

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Water Head and Irrigation Interval on Cumulative and Lateral Infiltration in Furrow Irrigation

B. Dialameh¹, H. Ebrahimian^{2*}, M. Parsinejad³ and A. Mokhtari⁴

- 1- MSc, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 2*- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran (*ebrahimian@ut.ac.ir*).
- 3- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 4- MSc, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: 4 December 2016

Revised: 17 December 2017

Accepted: 20 December 2017

Keywords: Double-ring, Short block-end furrow, Initial conditions, Boundary conditions, Relative lateral infiltration. **DOI:** 10.22055/jise.2017.20123.1440.

Introduction

Infiltration is considered as one of the most important soil parameters in the design and evaluation of furrow irrigation systems. Water is infiltrated through the wetted perimeter when it reaches a given point in the furrow until it recedes. The depth of infiltrated water at a given point, therefore, is a function of opportunity time, wetted perimeter, and soil intake characteristics (Oyonarte et al., 2002). Thus, in-depth knowledge of how the initial (e.g. initial water content) and boundary conditions (such as water head and wetted perimeter) of a furrow can act on the infiltration process is essential. Previous studies show that cumulative infiltration in furrow irrigation is highly affected by the water head and initial water content. In furrow irrigation, water infiltration into the soil is two-dimensional, both vertically and laterally (Bautista et al. 2014). Gravity forces are dominant in vertical infiltration, while suction forces dominate horizontal/lateral infiltration. Suction forces largely depend on soil matric potential, which is a function of the soil texture and structure, and play an important role in soil moisture retention, sorptivity, essential for plant growth, and lateral infiltration. Knowledge of lateral infiltration and edge effect is essential for designing furrow irrigation systems because many researchers have found that more than 60% of total infiltrated water is through the side walls of furrows.

Several studies have been carried out to determine how initial and boundary conditions may affect the cumulative and lateral infiltration in furrow irrigation, but the combined effect of water head and initial water content on infiltration process is not investigated yet. Therefore, the main objective of this study is to investigate the combined effect of various initial (i.e., irrigation interval or initial water content) and boundary (i.e., water level or the wetted perimeter) conditions on the cumulative and lateral infiltration.

Methodology

Field experiments were conducted at the experimental station of the College of Agriculture and Natural Resources of University of Tehran, Karaj. The furrows were trapezoidal and the furrow length, spacing, and bottom width were 1.5, 0.75, 0.15 m, respectively. Three short block-ended furrows were used to conduct infiltration tests. Side furrows were applied as buffer furrows to preserve the edge effects. In order to investigate the effect of initial water content and wetted perimeter on the infiltration process, two different irrigation intervals and two different water heads were considered, as follows: (i) 5- and 10-cm water heads and (ii) 4 and 9 days irrigation intervals, to reproduce two different initial water contents at the soil surface layer. The water head was kept constant during the tests, by initially restoring it every 30 s and subsequently at 10 min intervals. The volume of water added to keep the water head constant was considered to amount to the total cumulative infiltration. The tests were run for 250 min and were repeated in three irrigation events to consider the trend of infiltration through the time and soil stabilization. The wetted perimeters corresponding to the water heads of 5 and 10 cm were determined to be 38 and 62 cm, respectively. Finally, double ring tests were conducted with similar irrigation intervals and water heads to differentiate between lateral and vertical infiltration. Vertical infiltration was then taken off from the total infiltrated water to estimate the lateral infiltration.

Results and Discussion

The maximum cumulative infiltration was measured with a higher water head (i.e. 10 cm) and extended irrigation interval (i.e. 9 days). In all cases, cumulative infiltration in the first irrigation was higher than other irrigation events, with the third irrigation having a minimum amount. The cumulative infiltration decreased up to 46 and 34% between the second and first irrigations and between the third and second irrigations, respectively. In the first irrigation, infiltration is increased for an increased water head from 5 to 10 cm. This increase was higher for a lower initial water content (longer irrigation interval). Therefore, by increasing the water head from 5 to 10 cm, average cumulative infiltration is increased up to 92 and 102%, respectively. In the second irrigation, by increasing the water head from 5 to 10 cm, for both irrigation intervals, cumulative infiltration increased up to 58 and 68%, respectively. Also, in the third irrigation, average cumulative infiltration in CFI increased up to 77 and 54%. In all three irrigations and for both water heads, infiltrated water depth was increased for a decreased initial soil water content owing to increased soil matric potential. In the first irrigation, for both 5 and 10 cm water heads, by increasing the irrigation intervals from 4 to 9 days, cumulative infiltration increased up to 37 and 30%. The effect of changes in initial water content on the infiltration process was less in the second irrigation. Cumulative infiltration increased for decreased initial water content up to 14% in the 5 cm water head and up to 21% in the 10 cm water head. Infiltration increase due to increased irrigation interval in the third irrigation was greater than for the first and second irrigations. Decreased initial water content caused 62 and 41% increase for water heads of 5 and 10 cm, respectively.

The highest lateral infiltration was observed for the higher water head (10 cm) and extended irrigation interval (9 days). This findings are in agreement with the results reported by Valiantzas et al. (2009) and Furman et al. (2006) Similar to cumulative infiltration, maximum and minimum lateral infiltrations were observed in the first and third irrigations, respectively. Up to 51% difference between lateral infiltration in the first and second irrigations and up to 32% difference between the second and third irrigations were observed. Lateral infiltration was increased by raising the water head from 5 to 10 cm. This increase was higher for a lower initial water content. By increasing the water head from 5 to 10 cm, cumulative lateral infiltration increased by about 5 times in the first irrigation. In the second irrigation event, cumulative lateral infiltration increased by up to 4 and 5 times, when increasing the water head from 5 to 10 cm in 4 and 9 days irrigation intervals, respectively. Cumulative lateral infiltration in the third irrigation was also increased by up to 3.5 and 4.5 times, when raising the water head from 5 to 10 cm. Cumulative lateral infiltration increased by

extending the irrigation interval for both water heads because of higher matric suctions. Cumulative lateral infiltration increased up to 62 and 52% by extending the irrigation interval from 4 to 9 days, respectively. For both 5 and 10 cm water heads, by decreasing the initial water content lateral infiltration increased up to 14% in second irrigation event. Decreasing the initial water content caused 45 and 96% increase in lateral infiltration for the third irrigation.

Conclusions

The results of this study showed that for a higher water head and longer irrigation intervals, the total and lateral infiltration increased. The results also indicated that irrigation management leading to apply a higher water head or longer irrigation intervals (or lower initial water content) means less time is needed to infiltrate a given amount of water, which leads to a decreased deep percolation and evaporation losses. Improved lateral infiltration can, in turn, lead to higher water and fertilizer application efficiency. Precise and sufficient knowledge of initial and boundary conditions for prediction of the infiltration process is necessary to manage the inflow rate and irrigation intervals properly. Otherwise, it may lead to improper and insufficient irrigation.

Acknowledgement

This research was conducted in the Experimental Farm of College of Agriculture and Natural Resources of University of Tehran. Hence, we appreciate their time and efforts.

