



Journal of Hydraulics and Water Science

Online ISSN: [3092-6114](#)
Journal homepage: <https://hws.tabrizu.ac.ir/?lang=en>



Research Article

Evaluating the Hydraulic Characteristics of Gravity Subsurface Irrigation System in Sloping Laterals

Mohammad Ali Sadeghzadeh^{1*,2}  and Hossein Malekinezhad^{2,3}

1- Associate Prof., Physics Department, Yazd University, Yazd, Iran,.

2- Research and Development Group, Noabyaran Boostane Mehr Co. Ltd. Yazd Science Park, Yazd, Iran.

3- Associate Prof., Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran.

Accepted: September 20, 2025

Received: April 7, 2025

Revised: September 6, 2025

Published online: September 21, 2025

*Corresponding Author's Email: msadeghzadeh@yazd.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:

Gravity irrigation,
Leakage, Novel
irrigation methods,
Porous pipe,
Subsurface irrigation.

ABSTRACT

Background and Objectives

Much of high-quality available water is consumed for different plants irrigation, in agricultural applications, urban green spaces and other kind of orchards. So efficient use of water resources in arid and semi-arid regions like Iran has become unavoidable strategy. Although there has been a continuous trend towards application of efficient irrigation systems such as pressurized drip irrigation methods, due to their surface evaporating, dripper clogging, complexity and high initial investment, they are not suitable for arid climates, saline water, and small-scale owner applications. Thus, implementation of a simple, user-friendly, subsurface, porous pipe, and gravity (pressuereless) irrigation systems is attractive for agricultural and other applications. Perforated pipes covered by plastic textile sleeves as subsurface porous emitters have been used before for irrigating the Pistachio orchards in Iran. Later on, hydraulic properties of such irrigation system has been measured and reported for flat laterals, and here the feasibility and hydraulic characteristics of this irrigating system for sloping laterals is explained. In the case of sloping lateral, if the inlet water flow rate is low, the beginning part of the lateral will be irrigated more than mid and end parts and vice versa, consequently the discharge distribution uniformity will not be attained. The solution is implementation of a step like plateau piping system and siphon connections for each lateral. The objectives of this research are feasibility, performance and field study of hydraulic characteristics of such irrigation system in sloping lands.

Methodology

In this research, such siphon-step like piping subsurface irrigation system has been used for long (80 up to 115 meters) and sloping laterals. The subsurface porous pipe had 4 orifices per meter and its outer diameter was 63 mm. The average height of siphon barriers was 14cm. The speed of advancing waterfront was measured for different inlet water flow rates and lateral lengths. In field experiments, the hydraulic parameters including local head have been measured versus irrigation time in serial plateaus for different inlet water flow rates in the range of 0.735-1.225 lit/s and time of year. The leakage rate of individual plateaus has been evaluated using a physical model for leakage-head relation.

How to cite:

Sadeghzadeh, M.A. Malekinezhad, H. Evaluating the Hydraulic Characteristics of Gravity Subsurface Irrigation System in Sloppy Laterals. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (2):93-109. https://hws.tabrizu.ac.ir/article_20834.html



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



Findings

Practically, plateaus and siphon-like barriers increase the pressure potential energy and so result in desired irrigation distribution uniformity along the lateral. It was showed that, the speed of waterfront depends on inlet flow rate, number of siphon like barriers and their height and so lateral length. Moreover, an increase of a single barrier height causes significant delay in lateral filling and irrigation non-uniformity. According to aforementioned physical model, the discharge rate of such porous pipe is proportion to water head and orifices characteristics. Thus, the infiltration rate of the plateaus and the orifice parameter have been evaluated for different inlet water flow rates and lateral lengths. The simulation of leakage rate of plateaus provides a measure of irrigation distribution uniformity along the laterals. It is revealed that the irrigation uniformity can be achieved provided the inlet water flux to be set carefully (more than the optimum value) proportional to lateral length and time of year. As the leakage rate of this subsurface, gravity irrigation system is much more than other subsurface porous pipes, thus it can be a promising technique for agricultural irrigation in arid climates and saline water resources.

Conclusion

Water shortage and low efficient use of agricultural water in arid and semi-arid regions is increasingly becoming a global concern. Thus implementation of low pressure (gravity) subsurface irrigation method can be a solution for small scale owners and saline water resources. Perforated pipe covered by a plastic textile sleeve, can be used as a high hydraulic conductivity porous pipe for this task. The irrigated water distribution uniformity is a matter of concern in sloping laterals than flat ones, and a step like plateaus piping system with siphon connections has been used as a practical solution. Indeed, plateaus and siphon-like barriers increase the pressure potential energy and so result in irrigation distribution uniformity along the lateral. In field experiments, the speed of waterfront and the hydraulic parameters including local head, have been measured over time in serial plateaus for different inlet water flow rates and lateral lengths. The leakage rate of individual plateaus have been evaluated using a physical leakage-head relation. It is revealed that the desired irrigation uniformity can be achieved provided the inlet water flux to be set carefully (more than the optimum value) proportional to lateral length and time of year. This simple, user-friendly, gravity, subsurface irrigation system can be a practical irrigation system for agricultural applications in arid regions, saline water resources and sloping laterals.



نشریه دانش آب و هیدرولیک

شاپا الکترونیکی: 2717-4107
درگاه نشریه: hws.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

ارزیابی مشخصات هیدرولیکی سامانه آبیاری زیرسطحی تراوای ثقیلی در لترال‌های شیدار

محمد علی صادق زاده*^۱ و حسین ملکی نژاد^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

۱-دانشیار، عضو هیات علمی دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲- بخش تحقیق و توسعه، شرکت نوآبیاران بوستان مهر، پارک علم و فناوری یزد، یزد، ایران.

۳-دانشیار، عضو هیات علمی دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: msadeghzadeh@yazd.ac.ir

چکیده

کلمات کلیدی

آبیاری ثقیلی، آبیاری زیرسطحی، روش‌های نوین آبیاری، تراوایی، لوله تراوا

بخش عمده‌ی آب با کیفیت موجود به‌مصرف آبیاری گیاهان می‌رسد و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری زیرسطحی یکی از گزینه‌های کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی می‌باشد. در روش آبیاری زیرسطحی لوله تراوای ثقیلی، آب مورد نیاز گیاه در فشار بسیار کم، از طریق لوله‌های مشبک پوشیده با پارچه پلاستیکی، مستقیماً در اختیار ریشه قرار می‌گیرد. یکی از چالش‌های این سامانه نوین آبیاری عدم یکنواختی توزیع آب ناشی در طول لترال‌های شیدار می‌باشد. در این پژوهش، آزمایش‌های هیدرولیکی بر روی لترال‌های پلکانی با طول‌های ۸۳، ۱۰۲ و ۱۱۴ متر و با دبی آب ورودی ۰/۷۳۵ تا ۱/۱۲۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد که سرعت پیشروی جبهه‌ی آب در طول لترال نه تنها به دبی آب ورودی، بلکه به تعداد موانع سیفونی (و تعداد تختگاه‌ها) و ارتفاع آنها نیز بستگی دارد. موانع سیفونی و تختگاه‌ها عملاً باعث افزایش انرژی پتانسیل فشاری و در نتیجه افزایش یکنواختی پخش آب در طول خط لوله می‌شوند. نتایج نشان داد که دبی بهینه و لازم برای آبیاری لترال نه تنها به طول آن، بلکه به زمان (از سال) انجام فرایند آبیاری نیز بستگی دارد. همچنین مشخص شد تراوایی لوله‌های این سامانه زیرسطحی بیش از ۱۰۰ برابر تراوایی لوله‌های سفالی در بار هیدرولیکی مشابه می‌باشد. یکنواختی توزیع آب در تختگاه‌های لترال با استفاده از یک مدل فیزیکی برای رابطه نشت - فشار شبیه سازی شد. نتایج مویید این است که چنانچه دبی آب ورودی متناسب با طول لترال، زمان از سال، و بیش از مقدار بهینه باشد، یکنواختی آبیاری مطلوب حاصل می‌شود.

کلمات کلیدی: آبیاری ثقیلی، آبیاری زیرسطحی، روش‌های نوین آبیاری، تراوایی، لوله تراوا.

