

## مقاله پژوهشی

## بررسی بهبود پیاز رطوبتی در آبیاری زیرسطحی با لوله‌های روزنه‌دار و استفاده از تشک‌های ژئوتکستایل

مرضیه پاک‌نژاد<sup>۱</sup>، مهدی قبادی‌نیا<sup>۲\*</sup> و سید حسن طباطبائی<sup>۳</sup>

## چکیده

یکی از راه‌های کاهش میزان آب مصرفی و افزایش بهره‌وری آب، کاهش تبخیر آب از سطح خاک است و آبیاری زیرسطحی یکی از روش‌هایی است که می‌تواند تبخیر آب از سطح خاک را کاهش دهد. هدایت آب به زیر سطح زمین و محیط ریشه در آبیاری زیرسطحی، می‌تواند توزیع مناسب رطوبت را به همراه داشته باشد و تبخیر از سطح خاک را تحت‌تأثیر قرار دهد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از تشک ژئوتکستایل در سامانه آبیاری زیرسطحی بر الگوی توزیع رطوبت است. این پژوهش در یک مدل فیزیکی به حجم یک مترمکعب با دیواره پلکسی گلاس در دانشگاه شهرکرد انجام شد. طرح آماری مورد استفاده در این پژوهش، طرح فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با ۱۰ تیمار و سه تکرار بود. فاکتور اول عمق کارگذاری لوله‌ها در دو سطح (۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک) و فاکتور دوم نوع پوشش دور لوله در ۵ سطح (۴ نوع تشک ژئوتکستایل با ضریب آبگذری متفاوت و یک پوشش شن و ماسه) بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که کاربرد تشک ژئوتکستایل در اطراف لوله‌های آبدار سبب افزایش حداکثر عرض خیس‌شدگی تا ۷۰ درصد، کاهش حداکثر عمق خیس‌شدگی تا ۷۰ درصد و کاهش حداکثر صعود مویینگی نسبت به تیمار شن و ماسه تا ۹۵ درصد شد. همچنین افزایش عمق نصب تشک از ۱۵ به ۳۰ سانتی‌متر نیز سبب کاهش بیشتر صعود مویینگی و عمق خیس‌شدگی و افزایش عرض خیس‌شدگی شده است. از نظر آماری اثر عمق و نوع پوشش (فاکتورهای آزمایش) در سطح یک درصد معنی‌دار شد. تیمارهای ژئوتکستایل دارای ضریب آبگذری پایین‌تر، صعود مویینگی کمتری دارد که این نتایج در تطابق با عرض و عمق خیس‌شدگی است. در هر دو تیمار با گذشت زمان‌های مورد نظر هنوز فاصله زیادی تا رسیدن جبهه رطوبتی به سطح خاک وجود دارد. نتیجه‌گیری اینکه تشک‌های ژئوتکستایلی که از ژئوتکستایل با آبگذری عمودی پایین تهیه می‌شوند، می‌توانند گسترش افقی و عمودی مناسبی را ایجاد کنند و به‌عنوان یک گزینه مناسب برای زمین‌های فضای سبز، ورزشگاه‌ها و گلخانه‌ها با کشت گیاه مورد آزمون قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرسطحی، ژئوتکستایل، عمق خیس‌شده، عرض خیس‌شده و صعود مویینگی

ارجاع: پاک‌نژاد م.، قبادی‌نیا م. و طباطبائی ح. ۱۴۰۳. بررسی بهبود پیاز رطوبتی در آبیاری زیرسطحی با لوله‌های روزنه‌دار و استفاده از تشک‌های ژئوتکستایل. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸(۲): ۵۳-۴۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14680.2582>

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسئول: [mahdi.ghobadi@sku.ac.ir](mailto:mahdi.ghobadi@sku.ac.ir) و [mahdi.ghobadi@gmail.com](mailto:mahdi.ghobadi@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲

## مقدمه

باشد و علاوه بر آن استفاده از پساب در تغذیه گیاهی مؤثر بوده است (Soltani et al. 2023; Al-Hazmi et al., 2023; Teshnizi et al., 2023).