References

- 1- Bautista, E., Warrick, A.W. and Strelkoff, T.S. 2014. New results for an approximate method for calculating two-dimensional furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(10), pp. 04014032.
- 2- Furman, A., Warrick, A.W., Zerihun, D. and Sanchez, C.A. 2006. Modified Kostiakov infiltration function: Accounting for initial and boundary conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(6), pp. 587-596.
- 3- Oyonarte, N.A., Mateos, L. and Palomo, M.J. 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 128(1), pp. 26-33.
- 4- Valiantzas, J.D., Pollalis, E.D., Soulis, K.X. and Londra, P.A. 2009. Modified form of the extended Kostiakov equation including various initial and boundary conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(4), pp. 450-458.



© 2019 by the authors. Licensee SCU, 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/>).



تأثیر بار آبی و دور آبیاری بر نفوذ تجمعی و نفوذ جانبی در آبیاری جویچه‌ای

بابک دیالمه^۱، حامد ابراهیمیان^{۲*}، مسعود پارسینژاد^۳ و علی مختاری^۴

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. ebrahimian@ut.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۲۶

دریافت: ۱۳۹۵/۹/۱۴

چکیده

افزایش بازده در آبیاری جویچه‌ای، مستلزم شناخت کافی از تأثیر شرایط اولیه و مرزی متفاوت بر فرایند نفوذ و هم‌چنین نفوذ جانبی در جویچه‌ها است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر رطوبت اولیه و بار آبی متفاوت بر نفوذ تجمعی و جانبی در آبیاری جویچه‌ای انجام شد. به همین منظور، ۲۴ آزمایش نفوذ به صورت آزمایش نفوذ در جویچه و استوانه مضاعف در شرایط اولیه (دو بار آبی پنج و ده سانتی‌متر) و مرزی (دو دور آبیاری چهار و نه روز به منظور فراهم آمدن دو رطوبت اولیه متفاوت) متفاوت در مزرعه انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش بار آبی و کاهش رطوبت اولیه، نفوذ تجمعی به ترتیب تا ۱۰۲ و ۶۲ درصد افزایش یافت. تأثیر افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر بر افزایش نفوذ تجمعی بیشتر از تأثیر کاهش رطوبت اولیه در اثر افزایش دور آبیاری از چهار به نه روز بود. هم‌چنین نفوذ جانبی با افزایش بار آبی تا بیش از پنج برابر و با کاهش دور آبیاری تا ۹۶ درصد افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: استوانه مضاعف، جویچه کوتاه انتها بسته، شرایط اولیه، شرایط مرزی، نفوذ جانبی نسبی.

مقدمه

آبی و به‌دنبال آن محیط خیس‌شده بر فرایند نفوذ، به‌خصوص در آبیاری جویچه‌ای، بسیار مهم و حایز اهمیت می‌باشد. تاکنون مطالعه‌های متعددی در این زمینه انجام شده است. تحقیقات پیشین نشان دادند که بار آبی یکی از تأثیرگذارترین عوامل مؤثر بر نفوذ تجمعی در آبیاری جویچه‌ای می‌باشد (Fangmeier and Ramsey, 1987; Souza, 1981; Wallender and Izadi, 1990; Rayej, 1990). Wallender (1985) با استناد به مطالعه‌های مزرعه‌ای، نشان دادند که یک همبستگی معنادار بین مقادیر نفوذ تجمعی و محیط خیس‌شده در صورتی که درز و ترک، نفوذ را تحت تأثیر قرار ندهد، وجود دارد. هم‌چنین ثابت کردند که در طول آبیاری زبری کاهش می‌یابد و هندسه جویچه از نظر هیدرولیکی کارایی بهتری پیدا می‌کند. Vogel و Hopmans (1992) پس از انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای و هم‌چنین شبیه‌سازی به این نتیجه رسیدند که با افزایش بار آبی و به تبع آن افزایش محیط خیس‌شده، نفوذ تجمعی افزایش می‌یابد. هم‌چنین به دلیل افزایش مقدار آب نفوذیافته بر اثر افزایش محیط خیس شده، سرعت نفوذ در جویچه‌های با محیط خیس‌شده بیشتر، در مقایسه با جویچه‌های با محیط خیس‌شده کمتر، زودتر به سرعت نفوذ نهایی می‌رسد. Abbasi et al. (2003) با احداث جویچه‌های کوتاه انتها بسته و در نظر گرفتن چند بار آبی

نفوذ یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی و ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی می‌باشد (Karmeli et al., 1987; Walker and Skogerboe, 1987; Elliot and Walker, 1982; Zerihun et al., 1996; Oyonarte et al., 2002). سرعت و مقدار نفوذ آب در خاک با توجه به بافت خاک و هم‌چنین روش آبیاری مورد استفاده (آبیاری به روش کرتی، نواری و یا جویچه‌ای) متفاوت است. آبیاری جویچه‌ای یکی از روش‌های آبیاری سطحی است که در آن آب در کانال‌های بدون پوشش کوچکی به نام جویچه جریان می‌یابد (Walker and Skogerboe, 1987). در آبیاری جویچه‌ای، از لحظه‌ای که آب به یک نقطه از جویچه می‌رسد، تا زمانی که آب در آن نقطه فروکش کند، نفوذ آب به درون خاک از طریق محیط خیس‌شده صورت می‌گیرد. بنابراین، عمق آب نفوذیافته در نقطه مورد نظر، تابعی از فرصت زمان نفوذ، محیط خیس‌شده و پارامترهای نفوذ آب در خاک می‌باشد. دیگر عوامل نظیر شیب و زبری، از طریق تأثیر بر موارد بیان شده بر فرایند نفوذ، اثر می‌گذارند (Oyonarte et al., 2002; Walker and Kasilingam, 2004). به همین دلیل اطلاع دقیق از نحوه تأثیر شرایط اولیه نظیر رطوبت اولیه موجود در پروفیل خاک و هم‌چنین شرایط مرزی مانند بار