مقدمه

بخش عمده آب با کیفیت موجود به مصرف آبیاری گیاهان می‌رسد و تا کنون روش‌های متنوعی برای آبیاری آن‌ها بکار رفته است (صادق زاده و همکاران ۲۰۲۲). با توجه به محدودیت منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک، استفاده بهینه از منابع آبی موجود به عنوان محور اصلی توسعه کشاورزی و محیط زیست اجتناب‌ناپذیر است. آبیاری موضعی و حذف تبخیر از سطح خاک با استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری زیرسطحی یکی از گزینه‌های کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی می‌باشد. استفاده از کوزه‌های سفالی از اولین تجربیات موفق انسان‌های ساکن در مناطق خشک بوده است (ملکی نژاد ۲۰۰۳)، ولی استفاده از آن‌ها در سطوح وسیع و مزارع امکان‌پذیر نمی‌باشد.

بکارگیری لوله‌های سفالی بعنوان لوله تراوای زیرسطحی یکی دیگر از گزینه‌های مطرح بوده است ولی نتایج تجربی اشرفی و کنعانی (۲۰۲۳) مویید این است که تراوایی گسیلنده‌های مذکور به دلیل کاهش مشارکت خلل و فرج موجود در بدنه لوله سفالی در پدیده انتقال آب، به مرور زمان کاهش می‌یابد و لذا کاربرد آنها برای آبیاری پیشنهاد نشده است. روش‌های آبیاری زیرسطحی لوله تراوا، به لحاظ هیدرولیک و آبدی متفاوت می‌باشند و در چند دهه اخیر نوآوری‌ها، روش‌ها و پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است. علی حوری و علیزاده (۲۰۰۶)، در پژوهشی نشان دادند که استفاده از لوله‌های تراوای اسفنجی لاستیکی (موجود در بازار) نیز راهکار مشکل نبوده است و کاهش آبدی (با گذشت زمان) و پیچیدگی‌هایی که در طراحی و بهره‌برداری از آن‌ها وجود دارد، کاربرد را برای کشاورزان غیر ممکن می‌سازد. از جنبه کاربردی، در شرایط کم آبیاری و خرده مالکیتی، سیستم آبیاری ساده و کم فشاری که با سیستم غرقابی موجود هم‌خوانی داشته و به عبارتی نیازی به پمپاژ و فیلتراسیون آب نباشد، می‌تواند راهکار مناسب باشد. در روش آبیاری زیرسطحی لوله تراوای ثقلی (بی فشار)، آب مورد نیاز درختان از طریق لوله‌های مشبک (سوراخ‌دار) پوشیده با پارچه پلاستیکی و ترجیحاً مدفون در بستر شنی، در فشار بسیار کم (کمتر از ۰/۰۵ بار و بدون نیاز به پمپاژ و فیلتراسیون) مستقیماً در اختیار ریشه درخت قرار می‌گیرد. دستورانی و همکاران (۲۰۰۷) و صادق زاده و ملکی نژاد (۲۰۲۲) و دستورانی و همکاران (۲۰۱۰)، نوآوری‌های این فناوری عبارت است از: استفاده از لوله سوراخ‌دار با پوشش پارچه پلاستیکی بعنوان لوله تراوا در آبیاری زیرسطحی، عملکرد بدون فشار (ثقلی) سیستم آبیاری بواسطه رسانایی هیدرولیکی بسیار بالای لوله تراوا، تخلیه فوری لوله تراوا پس از اتمام فرایند آبیاری و به تبع عدم نفوذ ریشه در لوله تراوا و ایجاد پیاز رطوبتی افقی با مقطع بیضی گونه و یکنواخت در سرتاسر لترال. مشابه با سامانه آبیاری قطره‌ای (فلاح مرسلی و همکاران ۲۰۲۳)، یکی از چالش‌های این سامانه نوین آبیاری عدم یکنواختی توزیع آب نفوذی در طول لترال‌های شیب‌دار می‌باشد، بنحوی که اگر دبی آب ورودی به لترال کم باشد، پیشروی آب در لترال نیز کند بوده، و در نتیجه بخش ابتدایی بیشتر از بخش‌های میانی و انتهایی لترال آبیاری می‌شود، در مقابل چنانچه دبی آب ورودی زیاد باشد سرعت پیشروی جبهه آب هم زیاد بوده و زمان پرشدگی لترال هم کاهش یافته و بار هیدرولیکی (هد) آب در انتهای لترال بمراتب بیش از بخش میانی و بخش ابتدایی آن خواهد بود و چون نشت آب به هد (فشار) موضعی آب بستگی دارد، در نتیجه بخش انتهایی بیشترین حجم آب آبیاری را دریافت خواهد کرد. راهکار حل این چالش استفاده از سیستم لوله‌کشی پلکانی بوده است که اولین بار در یکی از بوستان‌های دانشگاه یزد اجرا شده است و در این پژوهش به مطالعه میدانی و مشخصه‌یابی هیدرولیکی این سامانه پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

پایلوت تحت مطالعه در سایت اصلی دانشگاه یزد واقع در منطقه صفائیه شهر یزد، در موقعیت جغرافیایی $54^{\circ}21'42.1''E$ و $31^{\circ}49'48.7''N$ قرار دارد. قطعه مذکور به طول ۲۹۵ متر و عرض ۱۰ متر و ۳/۲ متر اختلاف ارتفاع و به عبارتی شیب متوسط آن ۱۱ در هزار می‌باشد. این بوستان، دارای سه ردیف درخت می‌باشد. ردیف وسط دارای ۱۱۰ درخت کاج ۱۵ ساله و با

فواصل ۲/۵ متر الی ۳ متر بوده و تا سال ۱۴۰۲ به روش قطره‌ای تحت فشار آبیاری شده است و در این مدت ۱۹ اصله آن به دلایلی خشک شده‌اند. درختان دو ردیف دیگر زبان گنجشک، نارون و اقاچیا بوده و عمده آنها نیز در سال‌های گذشته خشک شده و با زیتون و شونگ، توت، نخل و درختچه‌های زینتی جایگزین شده‌اند. در شکل ۱ (الف) تصویر بخشی از آن، قبل از اجرای سامانه نوین آبیاری زیرسطحی لوله تراوا و در شکل ۱ (ب) تصویر بخشی از آن بعد از اجرای سامانه آبیاری زیرسطحی لوله تراوا (با قطر خرجی ۶۳ میلیمتر) نمایش داده شده است. همانطور که در بالا اشاره شد به واسطه شیب زیاد عرصه مذکور، لترال‌ها بصورت پلکانی و سیفون‌گونه طراحی و اجرا شده‌اند تا یکنواختی توزیع آب آبیاری در طول لترال‌ها حاصل شود. در شکل ۲ شماتیک جانبی وضعیت قرارگیری تخته‌گاه‌ها (P_1 و P_2 و ..) و موانع (B_1 و B_2 و ..) در طول لترال، نشان داده شده است. هر یک از موانع بصورت سیفون آبیاری می‌باشد و برای جلوگیری از حبس هوا و یا وقوع پدیده مکش سیفونی در یکی از خم‌های بالای سیفون یک لوله هواکش تعبیه شده است.

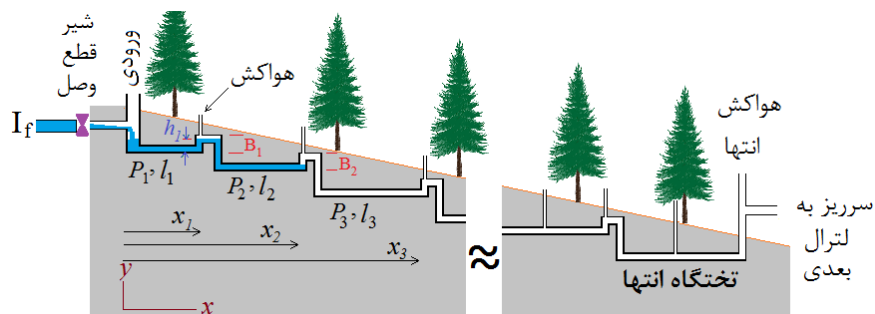


(ب)



(الف)

شکل ۱- تصویر بخشی از بوستان تحت مطالعه: (الف) قبل از اجرای سامانه نوین آبیاری زیرسطحی لوله تراوا و (ب) بعد از لوله‌گذاری سامانه.



