

## ارزیابی توزیع مجدد جبهه پیشروی آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی

بختیار کریمی<sup>1\*</sup>، فرهاد میرزایی<sup>2</sup> و تیمور سهرابی<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 91/03/16 تاریخ پذیرش: 91/11/04

<sup>1</sup> - استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، ایران

<sup>2</sup> - به ترتیب، استادیار و استاد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [Bakhtiar.Karimi@gmail.com](mailto:Bakhtiar.Karimi@gmail.com)

### چکیده

یکی از راهکارهای بهبود مدیریت در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در نظر گرفتن توزیع مجدد آب در جهات مختلف (افقی، عمودی، شعاعی و خیز به سمت بالا) می‌باشد که به نوبه خود قابل بررسی است. در این تحقیق جبهه توزیع مجدد پیشروی آب برای سه نوع خاک با بافت مختلف (بافت سبک، متوسط و سنگین) بعد از 6 ساعت از زمان آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت و تا 68 ساعت پس از آبیاری مقادیر جبهه پیشروی توزیع مجدد اندازه‌گیری شد. این آزمایشات در یک محفظه پلاستیکی گلاس به ابعاد مشخص و با دیواره شفاف به انجام رسید. در این تحقیق قطره‌چکان‌ها در 4 عمق نصب مختلف (صفر، 15، 30 و 45 سانتیمتری) قرار گرفتند و مقدار دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها (در دو تیمار 2/4 و 4 لیتر در ساعت) نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و برای سه نوع خاک مورد بررسی مقادیر توزیع مجدد در جهت افقی و عمودی برای دبی‌های کم بیشتر از دبی‌های زیاد می‌باشد. اما در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی مقادیر توزیع مجدد آب در جهت افقی و عمودی برای دبی‌های زیاد بیشتر از دبی‌های کم می‌باشد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی و برای یک دبی یکسان، توزیع مجدد آب در جهت افقی برای قطره‌چکانهایی با عمق کم بیشتر از قطره‌چکانهایی با عمق زیاد می‌باشد. دلیل آن بدین صورت می‌باشد که در قطره‌چکانهای عمیق آب بیشتری صرف خیس شدن جبهه خشک بالای قطره‌چکان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای زیر سطحی، توزیع مجدد رطوبت، جبهه رطوبت، مدیریت آبیاری.

## Evaluation of Moisture Front Redistribution in Surface and Subsurface

### Drip Irrigation Systems

BKarimi<sup>1\*</sup>, F Mirzaei<sup>2</sup> and T Sohrabi<sup>2</sup>

Received: 5 June 2012 Accepted: 23 January 2013

<sup>1</sup>-Assist., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Kurdistan, Iran

<sup>2,3</sup>-Respectively, Assist. and Prof., Faculty of Agric. Engin. and Technology, Univ. of Tehran, Iran

\*Corresponding Author Email: [Bakhtiar.Karimi@gmail.com](mailto:Bakhtiar.Karimi@gmail.com)

#### Abstract

One of the strategies for improving the management of drip irrigation systems is considering the soil water redistribution in different directions (horizontal, downward, radial and upward) which can be of considerable importance. In this research, the wetting front and water redistribution in light-, medium- and heavy-textured homogeneous soils were evaluated in drip irrigation systems. Irrigation time was set to 6 hours and measurements continued until 68 hours after irrigation. Experiments were carried out in a plexiglass container with transparent walls. Emitters were installed at 15, 30 and 45 cm depths and discharge rates of 2.4 and 4 L/hr were applied. Observations of water front in surface drip irrigation showed that the water redistributed more in horizontal and vertical directions for lesser emitter discharges than the highest ones, but the contrary was observed for subsurface drip irrigation. For the same emitter discharge, the largest depth showed less water redistributed in the horizontal direction but the contrary was observed for shallow depths. This could be explained considering the dry soil area above the emitters that is larger in the deepest location.

**Keywords:** Irrigation management, Moisture front, Moisture redistribution, Subsurface drip irrigation

#### مقدمه

شده است که در زیر برخی از این مطالعات آورده شده است. بررسی توزیع رطوبت به عنوان یک موضوعی مهم هم برای تحقیقات مزرعه‌ای و هم برای مدل‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است (گیلی و آلرد 1974، برسلا 1978، دیرکسن 1978، فیلیپ 1991، کوت و همکاران 2003، توربرن و همکاران 2003). تحت شرایط مزرعه‌ای جبهه خیس و خشک شدن آب نه تنها وابسته

مطالعات زیادی در مورد نفوذ آب در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی انجام شده است. در این مطالعات بیشتر توزیع رطوبت در خاک مورد بررسی قرار گرفته است و فرض شده است که این قطره‌چکان‌ها یا منابع نقطه‌ای این آب را فراهم می‌کنند. در این مطالعات اکثراً تخمین جبهه رطوبتی آب بررسی

