

**EXTENDED ABSTRACT**

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

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

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

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

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

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 24 August 2021

Revised: 7 March 2022

Accepted: 9 March 2022

*Keywords:*

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

**TO CITE THIS ARTICLE :**

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

**Introduction**

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

**Methodology**

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

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

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

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

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

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

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

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

## Results and Discussion

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

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

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

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

### **Conclusion**

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

### **Acknowledgment**

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

**References**

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



© 2024 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## ارزیابی سهم اجزای شبکه جریان در اطراف زهکش زیرزمینی در یک مزرعه شالیزاری

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

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

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

### چکیده

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

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

### مقدمه

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

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

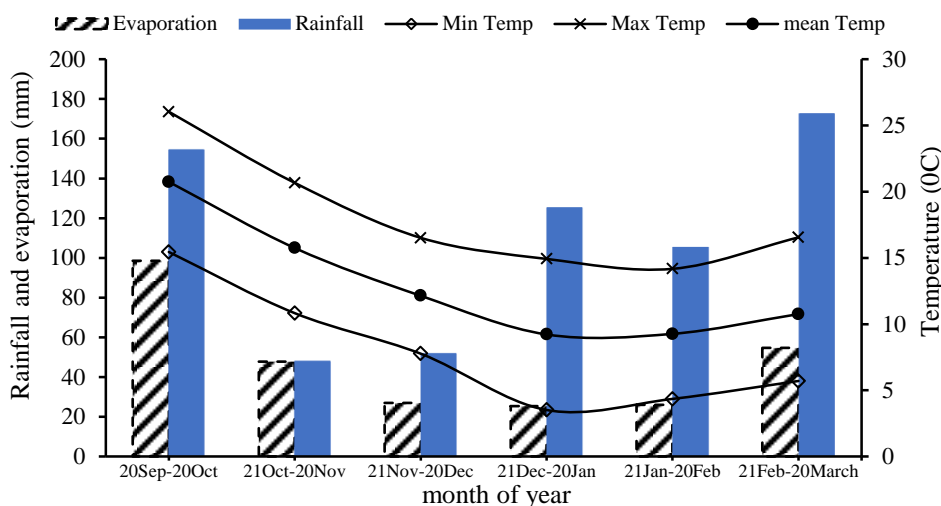


Fig. 1- Total monthly rainfall and evaporation and monthly minimum, maximum and average of temperature in the study area from October to March 2016

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

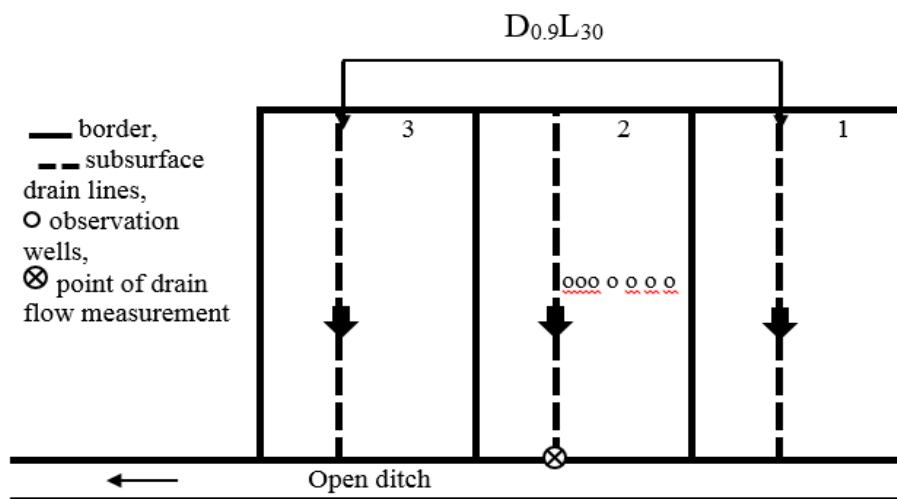


Fig. 2- Layout of the subsurface drainage systems in the study field

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

جدول ۱- درصد اجزای تشکیل دهنده بافت خاک

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

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



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

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

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

## روش انجام طرح و اندازه‌گیری‌ها

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

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

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

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

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

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

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

### آنالیز بار جریان

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

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

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

$$h_h = \frac{qLh^2}{8kD_h} \quad (6)$$

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

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

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

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

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

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

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

که در آن:

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

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

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

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

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

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

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

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

### پروفیل سطح ایستابی

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

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

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

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

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

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

که  $O_i$  مقادیر مشاهده شده در زمان  $i$  و  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده در همان زمان می‌باشد.  $\bar{O}$  میانگین مشاهدات در طول یک دوره و  $\bar{P}$  میانگین پیش‌بینی شده‌ها در همان دوره و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد.