شکل ۲- شماتیک جانبی وضعیت قرارگیری تخته‌گاه‌ها (P_1 و P_2 و ..) و موانع (B_1 و B_2 و ..) در طول لترال.

برای تعیین بافت خاک، نمونه‌برداری در عمق ۵۰ سانتیمتری (متوسط عمق قرارگیری لترال‌ها) انجام شد که بر اساس نتایج بدست آمده در آزمایشگاه خاک، بافت محل مورد مطالعه عموماً شنی-لومی می‌باشد. جزییات آزمایش بافت خاک در جدول ۱ آمده است.

آب لازم برای آبیاری پایلوت تحت مطالعه با $EC=2800$ میکرومhos بر سانتیمتر از شبکه آبرسانی تحت فشار و چاه عمیق موجود در دانشگاه یزد تامین گردید. دور آبیاری پایلوت مذکور طبق حق‌آبه آن ۱۴ روزه تعیین و آزمایش‌های میدانی عمدتاً در مهر ماه انجام شد.

برای تعیین دبی آب ورودی به لترال تحت مطالعه، با اندازه‌گیری مستقیم متوسط حجم آب ورودی V_{av} ، توسط کنتور حجمی با دقت 0.01 لیتر و زمان t بوسیله کرنومتر با دقت 0.01 ثانیه اقدام شد. در مواردی که دبی آب لازم حدود یک لیتر بر ثانیه بود، از ظرف ۵۰ لیتری استفاده شد و زمان پر شدن آن توسط کرنومتر اندازه‌گیری گردید. این عمل سه بار تکرار شد و با متوسط‌گیری زمان‌های بدست آمده، نهایتاً دبی آب طبق رابطه $I_f = V_{av} / t$ بدست آمد.

برای اندازه‌گیری بار هیدرولیکی (هد-فشار) آب در هر تخته‌گاه، با فرو کردن قطعه چوب باریک و مستقیمی به داخل لوله متصل به سه راهی جایگزین شده با خم بالای مانع در انتهای تخته‌گاه، و یا لوله هواکش تعبیه شده در وسط تخته‌گاه و هواکش انتهایی آخر تخته‌گاه انتهایی، و اندازه‌گیری طول قسمت خیس شده چوب با خط کش مدرج میلیمتری، اقدام گردید.

جدول ۱- مشخصات خاک پایلوت تحت مطالعه.

رس	لای	شن	بافت
۱۳٪	۲۷٪	۶۰٪	شنی-لومی

نتایج میدانی و بحث

لازم به توضیح است که برای تعیین مشخصات هیدرولیکی لوله‌های تراوای زیرسطحی تحت مطالعه بایستی افت فشار ناشی از جریان آب در طول لوله (لترال) بسیار کم و قابل صرف‌نظر باشد. مطالعه قبلی نشان داد چنانچه دبی آب ورودی به لترال‌های ۵۰-۶۰ متری (با قطر خارجی ۶۳ میلیمتر) زیاد (بیش از ۳ لیتر بر ثانیه) باشد، تغییرات فشار موضعی آب (هد)، در طول لترال نیز قابل ملاحظه و در نتیجه تراوایی آن نیز غیر یکنواخت خواهد بود. طبق قانون پوازیه، افت فشار ΔP در لوله (بدون سوراخ و نشست) به طول l و شعاع R حامل جریان آب با دبی I_f از معادله زیر بدست می‌آید:

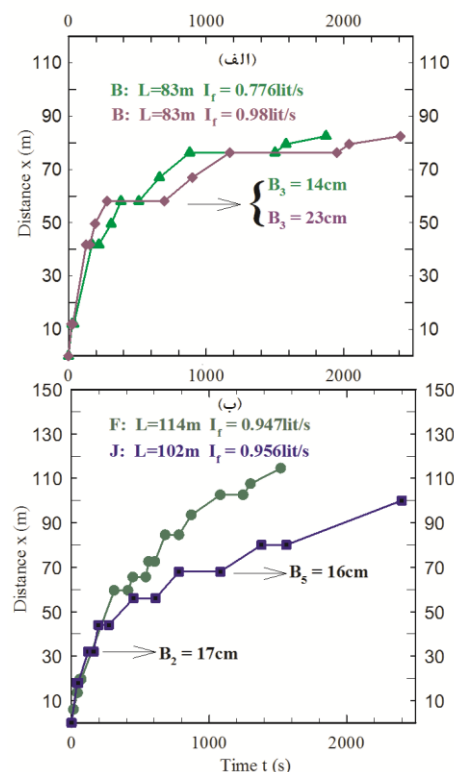
$$\Delta P = \frac{\eta l I_f}{\pi R^4} \quad (1)$$

که در آن $\eta = 10^{-3} \text{ pa.s}$ (بر حسب پاسکال-ثانیه) گرانروی آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد. این معادله می‌رساند اگر دبی آب ورودی به لوله ۶۳ میلیمتری (با قطر داخلی ۶۰ میلیمتر) برابر با ۱/۵ لیتر بر ثانیه باشد، افت فشار در طول یک تخته‌گاه نوعی بلند ($l=30m$) حد اکثر $\Delta P = 141 \text{ pa}$ (معادل ۱/۴۱ سانتیمتر آب) و قابل صرف‌نظر می‌باشد. صادق زاده و ملکی نژاد در پژوهش خود (۲۰۲۳) نشان دادند که استفاده از لوله‌های کم سوراخ و دبی کم (کمتر از ۱/۵ لیتر بر ثانیه)، راهکار مناسب می‌باشد و در این پژوهش از لوله‌هایی با چگالی $n=4$ سوراخ بر متر که قطر هر سوراخ ۶ میلیمتر (مساحت کل سوراخ‌ها ۱/۱۳ سانتیمتر مربع در متر لوله) بود استفاده گردید تا اینکه حد اکثر سرعت حرکت جبهه آب در لترال و به تبع یکنواختی آبیاری حاصل گردد.

حرکت جبهه‌ی آب در فاز پیشروی

با شروع فرایند آبیاری هر لترال، ابتدا جبهه آب به انتهای تختگاه اول رسیده و بتدریج آن را پر کرده تا اینکه تراز سطح آب (هد آن) به اندازه و بیشتر از ارتفاع مانع اول گشته و با گذشت زمان (و افزایش هد) مقداری از دبی وردی در طول تختگاه اول نشت کرده و مقداری از آن هم به تختگاه دوم سرریز می‌شود. با گذشت زمان، جبهه‌ی آب به انتهای تختگاه دوم رسیده و این فرایند تا آخرین تختگاه تکرار می‌شود. وجود مانع سیفونی در انتهای هر تختگاه موجب توقف موقت حرکت جبهه‌ی آب و به تبع تاخیر در آگیری تختگاه بعدی آن و کند شدن فرایند آبیاری می‌گردد. هرچه ارتفاع مانع سیفونی بیشتر باشد زمان پرشدگی تختگاه نیز افزایش می‌یابد. متوسط ارتفاع موانع در حد حداقل ارتفاع دو خم متوالی در سیفون اندازه ۶۳ میلیمتر (حدود ۱۴ سانتیمتر) می‌باشد. چنانچه ارتفاع حتی یکی از موانع در مسیر جریان آب در لترال، از این مقدار بیشتر باشد، این پدیده نه تنها موجب تاخیر در حرکت جبهه آب در تختگاه‌های بعدی می‌گردد، بلکه تراوایی تختگاه مربوطه هم افزایش می‌یابد (به دلیل افزایش هد) و دبی جریان آب سرریز شده به لترال بعدی هم کاهش یافته و موجب کندی حرکت جبهه‌ی آب در لترال می‌گردد. بنا بر این سرعت حرکت جبهه‌ی آب در طول لترال نه تنها به دبی آب ورودی، بلکه به تعداد موانع (تعداد تختگاه‌ها که متناسب با طول لترال می‌باشد) و ارتفاع آنها نیز بستگی دارد. نتایج میدانی حرکت جبهه‌ی آب در تختگاه‌های مختلف و دبی‌های متفاوت، در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که در تعدادی از لترال‌ها تعداد نقاط آزمایش بیش از تعداد تختگاه‌ها موجود در آن می‌باشد. شکل ۳ (الف)، تاثیر ارتفاع مانع در حرکت آب در لترال B به طول ۸۳ متر که دارای ۴ مانع (۵ تختگاه) است را نشان می‌دهد. نمودار سبز رنگ برای حالتی است که دبی آب ورودی ۰/۷۷۶ لیتر بر ثانیه و متوسط ارتفاع موانع ۱۳/۷۵ سانتیمتر و زمان رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای آن ۱۸۷۰ ثانیه بود و نمودار قهوه‌ای رنگ برای حالتی که ارتفاع مانع سوم آن به ۲۳ سانتیمتر افزایش یافت و علیرغم اینکه دبی آب ورودی به لترال بیشتر بود ولی زمان رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای لترال، به ۲۴۱۰ ثانیه افزایش یافته که این پدیده موجب عدم یکنواختی توزیع آب در طول لترال گشته است.