چاه بود. شوری آب برای آبیاری کمتر از یک دسی‌زیمنس بر متر و pH ۷/۵ بود. با توجه به عدم وقوع بارندگی و آبیاری، رطوبت اولیه خاک برابر با رطوبت باقی‌مانده (۰/۰۷ درصد حجمی) بود. سطح مقطع جریان در جویچه‌ها، با استفاده از اطلاعات مقطع سنج و پارامترهای هیدرولیکی و هندسی جریان تعیین شد. سطح مقطع جویچه‌ها دوزنقه‌ای و عرض بالایی، عرض کف و عمق جویچه‌ها به ترتیب، ۶۵، ۱۵ و ۱۲ سانتی‌متر بود. اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای با استفاده از جویچه‌های انتها بسته کوتاه انجام شد (مطابق با دستورالعمل Walker و Skogerboe (1987)). فاصله جویچه‌ها ۰/۷۵ متر و جویچه‌ها در جهت شیب زمین احداث شدند. به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر مقدار آب نفوذیافته، مقاطع عرضی ابتدایی و انتهایی جویچه با استفاده از صفحه‌های غیرقابل نفوذ به اندازه ۰/۵ * ۰/۵ متر مسدود شدند. صفحه‌های مذکور تا عمق ۰/۳ متر در خاک کوبیده شدند. هدف از این کار این بود که نفوذ فقط از کف و دیواره جویچه‌ها رخ دهد. به منظور انجام آزمایش‌ها، سه جویچه احداث شدند. اندازه‌گیری‌ها در جویچه وسط انجام شد و جویچه‌های کناری به عنوان جویچه‌های محافظ و به منظور کاهش اثرات حاشیه‌ای و نزدیک کردن شرایط آزمایش به شرایط واقعی در نظر گرفته شدند. برای بررسی تأثیر بار آبی و رطوبت اولیه بر فرایند نفوذ، دو بار آبی و دو رطوبت اولیه مختلف در نظر گرفته شد که این شرایط مرزی و اولیه متفاوت عبارت بودند از: دو بار آبی پنج و ده سانتی‌متر و دو دور آبیاری چهار و نه روز. هدف از در نظر گرفتن دوره‌های آبیاری متفاوت، فراهم آمدن رطوبت‌های مختلف در بخش سطحی خاک به عنوان شرایط اولیه متفاوت بود. شرایط اولیه یکسان فقط در بخش سطحی خاک کف جویچه‌ها (عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر) اعمال گردید. در طول آزمایش، بار آبی در ابتدا در بازه‌های ۳۰ ثانیه‌ای و سپس به صورت افزایشی تا بازه‌های ده دقیقه‌ای، ثابت نگاه داشته می‌شد. حجم آب اضافه‌شده در طول آزمایش به عنوان نفوذ تجمعی در نظر گرفته شد. مدت زمان هر آزمایش ۲۵۰ دقیقه و برای هر حالت، سه واقعه آبیاری لحاظ گردید. محیط خیس‌شده متناظر با بارهای آبی پنج و ده سانتی‌متر به ترتیب ۳۸ و ۶۲ سانتی‌متر بود. به منظور تعیین سهم نفوذ جانبی از نفوذ تجمعی کل، نفوذ عمودی (یک‌بعدی) توسط استوانه‌های مضاعف در شرایط اولیه و مرزی مشابه و یکسان با جویچه‌ها (بار آبی پنج و ده سانتی‌متر و دور آبیاری چهار و نه روز)، اندازه‌گیری شد.

مختلف، آزمایش‌های مزرعه‌ای را انجام دادند و گزارش کردند که با افزایش بار آبی، مقدار آب نفوذیافته نیز افزایش می‌یابد. در آبیاری جویچه‌ای، نفوذ آب به درون خاک به دو صورت عمودی و جانبی رخ می‌دهد (Yonts et al., 2003). اطلاع از مقدار و نحوه حرکت آب به صورت جانبی و اثر لبه‌ای، با توجه به اینکه نقش به‌سزایی در طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی جویچه‌ای دارد، بسیار مهم است. نتایج Skonard (2002) نشان داد که در جویچه‌ها بیش از ۶۰ درصد کل آب نفوذیافته از دیواره‌های جانبی جویچه‌ها وارد خاک می‌شود. Hamilton et al. (2014) با در نظر گرفتن دو رطوبت اولیه ۱۶ و ۲۸ درصد حجمی و همچنین انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، گزارش کردند که نفوذ جانبی در جویچه با رطوبت اولیه بیشتر با سرعت کمتری رخ می‌دهد. Bautista et al. (2014) با انجام شبیه‌سازی رایانه‌ای و همچنین برآورد نفوذ تجمعی در جویچه با استفاده از یک مدل فیزیکی، تحت شرایط مرزی متفاوت، گزارش کردند که با افزایش محیط خیس‌شده، نفوذ جانبی افزایش می‌یابد. همچنین گزارش کردند که در بارهای آبی کم و زیاد به ترتیب ۳۰ و ۶۰ درصد از نفوذ کل به صورت جانبی رخ می‌دهد.

همان‌گونه که اشاره گردید، تاکنون مطالعه‌های مختلفی برای شناخت و بررسی نحوه تأثیر شرایط اولیه و مرزی همانند رطوبت اولیه و بار آبی بر نفوذ تجمعی و نفوذ جانبی در آبیاری جویچه‌ای صورت گرفته است اما در هیچ‌یک از پژوهش‌های بیان‌شده، تأثیر این موارد به صورت توأم بر نفوذ در جویچه‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است. از این رو با توجه به اهمیت این مسئله، هدف اصلی از این پژوهش، بررسی تأثیر رطوبت اولیه و بار آبی متفاوت بر نفوذ تجمعی و جانبی در آبیاری جویچه‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های صحرائی در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. این مزرعه آزمایشی در موقعیت جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۱۲ متر است. کرج دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای است و متوسط بارندگی سالانه آن برابر ۲۶۵ میلی‌متر، بالاترین میانگین دمای ماهیانه در تیرماه (۲۴/۵ درجه سلسیوس) و پایین‌ترین میانگین دما در دی‌ماه (۱/۲ درجه سلسیوس) است. مشخصات فیزیکی خاک مزرعه در جدول (۱) آورده شده است. در زیر عمق ۰/۶ متری خاک یک لایه سنگ‌ریزه وجود دارد. منبع آب آبیاری،

جدول ۱ - مشخصات فیزیکی خاک مزرعه

Table 1 – Physical properties of field's soil

| Depth (m) | Soil Texture | Percentage of Soil Components | | | Bulk Density (gr/cm ³) |
|-----------|--------------|-------------------------------|------|------|------------------------------------|
| | | Clay | Silt | Sand | |
| 0 – 0.2 | Clay Loam | 28 | 43 | 29 | 1.31 |
| 0.2 – 0.4 | Clay Loam | 31 | 40 | 29 | 1.26 |
| 0.4 – 0.6 | Clay Loam | 33 | 46 | 21 | 1.23 |

نفوذ آب در خاک می‌گردد. اما در آبیاری‌های دوم به بعد، چون زبری خاک به یک مقدار ثابت رسید، مسئله زبری تأثیر معنی‌داری در اختلاف بین مقادیر نفوذ آبیاری‌های دوم و سوم نگذاشت (Govers et al., 2000). به همین دلیل، اختلاف بین مقدار نفوذ تجمعی آبیاری اول با آبیاری دوم، بیش از اختلاف بین نفوذ تجمعی آبیاری دوم و سوم بود، مخصوصاً در رطوبت کمتر یا دور آبیاری بیشتر. دلایل بیان‌شده در رابطه با اختلاف مقادیر نفوذ تجمعی در آبیاری‌های دوم و سوم نیز صادق است. در حالت‌های آزمایشی، بین آب نفوذیافته در آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول تا ۴۶ درصد و بین آب نفوذیافته در آبیاری سوم نسبت به آبیاری دوم تا ۳۴ درصد کاهش مشاهده شد. در حالت با رطوبت اولیه کمتر (دور آبیاری بیشتر)، در هر دو بار آبی پنج و ده سانتی‌متر، اختلاف بین مقادیر نفوذ در آبیاری‌های دوم و سوم کم‌تر از اختلاف بین مقادیر نفوذ در حالت‌های با رطوبت اولیه بیشتر (دور آبیاری کمتر) بود. زیرا هر چه رطوبت خاک کمتر باشد، مکش آب در خاک و در نتیجه قابلیت نفوذ آب در خاک، بیشتر است. نمودارهای نفوذ تجمعی دویعدی در جویچه‌ها در شکل (۱) آمده است. نتایج حاصل با نتایج حاصل از تحقیقات Ebrahimian (2014) و Vogel و Hopmans (1992) همخوانی دارد.

