخیره و بهره برداری از آبخوان های دشت های شرق استان کردستان. اکوهیدرولوژی، ۸(۱)، ۷۲-۵۷.
<https://doi.org/10.22059/ije.2021.307139.1360>
- بوگری، عیسی، آسودار، محمدامین، مرزبان، افشین، و کاظمی، نواب. (۱۳۹۹). بررسی کارایی مصرف آب، بهره وری انرژی، اقتصادی و عملکرد سیستم های مختلف کشت گندم- ذرت در شمال خوزستان. دانش کشاورزی و تولید پایدار (دانش کشاورزی)، ۳۰(۴)، ۳۹۵-۳۱۰.
<https://doi.org/10.22034/saps.2020.12318>
- بی نام. (۱۴۰۱). مقایسه شاخص بهره وری آب در زراعت سیب زمینی در ایران با سایر کشورها. مجموعه نشریات تجارب دنیا در بخش کشاورزی و منابع طبیعی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی معاونت آموزش و ترویج کشاورزی، نشریه ۲۴.
https://agrilib.areeo.ac.ir/book_9796.pdf
- بی نام. (۱۴۰۲a). گزارش عملکرد سال ۱۴۰۱ صنعت آب و برق. معاونت سرمایه انسانی تحقیقات و فناوری اطلاعات، وزارت نیرو.
[https://isn.moe.gov.ir/getattachment/Home/1-\(67\).pdf](https://isn.moe.gov.ir/getattachment/Home/1-(67).pdf)
- بی نام. (۱۳۸۳). ضوابط و معیارهای فنی آبیاری تحت فشار (طراحی). نشریه ۲۸۶، ۵۳.
<https://shaghool.ir/Files/CODE286.pdf>
- حسین پناهی، فرزاد، و کافی، محمد. (۱۳۹۱). ارزیابی بودجه انرژی و بهره وری آن در مزارع تولید سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) استان کردستان، مطالعه موردی: دشت دهگلان. بوم شناسی کشاورزی، ۴(۲)، ۱۶۹-۱۵۹.
<https://doi.org/10.22067/jag.v4i2.14969>
- حیدری سلطان آبادی، محسن. (۱۴۰۱). تعیین تابع تولید انرژی در گندم آبی استان اصفهان. مهندسی و مدیریت انرژی، ۱۱(۱)، ۱۲۷-۱۱۶.
https://energy.kashanu.ac.ir/article_113538.html
- دکامین، مجید. (۱۴۰۰). هزینه یابی جریان مواد و انرژی سیب زمینی در استان همدان. اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۵(۲)، ۱۱۹-۱۰۵.
<https://doi.org/10.22067/jead.2021.17804.0>
- رضوانی، سیدمعین الدین، جعفری، علی محمد، و امین، سیف اله. (۱۳۸۹). بررسی بازده و مصرف انرژی در ایستگاه های پمپاژ آبیاری بارانی برخی مزارع استان همدان. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۱۱(۴)، ۳۴-۱۹.
https://idser.areeo.ac.ir/article_102312.html
- زاهدی، مرتضی، عشقی زاده، حمیدرضا، و مندنی، فرزاد. (۱۳۹۴). کارایی انرژی و بهره وری در نظام های تولید سیب زمینی و چغندر قند استان اصفهان. تولید فراوری محصولات زراعی و باغی، ۵(۱۷)، ۱۹۰-۱۸۱.
<http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.17.181>
- سالمی، حمیدرضا، و رضوانی، سید معین الدین. (۱۳۹۵). ارزیابی سیستم آبیاری بارانی در شرایط زارعی (استان اصفهان و همدان). مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۳(۲۳)، ۳۵۰-۳۴۵.
<https://dx.doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204>
- سلیمانی پور، احمد، باقری، ابوالقاسم، و واثقی، الهه. (۱۳۹۰). ارزیابی اقتصادی روشهای آبیاری و تاثیر آن بر عملکرد ارقام سیب زمینی در استان اصفهان. تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۳(۱)، ۱۶۴-۱۴۳.