Lenjabi (2008) در پژوهشی نشان داد که استفاده از پوشش ژئوتکستایل بافته و نبافته باعث کم‌شدن مساحت خیس‌شده و حداکثر عمق خیس در یک خاک لوم رس سیلتی طی آزمایش شده است، اما تأثیر پوشش نبافته بیشتر از نوع بافته‌شده بود. حداکثر عرض خیس‌شده نیز با ژئوتکستایل نبافته افزایش یافته و تا حد زیادی نیز این نوع پوشش از صعود مویبگی جلوگیری کرده است. (Najafi and Tabatabaei, 2010) برای جلوگیری از مشکلات ورود ریشه‌ها و گرفتگی بیولوژیکی، از پوشش شن و ژئوتکستایل در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده کردند. آن‌ها پوشش شنی در اطراف قطره‌چکان را برای گیاهانی با ریشه‌های عمیق و بهره‌برداری طولانی‌مدت از سیستم و پوشش ژئوتکستایل را برای محصولات فصلی با ریشه‌های کم‌عمق توصیه کردند. (Ebrahimi, 2012) برای جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از پوشش‌های ژئوتکستایل و مواد پیش‌پیچانده سست (PLM) به دور قطره‌چکان‌ها استفاده کرد. نتایج نشان داد، روند توزیع الگوی پیاز رطوبتی با کاربرد پوشش به دور قطره‌چکان‌ها وابسته به ویژگی‌های ژئوتکستایل و ویژگی‌های فیزیکی خاک است. همچنین استفاده از پوشش در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی باعث کاهش مساحت و افزایش حداکثر عرض خیس‌شده می‌شود و استفاده از پوشش به دور قطره‌چکان تا حدی از صعود مویبگی جلوگیری می‌کند. (Afshar-Jahanshahi et al., 2013) به‌منظور بررسی توزیع رطوبت و تعیین عمق نصب بهینه در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی طرحی با قطره‌چکانی با دبی ۲ لیتر بر ساعت، دو عمق کارگذاری لوله‌ها (۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر) و چهار لایه عمقی قرائت رطوبت در یک خاک زراعی انجام دادند. نتایج نشان داد اگر سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌طور مناسب طراحی، اجرا و مدیریت شود، رطوبت به‌خوبی در پیاز رطوبتی قطره‌چکان و در نتیجه منطقه توسعه ریشه قرار می‌گیرد. همچنین توزیع رطوبت در این سیستم به‌شدت تحت تأثیر شرایط هیدرولیکی و فیزیکی خاک است. با

استفاده کارآمد از آب در بخش کشاورزی یا افزایش بهره‌وری آب می‌تواند به کاهش تنش کم‌آبی در ایران کمک کند. (Googoochani et al., 2023) یکی از بخش‌های مهم تلفات در آبیاری، تلفات تبخیر از سطح خاک است. کاربرد روش آبیاری زیرسطحی می‌تواند یکی از گزینه‌های مناسب برای کاهش تبخیر از سطح باشد. کمبود، پراکنش نامناسب و کیفیت نامطلوب آب، پستی‌وبلندی زمین و عدم دسترسی به نیروی کارگر از جمله عواملی هستند که در پیدایش روش‌های جدید نظیر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مؤثر بوده‌اند و به‌دنبال موفقیت‌های اجرایی آن در دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان یکی از روش‌های آبیاری با راندمان بالا مورد پذیرش قرار گرفته‌اند (Najafi and Tabatabaei, 2010; Camp, 1998). آبیاری زیر سطحی با کاهش تلفات رواناب، تبخیر سطحی و نفوذ عمقی می‌تواند راندمان کاربرد آب را افزایش دهد (Gunarathna et al. 2017; Ritzema et al., 2023).

