

Research Paper

Study of the Expansion of Wetting Front from a Point Source in Vertically and Horizontally Layered

Naser Ramzani Azizi¹ , Askari Tashakori^{2*} , Eisa Maroufpoor³ , Samad Emamgholizadeh⁴ 

¹ Ph.D. student, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

² *Assistant Professor, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

³ Associate Professor, Dept. of Water Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

⁴ Associate Professor, Dept. of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology.



10.22125/IWE.2023.168174

Received:

June 17, 2021

Accepted:

August 23, 2021

Available online:

April 18, 2023

Keywords:

**Wetting Front,
Horizontally Layered
Soil, Vertically Layered
Soil, Sloping Surface,
Point Source**

Abstract

Land slope, soil texture, emitter flow rate and volume of irrigation water are among the main factors that influence the shape of the wetting front in the soil. The experiments were conducted in four different groups of heterogeneous three-layered soils, two of which were horizontally layered and two vertically layered, at three slopes (0, 10 and 20%) and three emitter flow rates (2, 4 and 8 L/h) with a constant volume of irrigation water (24 L). The results revealed that the maximum value of the wetting front radius in the experiments varied from 33 to 109 cm whereas the values for the wetting front depth under the emitter were in the 39-71 cm range. The highest increase in the maximum wetting front radius belonged to the horizontally layered soil with the heavy layer at the top. The wetting front depth under the emitter slightly decreased with increases in slope. The maximum infiltration depth was that of the vertically layered soil with a light-textured middle layer and heavy-textured top and bottom layers. When other conditions were kept constant, the percentage of the wetted area was decreased with increases in the emitter flow rate. The highest percentages of the wetted area downstream of the emitter varied from 74 to 78 percent at flow rate of 8 L/h and 20% slope.

1. Introduction

Accurate estimation of moisture characteristics curve for the studied soil can play a very important and major role in modeling water and salt transport in porous media (Calciu et al., 2011). Topography and land slope influence the infiltration wetting front (Bodhinayake and Xiao, 2004, Patel and Rajput,

* **Corresponding Author:** Askari Tashakori

Address: Dept. of Water Science and Engineering,
Qaemshahr Branch, Islamic Azad University,
Qaemshahr, Iran.

Email: tash2447@gmail.com
Tel: +989113511826

2008). Infiltration depth decreases with increases in slope steepness (Haggard et al., 2005; Huat et al., 2006). The wetting front formed by a point soil on sloping land is not semicircular in shape but egg-shaped (Zur 1996; Hachum et al., 1976). Increases in soil clay content reduce the wetted depth but increases the wetted radius (Freeman et al., 2003). Consequently, this research studied wetting front dimensions in horizontally and vertically layered soils on flat and sloping surfaces under various conditions.

2. Materials and Methods

A cuboid physical model was constructed with the width, height and length of 60, 120 and 160 cm, respectively, to study soil wetting front advance in drip irrigation. Three light, medium and heavy textured soil types free of any organic matter were used. The experiments were conducted at discharge rates of 2, 4 and 8 L/h. The soil surface had horizontal slopes of 0, 10 and 20% and transverse slope of 0%. The experiments were carried out in four groups: groups 1 and 2 on horizontally layered soils and groups 3 and 4 on vertically layered soils. The horizontally layered soils included three 25-cm thick layers. Group 1 had light soil on the top, loam soil in the middle and heavy soil at the bottom. Group 2 consisted of heavy soil on the top, loam soil in the middle and light soil at the bottom. The vertically layered soils included 3 layers with a 33-cm thick middle layer. In group 3, the middle layer was light soil and the other two layers heavy soil whereas the middle layer was heavy soil and the other two layers light soil in group 4. In each experiment, the contour lines at the mentioned time intervals were drawn on the model using a whiteboard marker. The complete shape of the wetting front was also calculated and drawn on the model.

3. Results

The largest increases in the maximum wetted radius were observed in groups 2, 4, 1, and 3 in that order. The wetting fronts had larger maximum wetted radii on sloping surfaces in horizontally layered soils with the heavy textured soil on the top and in vertically layered soil with the heavy textured soil in the middle (groups 2 and 4). The wetting front in horizontally layered sloping soil with the light textured soil on the top and in the vertically layered soil with the light textured soil in the middle (groups 1 and 3) had the smallest wetted radii. In groups 2 and 4, the effect of slope on the formation of the maximum wetted radii of the wetting front was more pronounced compared to groups 1 and 3. The maximum wetted radius increased with increases in the discharge rate at constant volume of applied water. In all states at identical slope, the maximum infiltration depths along the emitter axis at constant volume of applied water were observed in groups 3, 1, 2, and 4 in that order. Changes in slope and discharge rate in groups 1 and 3 had less impact on the wetting front depth under the emitter compared to the other groups.

4. Discussion and Conclusion

The results indicated that increases in discharge rate at the same volume of water under identical conditions of soil slope and texture reduced the wetted area of the moisture bulb whereas increases in the slope of land surface under identical conditions increased it. The percentages of change in the wetted area at the slope of 10% were more pronounced but they decreased as the slope increased from 10 to 20%. It is suggested that emitter with lower discharge rates be used in soils with high slopes and heavy textures so that water has more time to penetrate into the soil. This will increase infiltration depth thus preventing runoff formation. Emitters with higher discharge rates are used for lighter soils because the wetting fronts become more uniform.

5. Six important references

- 1) Hachum, A. Y., Willardson, L. S., & Alfaro, J. F. (1976). Water movement in soil from trickle source. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 102(2), 179-192.
- 2) Hoover, J. R. (1985). Evaluation of flow pathways in a sloping soil cross section. *Transactions of the ASAE*, 28(5), 1471-1475.
- 3) Huat, B. B., Ali, F. H., & Low, T. H. (2006). Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(5), 1293-1306.
- 4) Keller, J. and Karmeli, D. (1974) Trickle Irrigation Design Parameters. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 17, 678-684.
- 5) Kumar, D. S., Sharma, R., & Brar, A. S. (2021). Optimising drip irrigation and fertigation schedules for higher crop and water productivity of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Irrigation Science*, 1-14.
- 6) Mohammad, N., Alazba, A. A., & Simunek, J. (2014). HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation science*, 32(2), 111-125.

بررسی گسترش جبهه رطوبتی خاک از منبع نقطه‌ای در خاک‌های مطبق افقی و عمودی

ناصر رضانیان عزیز^۱، عسکری تشکری^{۲*}، عیسی معروف‌پور^۳، صمد امامقلی‌زاده^۴

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

چکیده

از عوامل اصلی تأثیرگذار بر الگوی خیس‌شدگی خاک، شیب زمین، بافت خاک، دبی قطره‌چکان و حجم آب آبیاری می‌باشد. برای بررسی تأثیر این عوامل آزمایش‌ها در ۴ گروه متفاوت از خاک‌های ناهمگن با ۳ لایه متفاوت که ۲ گروه با خاک‌های مطبق افقی و ۲ گروه با خاک‌های مطبق عمودی در ۳ شیب ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد، با دبی‌های ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت و برای حجم آب ثابت ۲۴ لیتر انجام گردید. نتایج نشان داد که مقدار حداکثر شعاع جبهه رطوبتی از ۳۳ الی ۱۰۹ سانتی‌متر و عمق جبهه رطوبتی در زیر قطره‌چکان از ۳۹ الی ۷۱ سانتی‌متر متغیر بوده است. بیشترین افزایش در حداکثر شعاع خیس‌شده مربوط به خاک مطبق افقی با لایه با بافت سنگین در بالا می‌باشد. عمق خیس‌شدگی در زیر قطره‌چکان، با افزایش شیب مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند. بیشترین عمق نفوذ برای خاک مطبق عمودی با لایه میانی با بافت سبک و دو لایه اطراف با بافت سنگین می‌باشد. با افزایش دبی در شرایط برابر از مقدار مساحت جبهه رطوبتی کاسته می‌گردد. در آزمایش‌های انجام شده بیشترین درصد مساحت جبهه رطوبتی پایین‌دست قطره‌چکان در دبی ۸ لیتر در ساعت و با شیب ۲۰ درصد بین ۷۴ الی ۷۸ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جبهه رطوبتی، خاک مطبق افقی، خاک مطبق عمودی، سطح شیبدار، منبع نقطه‌ای

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

Email: nr_azizi@yahoo.com, Tel: +989111115621

^{۲*} استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

Email: tash2447@gmail.com, Tel: +989113511826

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان.