<http://ensani.ir/fa/article/241123>

- شاه حسینی، حمیدرضا، رمودی، محمود، و کاظمی، حسین. (۱۳۹۹). ارزیابی و مقایسه پایداری کشت بوم های پاییزه و بهاره سیب زمینی با استفاده از تحلیل انرژی (مطالعه موردی: استان گلستان). دانش کشاورزی و تولید پایدار (دانش کشاورزی)، ۳۰(۴)، ۲۶۵-۲۷۹.
<https://doi.org/10.22034/saps.2020.12316>
- عباسی، فریبرز، عباسی، نادر، و توکلی، علیرضا. (۱۳۹۶). بهره‌وری آب در بخش کشاورزی؛ چالش‌ها و چشم اندازه‌ها. آب و توسعه پایدار، ۴(۱)، ۱۴۱-۱۴۴.
<https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.67121>
- عباسی، فریبرز، سهراب، فرحناز، و عباسی، نادر. (۱۳۹۵). ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، ۱۷(۶۷)، ۱۲۸-۱۱۳.
<https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109617>
- عزیزی، خسرو، رحیمی، لیلا، گودرزی، داریوش، دانشور، ماشاءالله، و حیدری، سعید. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی انرژی و بهره‌وری بوم شناختی بوم نظام‌های زراعی گندم‌آبی و سیب‌زمینی در شهرستان بروجرد، استان لرستان. تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک (آماده انتشار).
<https://doi.org/10.22034/csrar.2023.349325.1252>
- علی آبادی، حسن، علیزاده، امین، و عرفانی، عاطفه. (۱۳۹۴). بهره‌وری مصرف آب و انرژی در سامانه های مختلف آبیاری (مطالعه موردی ذرت بذری در کشت و صنعت جوبین) در استان خراسان رضوی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۹(۴)، ۵۸۲-۵۷۱.
https://idj.iaid.ir/article_55081.html
- غلامی، زینب، ابراهیمیان، حامد، و نوری، حمیده. (۱۳۹۴). بررسی بهره‌وری انرژی آب و بهره‌وری اقتصادی انرژی در سامانه های آبیاری بارانی و سطحی در شرایط بهره‌برداری از آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین). مجله تحقیقات مهندسی صنایع غذایی، ۱۶(۳)، ۴۴-۳۱.
<https://doi.org/10.22092/jaer.2015.102988>
- فیض بخش، محمدتقی، دری، محمدعلی، و رضوان طلب، نصیبه. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص های انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی در تولید سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در استان گلستان. بوم شناسی کشاورزی، ۱۱(۱)، ۶۸-۵۳.
<https://dx.doi.org/10.22067/jag.v12i3.73855>
- قادرزاده، حامد، و پیرمحمدیانی، زانیار. (۱۳۹۸). بررسی کارایی انرژی در تولید سیب زمینی استان همدان. تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱۱(۴۲)، ۲۰۲-۱۶۷.
https://jae.marvdasht.iau.ir/article_3489.html
- قدیمی فیروزآبادی، علی، دهقانی سانجی، حسین، خوش روش، مجتبی، و سیدان، سیدمحسن. (۱۳۹۴). بررسی راندمان انرژی و مصرف آب در ایستگاه های پمپاژ گازوئیلی. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)، ۲۹(۳)، ۳۶۷-۳۷۷.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.22287140.1394.29.3.7.9>
- قدیمی فیروزآبادی، علی، سیدان، سید محسن، و دهقانی سانجی، حسین. (۱۳۹۷). بهره‌وری مصرف آب آبیاری و تحلیل اقتصادی تولید سیب‌زمینی در دو سیستم آبیاری بارانی و جویچه‌ای در دشت بهار استان همدان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲(۶)، ۱۴۱۷-۱۴۰۷.
https://idj.iaid.ir/article_85907.html
- قهرودی تالی، منیژه، خدامرادی، فرهاد، و علی نوری، خدیجه. (۱۴۰۲). تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر مخاطرات فرونشست زمین در دشت دهگلان، استان کردستان. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۰(۱)، ۷۰-۵۷.