شکل ۳ (ب) نیز تاثیر ارتفاع مانع در حرکت آب با دبی تقریباً یکسان در لترال F به طول ۱۱۴ متر که دارای ۸ مانع (۹ تختگاه) و لترال ۱۰۲ متری J که دارای ۶ مانع است را نشان می‌دهد. مقایسه دو نمودار می‌رساند که علیرغم اینکه لترال دوم کوتاهتر و یک مانع کمتر دارد ولی زمان رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای لترال بیش از لترال طویل ۱۱۴ متری بوده و دلیل آن فقط وجود دو مانع سیفونی ۱۷ و ۱۶ سانتیمتری در لترال کوتاهتر J می‌باشد.



شکل ۳- حرکت جبهه‌ی آب در: الف) لترال ۸۳ متری با دو مقدار دبی آب ورودی متفاوت، و ب) در دو لترال با طول‌های ۱۱۴ و ۱۰۲ متری ولی با دبی آب تقریباً یکسان.

تغییرات زمانی هد آب در تختگاه‌های لترال

برای ارزیابی مشخصات هیدرولیکی این سامانه آبیاری، لازم است تغییرات زمانی هد (فشار موضعی) آب در طول لترال در کل مدت آبیاری اندازه‌گیری گردد. مسلماً هد آب در هریک از بخش‌های (تختگاه‌های) لترال به دبی آب ورودی به لترال، شماره تختگاه (فاصله از ابتدای خط)، ارتفاع موانع ماقبل آن، زمان از شروع فرایند آبیاری، بافت خاک و درصد رطوبت خاک آن بستگی دارد. از طرفی میزان تراوایی موضعی لوله مذکور نیز به هد آب و ویژگی‌های خاک اطراف آن بستگی دارد که در آزمون‌های با مشخصات مندرج در جدول ۲ و با کمیت آب آبیاری در واحد طول تقریباً یکسان (۵۰ تا ۶۰ لیتر در متر) انجام شد و در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

شکل ۴ نتایج میدانی دو آزمون ۱ و ۲ که بر روی لترال‌های G و F با طول (۱۱۴ متر) و تعداد موانع یکسان ولی با دبی آب ورودی متفاوت انجام شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در لترالی که دبی آب ورودی به آن بیشتر بوده زمان رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای لترال بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. پس از رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای لترال، تراز آب (هد) در آخرین تختگاه بالا آمده و با گذشت زمان، با تراز آب در تختگاه ماقبل آن یکسان گشته و در ادامه فرایند آبیاری و افزایش هد آب، تراز سطح آب یکسان دو تختگاه انتهایی با تختگاه ماقبل بعدی (سومین تختگاه از آخر) نیز برابر می‌شود. چنانچه مدت کل آبیاری طولانی باشد، تراز آب در تعداد بیشتری از تختگاه‌های انتهایی یکسان می‌گردد. مثلاً در آزمون شکل ۴ (الف)، بعد گذشت ۳۰۰۰ ثانیه از شروع آبیاری بجز دو لترال ابتدایی، تراز آب در بقیه لترال‌ها یکسان گشته و این پدیده منجر به غیریکنواختی توزیع آبیاری می‌شود. در آزمون شکل ۴ (ب)، که دبی آب ورودی به لترال کمتر از آزمون قبلی است نه تنها هد آب در تختگاه انتهایی کمتر، بلکه در پایان آبیاری تعداد تختگاه‌هایی که سطح آب در آنها یکسان است نیز کمتر از حالت قبل است. حالت ایده‌آل

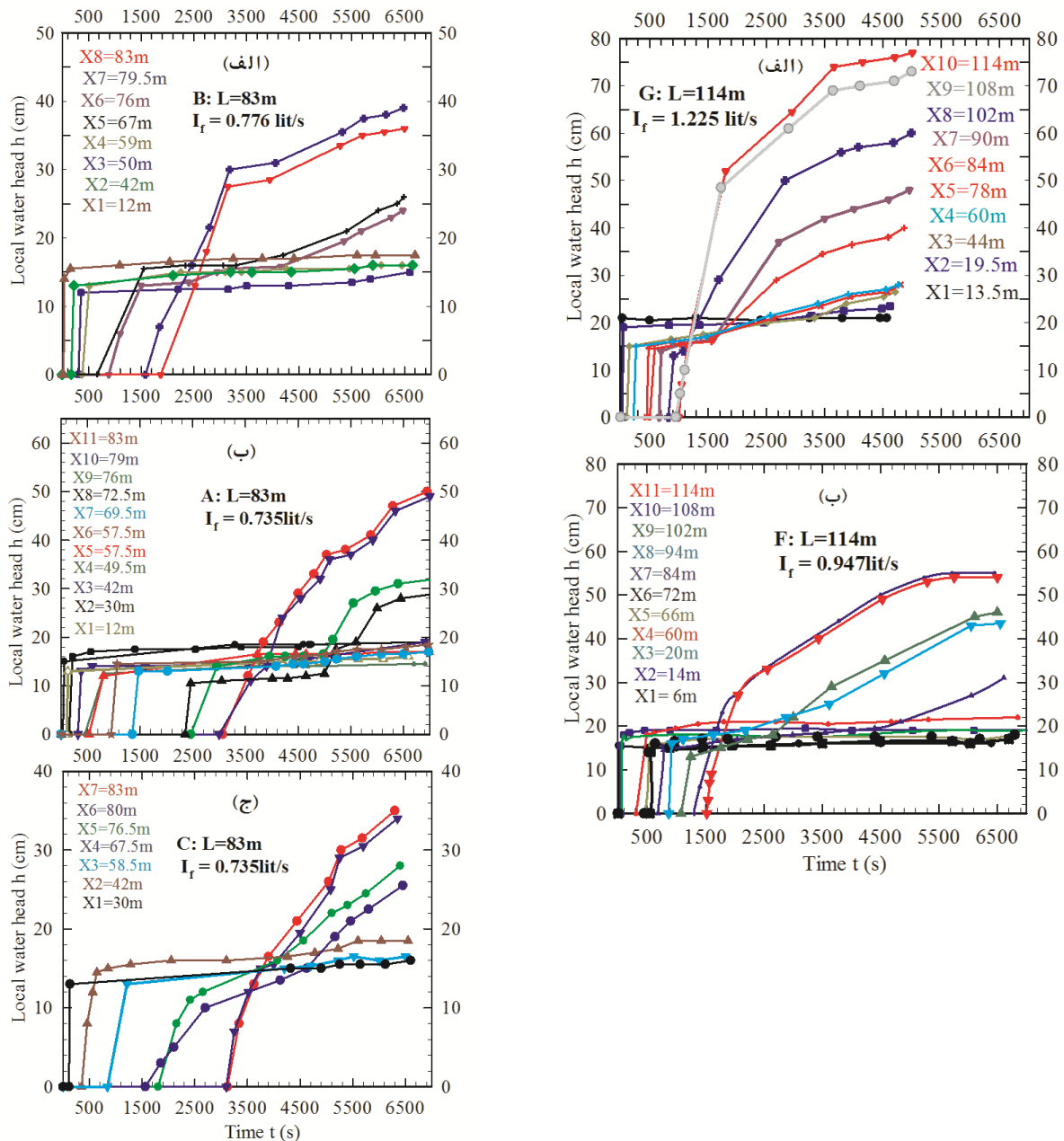
این است که هد آب در تمام لترال‌ها یکسان و زمان رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای لترال کوتاه باشد ولی مشاهده می‌گردد که هد آب فقط در چند تختگاه ابتدای لترال تقریباً ثابت می‌باشد و در مقابل هد آب در تختگاه‌های آخر بیشتر از اولین‌ها بوده ولی مدت زمان آبیاری آنها کمتر است.