تأثیر بار آبی بر نفوذ تجمعی کل

در آبیاری اول و در هر دو دور آبیاری چهار و نه روز، با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، عمق آب نفوذیافته در جویچه‌ها، افزایش یافت. این افزایش در رطوبت اولیه کمتر (دور آبیاری بیشتر)، بیشتر بود. به این صورت که با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، در دوره‌های آبیاری چهار و نه روزه، نفوذ تجمعی به ترتیب ۹۲ و ۱۰۲ درصد افزایش یافت. با افزایش بار آبی، محیط خیس‌شده افزایش می‌یابد و در نهایت این افزایش محیط خیس‌شده، منجر به افزایش نفوذ تجمعی می‌گردد. نتایج حاصله با نتایج گزارش‌شده توسط Vogel و Hopmans (1992) و Abbasi et al. (2003) مطابقت داشت. با افزایش محیط خیس‌شده به دنبال افزایش بار آبی، دیواره جانبی جویچه‌ها نقش بیشتری در فرایند نفوذ ایفا می‌کنند و آب درون جویچه، با دیواره‌های جانبی بزرگ‌تری در تماس است. از دیگر دلایل افزایش نفوذ تجمعی به دنبال افزایش بار آبی می‌توان به افزایش انرژی اشاره کرد. با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر انرژی بیشتری برای نفوذ آب به درون خاک تأمین می‌شود. در آبیاری دوم، تأثیر افزایش بار آبی بر افزایش نفوذ تجمعی، کمتر از آبیاری اول بود. دلیل این مسئله افزایش رطوبت پشته‌ها به دلیل آبیاری اول و به دنبال آن کاهش مکش ماتریک و همچنین تراکم و تثبیت خاک دیواره‌های جویچه‌ها در اثر آبیاری اول بود. در این واقع آبیاری، با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر در دوره‌های آبیاری چهار و نه روز، به ترتیب ۵۸ و ۶۸ درصد، نفوذ افزایش یافت. در آبیاری سوم نیز با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر،

استفاده از استوانه‌های مضاعف یک روش ساده و ارزان جهت تعیین نفوذ عمودی آب در خاک می‌باشد (Hills, 1970). در نهایت از اختلاف مقدار آب نفوذیافته به صورت یک‌بعدی در استوانه‌های مضاعف و کل آب نفوذیافته در جویچه‌ها، مقدار نفوذ جانبی در هر سری جویچه تعیین شد (مطابق با پژوهش Bautista et al. (2014)). برای بررسی اختلاف مقادیر نفوذ جانبی در حالت‌های مختلف از آزمون مقایسه میانگین‌ها با تحلیل خروجی آزمون تی (t-test) استفاده شد.

نتایج و بحث

نفوذ تجمعی

بیشترین مقدار نفوذ تجمعی در حالت بار آبی بیشتر (ده سانتی‌متر) و رطوبت کمتر خاک (دور آبیاری بیشتر) مشاهده شد. در تمامی حالت‌ها، بیشترین و کمترین مقدار نفوذ تجمعی به ترتیب در آبیاری‌های اول و سوم دیده شد. بین مقادیر نفوذ تجمعی آبیاری‌های اول، دوم و سوم، تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد وجود داشت. دلیل این مسئله این است که پیش از آبیاری اول، به جز رطوبت خاک سطحی که بر اثر تبخیر از سطح خاک با گذشت چهار یا نه روز به اندازه تقریباً یکسان می‌رسد (Miao et al., 2016)، رطوبت موجود در پروفیل خاک نسبت به مقادیر رطوبت خاک پیش از آبیاری‌های دوم و سوم کمتر بود. Abbasi et al. (2003) گزارش کردند که مقدار نفوذ تجمعی در آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول به شدت کاهش می‌یابد که این کاهش مقدار نفوذ به دلیل افزایش رطوبت اولیه پیش از آبیاری دوم می‌باشد. دلیل این مسئله، عدم وجود گیاه و یا سیستم زهکشی در پلات آزمایشی می‌باشد. با انجام آبیاری، آب در پروفیل خاک ذخیره می‌گردد. در صورت وجود گیاه، با جذب آب توسط ریشه از اعماق پروفیل خاک و تبخیر-تعرق، رطوبت از پروفیل خاک خارج می‌گردد (Bala et al., 2014). همچنین در صورت وجود سیستم زهکشی در مزرعه، آب اضافی از پروفیل خاک خارج می‌شود (Sloan et al., 2016). با افزایش رطوبت خاک (کاهش دور آبیاری)، پتانسیل ماتریک نیز کاهش می‌یابد که این مسئله منجر به کاهش مقدار نفوذ می‌گردد (Hartge et al., 2016). به همین دلیل در آبیاری اول، آب بیشتری در خاک نفوذ کرد. در همین راستا، رطوبت پروفیل خاک، پیش از آبیاری سوم بیشتر از رطوبت موجود در پروفیل خاک، پیش از آبیاری دوم بود که توجیه‌کننده بیشتر بودن نفوذ تجمعی در آبیاری دوم نسبت به آبیاری سوم می‌باشد. همچنین از دیگر دلایل این اختلاف می‌توان به تأثیر تراکم و تثبیت سطح خاک پس از آبیاری بر مقدار نفوذ تجمعی اشاره کرد، زیرا با متراکم‌تر شدن خاک، تخلخل کاهش و به تبع آن، نفوذ کاهش می‌یابد (Ebrahimian, 2014; Gregory et al., 2006). چون در آبیاری اول، هنوز در جویچه‌ها آبیاری صورت نگرفته است، خاک سطحی جویچه‌ها از زبری زیادی برخوردار است که این مسئله باعث افزایش مقدار

بود. کاهش رطوبت اولیه منجر به افزایش ۶۲ و ۴۱ درصدی نفوذ در آبیاری سوم، به ترتیب در بارهای آبی پنج و ده روز شد. نتایج حاصل با نتایج ارایه شده توسط (Abbasi et al. 2003) مطابقت داشت.

نفوذ جانبی

به منظور تعیین سهم نفوذ جانبی از نفوذ تجمعی کل، نفوذ عمودی (یک بعدی) توسط استوانه‌های مضاعف در شرایط اولیه و مرزی مشابه و یکسان با جویچه‌ها، اندازه‌گیری شد. منحنی نفوذ تجمعی در استوانه‌های مضاعف در شرایط اولیه و مرزی مختلف در شکل (۲) آمده است. در استوانه‌های مضاعف، مشابه با آبیاری جویچه‌ای، در تمام حالت‌ها، بیشترین عمق نفوذ عمودی در آبیاری اول و کمترین عمق نفوذ عمودی در آبیاری سوم صورت گرفت.

در دوره‌های آبیاری چهار و نه روز، عمق آب نفوذ یافته به ترتیب ۷۷ و ۵۴ درصد افزایش یافت.