Email: e.maroufpoor@uok.ac.ir, Tel: +989183809030

^۴ استاد گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Email: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir, Tel: +989111194389



مقدمه

در سیستم آبیاری قطره‌ای، عوامل متعددی مانند بافت خاک، شیب زمین، مدت زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان و حجم آب کاربردی از جمله عوامل تأثیرگذار در پیشروی جبهه‌رطوبتی از یک قطره‌چکان می‌باشند (Keller and Karmeli 1974؛ Neshat and Nasiri, 2012). از معایب مهم در روش آبیاری قطره‌ای، گرفتگی قطره‌چکانها و توزیع غیریکنواخت آب می‌باشد (Keller and Blinzer, 1990). مقدار حجم آب به کار رفته توسط قطره‌چکان بیشتر از مقدار دبی قطره‌چکان بر شکل و اندازه جبهه‌رطوبتی تأثیر دارد (Armstrong and Wilson, 1983). کاهش دبی قطره‌چکان در حجم آب کاربردی برابر، سبب افزایش عمق جبهه‌رطوبتی خاک شده و افزایش دبی قطره‌چکان در حجم مساوی آب آبیاری، سبب افزایش سطح و کاهش عمق خیس‌شده‌ی خاک می‌شود (Thabet and Zayani, 2008). با افزایش حجم آب بکار رفته در آبیاری، عمق رطوبتی خاک نیز افزایش می‌یابد (Khan et al., 1996). برآورد دقیق منحنی مشخصه رطوبتی برای بافت خاک مورد مطالعه می‌تواند نقشی بسیار مهم و کلیدی در مدل سازی حرکت آب و املاح در محیط‌های متخلخل ایفا نماید (Calciu et al. 2011). اهمیت فراوان این منحنی‌ها در آبیاری و زهکشی به خاطر اطلاع از وضعیت رطوبت خاک است.

اکثر زمین‌های کشاورزی مسطح نبوده و معمولاً دارای شیب بیشتر از ۵ درصد می‌باشند (Bodhinayake and Xioa, 2004). توپوگرافی و شیب زمین بر روی توزیع جبهه‌رطوبتی موثر می‌باشد (Bodhinayake and xiao, 2004؛ Patel and Rajput, 2008). با افزایش شیب زمین، مقدار نفوذ آب در خاک کاهش می‌یابد (Haggard et al. 2005؛ Huat et al. 2006). الگوی خیس‌شدگی برای خاکی که از یک منبع نقطه‌ای در اراضی شیبدار تشکیل می‌شود دیگر به شکل یک نیم دایره نمی‌باشد بلکه به شکل بیضی در می‌آید (Zur 1996؛ Hachum et al. 1976). در اوایل پیشروی جبهه‌رطوبتی در خاک، مولفه افقی با سرعت زیاد پیشروی می‌کند ولی با گذشت زمان از سرعت

آن کاسته می‌شود. در هنگامی که آبیاری هنوز تمام نشده و ادامه دارد با افزایش شیب مولفه‌ی عمودی کاهش می‌یابد و مولفه افقی جریان بیشتر گسترش پیدا می‌کند (Hoover, 1985).

افزایش مقدار درصد رس در بافت خاک منجر به کاهش عمق خیس‌شدگی و افزایش شعاع خیس‌شده می‌شود (Freeman et al., 2003). در خاکهای با بافت سنگین حرکت جانبی آب و در خاکهای با بافت سبک نفوذ عمقی آب بیشتر است. در خاک با بافت سنگین حرکت آب بیشتر تحت تأثیر پتانسیل ماتریک و در خاک با بافت سبک بیشتر تحت تأثیر نیروی ثقل است. در ابتدای پیشروی جبهه‌رطوبتی، مکش خاک الگوی خیس‌شدگی خاک را تعیین می‌کند و با افزایش عمق خیس‌شدگی، اثر نیروی ثقل بیشتر خواهد شد (Koo and Tucker, 1975).

در شرایط آزمایشگاهی به دلیل دست‌خوردگی و تغییر مکانی خاک نتایج بدست آمده جبهه‌رطوبتی متفاوت با شرایط مزرعه می‌باشد ولی استفاده از همین نتایج آزمایشگاهی به عنوان یک پیش‌بینی اولیه از وضعیت رطوبت خاک مفید می‌باشد (Or and Coelho, 1996). پژوهش و مطالعات بسیاری روی عوامل اثرگذار بر گسترش جبهه‌رطوبتی آب در خاک با استفاده از مدل‌های تجربی، نیمه تجربی و عددی توسط محققین در نقاط مختلف دنیا انجام گرفته است (shiri et al., 2020؛ Tripathi, 2017؛ kumar et al., 2021؛ Mohammad et al., 2014؛ Bufon et al., 2012).

مطالعات کمتری روی خاک‌های مطابق افقی و عمودی با لایه‌ها و ضخامت متفاوت انجام شده و یا گزارش نشده است. گاه‌گانه کشاورزان در مناطق مسطح و شیبدار، برای بهبود در عملیات کشاورزی اقدام به تغییر بافت سطح خاک می‌کنند که این امر سبب می‌گردد که لایه زیرین خاک، متفاوت با لایه بالای خود از نظر بافت خاک باشد. در بعضی از موارد با حفر چاله برای کاشت نهال، لایه عمودی خاک تغییر داده می‌شود که باعث تغییر بافت خاک با بافت خاک اطراف می‌شود.

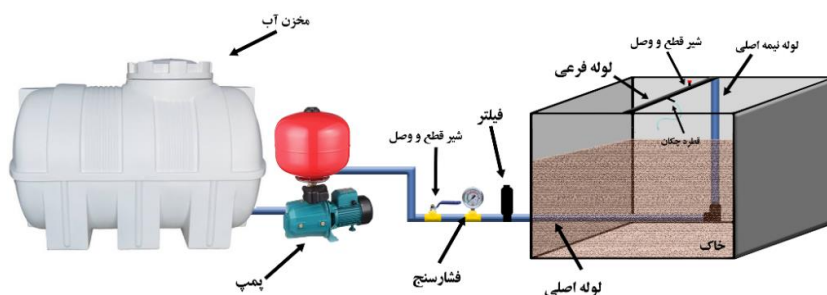
برای بررسی جبهه‌پیشروی رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای ساخته شد. جنس مدل از فلز و در قسمت جلو که از جنس شیشه سکوریت با ضخامت ۱۰ میلی‌متر برای مشاهده پیشروی خیس‌شدگی خاک بود، استفاده شده است. برای جلوگیری از جریان غیر معمول بر صفحه شیشه، سطح آن بوسیله دانه‌های شن با چسب شفاف پوشانده شد. سامانه آبیاری بطوری که در شکل ۱ نشان داده شده است شامل مخزن ذخیره آب، الکتروپمپ، شیرکشویی، فشارسنج، لوله اصلی، لوله نیمه اصلی، لترال و قطره‌چکان تنظیم‌شونده فشار بود.