<https://dx.doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777>
- مولایی، بهناز، قیصری، مهدی، مصطفی زاده فرد، بهروز، لندی، اسماعیل، و مجیدی، محمدمهدی. (۱۳۹۴). بررسی عملکرد و ویژگی های آن برای دو رقم سیب زمینی در روش های آبیاری بارانی و قطره ای- نواری. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۹(۷۱)، ۲۵۰-۲۴۱.
<http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.241>
- ناصری، ابوالفضل، و نیکان فر، رامین. (۱۳۹۸). آینده پژوهی بهره‌وری انرژی در تولید گندم آبی در حاشیه شرقی دریاچه ارومیه. علوم محیطی، ۱۷(۲)، ۸۰-۱۰۱.
<https://doi.org/10.29252/envs.17.2.81>

References

- Abbasi, F., & abbasi, N. (2017). Water productivity in agriculture; Challenges and prospects. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 141-144. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.67121> [In Persian]
- Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of Irrigation Efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67), 113-120. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109617> [In Persian]
- Abdelkader, M., Zargar, M., Murtazova, K. M. S., & Nakhaev, M. R. (2022). Life Cycle Assessment of the Cultivation Processes for the Main Vegetable Crops in Southern Egypt. *Agronomy*, 12(7), 1527. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071527>
- Ahmad, A., & Khan, S. (2009). On comparison of water and energy productivities in pressurized irrigation systems. *Energy*, 10(6.93), 4-29. <http://mssanz.org.au/modsim09/>
- Ali, H. (2010). *Fundamentals of irrigation and on-farm water management: Volume 1*. Springer Science & Business Media. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-6335-2>
- Aliabadi, H., Alizadeh, A., & Erfani, A. (2015). Energy and Water Productivity under Different Irrigation Systems, (Case Study of Corn in Jovain Agro-Industry). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(4), 571-582. https://idj.iaid.ir/article_55081.html [In Persian]
- Allali, K., Dhehibi, B., Kassam, S. N., & Aw-Hassan, A. (2017). Energy consumption in onion and potato production within the province of El Hajeb (Morocco): towards energy use efficiency in commercialized vegetable production. *Journal of Agricultural Science*, 9(1), 118-127. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v9n1p118>
- Azizi, K., Rahimi, L., Goodarzi, D., Daneshvar, M., & hydari, S. (2023). Evaluation of energy efficiency and ecological productivity of wheat and potato agroecosystem ecosystems in Borujerd city, Lorestan province. *Crop Science Research in Arid Regions* [ready to publish]. <https://doi.org/10.22034/csrar.2023.349325.1252> [In Persian]
- Bayat, F., Roozbahani, A., & Shahdany, S. M. H. (2022). AHP-Entropy-WASPAS Technique for Performance Evaluation of Agricultural Surface Water Distribution Systems Based on Water-Food-Energy Nexus. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1652590/v1>
- Bayazidi, M., & Kaki, M. (2021). Storage Volume and Exploitation Changes of Aquifers in the Eastern Plains of the Kurdistan Province. *Iranian journal of Ecohydrology*, 8(1), 57-72. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.307139.1360> [In Persian]
- Bougari, E., Asoodar, M. A., Marzban, A., & Kazemi, N. (2020). Investigating Water Use Efficiency, Energy Productivity, Economic and Yield under Different Wheat-Maize Cropping System in the North of Khuzestan Province. *JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE AND SUSTAINABLE PRODUCTION*, 30(4), 295-310. <https://doi.org/10.22034/saps.2020.12318> [In Persian]
- Dekamin, M. (2021). Potato Energy and Material Flow Cost Accounting in Hamadan Province, Iran. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 35(2), 105-119. <https://doi.org/10.22067/jead.2021.17804.0> [In Persian]
- Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M. R., Nawi, N. M., & Mairghany, M. (2019). Analysis of energy use and greenhouse gas emissions (GHG) of transplanting and broadcast seeding wetland rice cultivation. *Energy*, 189, 116160. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116160>
- FAOSTAT. (2021). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://fao.org/faostat/en>

- Faryabi, A., Maroufpoor, E., Ghamarnia, H., & Yamin Moshrefi, G. (2020). Comparison of classical sprinkler and wheel move irrigation systems in Dehgolan plain, north-west Iran. *Irrigation and Drainage*, 69(3), 352-362. <https://doi.org/10.1002/ird.2412>