شده و باعث حرکت آب به سمت افقی و بالا شده و همچنین به عنوان یک لایه نفوذناپذیر از تلفات نفوذ عمقی جلوگیری می‌کند. تلاش‌های زیادی به منظور تجاری کردن این اهداف انجام گردید اما هنوز مشخص نیست که آیا هزینه اضافی این موانع و همچنین هزینه نصب آنها با توجه مزایای بالا، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است (لام و همکاران 2007). بعد از آبیاری جبهه حرکت افقی آب برای یک خاک شنی لومی خیلی کمتر از جبهه پیشروی عمودی آب است. اما برای یک خاک سیلتی لومی جبهه پیشروی آب در جهت افقی و عمودی‌کنواخت می‌باشد. در کل حرکت آب در خاک‌های سنگین بافت خیلی محدود است اما حرکت عمودی در یک خاک با بافت سبک قابل توجه است (لام و همکاران 2007). المال اغلو و دیامان توپوس (2009) توزیع مجدد رطوبت را در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی با در نظر گرفتن وجود پدیده هیستریزیس و برای دو روش مختلف آبیاری (پیوسته و متناوب) و در شرایط آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که وجود پدیده هیستریزیس باعث کاهش تلفات آب بصورت نفوذ عمقی شده و تاثیر آن در قطره‌چکان‌هایی با دبی بیشتر بیش از قطره‌چکان‌هایی با دبی کم است. نکته قابل ذکر در اکثر این مطالعات این است که توزیع رطوبتی را در شرایط مختلف مدیریتی در حین آبیاری بررسی کردند. در حالی که مطالعات کمی در ایران و جهان در زمینه توزیع مجدد آب بعد از آبیاری صورت گرفته است. یکی از پارامترهای مهمی که برای طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای بایستی در نظر گرفت، توزیع مجدد آب بعد از آبیاری می‌باشد. بسته به موقعیت نصب لاترال‌ها از سطح زمین و دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها، مقادیر توزیع مجدد آب در جهت عمودی، حرکت افقی آب و خیز جبهه آب به سمت بالا قابل بررسی است. پس یکی از اهداف این تحقیق ارزیابی توزیع مجدد آب در سیستم آبیاری قطره-

به نوع خاک، دبی قطره‌چکان بلکه بستگی به مدیریت آبیاری و مقدار آب کاربردی دارد (لام و همکاران 2007). همچنین تابع فاصله قطره‌چکان از ردیف گیاهان، عمق نصب قطره‌چکان‌ها و همچنین جذب آب توسط گیاه دارد. گریس و همکاران (1990) یک راه‌حل به منظور بهبود توزیع رطوبت در ناحیه توسعه ریشه پیشنهاد دادند و دریافتند که حرکت افقی آب بیشتر در دبی 4 لیتر در ساعت رخ می‌دهد و بیشترین حرکت عمودی جبهه رطوبتی در دبی 2 لیتر در ساعت می‌باشد. همچنین بیان کردند که در سیستم SDI<sup>1</sup> تجمع نمک در نزدیکی سطح زمین و در جوار گیاه بیشتر است و در عوض توزیع مجدد آب در سیستم SDI نسبت به سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بیشتر است. آنها همچنین نشان دادند که عملکرد گیاه برای سیستم SDI در مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی 4 تا 7 درصد بیشتر است و همچنین وضعیت رطوبت گیاه مناسب‌تر و تلفات تبخیر نیز کمتر خواهد بود. نوع و ساختمان خاک به طور قابل توجهی بر روی عملکرد سیستم SDI برای محصولات مختلف فرق می‌کند. پارامترهای طراحی سیستم SDI شامل نوع لاترال، عمق لاترال و طول لاترال و فاصله لاترال و جریان خروجی می‌باشد و تمامی این پارامترهای بایستی با توجه به نوع و ساختمان خاک در نظر گرفته شود. پس اجرای یک سیستم SDI و طراحی مناسب آن مستلزم در نظر گرفتن نوع خاک است. بررسی توزیع رطوبت به عنوان یک موضوع خیلی مهم هم برای تحقیقات مزرعه‌ای و هم برای مدل‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است (کوت و همکاران 2003، توربرن و همکاران 2003). محققان یک راهکار مدیریتی به منظور افزایش توزیع مجدد آب در نزدیکی سطح زمین پیشنهاد دادند و آن استفاده از موانع نفوذناپذیر پلاستیکی در زیر لاترال‌ها در سیستم SDI می‌باشد که این موانع به عنوان یک لایه نفوذناپذیر، باعث ایجاد یک سطح آب در زیر لاترال‌ها