جدول ۲- مشخصات لترال‌ها در آزمون‌های تغییرات زمانی هد آب در تختگاه‌های متوالی.

آزمون	لترال	طول	دبی آب		زمان		حجم			
			به لترال	ورودی	رسیدن آب	کل	کل آب	متوسط		
	لترال	لترال	I _f (lit/s)	لترال	به انتهای	آبیاری	لترال	V (lit)	تراوایی واحد	پارامتر روزنه
		L(m)		T _r (s)		T _i (s)		q _{av} (mlit/s.m)		
1	G	114	1.225	1000		4560		5586	10.745	0.586
2	F	114	0.947	1520		6400		6060	7.83	0.49
3	B	83	0.776	1870		6400		4996	9.34	0.638
4	A	83	0.735	3065		6950		5108	8.855	0.625
5	C	83	0.735	3120		6300		4630	8.855	0.67
6	J	102	0.735	3900		7000		5140	7.2	0.69
7	F*	114	0.735	2400		8700		6400	6.447	0.43

* این آزمون در اواسط آذر ماه انجام شده است.

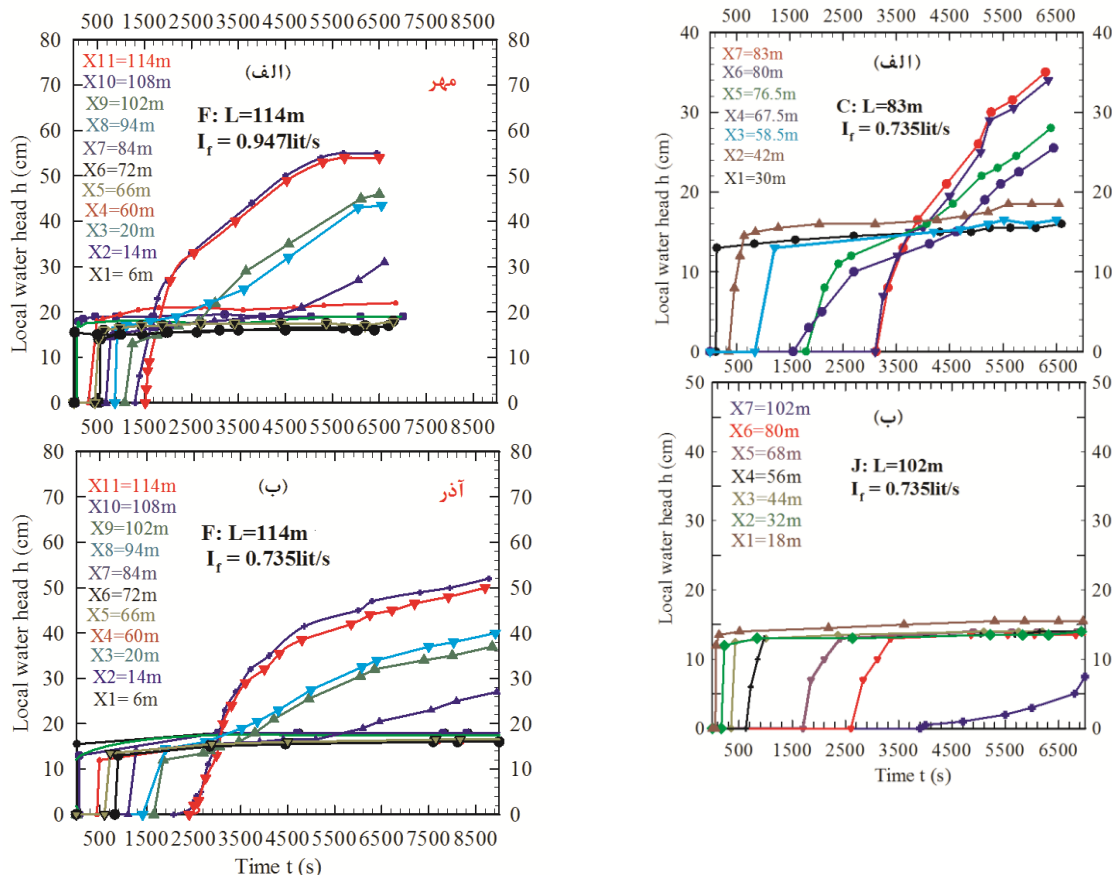
شکل ۵ تغییرات زمانی هد آب در تختگاه‌های سه لترال B و A و C با طول یکسان ۸۳ متر و دبی تقریباً برابر (۰/۷۸-۰/۷۴ لیتر بر ثانیه) و تعداد موانع بترتیب ۶ و ۷ و ۵ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که زمان رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای لترال B کمتر از دو لترال دیگر است که ناشی از دبی آب ورودی بیشتر به آن نسبت به دولترال دیگر می‌باشد. هرچند تفاوت‌های جزئی در نتایج این سه آزمون وجود دارد ولی می‌تواند تاییدی بر اصل تکرار پذیری باشد.



شکل ۴- تغییرات زمانی هد آب در تخته‌گاه‌های دو لترال با طول یکسان و (الف) دبی ۱/۲۲۵ و (ب) دبی ۰/۹۴۷ لیتر بر ثانیه.

شکل ۵- تغییرات زمانی هد آب در تخته‌گاه‌های سه لترال با طول یکسان و دبی تقریباً برابر و تعداد موانع (الف) ۶، (ب) ۷ و (ج) ۵.

شکل ۶ تغییرات زمانی هد آب در تخته‌گاه‌های دو لترال با دبی یکسان ۰/۷۳۵ لیتر بر ثانیه و طول‌های ۸۳ متر و ۱۰۲ متر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که زمان رسیدن جبهه‌ی آب به انتهای لترال ۸۳ متری (شکل ۷ الف) بمراتب کمتر از لترال ۱۰۲ متری (شکل ۷ ب) می‌باشد، مضافاً اینکه، تراز سطح آب در تخته‌گاه آخر لترال طویل نیز کمتر از هد آب در سایر تخته‌گاه‌های آن لترال می‌باشد، بعبارتی آب دریافتی تخته‌گاه آخر کمتر از لترال ماقبل آن و بقیه تخته‌گاه‌ها می‌باشد و در نتیجه توزیع یکنواختی آبیاری در تخته‌گاه‌های این لترال (J) مطلوب نمی‌باشد.



شکل ۶ - تغییرات زمانی هد آب در تخته‌گاه‌های دو لترال با دبی ۰/۷۳۵ لیتر بر ثانیه و طول‌های، الف) ۸۳ متر و ب) ۱۰۲ متر در دو زمان از سال، الف) مهر و ب) آذر. شکل ۷ - تغییرات زمانی هد آب در تخته‌گاه‌های لترال F که دارای ۹ تخته‌گاه و ۸ مانع سیفون‌گونه است، در دو زمان متفاوت از سال (مهر و آذرماه) را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً اشاره شد، تراوایی این سیستم زیرسطحی به درصد رطوبت اولیه خاک نیز بستگی دارد. در مهر ماه که تابش خورشید بیش از آذر است، میزان جذب آب توسط درختان بمراتب بیش از آذر ماه و به تبع میزان رطوبت خاک کمتر بوده و در نتیجه متوسط تراوایی لترال بیشتر و لذا از دبی آب ورودی بیشتری در فرایند آبیاری استفاده شد، بر عکس، در آذر ماه علیرغم اینکه دور آبیاری طولانی ۴۰ روز بود، رطوبت نسبی خاک بیشتر، و دبی لازم برای آبیاری کمتر (۰/۷۳۵ لیتر بر ثانیه) کفایت می‌کند. از مقایسه تغییرات زمانی هد تخته‌گاه‌های ابتدای خط، در می‌یابیم که با کاهش دبی آب ورودی به لترال، هد آب در تخته‌گاه‌های ابتدای خط نیز کاهش می‌یابد که این پدیده ناشی از کاهش مقاومت جریان در اثر عبور آب از دو خم بالای هر مانع می‌باشد. از این آزمون‌ها نتیجه می‌گیریم که دبی بهینه و لازم برای آبیاری لترال نه تنها به طول آن بستگی دارد بلکه به زمان (از سال) انجام فرایند آبیاری نیز بستگی دارد.