تأثیر رطوبت اولیه بر نفوذ تجمعی کل

در هر سه واقعه آبیاری، در بار آبی پنج و یا ده سانتی‌متری، با کاهش رطوبت اولیه، عمق آب نفوذ یافته افزایش یافت. دلیل این مسئله، افزایش مکش ماتریک به علت کاهش رطوبت بود. در بارهای آبی پنج و ده سانتی‌متر، با افزایش دور آبیاری از چهار به نه روز و به دنبال آن کاهش رطوبت اولیه، به ترتیب ۳۷ و ۳۰ درصد افزایش نفوذ مشاهده شد. تأثیر کاهش رطوبت اولیه بر افزایش نفوذ در آبیاری دوم کمتر از آبیاری اول بود. به این ترتیب که با کاهش رطوبت اولیه در بار آبی پنج سانتی‌متر، ۱۴ و در بار آبی ده سانتی‌متر، ۲۱ درصد نفوذ افزایش یافت. اما در آبیاری سوم، درصد افزایش نفوذ بر اثر افزایش دور آبیاری، بیشتر از آبیاری اول و دوم

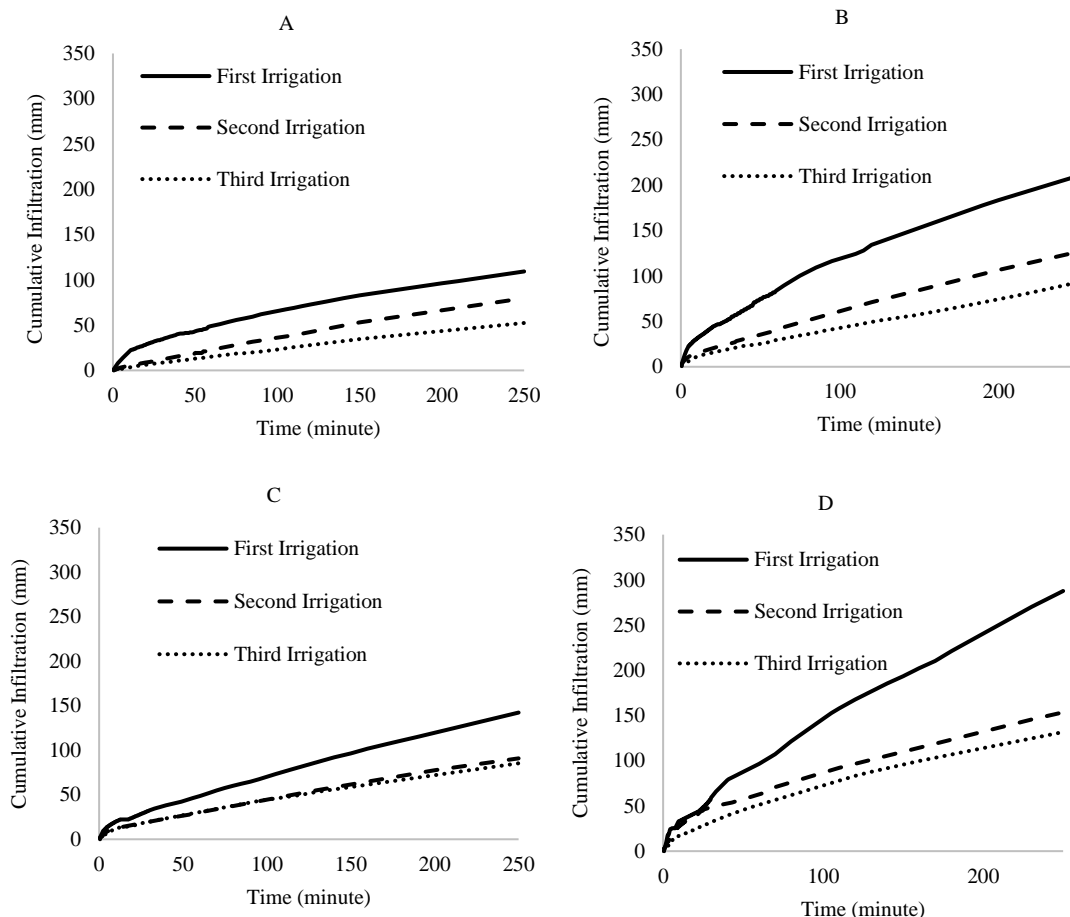


Fig. 1 – Cumulative infiltration curve in furrow irrigation under various initial and boundary conditions of first, second and third irrigation event (A: 5 cm water head and 4-day irrigation interval, B: 10 cm water head and 4-day irrigation interval, C: 5 cm water head and 9-day irrigation interval, D: 10 cm water head and 9-day irrigation interval)

شکل ۱ – منحنی نفوذ تجمعی در آبیاری جویچه‌ای در شرایط اولیه و مرزی متفاوت آبیاری‌های اول، دوم و سوم (A: بار آبی پنج سانتی‌متر و دور آبیاری چهار روز، B: بار آبی ده سانتی‌متر و دور آبیاری چهار روز، C: بار آبی چهار سانتی‌متر و دور آبیاری نه روز، D: بار آبی ده سانتی‌متر و دور آبیاری ده روز)

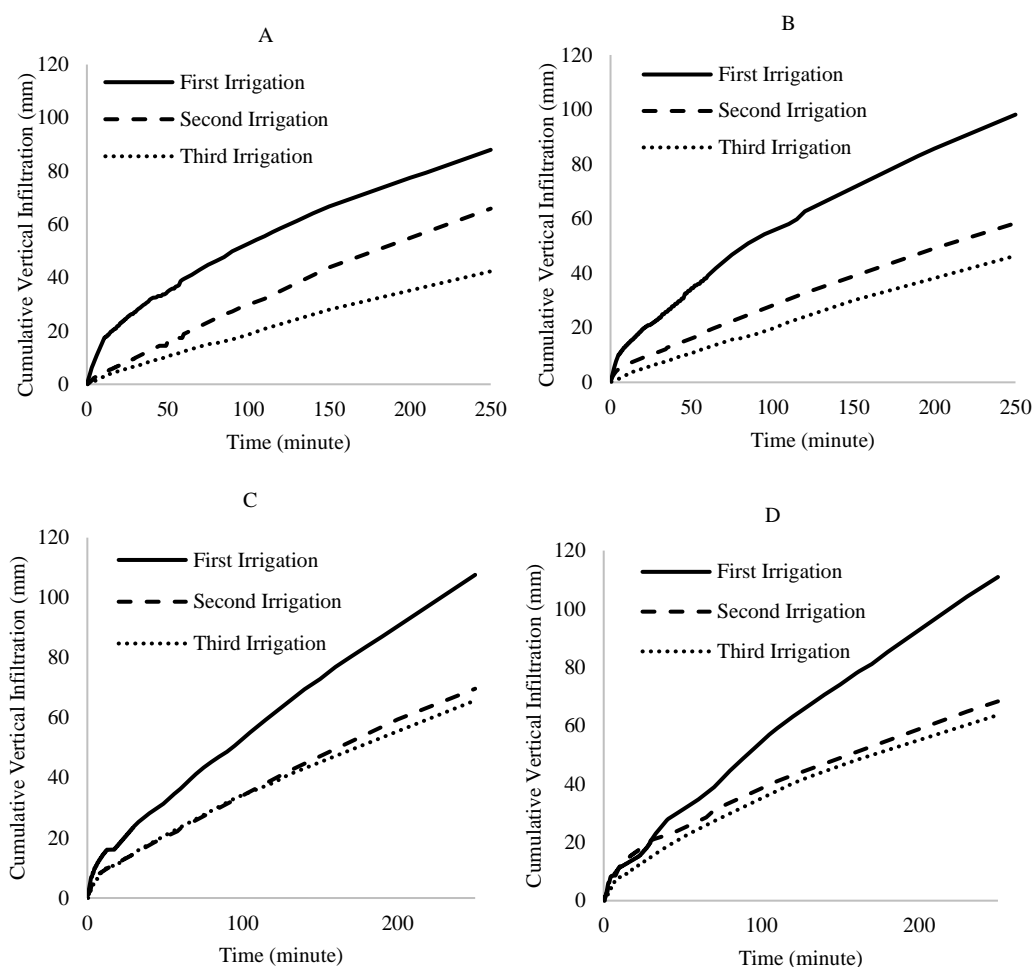


Fig. 2 – Cumulative infiltration curve in double rings under various initial and boundary conditions of first, second and third irrigation event (A: 5 cm water head and 4-day irrigation interval, B: 10 cm water head and 4-day irrigation interval, C: 5 cm water head and 9-day irrigation interval, D: 10 cm water head and 9-day irrigation interval)