<sup>1</sup> Subsurface Drip Irrigation

ای سطحی و زیر سطحی متناسب با عمق نصب لاترال‌ها و دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

این آزمایشات در یک مدل پلکسی گلاس با ابعاد  $3m \times 1/22mm \times 0/5m$  و در آزمایشگاه مرکزی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به انجام رسید. این محفظه شفاف به گونه‌ای طراحی شده بود که به سه قسمت مجزا تفکیک شده بود و امکان انجام همزمان سه آزمایش با هم فراهم شده بود. در این تحقیق سه نوع خاک با بافت‌های مختلف از نقاط مختلف جمع‌آوری شد و با ترکیب کردن نسبت‌های مشخص از آنها سه نوع بافت (بافت متوسط، سنگین و سبک) مجزا فراهم گردید که در جدول 1 مشخصات فیزیکی این خاک‌ها ارائه گردیده است. طراحی مدل آزمایشگاهی نیز به گونه‌ای بود که هر قسمت مربوط به یک نوع خاک بود. با توجه به اینکه توزیع افقی آب در خاک‌های سنگین بیشتر می‌باشد، پس محفظه مربوط به خاک سنگین (1/2 متر) بزرگتر از خاک‌های با بافت سبک و متوسط (هر کدام 0/9 متر) طراحی شد (شکل 1). همچنین به منظور جلوگیری از جریان‌ات ترجیحی در حین آزمایش با استفاده از چسب و پاشیدن شن‌های زبر یک سطح نسبتاً زبر ایجاد گردید به گونه‌ای این چسب شفافیت بدنه مدل را حفظ کرده بود (کندلوس و سیمونک a و b 2010). در این تحقیق بعد از پایان هر آزمایش خاک‌ها از داخل مدل بیرون آورده می‌شد و در با قرار دادن در معرض نور آفتاب و خشک شدن، برای آزمایشات بعدی مهیا می‌گردید و در هنگام پر کردن مدل، کوبیدن خاک‌ها به صورت لایه به لایه (لایه‌های 10 سانتی‌متری) مطابق با وزن مخصوص ظاهری انجام گردید. در این تحقیق کلیه لوازم و تجهیزات یک سیستم آبیاری قطره‌ای متناسب با شرایط واقعی مزرعه شبیه‌سازی گردید. آب به وسیله پمپ و از طریق لوله‌های پلی اتیلن (لوله اصلی با قطر 50 میلی‌متر و نیمه اصلی و لاترال به ترتیب با قطرهای 20 و

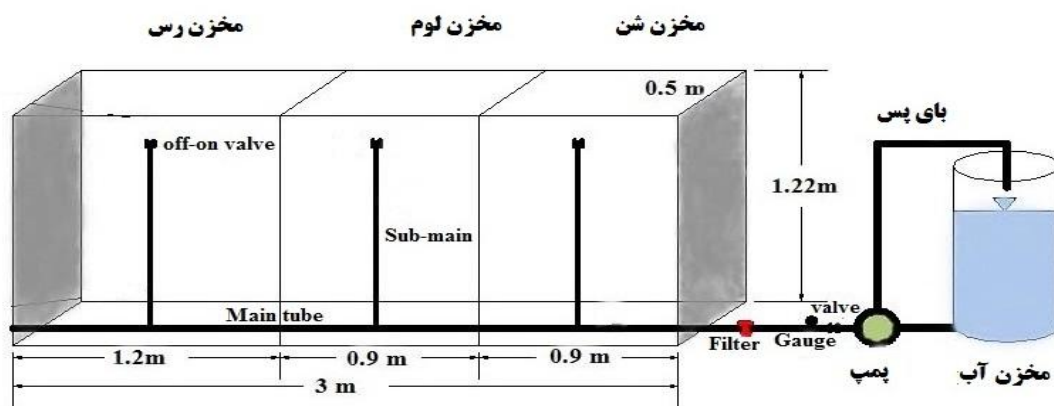
16 میلیمتر) از یک مخزن 250 لیتری به قطره‌چکان‌ها منتقل می‌گردید و در داخل مخزن آب از شناور (به منظور ثابت نگه داشتن آب در داخل مخزن) و در مسیر انتقال آب از شیر فلکه (به منظور هدایت جریان)، فیلتر توری (به منظور جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها و عدم یکنواختی توزیع)، فشارسنج (به منظور اعمال یک فشار ثابت در کلیه آزمایشات) و شیر قطع و وصل جریان (به منظور کنترل جریان به داخل هر محفظه) استفاده گردید. کلیه آزمایشات در فشار ثابت 2 بار به انجام رسید و با توجه به اینکه مقدار دبی خروجی خیلی کم بود به منظور کاهش فشار وارده به سیستم یک مجموعه بای‌پس<sup>1</sup> نیز طراحی گردید که در شکل 1 آورده شده است. در این تحقیق قطره‌چکان‌ها در عمق نصب (اعماق صفر (سطحی)، 15 (H1)، 30 (H2) و 45 (H3) سانتیمتری) مورد ارزیابی قرار گرفتند و همچنین دبی‌های 2/4 (Q1) و 4 (Q2) لیتر بر ساعت اعمال گردید. در این تحقیق مدت زمان آبیاری در کلیه تیمارها 6 ساعت بود و مقادیر توزیع مجدد تا 68 ساعت بعد از آبیاری و در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. با مدرج نمودن مدل آزمایشگاهی و ترسیم جبهه رطوبتی بر روی صفحه شفاف پلکسی گلاس، توزیع مجدد جبهه رطوبتی در جهات مختلف (توزیع افقی، عمودی و خیزبه سمت بالا) در زمان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در پایان هر آزمایش از جبهه رطوبتی عکس‌هایی فراهم می‌گردید که با استفاده از نرم افزار گرافر<sup>2</sup> مختصات کلیه نقاط جبهه پیشروی محاسبه می‌گردید و سپس با داشتن مختصات نقاط و استفاده از نرم افزار اتوکد جبهه پیشروی در زمانهای مختلف محاسبه گردید.