آبیاری زیرسطحی همراه با زمین‌بافت‌ها (ژئوسنتتیک‌ها) یا SSTI یک روش خاص است که برای همه خاک‌ها از جمله خاک‌های ماسه‌ای تا خاک‌های رسی قابل کاربرد است. از مزایای SSTI کاهش مصرف آب، کود و علف‌کش‌ها است. در این سیستم آب و مواد غذایی به‌صورت مستقیم به منطقه ریشه وارد می‌شود و در نتیجه باعث افزایش عملکرد گیاه و سلامت آن‌ها خواهد شد (Abou Seeda et al., 2020). ژئوسنتتیک‌ها با استفاده از انواع پلیمرها ساخته می‌شوند و استفاده از آن‌ها در طرح‌های آب و خاک به‌عنوان مصالحی جدید مورد استقبال مهندسان و کارشناسان در بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفته است. به‌طور کلی ژئوسنتتیک عنوانی برای توصیف صفحات نازک و انعطاف‌پذیری است که در داخل توده خاک یا در ارتباط با مصالح خاکی با اهداف مختلفی همچون مسلح‌سازی، جداسازی، عایق‌بندی رطوبتی، مهار فرسایش، ایفای نقش صافی (فیلتر)، زهکشی و... به‌کار گرفته می‌شوند (Rahimi et al., 2007). پژوهش‌های زیادی روی کاربرد پساب در آبیاری زیرسطحی انجام شده است که نشان می‌دهد آبیاری زیرسطحی می‌تواند در کاهش آلودگی سطح خاک مؤثر

زهکشی با شن درشت پر شد. برای پرکردن مدل از خاکی که از الک شماره ۱۰ عبور داده شده بود، استفاده شد. خاک به صورت لایه به لایه در مدل ریخته و کوبیده شد، به گونه‌ای که وزن مخصوص ظاهری لایه‌ها یکسان باشد و در مجموع وزن مخصوص ظاهری کل خاک مخزن یکسان شود. برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ و مشخصات آب مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است.

این پژوهش در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول عمق کارگذاری لوله‌ها در دو سطح (۱۵ و ۳۰ سانتی متری از سطح خاک)، فاکتور دوم نوع تشک ژئوتکستایل در ۵ سطح (دو نوع تشک ژئوتکستایل نفاخته با لایه زیرین نفوذپذیر (مشابه لایه فوقانی)، دو نوع تشک ژئوتکستایل نفاخته با لایه زیرین کم نفوذ و بدون پوشش به عنوان شاهد) در نظر گرفته شد. مشخصات ژئوتکستایل‌های مورد استفاده در جدول ۳، تیمارهای پژوهش و مشخصات تیمارهای مورد آزمایش در جدول ۴ آمده است. برای ساخت تشک از دو لایه ژئوتکستایل بافته نشده انعطاف پذیر با ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ سانتی متر استفاده و دو لوله آبدار روزنه دار به طول ۱۰۰ سانتی متر و قطر ۲۵ میلی متر در بین تشک و به فاصله ۴۰ سانتی متر در عمق مورد نظر با توجه به تیمار قرار داده شد (شکل ۱). فیلتر شن و ماسه با ذرات شن درشت و هدایت هیدرولیکی بیش از ۳ متر بر روز تهیه شد. تعداد روزنه‌ها روی لوله آبدار در همه تیمارها یکسان در نظر گرفته شد. میزان جریان ورودی به مدل با استفاده از یک شناور و مخزن در طول آزمایش ثابت نگه داشته شد. از آنجایی که رطوبت اولیه نقش مهمی در توزیع رطوبت خاک دارد، سعی شد تا همه آزمایش‌ها در رطوبت اولیه یکسان (برابر با ۴ درصد حجمی و خاک هواخشک) انجام گیرد. برای کنترل رطوبت اولیه در همه آزمایش‌ها از دستگاه رطوبت سنج تتاپروب (SM-300) استفاده شد. در هر آزمایش، آبیاری تا زمانی ادامه پیدا کرد که دستگاه رطوبت سنج در سطح خاک، رطوبتی نزدیک به ظرفیت زراعی (۳۶ درصد حجمی) را نشان می‌داد.