همچنین، شاخص تبیین ( $R^2$ ) نیز از رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بدست آمد (Jing et al., 2010).

### نتایج و بحث

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

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

Table 3- Field parameters of the drainage site at SANRU

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

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

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

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

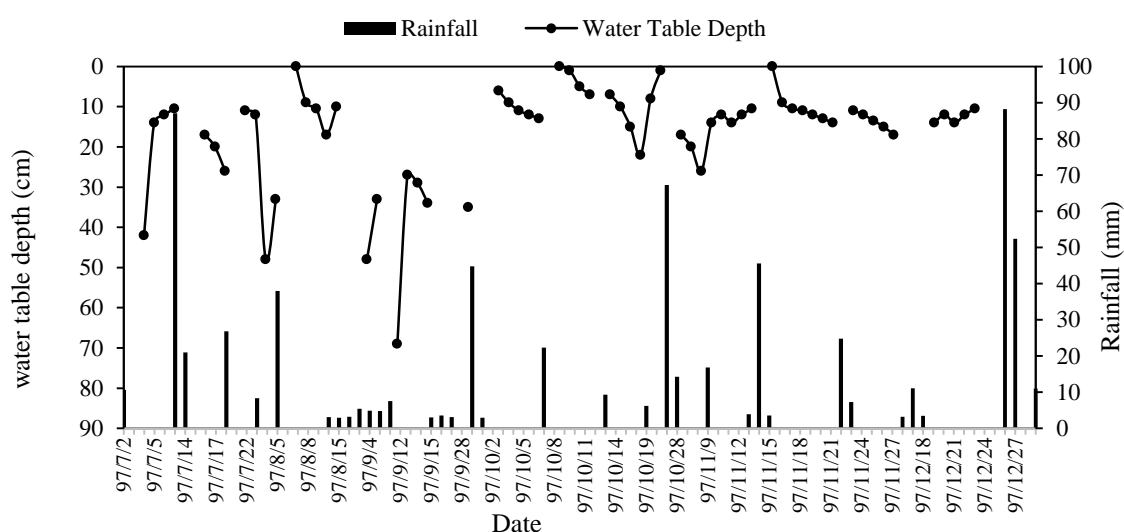


Fig. 3- Water table fluctuation of mid-spacing after each rainfall in drainage system