<sup>1</sup> By Pass

<sup>2</sup> Grapher

جدول 1- خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق.

نوع بافت	درصد شن (%)	درصد سیلت (%)	درصد رس (%)	بافت خاک	چگالی ظاهری چگالی حقیقی (gr/cm <sup>3</sup> )	درصد رطوبت وزنی F.C (%)	درصد رطوبت وزنی اشباع (%)
سنگین	46	18	36	رسی‌شنی	1/2	21/6	37/5
متوسط	55	22	23	لومی‌رسی‌شنی	1/35	18/7	34/5
سبک	76	13	11	شنی‌لومی	1/45	14/1	30/1



شکل 1- محفظه آزمایشگاهی و اتصالات مربوط برای انجام آزمایشات.

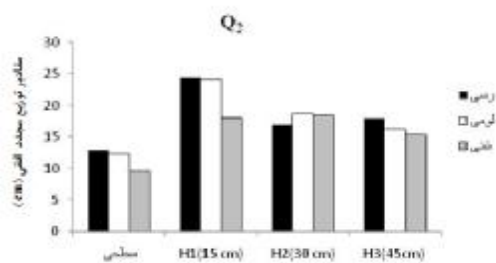
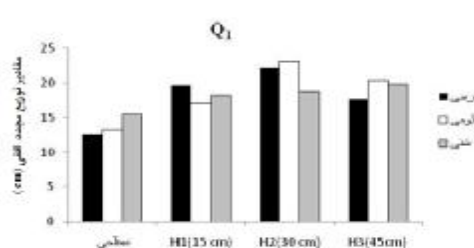
## نتایج و بحث

آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی درصد مقادیر توزیع مجدد آب (بعد از 68 ساعت) نسبت به کل جبهه حرکت آب در جهت افقی (شکل 2) و عمودی (شکل 3) قابل ملاحظه است و در بعضی از تیمارهای آبیاری به 28 درصد نیز می‌رسد. در نظر گرفتن این مقادیر توزیع مجدد در طراحی سیستم‌های آبیاری باعث کاهش نفوذ عمقی و افزایش راندمان مصرف آب می‌شود و به نوبه خود در مصرف حجم آب کاربردی و انرژی مورد نیاز و هزینه‌های ناشی از آن صرفه جویی به عمل می‌آید. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و برای سه نوع خاک مورد بررسی (بافت متوسط، سبک و سنگین) مقادیر توزیع مجدد در جهت افقی (شکل 4) و عمودی (شکل 5) برای دبی‌های کم بیشتر از دبی‌های زیاد می‌باشد و دلیل آن بدین صورت می‌باشد که با توجه به اینکه در این تحقیق نسبت جبهه