شکل ۲ – منحنی نفوذ تجمعی در استوانه‌های مضاعف در شرایط اولیه و مرزی متفاوت آبیاری‌های اول، دوم و سوم
 A: بار آبی پنج سانتی‌متر و دور آبیاری چهار روز، B: بار آبی ده سانتی‌متر و دور آبیاری چهار روز، C: بار آبی چهار سانتی‌متر و دور آبیاری نه روز، D: بار آبی ده سانتی‌متر و دور آبیاری ده روز

حالت بار آبی بیشتر (ده سانتی‌متر) و رطوبت کمتر خاک (دور آبیاری بیشتر) مشاهده شد.

مشابه با نفوذ تجمعی کل، در تمامی حالت‌ها، بیشترین و کمترین مقدار نفوذ جانبی به ترتیب در آبیاری‌های اول و سوم دیده شد. بین مقادیر نفوذ جانبی آبیاری‌های اول، دوم و سوم تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد وجود داشت. اختلاف بین مقادیر نفوذ جانبی در آبیاری‌های اول و دوم بیشتر از این اختلاف بین آبیاری‌های دوم و سوم بود. افزایش رطوبت پشته‌ها در اثر آبیاری منجر به کاهش پتانسیل ماتریک می‌شود که در نهایت نفوذ آب در خاک نیز کاهش می‌یابد. تراکم، تثبیت و کاهش زبری سطح خاک پس از آبیاری نیز بر کاهش مقدار نفوذ تأثیرگذار است.

چون پیش از آبیاری اول، هنوز آبیاری صورت نگرفته است، خاک سطحی جویچه‌ها از زبری زیادی برخوردار است که این

به‌طور کلی با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، در هر دو حالت رطوبت اولیه، نفوذ عمودی افزایش یافت. نتیجه حاصل با نتایج گزارش شده توسط Valiantzas et al. (2009) و همچنین Furman et al. (2006) مطابقت داشت. هم‌چنین به‌طور کلی در حالت با رطوبت اولیه کمتر، عمق و شدت نفوذ عمودی افزایش یافت که این نتیجه نیز با نتیجه گزارش شده توسط Philip (1957, 1969) همخوانی داشت. به‌طور کلی، نفوذ تجمعی در استوانه‌های مضاعف با افزایش بار آبی و کاهش رطوبت خاک به ترتیب تا ۱۱ و ۲۲ درصد افزایش یافت.

در نهایت از اختلاف مقدار آب نفوذ یافته به صورت یک‌بعدی در استوانه‌های مضاعف و کل آب نفوذ یافته در جویچه‌ها، مقدار نفوذ جانبی در جویچه تعیین شد. بیشترین مقدار نفوذ جانبی در

خاک کمتر باشد، مکش آب در خاک و در نتیجه قابلیت نفوذ آب در خاک، بیشتر است. نمودارهای نفوذ جانبی در شکل (۳) آمده است.

تأثیر بار آبی بر نفوذ جانبی

در آبیاری اول و در هر دو دور آبیاری چهار و نه روز، با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، نفوذ جانبی در جویچه‌ها، افزایش یافت. این افزایش در رطوبت اولیه بیشتر (دور آبیاری کمتر)، بیشتر بود. به این صورت که با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، در دوره‌های آبیاری چهار و نه روزه، نفوذ جانبی به‌ترتیب تا پنج و بیش از پنج برابر افزایش یافت.

مسئله باعث افزایش مقدار نفوذ آب در خاک می‌گردد. به همین دلیل، اختلاف بین مقدار نفوذ جانبی آبیاری اول با آبیاری دوم، بیش از اختلاف بین نفوذ جانبی آبیاری دوم و سوم بود، مخصوصاً در رطوبت اولیه کمتر (دور آبیاری بیشتر). دلایل بیان‌شده در رابطه با اختلاف مقادیر نفوذ جانبی بین آبیاری‌های دوم و سوم نیز صادق است. در حالت‌های آزمایشی، بین نفوذ جانبی در آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول تا ۵۱ درصد و بین آب نفوذیافته در آبیاری سوم نسبت به آبیاری دوم تا ۳۲ درصد کاهش مشاهده شد. در حالت با رطوبت اولیه کمتر (دور آبیاری بیشتر)، در هر دو بار آبی پنج و ده سانتی‌متر، اختلاف بین مقادیر نفوذ در آبیاری‌های دوم و سوم کمتر از اختلاف بین مقادیر نفوذ در حالت‌های با رطوبت اولیه بیشتر (دور آبیاری کمتر) بود. زیرا هر چه رطوبت