یکی از اهداف آنها از این اقدام تطبیق بهتر ابعاد جبهه‌رطوبتی در آبیاری قطره‌ای با عمق و عرض ریشه گیاه به منظور جلوگیری از هدر رفت آب و کود همراه آن می‌باشد. بنابراین هدف تحقیق حاضر بررسی ابعاد جبهه‌رطوبتی در خاک‌های مطبق افقی و عمودی در حالت مسطح و شیبدار در شرایط مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ساخت مدل

یک مدل فیزیکی به شکل مکعب مستطیل و با ابعاد، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی‌متر به ترتیب عرض، ارتفاع و طول،



شکل (۱): نمای کلی از مدل فیزیکی ساخته شده به همراه اتصالات

خاک‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است، استفاده گردید. ابتدا خاک در لایه‌های به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر داخل مدل ریخته شده و سپس متراکم گردیده و این کار تا پرشدن مدل ادامه پیدا می‌کند.

مراحل انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش از سه نوع خاک فاقد هر گونه مواد آلی با بافت سبک، متوسط و سنگین که مشخصات فیزیکی

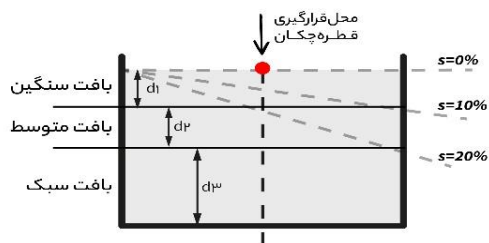
جدول (۱): مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق

نمونه خاک	بافت خاک	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	چگالی ظاهری $(\frac{gr}{cm^3})\rho_b$	هدایت هیدرولیکی $(\frac{cm}{hr})K_s$
بافت سبک	Loamy sand شنی لومی	۸۴	۵	۱۱	۱/۵۵	۳/۹۶
بافت متوسط	Sandy clay loam لومی رسی شنی	۵۳	۱۸	۲۹	۱/۳۹	۰/۹۵
بافت سنگین	Clay رسی	۲۹	۲۴	۴۷	۱/۳۵	۰/۱۸

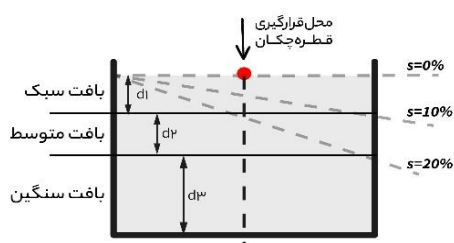


میانی بافت متوسط و لایه پایین بافت سبک تشکیل شده بود. خاک مطابق عمودی شامل ۳ لایه و ضخامت لایه میانی ۳۳ سانتی‌متر بود. گروه ۳ لایه میانی از بافت سبک، لایه‌های اطراف آن بافت سنگین، گروه ۴ لایه میانی از بافت سنگین، لایه‌های اطراف آن از بافت سبک تشکیل شده بود. برای سطوح شیبدار مانند سطوح مسطح ضخامت هر لایه ۲۵ سانتی‌متر برای هر لایه در خاک مطابق افقی و ضخامت ۳۳ سانتی‌متر لایه میانی در خاک مطابق عمودی در راستای شیب لحاظ شده است

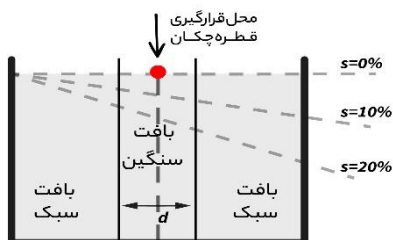
آزمایش‌ها با ۳ دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت انجام شد. شیب طولی سطح خاک ۱۰،۰ و ۲۰ درصد و شیب عرضی صفر درصد بود. آزمایش‌ها به روشی که در شکل ۲ نشان داده شد، در ۴ گروه خاک ناهمگن انجام گردید. گروه‌های ۱ و ۲ با خاک مطابق افقی و گروه‌های ۳ و ۴ با خاک مطابق عمودی بود. خاک مطابق افقی شامل ۳ لایه و ضخامت هر لایه ۲۵ سانتی‌متر بود. برای گروه ۱ در بالا خاک سبک در لایه میانی خاک متوسط و لایه پایین خاک بافت سنگین، گروه ۲ لایه اول از بافت سنگین، لایه



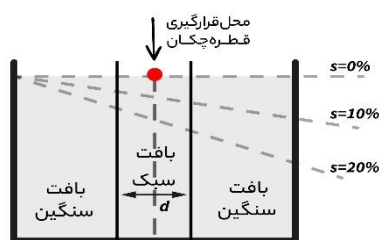
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۱): نمای کلی از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، (الف) گروه ۱، (ب) گروه ۲، (ج) گروه ۳ و (د) گروه ۴

۲۵، ۴۵، ۹۰، ۱۸۰، ۳۶۰، ۵۴۰ و ۷۲۰ دقیقه ترسیم شد. حجم آب استفاده شده در هر آزمایش ۲۴ لیتر ثلثت می‌باشد. در هر آزمایش خطوط تراز در دوره‌های زمانی ذکر شده با استفاده از ماژیک وایت‌بورد بر روی شیشه سکوریت ترسیم شده و با مختصات‌بندی نقاط روی شیشه و وارد کردن آن روی کاغذ شطرنجی و فراهم

الگوی پیشروی رطوبت خاک با قطره‌چکان ۸ لیتر در ساعت در مدت ۳ ساعت آبیاری در ۶ دوره زمانی ۵، ۲۵، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ دقیقه، قطره‌چکان ۴ لیتر در ساعت در مدت ۶ ساعت آبیاری در ۷ دوره زمانی ۵، ۲۵، ۴۵، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ دقیقه و قطره‌چکان ۲ لیتر در ساعت در مدت ۱۲ ساعت آبیاری در ۸ دوره زمانی ۵،

نتیجه با نتایج بدست آمده از تحقیقات Freeman et al., 2003 مطابقت دارد. پیشروی رطوبت در اراضی شیبدار مانند اراضی مسطح نیست. نتایج نشان داد که به اندازه‌ی که جبهه رطوبتی به سمت پایین دست کشیده می‌شود، به همان اندازه از پیشروی در جبهه بالادست کاسته می‌شود. در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در تمام حالت‌ها از ابتدای شروع آزمایش‌ها با افزایش زمان مقدار دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها، پیشروی جبهه رطوبتی خاک در حالت افقی و عمودی و مساحت خیس‌شدگی پیاز رطوبتی افزایش می‌یابد. به دلیل افزایش دبی خروجی از قطره‌چکان در واحد زمان، مقدار حجم آب کاربردی نیز افزایش یافته و با افزایش حجم آب کاربردی، جبهه رطوبتی نیز در همه جهات گسترش می‌یابد.

حداکثر شعاع جبهه رطوبتی

نتایج مربوط به پیشروی حداکثر شعاع جبهه رطوبتی در ۴ گروه تحت آزمایش در شیب‌های ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد، و با دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت و برای حجم آب آبیاری ثابت ۲۴ لیتر در شکل ۳ نشان داده شده است. در تمامی موارد آزمایش مقدار حداکثر شعاع خیس‌شده گروه ۲ از گروه ۱ بیشتر می‌باشد. مقدار اختلاف حداکثر شعاع خیس‌شده برای دبی‌های ۲، ۴ و ۸ لیتر در ساعت بین گروه‌های ۱ و ۲ در حالت مسطح به ترتیب برابر با ۶، ۸ و ۱۱ سانتی‌متر، در شیب ۱۰ درصد برابر با ۶، ۹ و ۲۵ سانتی‌متر و در شیب ۲۰ درصد برابر با ۶، ۹ و ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. در تمامی موارد آزمایش مقدار حداکثر شعاع خیس‌شده گروه ۴ از گروه ۳ بیشتر می‌باشد. مقدار اختلاف حداکثر شعاع خیس‌شده برای دبی‌های ۲، ۴ و ۸ لیتر در ساعت بین گروه‌های ۳ و ۴ در حالت مسطح به ترتیب برابر با ۱۱، ۱۲ و ۱۴ سانتی‌متر، در شیب ۱۰ درصد برابر با ۱۲، ۱۷ و ۲۹ سانتی‌متر و در شیب ۲۰ درصد برابر با ۱۲، ۲۳ و ۳۱ سانتی‌متر می‌باشد. در مجموعه همه آزمایش‌های انجام گرفته کمترین مقدار حداکثر شعاع جبهه رطوبتی در گروه ۳ با

کردن تصاویر از الگوی خیس‌شده‌گی و با استفاده از نرم‌افزار اتوکلد و اکسل (2016) الگوی ابعاد خیس‌شده، مساحت خیس‌شده و همچنین شکل کامل جبهه رطوبتی محاسبه و ترسیم گردید.