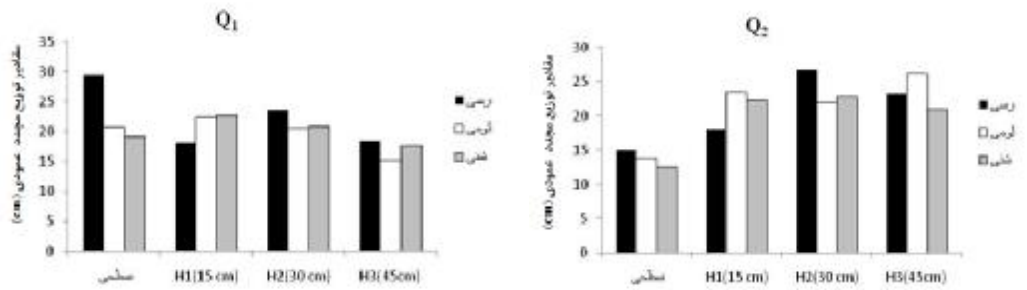
در این تحقیق پس از زمان آبیاری (6 ساعت) مقادیر توزیع مجدد آب در زمانهای مختلف بر روی دیواره شفاف (پلکسی گلاس) مدل آزمایشگاهی ترسیم گردید و این اندازه‌گیری تا 68 ساعت پس از زمان آبیاری به انجام رسید. بعد از فراهم کردن عکس‌های دقیق (به صورت عمودی از جبهه توزیع آب فراهم گردید)، مختصات بندی و دیجیت کردن این عکس‌ها با استفاده از نرم افزار گرافر انجام گردید. در این تحقیق سعی بر آن بود که مختصات بندی با فواصل کم صورت گیرد تا ترسیم جبهه پیشروی توزیع مجدد به صورت دقیق اندازه‌گیری شود و در نهایت با استفاده از این نقاط مقادیر توزیع مجدد در سه جهت مختلف (افقی، عمودی و خیز به سمت بالا) و با استفاده از نرم افزار اتوکد محاسبه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که در سیستم

نسبت به حالتی که قطره‌چکان‌ها با عمق کم کار گذاشته شدند مقدار کمتری است و این به دلیل تراکم خاک می‌باشد که آب در اعماق زیاد توانایی توزیع مجدد را پیدا نمی‌کند و یا دلیل دیگر آن ممکن است بدین صورت باشد که در قطره‌چکان‌هایی با عمق زیاد سطح خشکی که بالای قطره‌چکان قرار می‌گیرد نسبت به قطره‌چکان‌های کم عمق زیاد است و در این حالت در قطره‌چکان‌های عمیق بخشی از آب موجود در خاک صرف خیس کردن جبهه خشک بالای قطره‌چکان می‌شود و آب کمتری در جهت افقی توزیع می‌شود (شکل 4). در نهایت نتایج مربوط به این آزمایشات نشان داد که مقدار توزیع مجدد آب در جهت خیز به سمت بالا برای تیمارهایی با دبی زیاد بیشتر از تیمارهایی با دبی کم می‌باشد زیرا برای حالتی که مقدار دبی زیاد می‌باشد آب در زمان آبیاری فرصت لازم برای نفوذ را پیدا نمی‌کند و مقدار آب باقیمانده در خاک (در دبی‌های زیاد) در زمان‌های بعد از آبیاری توزیع پیدا می‌کند که بخشی از این آب صرف خیز به سمت بالا می‌شود (شکل 6).