- Feyz Bakhsh, M. T., Dorri, M. A., & Rezvan Talab, N. (2019). Evaluation of energy indices and its impact on global warming potential for potato production: a case study, Golestan province. *Journal Of Agroecology*, 11(1), 53-68. <https://doi.org/10.22067/jag.v12i3.73855> [In Persian]
- Firouzabadi, A. G. (2012). Technical evaluation of low pressure irrigation pipe (hydroflume) and comparison with traditional and sprinkler irrigation systems. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS)*, 4(3), 108-113. <https://doi.org/full/10.5555/20123364433>
- Ghadami firouzabadi, A., Dehghani Sanij, H., Khoshnavesh, M., & Seydan, S. M. (2015). Evaluation of Energy Efficiency and Water Consumption in Gasoline Pumping Stations. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3), 367-377. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22287140.1394.29.3.7.9> [In Persian]
- Ghadami firouzabadi, A., Seyedan, S. M., & Dehghanisanij, H. (2019). Water productivity and economic analysis of potato production under sprinkler and furrow irrigation in Bahar plain of Hamedan Province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(6), 1407-1417. https://idj.iaid.ir/article_85907.html [In Persian]
- Ghaderzadeh, H., & Pirmohamadyani, Z. (2019). Evaluation Efficiencies of Energy for Potato Production in Hamedan Province of Iran. *Agricultural Economics Research*, 11(42), 167-202. https://jae.marvdasht.iau.ir/article_3489.html [In Persian]
- Ghahroudi Tali, M., Khodamoradi, F., & Ali Nouri, K. (2023). Effects of groundwater decrease on the of land subsidence in Dehgolan plain, Kurdistan province. *Environmental Management Hazards*, 10(1), 57-70. <https://dx.doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777> [In Persian]
- Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Nouri, H. (2015). Water and energy resources are limited; however, water and energy consumption for production of agricultural crops is increasing to meet the food dema. *Food Engineering Research*, 16(3), 31-44. <https://doi.org/10.22092/jaer.2015.102988> [In Persian]
- Hamedani, S. R., Shabani, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy*, 36(5), 2367-2371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.013>
- Heidarisoltanabadi, M. (2023). Determination of Energy Production Function in Irrigated Wheat of Isfahan Province. *Energy Engineering and Management*, 11(1), 116-127. <https://doi.org/10.22052/11.1.116> [In Persian]
- Hosseinpanahi, F., & Kafi, M. (2012). Evaluation of energy budget and productivity of potato (*Solanum tuberosum* L.) farm of Kurdistan province; case study: Dehgolan Plain. *Journal Of Agroecology*, 4(2), 159-169. <https://doi.org/10.22067/jag.v4i2.14969> [In Persian]
- Ilahi, S., Wu, Y., Raza, M. A. A., Wei, W., Imran, M., & Bayasgalankhuu, L. (2019). Optimization approach for improving energy efficiency and evaluation of greenhouse gas emission of wheat crop using data envelopment analysis. *Sustainability*, 11(12), 3409. <https://doi.org/10.3390/su11123409>
- Izadkhah shishvan, M., Tajbakhsh, M., & Hassanzadeh, A. (2010). Evaluation of Energy Efficiency of Conventional and Mechanized Farming System on Potato Production in East Azarbyjan Province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(2), 284-297. <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i2.7526> [In Persian]
- Khar, S., & Zaffar, O. (2023). Energy Utilization Pattern in Potato Production in Jammu and Kashmir. *Environment and Ecology*, 41(2B), 1258-1262. <https://www.researchgate.net/publication/371857191>

- Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. Energy and biomass engineering, 5, 330. <https://www.researchgate.net/publication/291708655>
- Kowalczyk, Z. (2019). Life cycle assessment (LCA) of potato production. In E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 132. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913202003>
- Lawson, M. J., & Keeling, A. A. (1999). Production and physical characteristics of composted poultry carcasses. British Poultry Science, 40(5), 706-708. <https://doi.org/10.1080/00071669987133>
- Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., & Khaledi, M. (2019). Effect of farmers' management on movable sprinkler solid-set systems. Agricultural Water Management, 223, 105691. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105691>