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

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

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

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

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

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

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

#### الگوی جریان به سمت زهکش

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

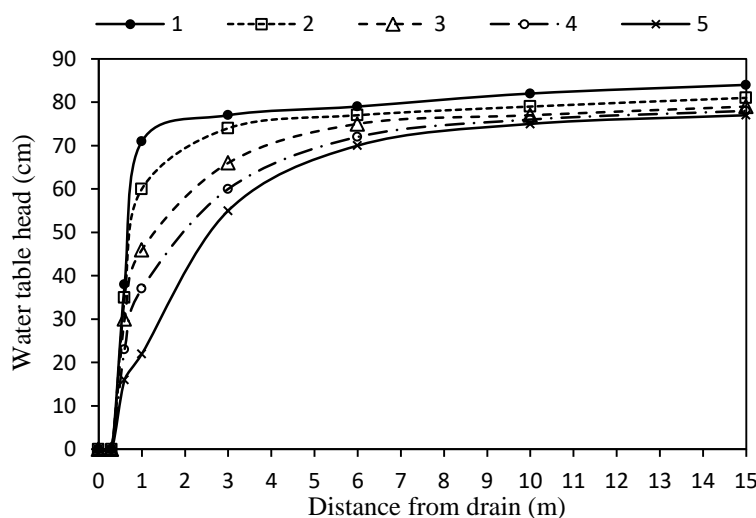


Fig. 4- Water table profile for days after rainfall in drainage system

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

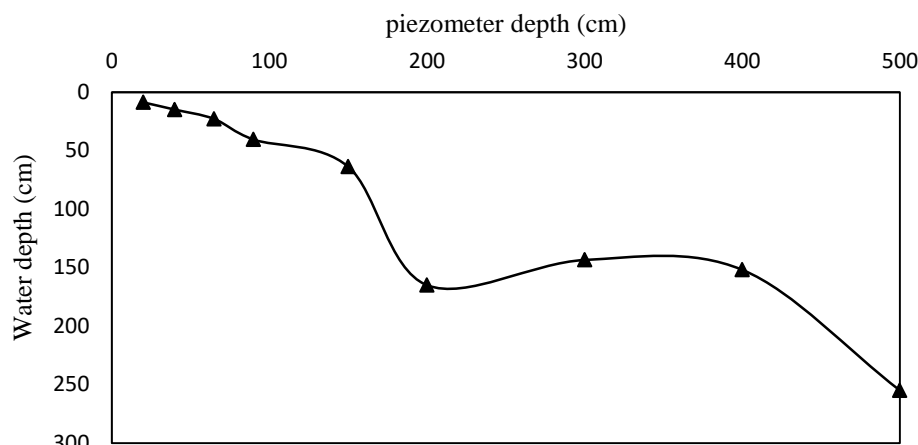


Fig. 5- Water table depth from piezometer observations in different depths

شکل ۵- میانگین عمق آب در پیزومترهای واقع در عمق‌های مختلف

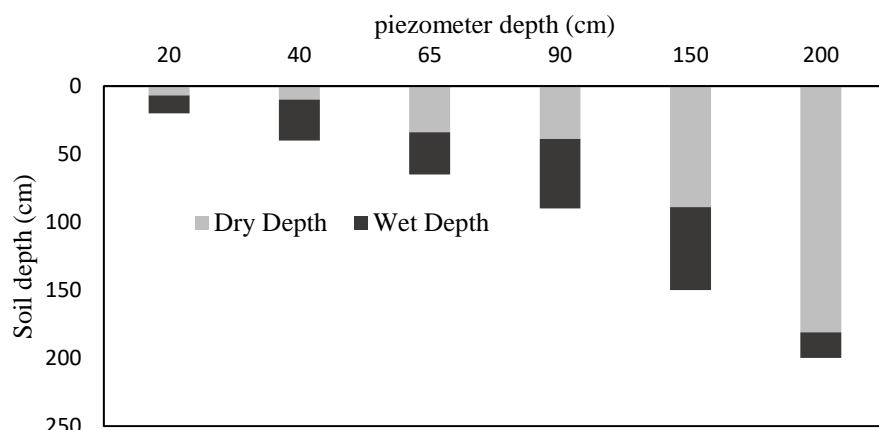


Fig. 6- Water depth from piezometer observations in different depths

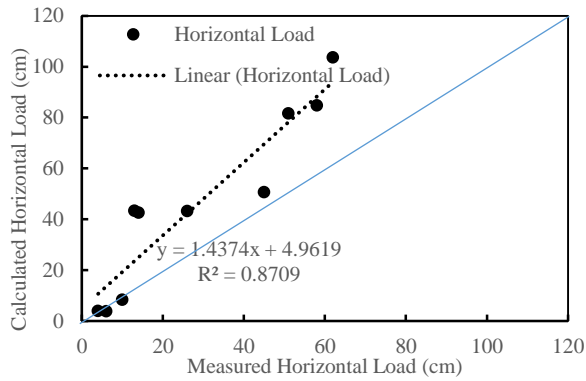
شکل ۶- عمق سطح ایستایی در پیزومترهای نصب شده در عمق‌های مختلف

$I_a$  به ترتیب  $19/3$  و  $0/75$  به دست آمدند. از طرف دیگر،  $h_v$  تنها زمانی قابل توجه خواهد بود که قابلیت نفوذ خاک بسیار کم باشد مانند وضعیتی که در خاک‌های رسی حاکم است (Alizadeh, 2006).