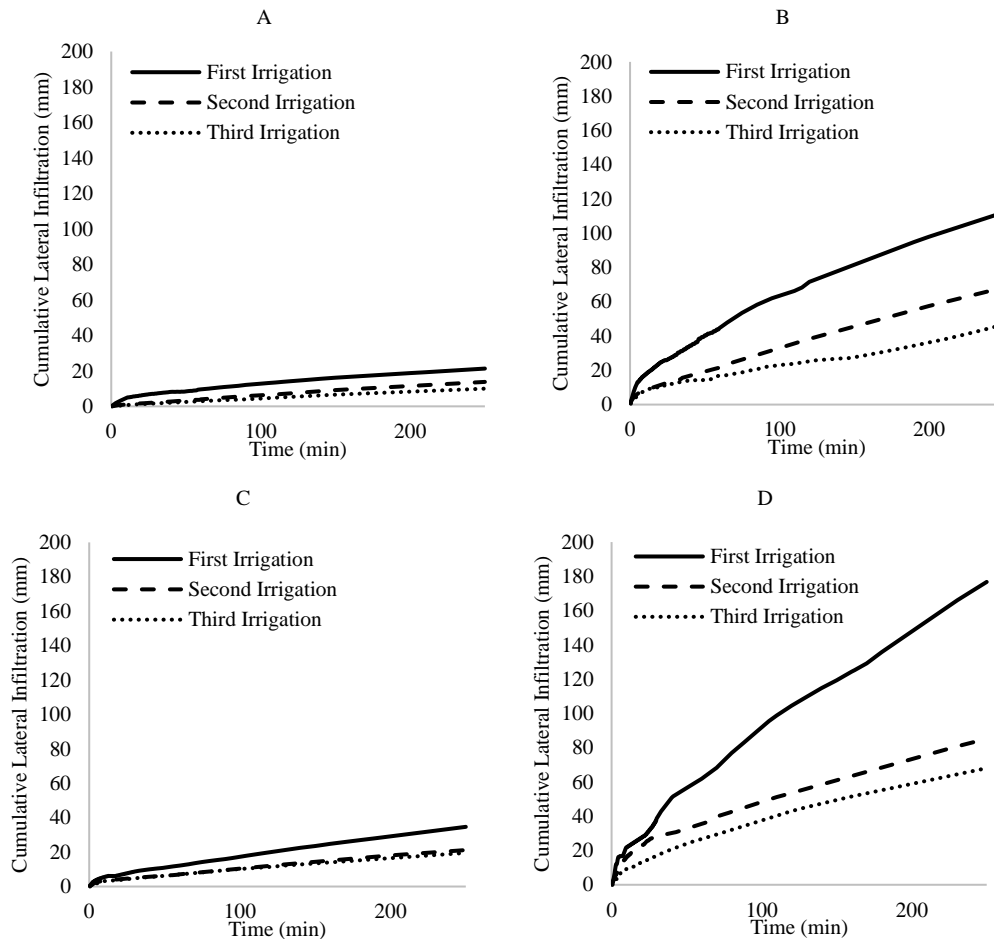


Fig. 3 – Cumulative lateral infiltration curve in furrow irrigation under various initial and boundary conditions of first, second and third irrigation event (A: 5 cm water head and 4-day irrigation interval, B: 10 cm water head and 4-day irrigation interval, C: 5 cm water head and 9-day irrigation interval, D: 10 cm water head and 9-day irrigation interval)

شکل ۳- منحنی نفوذ جانبی در آبیاری جویچه‌ای در شرایط اولیه و مرزی متفاوت آبیاری‌های اول، دوم و سوم (A: بار آبی پنج سانتی‌متر و دور آبیاری چهار روز، B: بار آبی ده سانتی‌متر و دور آبیاری چهار روز، C: بار آبی چهار سانتی‌متر و دور آبیاری نه روز، D: بار آبی ده سانتی‌متر و دور آبیاری ده روز)

نفوذ جانبی نسبی

سهام نفوذ جانبی از نفوذ کل در جویچه‌ها در جدول (۲) آمده است. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش بار آبی و همچنین کاهش رطوبت اولیه (افزایش دور آبیاری)، سهم نفوذ جانبی از نفوذ تجمعی کل، افزایش می‌یابد. با این تفاوت که افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، تأثیر بیشتری بر افزایش سهم نفوذ جانبی از نفوذ کل نسبت به افزایش دور آبیاری از چهار به نه روز (کاهش رطوبت اولیه به صورت تقریبی از ۲۱ به ۱۶ درصد حجمی) گذاشت. به طور کلی، بیشترین و کمترین سهم نفوذ جانبی از نفوذ کل مربوط به آبیاری‌های اول و سوم می‌باشد. حداکثر سهم نفوذ جانبی از نفوذ کل ۶۱ درصد بود که مربوط به آبیاری اول با بار آبی بیشتر و رطوبت اولیه کمتر بود. نتیجه حاصل با نتایج گزارش شده توسط Skonard (2002) و Bautista et al. (2014)، مبنی بر سهم تقریباً ۶۰ درصدی نفوذ جانبی از نفوذ کل در بار آبی زیاد و سهم ۳۰ درصدی در بار آبی کم، در آبیاری جویچه‌ای مطابقت دارد. همچنین حداقل سهم نفوذ جانبی از نفوذ کل، ۱۷ درصد بود که مربوط به آبیاری دوم با بار آبی کمتر و رطوبت اولیه بیشتر بود. فارغ از در نظر گرفتن تأثیر رطوبت اولیه بر نفوذ جانبی، میانگین سهم نفوذ جانبی در بار آبی پنج سانتی‌متر و ده سانتی‌متر به ترتیب ۲۱ و ۵۴ درصد بود. به طور کلی، در هر دو رطوبت اولیه (دور آبیاری چهار و نه روز)، با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، نفوذ جانبی به بیش از ۲/۵ برابر افزایش یافت.

با افزایش بار آبی محیط خیس شده افزایش و به تبع آن دیواره جانبی جویچه‌ها نقش بیشتری در فرایند نفوذ ایفا می‌کنند و آب درون جویچه با دیواره‌های جانبی بزرگ‌تری در تماس است (Bautista et al., 2014). در آبیاری دوم، تأثیر افزایش بار آبی بر افزایش نفوذ جانبی، کمتر از آبیاری اول بود. دلیل این مسئله افزایش رطوبت پشته‌ها به دلیل آبیاری اول و به دنبال آن کاهش مکش ماتریک و همچنین تراکم و تثبیت خاک دیواره‌های جویچه‌ها در اثر آبیاری اول بود. در این واقعه آبیاری، با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر در دوره‌های آبیاری چهار و نه روز، نفوذ جانبی به ترتیب چهار و پنج برابر شد. در آبیاری سوم نیز با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، در دوره‌های آبیاری چهار و نه روز، نفوذ جانبی به ترتیب ۳/۵ و ۴/۵ برابر شد.

تأثیر رطوبت اولیه بر نفوذ جانبی

در هر سه واقعه آبیاری، در بار آبی پنج و یا ده سانتی‌متری، با کاهش رطوبت اولیه، نفوذ جانبی افزایش یافت. دلیل این مسئله، افزایش مکش ماتریک به علت کاهش رطوبت بود. در بارهای آبی پنج و ده سانتی‌متر، با افزایش دور آبیاری از چهار به نه روز و به دنبال آن کاهش رطوبت اولیه، به ترتیب ۶۲ و ۵۷ درصد افزایش نفوذ جانبی مشاهده شد. تأثیر کاهش رطوبت اولیه بر افزایش نفوذ در آبیاری دوم کمتر از آبیاری اول بود. به این ترتیب که با کاهش رطوبت اولیه در هر دو بار آبی پنج و ده سانتی‌متر، ۱۴ درصد نفوذ افزایش یافت. همچنین در آبیاری سوم، کاهش رطوبت اولیه، در بارهای آبی پنج و ده سانتی‌متر، به ترتیب موجب افزایش ۹۶ و ۴۵ درصدی نفوذ جانبی شد.

جدول ۲ - سهم نفوذ جانبی از نفوذ کل تحت شرایط اولیه و مرزی متفاوت

Table 2 – Proportion of lateral infiltration from total infiltration under various initial and boundary conditions

| Initial and Boundary Conditions | Irrigation Event | Relative Lateral Infiltration (%) |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| | 1 | 19.47 |
| | 2 | 17.26 |
| | 3 | 18.04 |
| | 1 | 53.33 |
| | 2 | 53.9 |
| | 3 | 49.4 |
| | 1 | 24.37 |
| | 2 | 23.4 |
| | 3 | 23.02 |
| | 1 | 61.42 |
| | 2 | 55.51 |
| | 3 | 51.86 |

نتیجه گیری

هدف اصلی از پژوهش انجام شده، مطالعه میدانی نفوذ تجمعی و هم‌چنین نفوذ جانبی در آبیاری جویچه‌ای بود که این مهم با انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای تحت شرایط اولیه و مرزی متفاوت صورت گرفت.