ارزیابی یکنواختی آبیاری

نشت (نفوذ) آب از لوله تراوا به خاک، بواسطه نیروی ثقلی (در جهت قائم) و نیروی موئینگی (در همه جهات) صورت می‌گیرد. در ابتدای آبیاری، که خاک غیر اشباع و منافذ موئین خالی از آب است، نیروی موئینگی (ناشی از پتانسیل ماتریک خاک) در همه جهات اعمال می‌شود ولی بتدریج که منافذ خاک از آب اشباع شود، تنها نیروی ثقلی عامل نشت می‌باشد. در

شرایطی که دبی آب ورودی به لوله تراوا (نشت یافته به خاک)، ثابت باشد، با گذشت زمان از شروع آبیاری، منطقه اشباع اطراف لوله در جهت افق (جانبی) و عمقی وحتى در قسمت بالای لوله تراوا، گسترش می‌یابد و در اثر نیروی موئینگی، آب بالا می‌آید و خاک را اشباع می‌کند. هر چه دبی آب ورودی به لوله کمتر (به تبع هد آب در لوله کمتر) باشد حاشیه موئینگی (capillary fringe) تشکیل شده در بالای لوله کمتر است و در نتیجه تبخیر از سطح خاک، نیز کمتر و راندمان آبیاری افزایش می‌یابد و این مزیت اصلی استفاده از شرایط کم فشار در این سیستم نوین آبیاری می‌باشد. نتایج میدانی نشان داده شده در شکل‌های ۴ الی ۷ می‌رساند که متوسط هد آب در طول لترال‌ها در گستره ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتر و عبارتی کمتر از عمق کارگذاری لوله‌ها بوده و لذا اطلاق اصطلاح "ثقلی و بی فشار" برای این سیستم آبیاری منطقی است.

از جنبه فیزیکی، سرعت خروج آب از سوراخی که تحت هد h و در محیط آزاد (هوا) قرار دارد برابر با $\sqrt{2gh}$ می‌باشد و لذا آهنگ نشت از واحد طول q از لوله سوراخدار مدفون در بستر خاکی نیز به هد (فشار آب اعمالی) h و چگالی سوراخ‌ها n بستگی دارد (صادق زاده و ملکی نژاد (۲۰۲۳)، شوالر و زیل (۲۰۱۵) و زمانی و فتاحی (۲۰۱۹)):

$$q = n a \sqrt{h} \quad (۲)$$

که در آن a پارامتر روزنه که به قطر (مساحت) و ضخامت روزنه (ضخامت لوله) و ویژگی‌های محیط اطراف آن (پوشش لوله و شرایط فیزیکی خاک) بستگی دارد. به بیان دقیق‌تر، پارامتر روزنه که بنحوی مشخصه هیدرولیکی هر روزنه می‌باشد، به میزان رطوبت و به نفوذپذیری منطقه اشباع اطراف لوله، به عبارتی به بافت خاک نیز بستگی دارد. از طرفی مقدار آب ورودی به هر لترال V در فرایند آبیاری در مدت T_i ، در تخته‌گاه‌های متوالی آن، طبق معادله زیر به خاک نشت می‌کند:

$$V = I_f T_i = \sum l_j v_{1j} \quad (۳)$$

که در آن l_j طول تخته‌گاه j ام و v_{1j} مقدار آب نشت یافته در واحد طول (در هر متر) آن است که در مدت زمان آبیاری (از لحظه رسیدن آب به آن T_{0j} ، تا لحظه اتمام آبیاری T_i) دریافت کرده است و طبق این مدل فیزیکی، برابر است با:

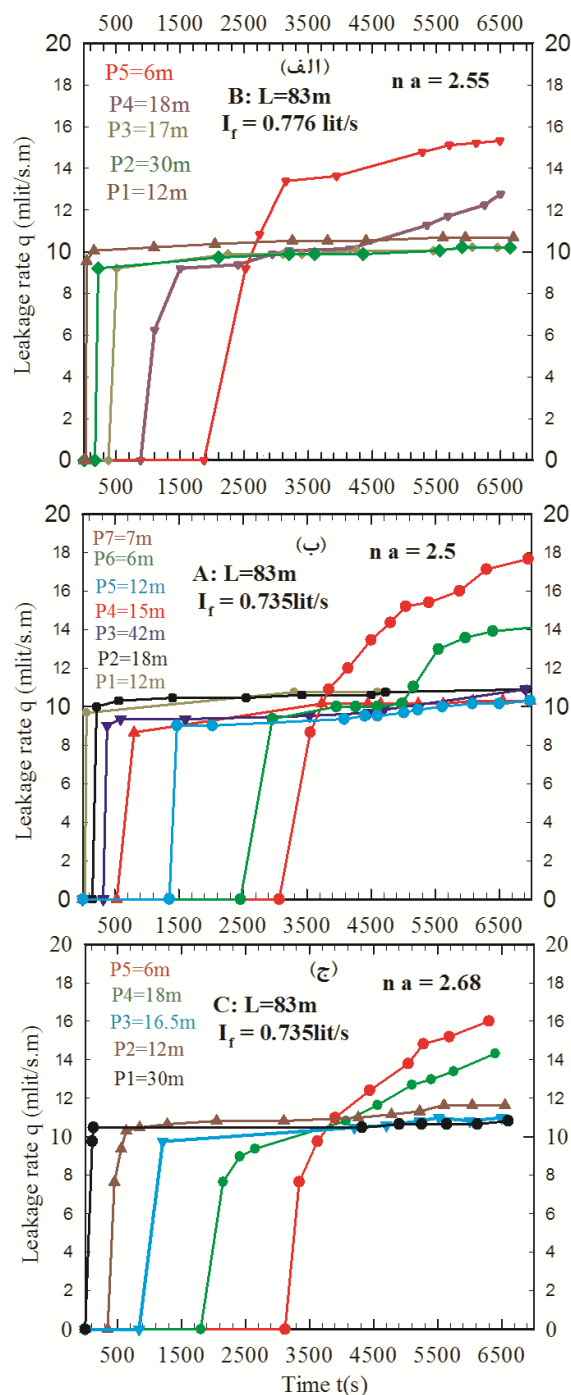
$$v_{1j} = \int_{T_{0j}}^{T_i} q_j dt = \int_{T_{0j}}^{T_i} n a \sqrt{h_j} dt \quad (۴)$$

با انتگرال‌گیری از منحنی تغییرات زمانی جذر هد (اندازه‌گیری شده) در تخته‌گاه‌های موجود در هر لترال می‌توان پارامتر کلی روزنه‌ها $A = na$ و به تبع پارامتر روزنه a ، را طبق معادله زیر و با روش سعی و خطا بدست آورد:

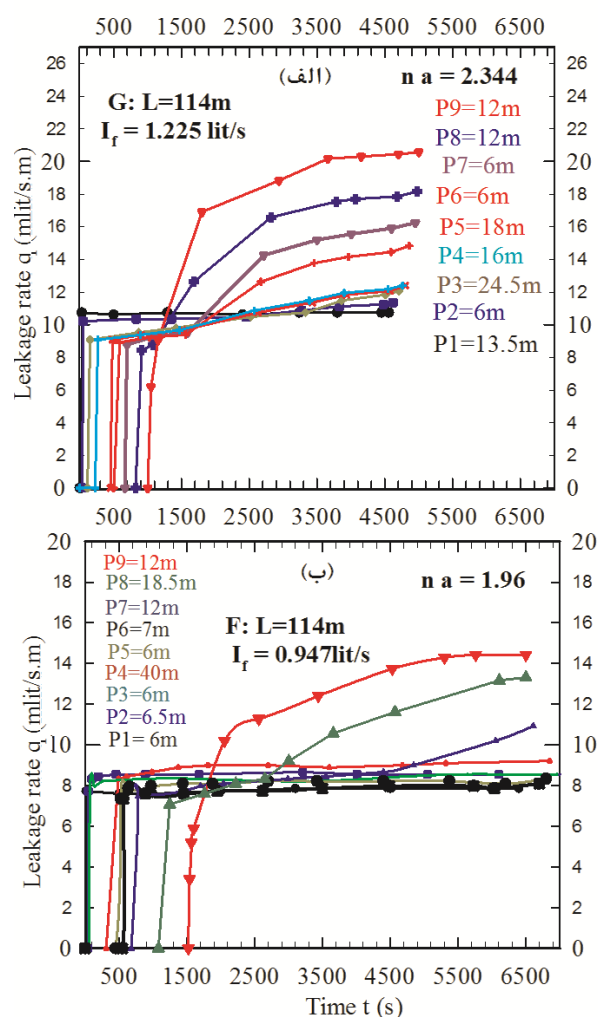
$$V = na \sum l_j \int_{T_{0j}}^{T_i} \sqrt{h_j} dt \quad (۵)$$

و در نتیجه تغییرات زمانی تراوایی در بخش‌های مختلف (در تخته‌گاه‌های) هر لترال طبق معادله (۲) شبیه سازی گردید و نتایج در جدول ۲ و شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است. از بررسی کلی این نمودارها در می‌یابیم که تراوایی لوله‌های این سامانه در فشار پایین (هد ۲۰ سانتیمتر آب) حدود ۱۰ میلی لیتر بر ثانیه بر متر بوده که بیش از ۱۰۰ برابر تراوایی لوله‌های سفالی مدفون در خاک مشابه و در هد اعمالی تقریباً یکسان می‌باشد (نتایج داس گاپتا و همکاران (۲۰۰۹)) و این مزیت منحصر بفرد این سامانه نوین آبیاری قلمداد می‌گردد.

مقادیر بدست آمده برای پارامتر روزنه موید این است که با افزایش دبی آب ورودی (افزایش آهنگ تراوش از لوله) پارامتر روزنه هم افزایش می‌یابد که در توافق با نتایج پژوهش صادق زاده و ملکی نژاد (۲۰۲۳) بوده ولی کاهش ضریب کلی روزنه‌ها $A = na$ نسبت به گزارش قبلی به دانسیته پایین سوراخ‌ها و دبی کمتر آب ورودی به لترال مربوط می‌شود.

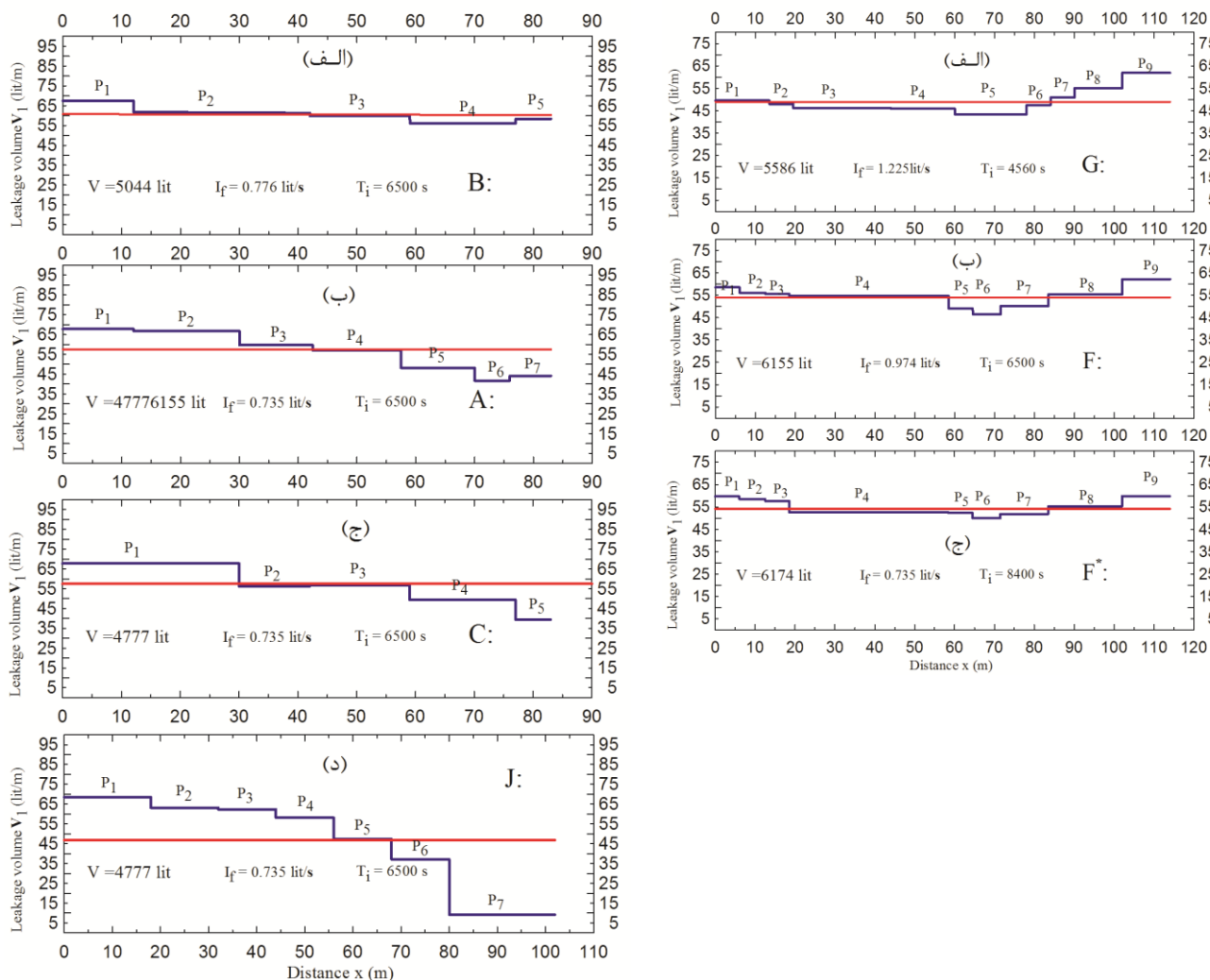


شکل ۹ - نتایج شبیه‌سازی تغییرات زمانی تراوایی واحد طول q درختگاه‌های سه لترال با طول یکسان و الف) دبی ۰/۷۷۶ (ب) دبی ۰/۷۳۵ (ج) ۰/۷۳۵ لیتر بر ثانیه (ممتناظر با نتایج تجربی شکل ۵).



شکل ۸ - نتایج شبیه‌سازی تغییرات زمانی تراوایی واحد طول q درختگاه‌های دو لترال با طول یکسان و الف) دبی ۱/۲۲۵ و ب) دبی ۰/۹۴۷ لیتر بر ثانیه (ممتناظر با نتایج تجربی شکل ۴).