بحث و نتایج

برای مطالعه بررسی اثر دبی قطره‌چکان و شیب طولی در ۴ گروه مختلف خاک که ۲ گروه با بافت خاک ناهمگن افقی و ۲ گروه با بافت خاک ناهمگن عمودی بر پیشروی جبهه رطوبتی، آزمایش‌هایی انجام گردید. در این پژوهش پیشروی جبهه رطوبتی، عمق خیس‌شده زیر قطره‌چکان، حداکثر شعاع خیس‌شده، مساحت خیس‌شده در اتمام آبیاری و درصد مساحت خیس‌شده دو طرف قطره‌چکان مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده نتایج آنها به شرح زیر می‌باشد.

پیشروی جبهه رطوبتی

در اراضی مسطح، نیروی ماتریک عامل اصلی گسترش رطوبت در سطح می‌باشد و نیروی ثقل جبهه رطوبتی را به سمت پایین هدایت می‌کند. در سطوح شیبدار پیشروی رطوبت در جهت بالادست تحت تأثیر دو نیروی مکش و ثقل می‌باشد که نیروی مکش رطوبت را به سمت بالادست کشانده اما نیروی ثقل مانع حرکت به سمت بالادست می‌شود لذا به دلیل عدم غلبه‌ی نیروی مکش بر نیروی ثقل در حرکت به سمت بالا، با پیشروی کمتر جبهه رطوبتی مواجه می‌شویم (Rahimzadegan, 1977). در اراضی شیبدار الگوی خیس‌شدگی در جهت شیب، از حالت دایره به بیضی تغییر می‌کند. با افزایش شیب، مرکز این بیضی از محور قطره‌چکان در جهت شیب فاصله می‌گیرد. نتایج نشان داد که عامل اصلی گسترش جبهه رطوبتی در قسمت پایین دست و عامل بازدارندگی آن در قسمت بالادست قطره‌چکان، شیب زمین می‌باشد. در خاکهای با درصد رس بیشتر، اثر شیب بر پیشروی جبهه رطوبتی به سمت پایین دست نسبت به بافت سبک، بیشتر می‌باشد که این



۱۰ و ۲۰ درصد، دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت و با حجم آب ثابت ۲۴ لیتر در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که کمترین میزان عمق خیس شده در زیر قطره چکان مربوط به گروه ۲ آزمایش‌ها بوده و بیشترین میزان عمق خیس شده جبهه‌رطوبتی در زیر قطره چکان مربوط به گروه ۳ آزمایش‌ها می‌باشد. بیشترین عمق جبهه‌رطوبتی در زیر قطره چکان با دبی ۲ لیتر در ساعت و در شیب صفر در گروه ۳، برابر ۷۱ سانتی‌متر و کمترین عمق جبهه‌رطوبتی در زیر قطره چکان با دبی ۸ لیتر در ساعت و در شیب ۲۰ درصد برای گروه ۲، برابر ۳۹ سانتی‌متر می‌باشد.

تفاوت عمق خیس شده در زیر قطره چکان بین گروه ۳ و ۴ در حالت مسطح در دبی‌های ۲، ۴، ۸ و ۱۰ لیتر در ساعت به ترتیب برابر ۱۵، ۱۹ و ۲۷ سانتی‌متر، در شیب ۱۰ درصد برابر ۱۴، ۲۰ و ۲۷ سانتی‌متر و در شیب ۲۰ درصد برابر ۱۳، ۲۰ و ۲۸ سانتی‌متر می‌باشد. عمق خیس شده در زیر قطره چکان در گروه ۳ در همه حالت‌های آزمایش از گروه ۴ بیشتر است. مقدار اختلاف عمق خیس شده زیر قطره چکان بین گروه ۳ و ۴ بیشتر از مقدار اختلاف بین گروه ۱ و ۲ می‌باشد. با افزایش دبی در حجم ثلث آب آبیاری و به علت کاهش زمان نفوذ، از عمق نفوذ نیز کاسته می‌شود که این کاهش در خاک‌های با بافت سنگین بیشتر از بافت‌های سبک می‌باشد که این نتیجه با نتایج بدست آمده از تحقیقات Thabet and Zayani (2008) مطابقت دارد.