با توجه به افزایش محیط خیس شده و انرژی آب بر اثر افزایش بار آبی و هم‌چنین افزایش مکش ماتریک بر اثر افزایش دور آبیاری (کاهش رطوبت اولیه)، نفوذ تجمعی و هم‌چنین نفوذ جانبی افزایش یافت. به‌طور کلی افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، منجر به افزایش بیشتر نفوذ دوبعدی در مقایسه با افزایش دور آبیاری از چهار به نه روز در جویچه شد. با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، نفوذ تجمعی در جویچه‌ها تا ۱۰۲ درصد افزایش یافت.

افزایش دور آبیاری از چهار به نه روز نیز باعث شد که نفوذ تا ۶۲ درصد افزایش یابد. با افزایش بار آبی، نفوذ جانبی تا ۵/۵ برابر افزایش یافت. هم‌چنین با کاهش رطوبت اولیه، نفوذ جانبی در جویچه‌ها تا ۹۶ درصد افزایش یافت. با افزایش بار آبی و هم‌چنین کاهش رطوبت اولیه (افزایش دور آبیاری)، سهم نفوذ جانبی از نفوذ تجمعی کل، افزایش یافت. به‌طور کلی، در هر دو رطوبت اولیه (دور

آبیاری چهار و نه روز)، با افزایش بار آبی از پنج به ده سانتی‌متر، سهم نفوذ جانبی از نفوذ کل به بیش از ۲/۵ برابر افزایش یافت. با توجه به نتایج حاصل، اطلاع از تأثیر شرایط اولیه و مرزی متفاوت بر فرایند نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، پیش از طراحی سیستم‌های آبیاری، بایستی حتماً شرایط اولیه و مرزی بررسی و با توجه به این موارد، سیستم آبیاری طراحی شود. در صورت شناخت دقیق این متغیرها، دبی ورودی به جویچه‌ها و دور آبیاری به‌درستی تعیین خواهند شد که این موارد به‌ترتیب به‌صورت بار آبی و رطوبت اولیه نمود پیدا می‌کنند. در غیر این صورت ممکن است که پس از طراحی سیستم آبیاری، کم‌آبیاری و یا بیش‌آبیاری رخ دهد. هم‌چنین با توجه به کاشت اکثر گیاهان بر روی پشته‌ها، در صورت استفاده از آبیاری جویچه‌ای، هر چه بار آبی و دور آبیاری بیشتر باشد، چون حرکت جانبی آب و املاح افزایش می‌یابد، بازده آبیاری و کوددهی نیز بهبود می‌یابد.

تقدیر و تشکر

این تحقیق در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- 1- Abbasi, F., Adamsen, F.J., Hunsaker, D.J., Feyen, J., Shouse, P. and Van Genuchten, M.T. 2003. Effects of flow depth on water flow and solute transport in furrow irrigation: Field data analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(4), pp. 237-246.
- 2- Bala, N., Singh, G., Bohra, N.K., Limba, N.K. and Baloch, S.R. 2014. Bio drainage for Restoration of Canal Command Waterlogged Area in Indian Desert. *Indian Forester*, 140(5), pp. 462-467.
- 3- Bautista, E., Warrick, A.W. and Strelkoff, T.S. 2014. New results for an approximate method for calculating two-dimensional furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(10), pp. 04014032.
- 4- Ebrahimiyan, H. 2014. Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), pp. 1904-1911.
- 5- Elliot, R.L. and Walker, W. 1982. Field evaluation on furrow infiltration and advance functions. *Transaction of the ASAE*, 25(2), pp. 396-400.
- 6- Fangmeier, D.D. and Ramsey, K.K. 1978. Intake characteristics of irrigation furrows. *ASAE*, 21(4), pp. 696-700.
- 7- Furman, A., Warrick, A.W., Zerihun, D. and Sanchez, C.A. 2006. Modified Kostikov infiltration function: Accounting for initial and boundary conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(6), pp. 587-596.
- 8- Govers, G., Takken, I. and Helming, K. 2000. Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20(2), pp. 131-146.
- 9- Gregory, J.H., Dukes, M.D., Jones, P.H. and Miller, G.L. 2006. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(3), pp. 117-124.

- 10-Hamilton, G., Akbar, G., Hassan, I., Raine, S., McHugh, A., Fisher, P. and Sheppard, J. 2014. Management to improve soil productivity and maximise lateral infiltration in permanent bed-furrow irrigation systems. *In Proceedings of the National Soil Science Conference Soil Science Australia*.
- 11-Hartge, K.H., Horn, R., Horton, R., Bachmann, J. and Peth, S. 2016. *Essential Soil Physics*. Schweizerbart science publishers. Germany.
- 12-Hills, R.C. 1970. The determination of the infiltration capacity of field soils using the cylinder infiltrometer. *Technical Bulletin, British Geomorphological Research Group*.
- 13-Izadi, B. and Wallender, W.W. 1985. Furrow hydraulic characteristics and infiltration. *ASAE*, 28(6), pp. 1901-1908.
- 14-Karmeli, D., Salazar, L. and Walker, W. 1978. *Assessing the spatial variability of irrigation water application*. Office of Research and Development US Environmental Protection Agency, Oklahoma, USA.
- 15-Miao, Q., Rosa, R.D., Shi, H., Paredes, P., Zhu, L., Dai, J. and Pereira, L. S. 2016. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat–maize and spring wheat–sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach. *Agricultural Water Management*, 165, pp. 211-229.
- 16-Oyonarte, N.A., Mateos, L. and Palomo, M.J. 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(1), pp. 26-33.
- 17-Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 5. the influence of the initial moisture content. *Soil Science*, 84(4), pp. 329–339.
- 18-Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. *Advance Hydroscience*, 5, pp. 215–305.
- 19-Skonard, C.J. 2002. *A field-scale furrow irrigation model*. PhD dissertation, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, USA.
- 20-Sloan, B.P., Basu, N.B. and Mantilla, R. 2016. Hydrologic impacts of subsurface drainage at the field scale: Climate, landscape and anthropogenic controls. *Agricultural Water Management*, 165, pp. 1-10.
- 21-Souza, F. 1981. *Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation*. PhD dissertation, University of California, Davis, California.
- 22-Valiantzas, J.D., Pollalis, E.D., Soulis, K.X. and Londra, P.A. 2009. Modified form of the extended Kostikov equation including various initial and boundary conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(4), pp. 450-458.
- 23-Vogel, T. and Hopmans, J.W. 1992. Two-dimensional analysis of furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(5), pp. 791-806.
- 24-Walker, W.R. and Kasilingam, B. 2004. Another look at wetted perimeter along irrigated furrows— modeling implications. *World Water and Environmental Resources Congress: ASCE/EWRI Salt Lake City, UT*.
- 25-Walker, W.R. and Skogerboe, G.V. 1987. *Surface Irrigation Theory and Practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. USA.

-
- 26-Wallender, W.W. and Rayej, M. 1990. Shooting method for Saint Venant equations of furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(1), pp. 114-122.
- 27-Yonts, C.D., Eisenhauer, D.E. and Varner, D.L. 2003. *Managing furrow irrigation systems*. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln.
- 28-Zerihun, D., Feyen, J. and Reddy, J.M. 1996. Sensitivity analysis of furrow-irrigation performance parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(1), pp. 49-57.