یکنواختی توزیع آب در طول لترال، یکی از مهم‌ترین ملاک‌های ارزیابی سامانه‌های آبیاری است. موانع سیفونی و تختگاه‌ها عملاً باعث افزایش انرژی پتانسیل فشاری و در نتیجه افزایش یکنواختی پخش آب در طول خط لوله می‌شوند. معادله (۴) موید این اینست که سطح محصور بین هر یک از نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹، برابر با مقدار آب نشت یافته در واحد طول V_1 هر تختگاه می‌باشد و لذا می‌تواند سنج مناسبی برای ارزیابی یکنواختی توزیع آب آبیاری در لترال‌های تحت مطالعه باشد. شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی تغییرات آب نشت یافته در واحد طول V_1 در تختگاه‌های لترال‌های با طول یکسان ۱۱۴ متری و با سه دبی آب ورودی متفاوت را نشان می‌دهد. از این شکل نتیجه می‌گیریم که تختگاه‌های میانی کمتر از تختگاه‌های ابتدایی و انتهایی لترال آبیاری شده‌اند. از مقایسه هریک از نمودارها با خط قرمز (متوسط آب نشت یافته در واحد طول در لترال) در می‌یابیم که توزیع آب در طول این لترال‌ها تا حدی یکنواخت می‌باشد. اما این ویژگی برای نمودارهای ب و ج شکل ۱۱ وجود ندارد. از مقایسه نمودارهای شکل ۱۱ در می‌یابیم که در شرایطی که دبی آب ورودی به لترال کافی نباشد، تختگاه‌های انتهایی کمترین مقدار آب را دریافت کرده و توزیع آب در طول لترال یکنواخت نمی‌باشد و این نقیصه در لترال J (با طول ۱۰۲ متر و دبی 0.735 lit/s) بسیار شدید می‌باشد. هر چند در لترال‌های تحت مطالعه، آب نفوذی به خاک در تختگاه‌های ابتدایی بیش از تختگاه‌های میانی می‌باشد ولی می‌توان با کاهش ارتفاع موانع ابتدایی (B_1 و B_2 و B_3) و اتصال سرریز تختگاه آخر به لترال بعدی این عیب را مرتفع ساخت و یکنواختی توزیع آبیاری را بهبود بخشید. خلاصه اینکه در شرایطی که دبی آب ورودی به لترال متناسب بوده، می‌توان انتظار داشت یکنواختی توزیع آب در طول لترال مطلوب باشد.



شکل ۱۱- نتایج شبیه‌سازی تغییرات آب نشت یافته در واحد طول V_1 در تخته‌گاه‌های لترال‌های با طول یکسان ۸۳ متر: (الف) با دبی ورودی $I_f = 0.776 \text{ lit/s}$ ، (ب) با دبی ورودی $I_f = 0.735 \text{ lit/s}$ ، و (ج) با دبی ورودی $I_f = 0.735 \text{ lit/s}$ و طول ۱۰۲ متر و دبی ورودی $I_f = 0.735 \text{ lit/s}$. نمودارهای قرمز متوسط آب نشتی به واحد طول در هر لترال را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی تغییرات آب نشت یافته در واحد طول V_1 در تخته‌گاه‌های لترال‌های با طول یکسان: (الف) با دبی ورودی $I_f = 1.125 \text{ lit/s}$ ، (ب) با دبی ورودی $I_f = 0.974 \text{ lit/s}$ ، و (ج) با دبی ورودی $I_f = 0.735 \text{ lit/s}$. نمودارهای قرمز متوسط آب نشتی به واحد طول در هر لترال را نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

به‌کارگیری سامانه‌های نوین آبیاری زیرسطحی ثقلی یکی از گزینه‌های کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی خرده مالکیتی در مناطق خشک می‌باشد. در روش آبیاری زیرسطحی لوله تراوای ثقلی، آب مورد نیاز گیاه در فشار بسیار کم، از طریق لوله‌های مشبک پوشیده با پارچه پلاستیکی و مدفون در خاک، مستقیماً در اختیار ریشه قرار می‌گیرد. یکی از چالش‌های این سامانه نوین آبیاری عدم یکنواختی توزیع آب نشتی در طول لترال‌های شیب‌دار می‌باشد. در این پژوهش آزمایش‌های هیدرولیکی

بر روی لترال‌های پلکانی با موانع سیفونی با ارتفاع ۱۴ سانتیمتر با طول‌های ۸۳، ۱۰۲ و ۱۱۴ متر و با دبی آب ورودی ۰/۷۳۵ تا ۱/۱۲۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد که سرعت پیشروی جبهه‌ی آب در طول لترال نه تنها به دبی آب ورودی، بلکه به تعداد موانع سیفونی (و تعداد تختگاه‌ها) و ارتفاع آنها نیز بستگی دارد. موانع سیفونی و تختگاه‌ها عملاً باعث افزایش انرژی پتانسیل فشاری و در نتیجه افزایش یکنواختی پخش آب در طول خط لوله می‌شوند. نتایج نشان داد که دبی بهینه و لازم برای آبیاری لترال نه تنها به طول آن، بلکه به زمان (از سال) انجام فرایند آبیاری نیز بستگی دارد. همچنین مشخص شد تراوایی لوله‌های این سامانه زیرسطحی بیش از ۱۰۰ برابر تراوایی لوله‌های سفالی در بار هیدرولیکی مشابه می‌باشد. یکنواختی توزیع آب در تختگاه‌های لترال با استفاده از یک مدل فیزیکی برای رابطه نشت - فشار شبیه سازی شد. نتایج موید این است آب نفوذی به خاک در تختگاه‌های ابتدای لترال بیش تختگاه‌های میانی و انتهایی می‌باشد. چنانچه دبی آب ورودی متناسب با طول لترال و زمان (از سال) و بیش از مقدار بهینه باشد، می‌توان انتظار داشت با کاهش ارتفاع موانع سیفونی ابتدایی و اتصال سرریز تختگاه آخر به لترال بعدی، یکنواختی آبیاری مطلوب حاصل گردد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از گزارش علمی طرح پژوهشی شماره ۸۳/۴۳۶ مورخ ۱۴۰۳/۷/۲۲ بوده و نویسندگان از حمایت‌های مالی و فنی بخش تحقیق و توسعه شرکت نو آبیاران بوستان مهر تشکر و قدردانی را دارند.

منابع مورد استفاده

- Alihoury, M, and Alizadek, A, 2006. Operation and Hydraulic Characteristics of Porous Pipes at Different Pressures, Joernal of Water and Soil Sciences, Vol. 20(1) pp. 144-154.
- Ashrafi, S, and Kanani, E, 2023. Investigating the Effect of Hydrolic Pressure on the Clogging of Clay Emitters in Subsurface Irrigatin Systems. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, Vol. 16(6), pp. 1233-1244.
- Das Gupta, A, Singh Babel, M, and Ashrafi, S, 2009. Effect of Soil Texture on the Emission Characterictics of Porous Clay Pipe for Subsurace Irrigation. Irrigation Science Vol. 27, pp. 201-208. Doi 1.1007/s00271-008-0129-9.
- Dastorani, MT, Heshmeti, M, and Sadeghzadeh, MA, 2007. Optimistion of Irrigation System in Arid Land Pistachio Orchards. BIABAN (Desert Journal) Vol. 12, pp. 53-60
- Dastorani, MT, Heshmeti, M, and Sadeghzadeh, MA, 2010. Evaluation of the efficiency of surface and subsurface irrigation in dry land environments. Irrigation and Drainage, Vol. 59(2) pp. 129-137.
- Fallah Morsali, M, Ramazani Etedali, H, Bijankhan, M, and Mahdavi Mazdeh, M, 2023. Evaluating the Application of Atomatic Flow Control Valves to Increase the Water Uniformity Distribution in the Drip Irrigation System in Slopy Lands and Modeling by EPANET Software (Case Study: Bargin Park, Qazvin). Irrigation Science and Engineering Vol. 46(2), pp.59-73.
- Melekinezhad, H, 2003. Water Use Efficiency and Crop Yeild Under Pot and Furrow Irrigatin Systems, Agric. Sci. Natur. Resour. Vol. 10(1), pp. 27-37.
- Sadeghzadeh, MA, Jannati, M, and Melekinezhad, H, 2022. Solar-Thermophysical J. Irrigation Instrument for Container Plants, Irrigation Drainage Engineering Vol. 148(7): 04022019. Doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001686.
- Sadeghzadeh, MA, and Melekinezhad, H, 2023. Assessment of the Pressure and Discharge Rate Perforated Lateral Pipes Variations Along the

of Novel Subsurface Irrigation System.
Irrigation Sciences and Engineering Vol. 45(1),
pp. 85-97. Doi 10.22055/jise.2021.36492.1995.

Schwaller, J, and Zyl, JE, 2015. Modeling the
Pressure Lakage Response of Water
Distribution Systems Based on Individual
Behavior. J. Hydroul. Eng. Vol. 141, 04014089.

Zamani, S, and Fattahi, R, 2019. Investigating
on the Orifices Outflow with Different
Diameters and Envelops in the Subsurface
Irrigation System. Journal of Irrigation and
Water Engineering Vol. 7(2) pp. 127-141. (In
Persian).