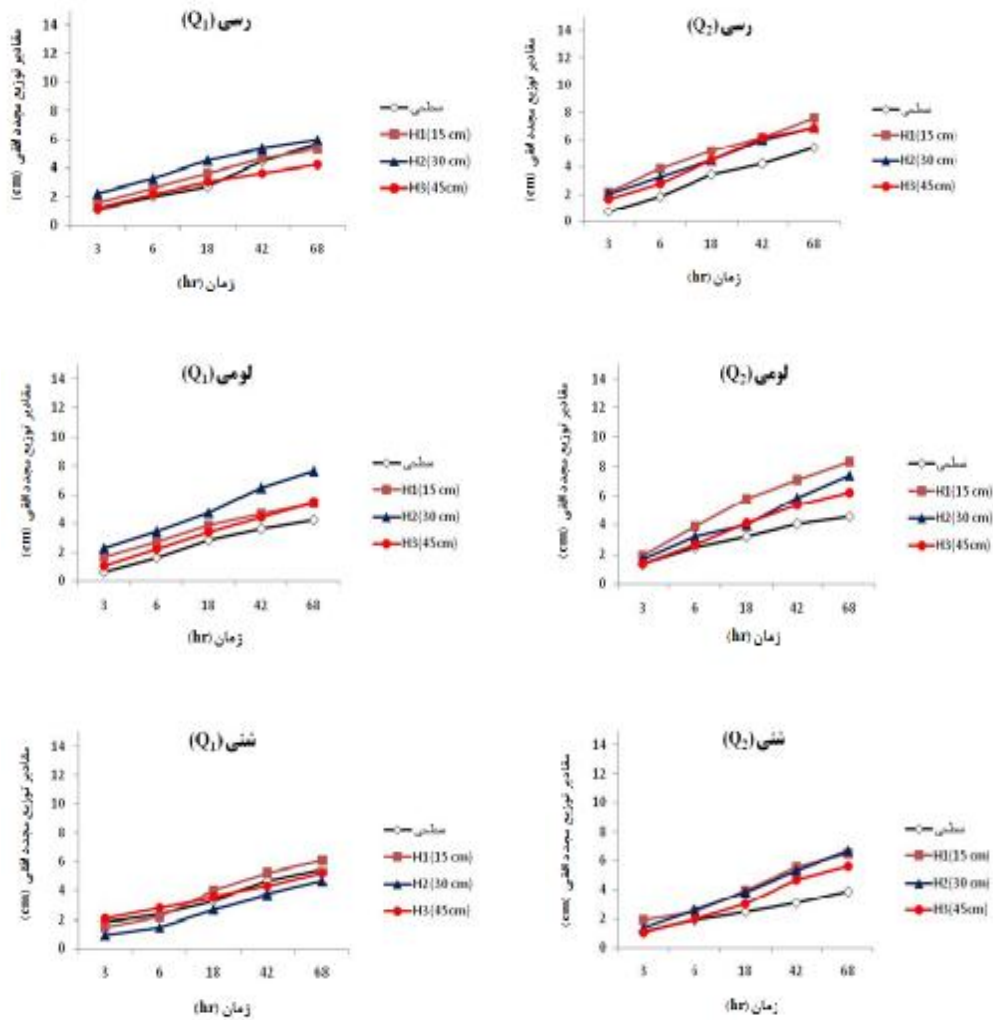
حرکت آب در زمان توزیع مجدد به کل جبهه حرکت مورد ارزیابی قرار گرفته است و از آنجائیکه در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی کل جبهه حرکت آب در زمان آبیاری بیشتر از مقدار توزیع مجدد است (در دبی‌های زیاد) پس در واقع نسبت این کسر عدد کمتری را نشان می‌دهد. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی مقادیر توزیع مجدد آب در جهت افقی (شکل 4) برای دبی‌های زیاد به صورت جزئی بیشتر از دبی‌های کم می‌باشد و دلیل آن بدین صورت می‌باشد که در دبی‌های زیاد، آب در زمان آبیاری فرصت لازم برای نفوذ را پیدا نمی‌کند و بخشی از این آب اضافی بعد از زمان آبیاری توزیع می‌شود در حالی که در دبی‌های کم بیشتر آب در زمان آبیاری نفوذ پیدا کرده و مقدار آبی که در خاک که بعد از آبیاری توزیع می‌شود کمتر است. همچنین این نتایج برای توزیع مجدد آب در جهت عمودی نیز صادق می‌باشد (شکل 5). نتایج دیگری از این تحقیق نشان می‌دهد که در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی (با دبی یکسان) و برای حالتی که قطره‌چکان‌ها به صورت عمیق کار گذاشته شدند، مقدار توزیع مجدد در جهت افقی



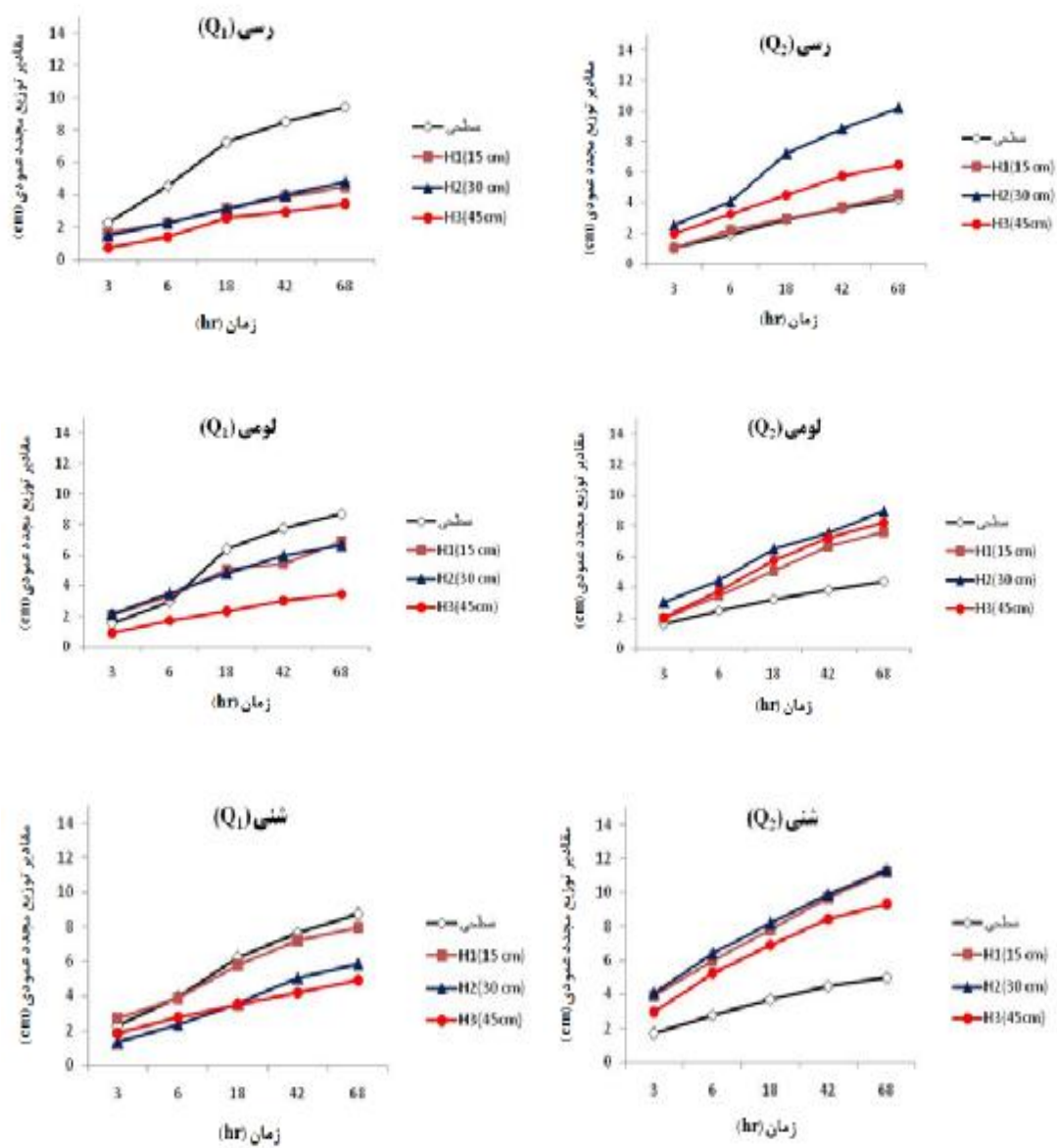
شکل 2- درصد مقادیر توزیع مجدد جبهه حرکت آب در جهت افقی نسبت به کل جبهه حرکت آب در جهت افقی.