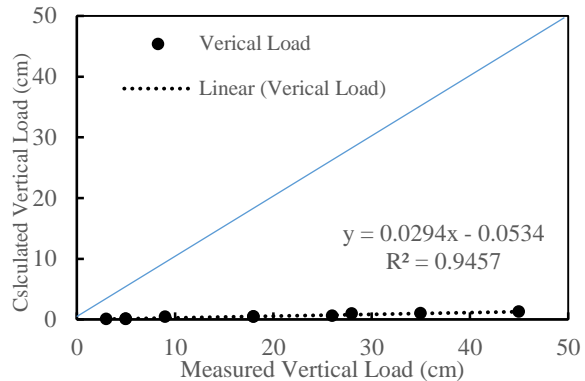
با توجه به ضریب همبستگی و معادله خط آن، بین مقادیر اندازه‌گیری شده از پیزومترها و بار افقی محاسبه شده همبستگی مناسب و مثبتی وجود دارد. مقادیر محاسبه شده بار افقی و اندازه‌گیری شده آن تا حدودی نزدیک به هم بوده و نشان از سهم زیاد جریان افقی در خاک‌های اراضی شالیزاری می‌دهد. رابطه رگرسیونی بین مقادیر بار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

#### سهم جریان افقی، عمودی و شعاعی

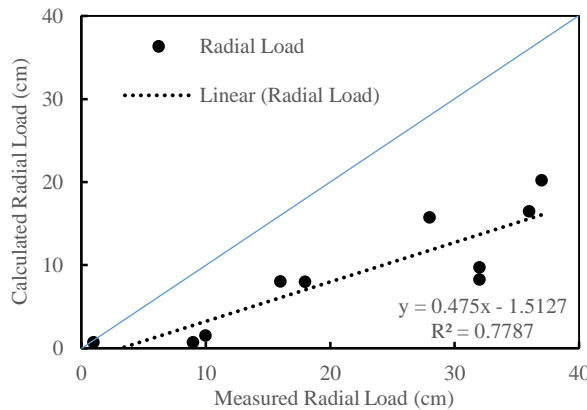
در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) رابطه همبستگی بین مقادیر محاسبه شده اجزای جریان و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط پیزومترها نشان داده شد. در بحث جریان عمودی، هر چند همبستگی بین مقادیر بالا می‌باشد اما شیب خط همبستگی و همچنین مقادیر محورها نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده از پیزومترها تفاوت زیادی با مقادیر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



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



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



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

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

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

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

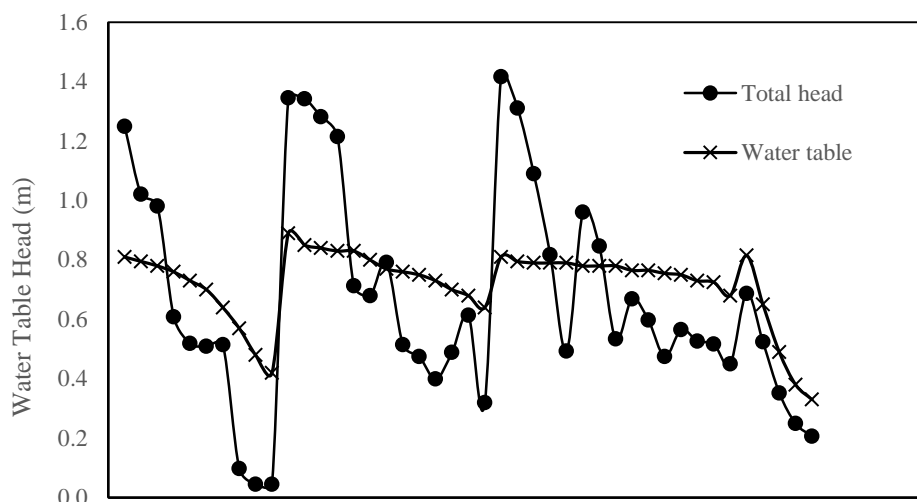


Fig. 10- Measured load values of total flow and water table  
 شکل ۱۰- مقادیر بار کل جریان و سطح ایستابی اندازه‌گیری شده

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

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

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

جدول ۶- درصد سهم اجزای جریان از کل بار جریان

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

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

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

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

### نتیجه‌گیری

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

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

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



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

### تقدیر و تشکر

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

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

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

### References

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

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

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

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