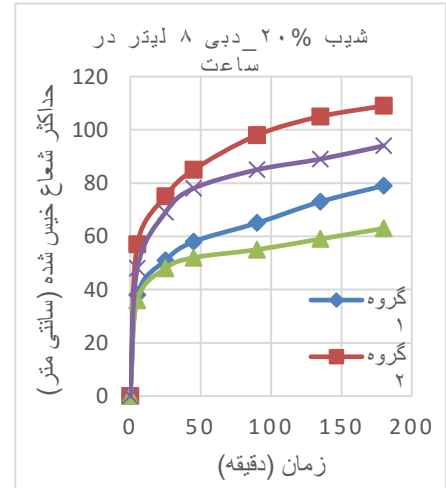
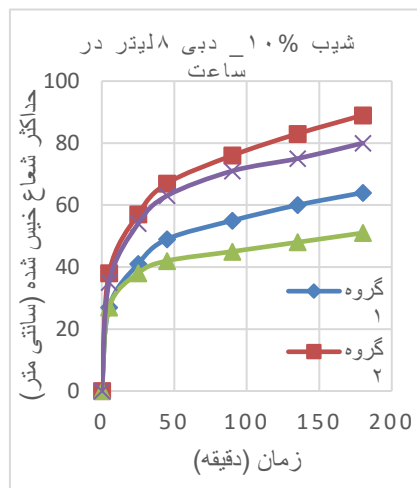
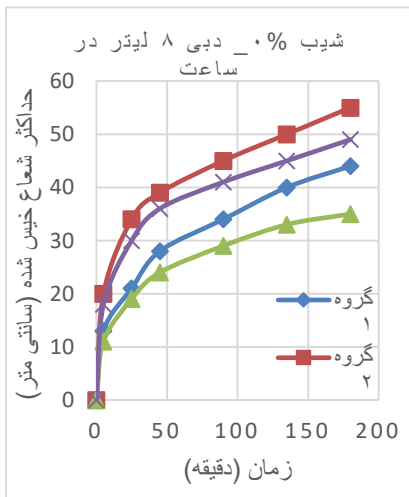
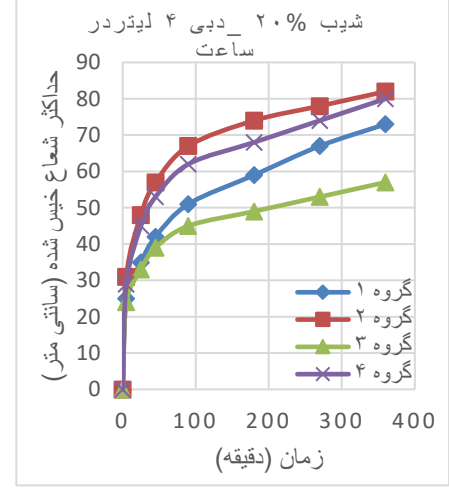
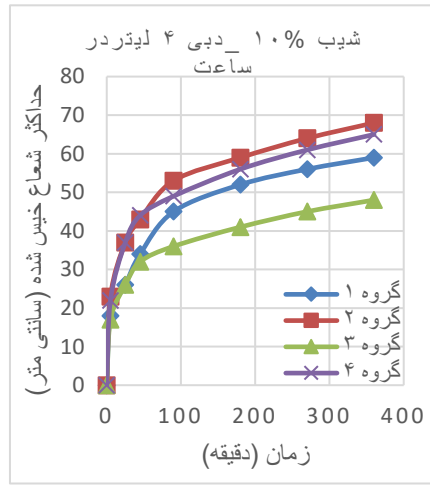
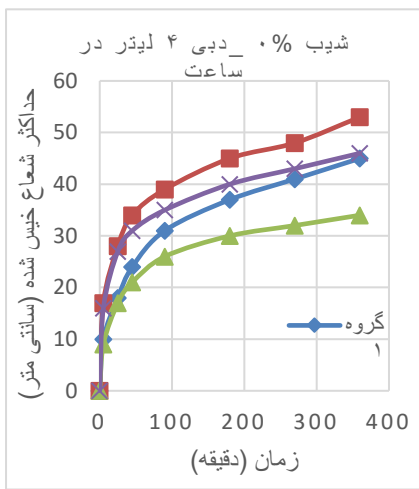
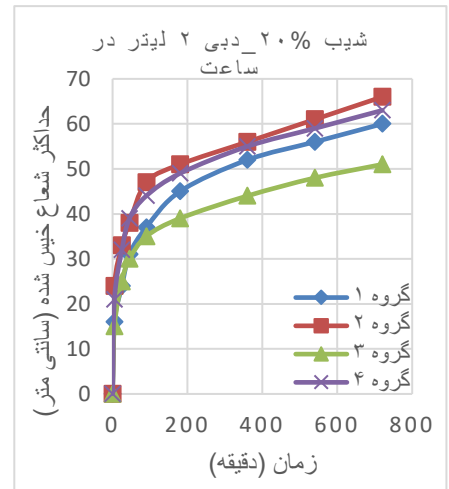
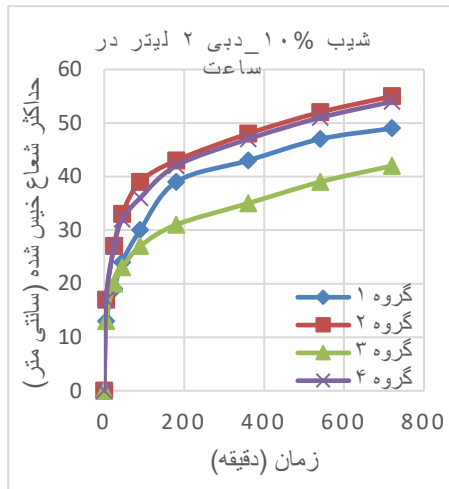
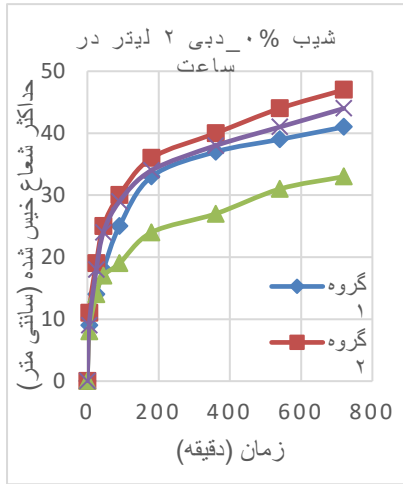
در همه حالت‌ها با شیب‌های برابر بیشترین عمق نفوذ در راستای قطره چکان با حجم ثابت آب کاربردی به ترتیب برای گروه ۳، ۱، ۲ و ۴ می‌باشد. تغییرات شیب و دبی در گروه‌های ۳ و ۱ اثر کمتری در عمق جبهه‌رطوبتی در زیر قطره چکان، نسبت به دیگر گروه‌ها دارد. با افزایش شیب، عمق جبهه‌رطوبتی در زیر قطره چکان مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند که این نتیجه با نتایج بدست آمده از تحقیق‌های سایر محققین مانند Hoover (1985)، Haggard et al. (2005)، و Huat et al. (2006) مطابقت دارد.

شیب صفر در دبی قطره چکان ۲ لیتر در ساعت برابر ۳۳ سانتی‌متر می‌باشد. بیشترین مقدار حداکثر شعاع جبهه‌رطوبتی در گروه ۲ با شیب ۲۰ درصد در دبی قطره چکان ۸ لیتر در ساعت برابر ۱۰۹ سانتی‌متر می‌باشد. بیشترین مقدار حداکثر شعاع خیس شده برای تمامی حالت‌های شیب برای گروه ۲ و کمترین مقدار آن برای گروه ۳ می‌باشد. با افزایش دبی قطره چکان در شرایط برابر، حداکثر شعاع جبهه‌رطوبتی افزایش پیدا می‌کند این افزایش در حالت شیب‌دار و گروه ۲ آزمایش‌ها، که دارای بافت خاک سنگین‌تر با درصد رس بیشتر در سطح بوده، بیشتر از موارد دیگر می‌باشد. بیشترین افزایش در حداکثر شعاع خیس شده به ترتیب برای گروه ۲، ۴، ۱ و ۳ می‌باشد. جبهه‌رطوبتی در سطوح شیب‌دار با خاک‌های لایه‌ای افقی که بافت سنگین در سطح و خاک با لایه عمودی و با بافت سنگین در وسط، که گروه ۲ و ۴ جزء آن می‌باشند از حداکثر شعاع خیس شده بالاتری برخوردار هستند. جبهه‌رطوبتی در خاک‌های لایه‌ای افقی شیب‌دار و با بافت سبک در سطح و خاک با لایه عمودی و با بافت سبک در وسط، که گروه ۱ و ۳ جزء آن می‌باشند از حداقل شعاع خیس شده برخوردار می‌باشند. در هر ۴ گروه تحت آزمایش در حالت شیب‌دار، با افزایش شیب، شعاع جبهه‌رطوبتی در قسمت پایین دست جبهه برای حجم آب آبیاری یکسان با افزایش همراه بوده است. این نتیجه با نتایج بدست آمده Patel and Rajput (2008) مطابقت لازم را دارد.