تعیین عمق نصب مناسب، صعود آب به سطح خاک تحت تأثیر تبخیر و فشار ماتریک به حداقل می‌رسد و عمق نصب ۳۰ سانتی متری به عنوان عمق نصب بهینه انتخاب شده است (Heshmati et al., 2017) از صفحات ژئوکمپوزیت به عنوان بخش آبدار سیستم آبیاری زیرسطحی در شرایط کاربرد پساب استفاده کرده و تأثیر شکل و نحوه قرارگیری صفحات ژئوکمپوزیت بر الگوی توزیع رطوبت را بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از صفحات ژئوکمپوزیت باعث کاهش سطح خیس شده زمین و افزایش حداکثر سطح خیس شده پروفیل خاک در سطح یک درصد معنادار شد (Googoochani et al., 2023) بیان کردند که استفاده از صفحات ژئوکمپوزیت می‌تواند در کاربرد پساب در آبیاری زیرسطحی مؤثر باشد. از آنجایی که هدایت هیدرولیکی تشک ژئوتکستایل با خاکی که در آن سیستم آبیاری زیرسطحی نصب شده متفاوت است، به نظر می‌رسد وجود تشک در الگوی توزیع رطوبت خاک در این سیستم اثر گذاشته و باعث می‌شود آب به گونه‌ای مناسب در منطقه توسعه ریشه توزیع شود.

با توجه به اینکه پژوهش‌های کمی در خصوص اثر تشک ژئوتکستایل روی توزیع رطوبت در خاک وجود دارد، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تشک ژئوتکستایل بر الگوی توزیع رطوبت در سیستم آبیاری زیرسطحی در خاک رس سیلنتی انجام شد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور بررسی تأثیر تشک ژئوتکستایل بر الگوی توزیع رطوبت در سیستم آبیاری زیرسطحی در دانشگاه شهرکرد انجام شد. تشک‌های ژئوتکستایل متشکل از ورقه‌های ژئوتکستایل بزرگ هستند که اطراف لوله‌های آبدار قرار می‌گیرند. با توجه به تفاوت آبگذری صفحات و پوشش، آزمایشی با ده تیمار در خاک رس سیلنتی در نظر گرفته شد. برای تهیه بستر آزمایش، از یک واحد آزمایشی به صورت جعبه مکعبی شکل به ابعاد ۱۰۰\*۱۰۰\*۱۰۰ سانتی متر که سه طرف آن محدود به صفحه فلزی و طرف مقابل آن صفحه پلکسی گلاس شفاف بود، استفاده شد. کف مکعب به ارتفاع ۲۰ سانتی متر به منظور

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بافت خاک مورد استفاده

بافت خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	کربن آلی (%)	کربنات کلسیم (%)	چگالی ظاهری (gr/cm)	هدایت هیدرولیکی اشباع (m/day)	EC (dS/m)	pH
رس سیلتی	۴۱/۹	۴۱/۲	۱۶/۹	۰/۳۲	۲۶	۱/۲	۰/۳۲	۰/۴۷	۷/۲

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب مورد استفاده

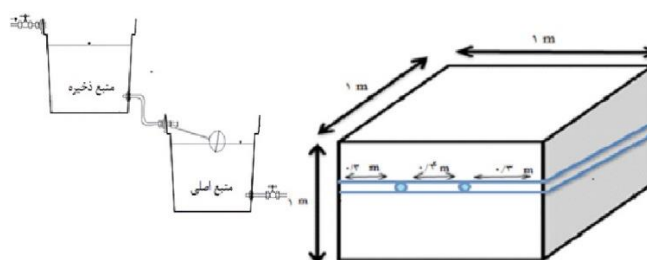
pH	EC (dS/m)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/lit)	Cl <sup>-</sup> (meq/lit)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/lit)	K <sup>+</sup> (meq/lit)	Na <sup>+</sup> (meq/lit)	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> (meq/lit)
۷/۸	۰/۳۱	۰/۶	۰/۴	۱/۶	۰/۱	۰/۷	۲