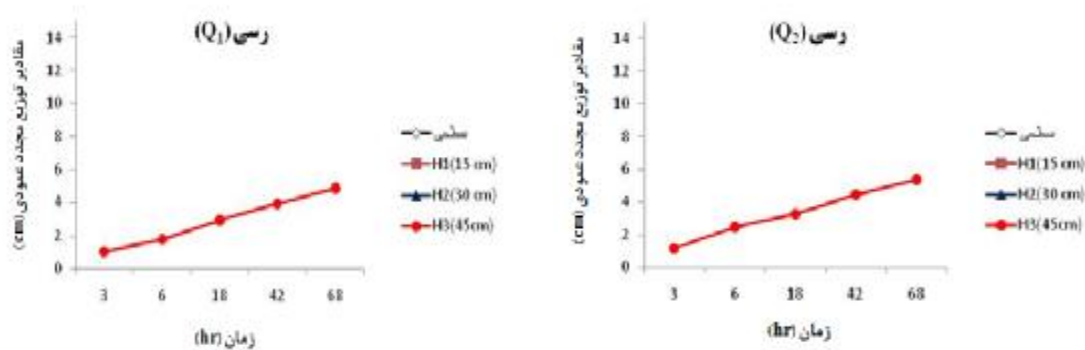
شکل 3- درصد مقادیر توزیع مجدد جبهه حرکت آب در جهت عمودی نسبت به کل جبهه حرکت آب در جهت عمودی.