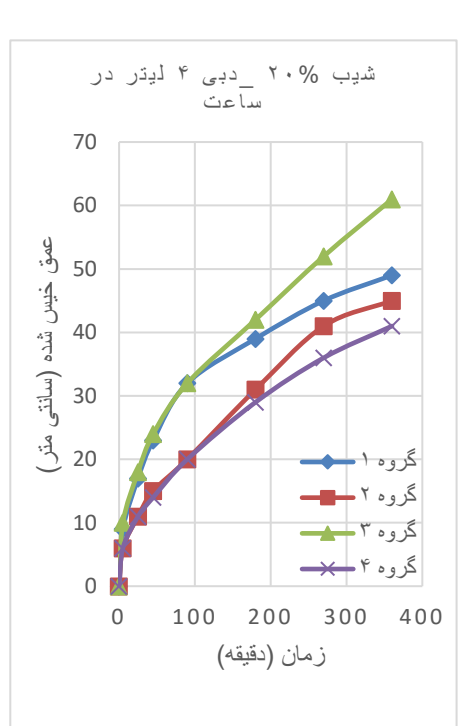
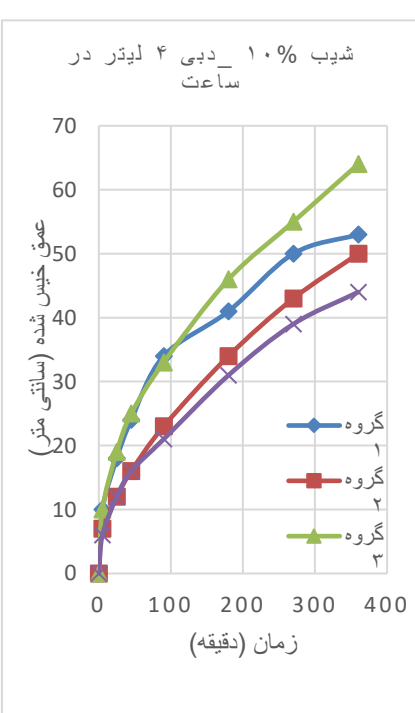
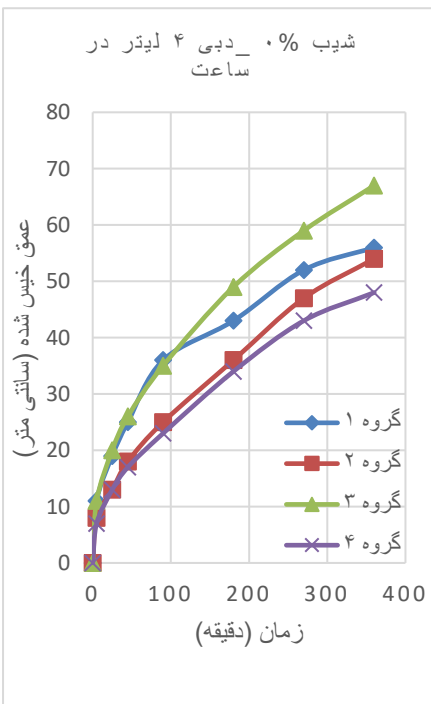
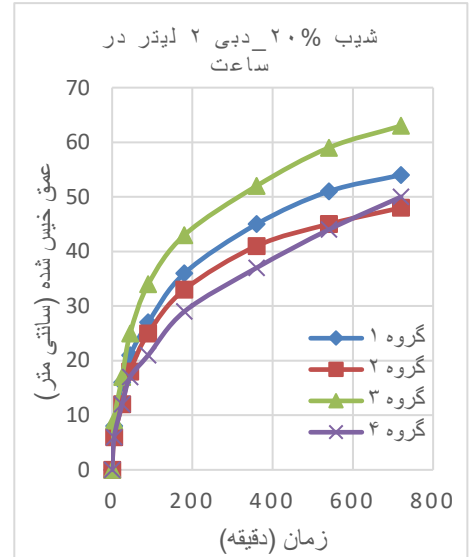
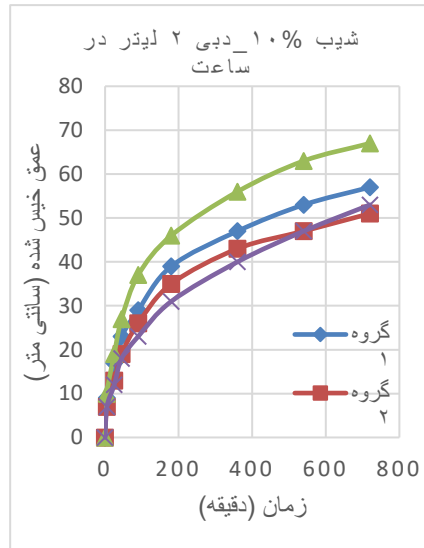
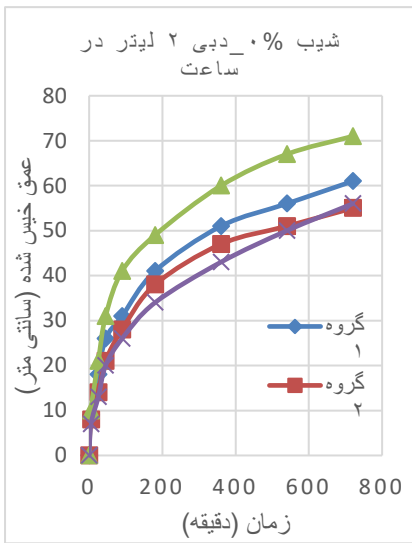
نتایج بدست آمده از شکل ۳ نشان می‌دهد که در اوایل آزمایش مولفه افقی با سرعت زیادتری در جهت شیب پیشروی می‌کند ولی با گذشت زمان از سرعت پیشروی کاسته می‌شود. مقدار حداکثر شعاع جبهه پیشروی در گروه ۲ بیشتر از دیگر گروه‌ها مورد آزمایش می‌باشد. در گروه‌های ۲ و ۴ اثر شیب در تشکیل حداکثر شعاع جبهه‌رطوبتی، نمایان‌تر از گروه‌های ۱ و ۳ است.

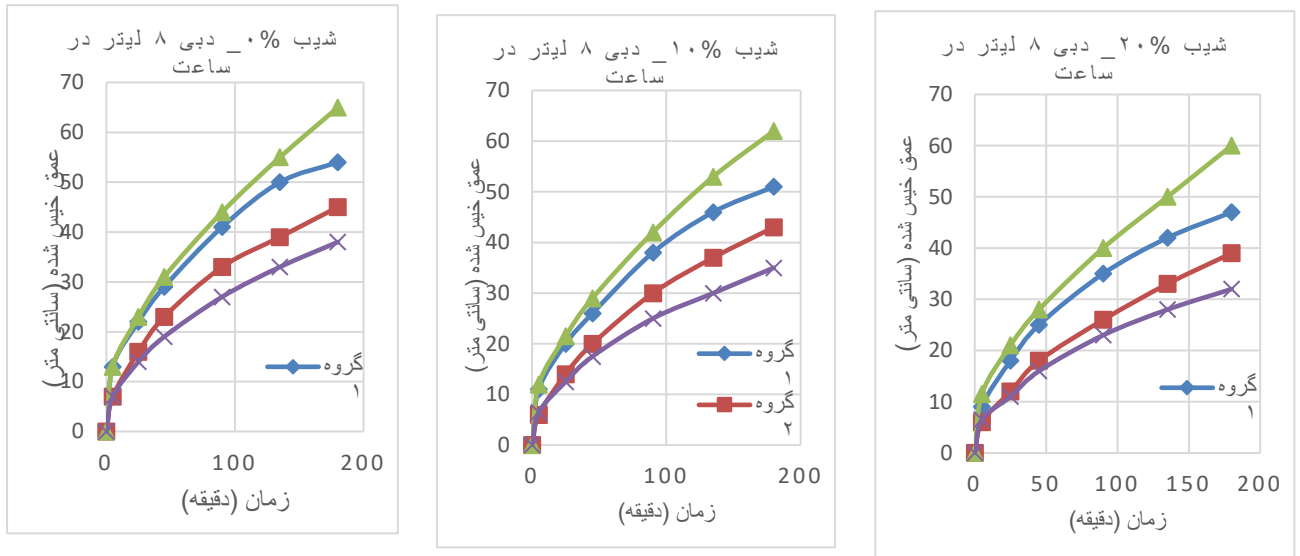
عمق جبهه‌رطوبتی در زیر قطره چکان

نتایج مربوط به گسترش عمقی جبهه‌رطوبتی در زیر قطره چکان در ۴ گروه آزمایش‌ها و در شیب‌های ۰،