- Molaei, B., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B., Landi, E., Majidi, M. M. (2015). Evaluation of Yield and Yield Characteristics of Two Potato Varieties Under Sprinkler and Trickle Irrigation Systems. Jwss, 19 (71), 241-251. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.241> [In Persian]
- Nasseri, A., & Nikanfar, R. (2019). Future study of energy use efficiency in irrigated wheat production in eastern Urmia lake. Environmental Sciences, 17(2), 81-102. <https://doi.org/10.29252/envs.17.2.8> [In Persian]
- No name. (2004). Technical standards and criteria of irrigation under pressure (design). Publication 286, 53. <https://shaghool.ir/Files/CODE286.pdf> [In Persian]
- No name. (2021). Comparison of water efficiency index in potato cultivation in Iran with other countries. The collection of publications of world experiences in the field of agriculture and natural resources, Organization of Research, Education and Extension of Agriculture, Vice-President of Education and Extension of Agriculture, publication 24. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_9796.pdf [In Persian]
- No name. (2023). 1401 water and electricity industry performance report. Vice President of Human Capital Research and Information Technology, Ministry of Energy. [https://isn.moe.gov.ir/getattachment/Home/1-\(67\).pdf](https://isn.moe.gov.ir/getattachment/Home/1-(67).pdf) [In Persian]
- Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy Input Output Analysis in Turkish Agriculture. Renewable Energy, 29, 39-51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
- Pahlavan, R., Omid, M., & Akram, A. (2012). The relationship between energy inputs and crop yield in greenhouse basil production. Journal of Agricultural Science and Technology 14(6), 1243-1253. <https://www.researchgate.net/publication/236484733>
- Rizvani, S. M., Jafari, A. M., & Amin, S.E. (1389). Investigating efficiency and energy consumption in rain irrigation pumping stations of some farms in Hamadan province. Journal of Agricultural Engineering Research, 11(4), 19-34. https://idser.areeo.ac.ir/article_102312.html [In Persian]
- Saccon, P. (2018). Water for agriculture, irrigation management. Applied soil ecology, 123, 793-796. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.037>
- Sage, R. F., Wedin, D. A., & Li, M. (1999). The biogeography of C4 photosynthesis: patterns and controlling factors. C4 plant biology, 10, 313-376. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1363107368366754432>
- Salemi, H., & Rezvani, S. (2016). Technical evaluation of sprinkler irrigation system on farm (Isfahan and Hamadan Provinces). Journal of Water and Soil Conservation, 23(3), 345-350. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3204> [In Persian]
- Sánchez-Sutil, F., & Cano-Ortega, A. (2021). Smart control and energy efficiency in irrigation systems using lorawan. Sensors, 21(21), 7041. <https://doi.org/10.3390/s21217041>
- Shah Hosseini, H.R., Ramroudi, M., & Kazemi, H. (2019). Evaluation and comparison of the sustainability of autumn and spring potato cultivation using energy analysis (case study: Golestan

- province). *Agricultural Science and Sustainable Production (Agricultural Science)*, 30(4), 279-265. <https://doi.org/10.22034/saps.2020.12316> [In Persian]
- Singh, G. (2000). Energy conservation through efficient mechanized farming. *Agricultural Engineering Today*, 24(2), 35-50. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:aet&volume=24&issue=2&article=003>
- Soleimanipour, A., Bagheri, A. Gh., & Vathghi, E. (1390). Economic evaluation of irrigation methods and its effect on yield of potato cultivars in Isfahan province. *Agricultural Economics Research*, 3(1), 143-164. <http://ensani.ir/fa/article/241123> [In Persian]
- Tabar, I. B., Keyhani, A., & Rafiee, S. (2010). Energy balance in Iran's agronomy (1990–2006). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 849-855. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.024>
- Zahedi, M., Eshghizadeh, H. R., Mondani, F. (2015). Energy Efficiency and Productivity in Potato and Sugar Beet Production Systems in Isfahan Province. *Journal of Crop Production and Processing*, 5 (17), 181-191. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.17.181> [In Persian]