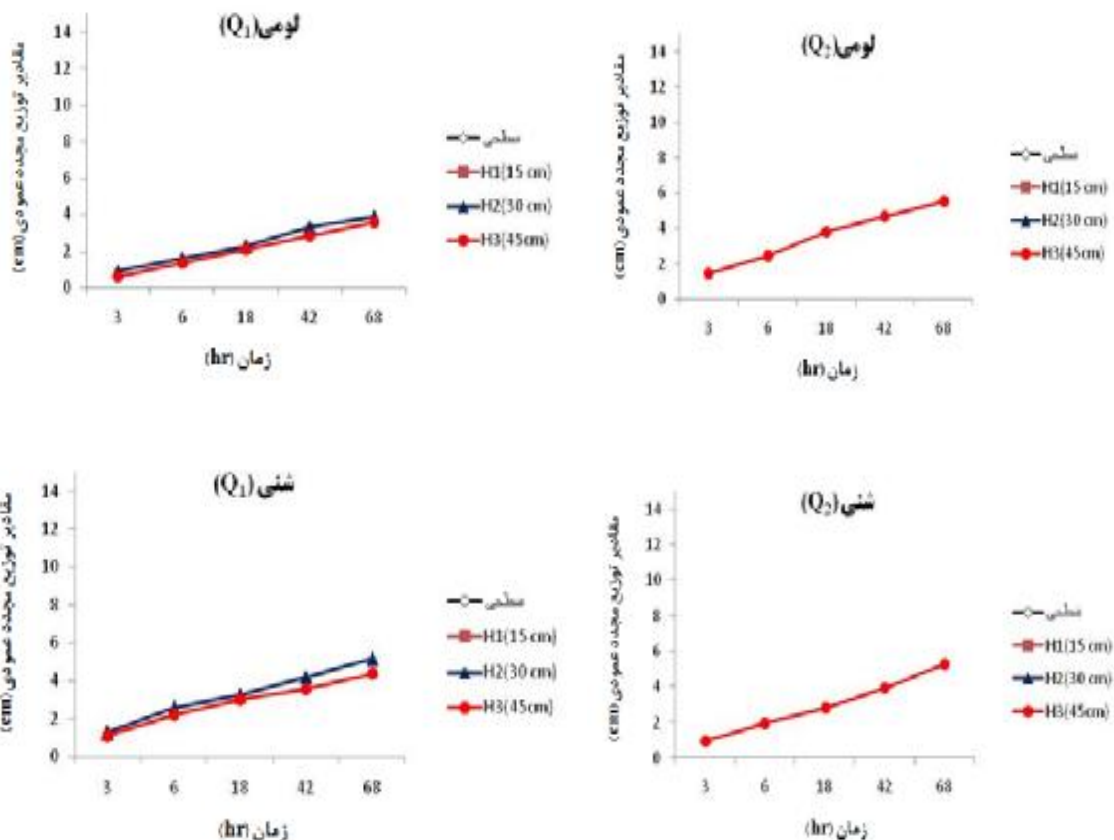
شکل 4- مقادیر توزیع مجدد آب در جهت افقی در زمان‌های مورد بررسی برای تیمارهای مختلف.



شکل 5- مقادیر توزیع مجدد آب در جهت عمودی در زمان‌های مورد بررسی برای تیمارهای مختلف.







شکل 6- مقادیر توزیع مجدد آب در جهت خیز به سمت بالا در زمان‌های مورد بررسی برای تیمارهای مختلف.

### نتیجه گیری کلی

قابل ملاحظه می‌باشد پس در نظر گرفتن آن در طراحی سیستم‌های آبیاری باعث کاهش زمان آبیاری و متناسب با آن باعث صرفه جویی در مصرف آب و انرژی می‌شود که به نوبه خود توجیحات اقتصادی را نیز به دنبال دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر توزیع مجدد آب در سه جهت (افقی، عمودی و خیز به سمت بالا) قابل ملاحظه می‌باشد و در نظر گرفتن این پارامترها در طراحی شبکه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی امری کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

با توجه به کمبود منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک و اهمیت سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی در این مناطق، ارائه راهکارهای مدیریتی به منظور افزایش راندمان آبیاری و کاهش تلفات نفوذ عمقی امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این راهکارهای مدیریتی در نظر گرفتن مقادیر توزیع مجدد آب بعد از زمان آبیاری می‌باشد. با توجه به اینکه مقادیر توزیع مجدد آب برای این سیستم‌های آبیاری

### منابع مورد استفاده

- Bresler E, 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrig Sci* 1: 13- 17.  
 Cote CM, Bristow KL, Charlesworth PB, Cook FJ and Thorburn PJ, 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig Sci* 22: 143-156.

- Dirksen C, 1978. Transient and steady flow from subsurface line sources at constant hydraulic head in anisotropic soil. *Trans ASAE* 21(5): 913- 919.
- Elmaloglou S, Diamantopoulos E. 2009. Effects of hysteresis on redistribution of soil moisture and deep percolation at continuous and pulse drip irrigation. *Journal of Agricultural Water Management* 96: 533–538.
- Gilley JR and Allred ER, 1974. Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals. *Trans ASAE* 17 (5): 927- 933.
- Grimes DW, Munk DS and Goldhamer DA, 1990. Drip irrigation emitter depth placement in a slowly permeable soil. Pp: 248-254. *Proc. Third National Irrigation Symp.*, Oct. 28 - Nov 1, Phoenix, Arizona. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Kandelous MM, Simunek J, 2010a. Comparison of numerical, analytical and empirical models to estimate wetting pattern for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig Sci* 28(5): 435-444.
- Kandelous MM, Simunek J, 2010b. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Journal of Agricultural Water Management* 97: 1070–1076.
- Lamm FR, Ayars JE, Nakayama FS, 2007. *Micro Irrigation for Crop Production (Design, Operation and Management)*. Publication of Elsevier Academic Press. USA
- Philip JR, 1991. Effects of root and subirrigation depth on evaporation and percolation losses. *Soil Sci Soc Am J* 55: 1520- 1523.
- Thorburn PJ, Cook FJ and Bristow KL, 2003. Soil-dependant wetting from trickle emitters. Implications for system design and management. *Irrig Sci* 22: 121-127.