شکل (۳): پیشروی حداکثر شعاع خیس شدگی در ۴ گروه آزمایش در دبی‌ها و شیب‌های مختلف



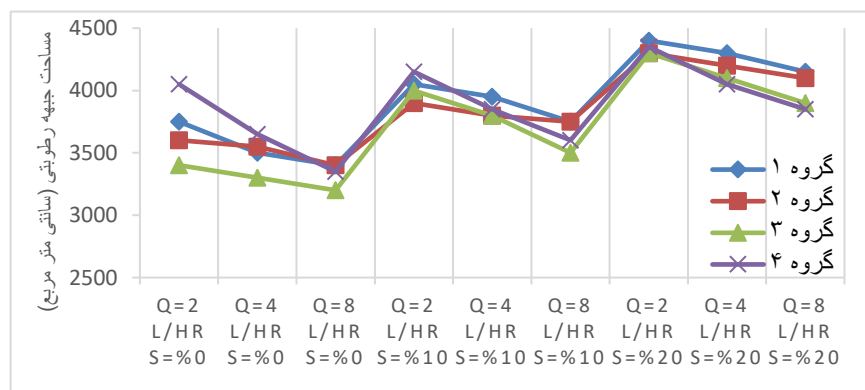


شکل (۴): عمق خیس‌شدگی در زیر قطره‌چکان در ۴ گروه آزمایش در دبی‌ها و شیب‌های مختلف

مساحت جبهه‌رطوبتی

لیتر در ساعت و به ۳۷۵۰ سانتی‌مترمربع در دبی ۸ لیتر در ساعت کاهش پیدا می‌کند. مساحت جبهه‌رطوبتی برای گروه ۲ و دبی ۲ لیتر در ساعت از ۳۶۰۰ سانتی‌مترمربع در شیب صفر، به ۳۹۰۰ سانتی‌مترمربع در شیب ۱۰ درصد و ۴۳۰۰ سانتی‌مترمربع در شیب ۲۰ درصد تغییر کرده است، نتایج نشان داد که با افزایش شیب سطح زمین در شرایط برابر از نظر بافت و دبی، بر میزان مساحت جبهه‌رطوبتی افزوده شده است

نتایج مربوط به مقایسه مساحت جبهه‌رطوبتی در پایان آزمایش‌ها، برای ۴ گروه مورد آزمایش در شیب‌ها و دبی‌های متفاوت و برای حجم آب آبیاری ثابت ۲۴ لیتر در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دبی به ازای حجم آب یکسان از خروجی قطره‌چکان در شرایط برابر از نظر شیب و بافت خاک، از مقدار مساحت جبهه‌رطوبتی کاسته می‌گردد. در گروه ۱ و در شیب ۱۰ درصد مساحت جبهه رطوبتی از ۴۰۵۰ سانتی‌مترمربع در دبی ۲ لیتر در ساعت، به ۳۹۵۰ سانتی‌مترمربع در دبی ۴



شکل (۵): مقایسه مساحت خیس‌شده پس از اتمام زمان آبیاری



۷۴ الی ۷۸ درصد می‌باشد. کمترین تغییرات درصد مساحت سمت راست قطره‌چکان ۷ درصد بوده که مربوط به گروه ۳ در شیب ۱۰ درصد و دبی ۲ لیتر در ساعت می‌باشد. در حالات شیب‌دار در مواردی که شیب و دبی قطره‌چکان ثابت در نظر گرفته شود هر چه بافت خاک سطحی، سنگین‌تر یا لایه عمودی زیر قطره‌چکان از بافت سنگین تشکیل شده باشد بر درصد مساحت جبهه سمت راست افزوده می‌شود. در سطوح مسطح جبهه‌رطوبتی به شکل دایره می‌باشد اما در سطوح شیب‌دار شکل پیاز-رطوبتی به شکل بیضی درآمد و هنگامی که پیازرطوبتی به شکل بیضی درآید، مساحت خیس‌شده در سمت راست قطره‌چکان بیشتر از مساحت خیس‌شده در سمت چپ قطره‌چکان می‌شود که این نتیجه با تحقیقات (Hachum et al. 1976 ؛ Zur 1996 ؛ Moncef and Khemaies 2016) مطابقت دارد

درصد مساحت دو طرف قطره‌چکان
درصد مساحت جبهه‌رطوبتی دو طرف قطره‌چکان‌ها در دبی و شیب‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در سطوح مسطح درصد مساحت دو طرف قطره‌چکان تقریباً با هم برابر می‌باشد ولی با افزایش شیب بر میزان مساحت پایین‌دست یا سمت راست قطره‌چکان (R) افزوده می‌شود و از میزان مساحت بالادست یا سمت چپ قطره‌چکان (L) کاسته می‌شود. در خاک‌های شیب‌دار در شرایط برابر با افزایش دبی قطره‌چکان به مساحت قسمت سمت راست قطره‌چکان افزوده و از مساحت قسمت سمت چپ قطره‌چکان کاسته می‌شود. با توجه به جدول ۲، درصد تغییرات مساحت در شیب ۱۰ درصد بیشتر نمایان می‌باشد و این تغییرات از شیب ۱۰ به ۲۰ درصد مقدار کمتری را نشان می‌دهد. بیشترین درصد مساحت جبهه‌رطوبتی سمت راست قطره‌چکان در دبی ۸ لیتر در ساعت و با شیب ۲۰ درصد بین

جدول (۲): درصد مساحت جبهه‌رطوبتی دو طرف قطره‌چکان

شماره گروه	دبی (L/hr)	شیب ۰٪		شیب ۱۰٪		شیب ۲۰٪	
		L	R	L	R	L	R
۱	۲	۵۰	۵۰	۳۸	۶۲	۳۴	۶۶
	۴	۴۹	۵۱	۳۶	۶۴	۳۱	۶۹
	۸	۵۲	۴۸	۳۱	۶۹	۲۶	۷۴
۲	۲	۵۱	۴۹	۳۵	۶۵	۲۹	۷۱
	۴	۴۹	۵۱	۳۱	۶۹	۲۵	۷۵
	۸	۴۸	۵۲	۲۸	۷۲	۲۲	۷۸
۳	۲	۵۰	۵۰	۴۳	۵۷	۳۶	۶۴
	۴	۵۱	۴۹	۳۵	۶۵	۲۸	۷۲
	۸	۵۲	۴۸	۳۰	۷۰	۲۲	۷۸
۴	۲	۵۱	۴۹	۳۸	۶۲	۳۲	۶۸
	۴	۴۹	۵۱	۳۳	۶۷	۲۷	۷۳
	۸	۵۲	۴۸	۲۷	۷۳	۲۲	۷۸

راستای محور قطره‌چکان نمی‌باشد. در اراضی شیب‌دار الگوی خیس‌شدگی در جهت شیب، از حالت دایره به بیضی تغییر می‌کند. با افزایش شیب، مرکز این بیضی از محور قطره‌چکان در جهت شیب فاصله می‌گیرد. بیشترین

نتیجه‌گیری

الگوی خیس‌شدگی در زمین‌های دارای شیب و با بافت خاک مطابق عمودی و افقی برخلاف اراضی مسطح در

شده در این حالت نفوذ عمقی از حالتی که نمونه خاک در وسط بافت سنگین و در اطراف خاک سبک باشد، بیشتر می‌شود. حداکثر شعاع خیس‌شده در خاکهای مطابق عمودی زمانی که لایه وسط از بافت سبک و دو لایه اطراف از بافت سنگین نسبت به خاکی که در لایه وسط دارای بافت سنگین و در اطراف بافت سبک باشد، کاسته می‌شود. با افزایش شیب، عمق خیس‌شدگی در زیر قطره‌چکان مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند. پیشنهاد می‌شود در شیب‌های زیاد و خاک‌های با بافت سنگین از قطره‌چکان‌هایی با دبی کمتر استفاده شود تا فرصت نفوذ بیشتری برای خاک ایجاد شود. این امر باعث می‌شود که نفوذ عمقی بیشتر شده و از ایجاد رواناب نیز جلوگیری می‌شود. از قطره‌چکان‌های با دبی بیشتر، برای خاک‌های سبک‌تر استفاده شود تا جبهه‌رطوبتی یکنواخت‌تری داشته باشیم. با اصلاح موقعیت قرارگیری قطره‌چکان در اراضی شیبدار می‌توان تا حدود زیادی از هدر رفت آب از منطقه توسعه ریشه جلوگیری کرد. با توجه به اهمیت موضوع توصیه می‌شود در پژوهش‌های بعدی از خاک‌های همگن و ناهمگن با نوع قرارگیری و ضخامت لایه‌های متفاوت چه بصورت عمودی و افقی در دبی‌ها و حجم آب متفاوت همراه با موقعیت قرارگیری متفاوت قطره‌چکان استفاده شود.

مقدار حداکثر شعاع خیس‌شده در پایان آبیاری در تمامی حالت‌ها به ترتیب برای گروه ۲، ۴، ۱ و ۳ می‌باشد. عامل اصلی گسترش خیس‌شدگی خاک در پایین‌دست و بالادست قطره‌چکان، شیب زمین می‌باشد. به همان اندازه که از پیشروی در جبهه‌رطوبتی سمت چپ (بالادست) کاسته می‌شود به همان اندازه به جبهه‌رطوبتی سمت راست (پایین‌دست) افزوده می‌شود.

در تمامی حالت‌ها با شیب‌های برابر بیشترین عمق نفوذ در راستای قطره‌چکان با حجم ثابت آب کاربردی به ترتیب برای گروه ۳، ۱، ۲ و ۴ می‌باشد. دلیل افزایش عمق خیس‌شده بیشتر در خاک مطابق عمودی با لایه میانی با بافت سبک و دو لایه اطراف با بافت سنگین این بوده که به دلیل درصد بیشتر رس در خاک اطراف از میزان نفوذپذیری آن نسبت به خاک سبک کاسته می‌شود لذا نفوذ عمقی در این خاکها بیشتر از موارد دیگر می‌باشد. عمق خیس‌شدگی در خاکی که لایه بالایی از بافت سبک تشکیل شده، بیشتر از خاکی که لایه بالایی آن از بافت سنگین تشکیل شده باشد. شعاع خیس‌شدگی در خاکهای مطابق افقی در هر دو حالت مسطح و شیبدار، در حالتی که خاک با بافت سنگین در بالا قرار دارد بیشتر از خاکی که لایه بالایی آن از بافت سبک تشکیل شده، می‌باشد. در خاکهای مطابق عمودی زمانی که لایه وسط از بافت سبک و دو لایه اطراف از بافت سنگین تشکیل

منابع

- Armstrong, C. F., & Wilson, T. V. (1983). Computer model for moisture distribution in stratified soils under a trickle source. *Transactions of the ASAE*, 26(6), 1704-1709.
- Bodhinayake, W., Si, B. C., & Xiao, C. (2004). New method for determining water-conducting macro-and mesoporosity from tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 760-769.
- Bufon, V. B., Lascano, R. J., Bednarz, C., Booker, J. D., & Gitz, D. C. (2012). Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrigation Science*, 30(4), 259-273.
- Calciu, I., Simota, C., Vizitiu, O., & Panoiu, I. (2011). Modelling of soil water retention properties for soil physical quality assessment. *Research Journal of Agricultural Science*, 43(3).
- Freeman, J.C., Peter, J.T., Peter, F., and Keith, L.B. (2003). Software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *J. Irrig. Sci.* 22: 129-134.



Hachum, A. Y., Willardson, L. S., & Alfaro, J. F. (1976). Water movement in soil from trickle source. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 102(2), 179-192.

Haggard, B. E., Moore Jr, P. A., & Brye, K. R. (2005). Effect of Slope on Runoff from a Small Variable-Slope Box. *J. Environ. Hydrol*, 13, 25.

Hoover, J. R. (1985). Evaluation of flow pathways in a sloping soil cross section. *Transactions of the ASAE*, 28(5), 1471-1475.

Huat, B. B., Ali, F. H., & Low, T. H. (2006). Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(5), 1293-1306.

Keller, J. and Bliesner, R. (1990). *Sprinkle and Trickle Irrigation*, Van Nostrand Reinhold, New York, 442 P.

Keller, J. and Karmeli, D. (1974) Trickle Irrigation Design Parameters. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 17, 678-684.

Khan, A. A., Yitayew, M., & Warrick, A. W. (1996). Field evaluation of water and solute distribution from a point source. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 122(4), 221-227.

Koo, R. C. J., & Tucker, D. P. H. (1975). Soil moisture distribution in citrus groves under drip irrigation. In *Proceedings of the... annual meeting*.

Kumar, D. S., Sharma, R., & Brar, A. S. (2021). Optimising drip irrigation and fertigation schedules for higher crop and water productivity of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Irrigation Science*, 1-14.

Mohammad, N., Alazba, A. A., & Simunek, J. (2014). HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation science*, 32(2), 111-125.

Moncef, H., & Khemaies, Z. (2016). An analytical approach to predict the moistened bulb volume beneath a surface point source. *Agricultural Water Management*, 166, 123-129.

Neshat, A., & Nasiri, S. H. I. M. A. (2012). Finding the optimized distance of emitters in the drip irrigation in loam-sandy soil in the Ghaeme Abad plain of Kerman, Iran. *Middle East Journal of Scientific Research*, 11(4), 426-434.

Or, D., & Coelho, F. E. (1996). Soil water dynamics under drip irrigation: transient flow and uptake models. *Transactions of the ASAE*, 39(6), 2017-2025.

Patel, N., & Rajput, T. B. S. (2008). Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural water management*, 95(12), 1335-1349.

Rahimzadegan, R. 1977. Water movement in field soil from a point source. Master. Degree Thesis, Agricultural and Irrigation Engineering, Faculty of Agriculture, Utah State University.

Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M. H., & Karimi, S. (2020). Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, 585, 124792.

Thabet, M., & Zayani, K. (2008). Wetting patterns under trickle source in a loamy sand soil of south Tunisia. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 3(01), 38-42.

Tripathi, V. K. (2017). Simulating soil water content under surface and subsurface drip irrigation with municipal wastewater. *Journal of AgriSearch*, 4(3), 167-172.

Zur, B. (1996). Wetted soil volume objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*, 16(3), 101-105.



Study of the Expansion of Wetting Front from a Point Source in Vertically and Horizontally Layered Soils

Naser Ramzani Azizi¹, Askari Tashakori*², Eisa Maroufpoor³, Samad Emamgholizadeh⁴

Abstract

Land slope, soil texture, emitter flow rate and volume of irrigation water are among the main factors that influence the shape of the wetting front in the soil. The experiments were conducted in four different groups of heterogeneous three-layered soils, two of which were horizontally layered and two vertically layered, at three slopes (0, 10 and 20%) and three emitter flow rates (2, 4 and 8 L/h) with a constant volume of irrigation water (24 L). The results revealed that the maximum value of the wetting front radius in the experiments varied from 33 to 109 cm whereas the values for the wetting front depth under the emitter were in the 39-71 cm range. The highest increase in the maximum wetting front radius belonged to the horizontally layered soil with the heavy layer at the top. The wetting front depth under the emitter slightly decreased with increases in slope. The maximum infiltration depth was that of the vertically layered soil with a light-textured middle layer and heavy-textured top and bottom layers. When other conditions were kept constant, the percentage of the wetted area was decreased with increases in the emitter flow rate. The highest percentages of the wetted area downstream of the emitter varied from 74 to 78 percent at flow rate of 8 L/h and 20% slope.

Keywords: Wetting Front, Horizontally Layered Soil, Vertically Layered Soil, Sloping Surface, Point Source

¹ Ph.D. student, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran. Email: nr_azizi@yahoo.com

² *Assistant Professor, Dept. of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran. Email: tash2447@gmail.com

³ Associate Professor, Dept. of Water Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: e.maroufpoor@uok.ac.ir

⁴ Professor, Dept. of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. Email: s_gholizadeh517@Shahroodut.ac.ir