جدول ۳- برخی ویژگی‌های صفحات ژئوتکستایل مورد استفاده در آزمایش

نام پوشش	جرم واحد سطح (gr/m <sup>2</sup> )	ضخامت (mm)	ضریب آبگذری (l/m <sup>2</sup> /s)
NW (a)	۲۰۰	۲/۶	۱۱۰
NW (b)	۴۰۰	۴	۹۰
NW (c)	۷۰۰	۶/۵	۲۴

جدول ۴- معرفی تیمارهای آزمایش

ردیف	عمق نصب (cm)	نوع پوشش	نوع لایه زیرین	نام اختصاری
۱	۱۵	ژئوتکستایل نیافته نوع a	مشابه لایه بالایی	NW15(aa)
۲	۱۵	ژئوتکستایل نیافته نوع a	کم نفوذ	NW15(ac)
۳	۱۵	ژئوتکستایل نیافته نوع b	مشابه لایه بالایی	NW15(bb)
۴	۱۵	ژئوتکستایل نیافته نوع b	کم نفوذ	NW15(bc)
۵	۱۵	شن و ماسه	شن و ماسه	SH15
۶	۳۰	ژئوتکستایل نیافته نوع a	مشابه لایه بالایی	NW30(aa)
۷	۳۰	ژئوتکستایل نیافته نوع a	کم نفوذ	NW30(ac)
۸	۳۰	ژئوتکستایل نیافته نوع b	مشابه لایه بالایی	NW30(bb)
۹	۳۰	ژئوتکستایل نیافته نوع b	کم نفوذ	NW30(bc)
۱۰	۳۰	شن و ماسه	شن و ماسه	SH30



شکل ۱- شماتیکی از مدل فیزیکی

انتقال تصاویر به نرم‌افزار Grapher v.5، مختصات جبهه رطوبتی نسبت به زمان مشخص و با استفاده از نرم‌افزار Surfer v.8 الگوی توزیع رطوبت در زمان‌های مختلف ترسیم شد. در نهایت داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS v.9 براساس آزمایش فاکتوریل در غالب

برای بررسی جبهه رطوبتی پس از برقراری جریان، پیشروی جبهه رطوبتی در طی آزمایش در زمان‌های تعیین شده روی صفحه پلگسی گلاس مدل ترسیم و پس از پایان هر آزمایش با عکس‌برداری از خطوط جبهه رطوبتی ترسیم شده روی صفحه پلگسی گلاس و

طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل و با روش آماری دانکن در سطح پنج درصد مقایسه شدند.

جبهه‌های رطوبتی هستند که در زیر به تفصیل به آن پرداخته شده است.

## نتایج و بحث

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر دو عمق نصب لوله‌های آبیاری زیرسطحی در داخل تشک‌های ژئوتکستایل انجام گرفت، به طوری که لایه زیرین و بالایی تشک از ضرایب آبگذری متفاوتی برخوردار بودند و تیمار شن نیز در کنار آن‌ها برای مقایسه قرار گرفت. نتایج پژوهش در ۴ بخش آمده است. این بخش‌ها شامل نتایج حداکثر عرض خیس شده، حداکثر عمق خیس‌شدگی، حداکثر صعود مویبندی و هم‌پوشانی

## حداکثر عرض خیس شده

جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس حداکثر عرض خیس شده مربوط به زمان‌های مختلف تحت دو عامل، عمق کارگذاری و پوشش لوله‌های آبدار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر هر دو فاکتور عمق نصب لوله‌های آبدار و نوع پوشش بر ویژگی حداکثر عرض خیس شده پس از زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه در سطح یک درصد معنی‌دار شد.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس حداکثر عرض خیس شده مربوط به زمان‌های مختلف تحت عمق‌های کارگذاری و پوشش‌های

مختلف

میانگین مربعات عرض خیس شده (سانتی‌متر مربع)		درجه آزادی	منابع تغییرات
پس از ۱۵ دقیقه	پس از ۳۰ دقیقه		
۹/۹۲**	۷۳/۹۷**	۹	تیمار
۵/۴۶**	۱۳۸/۲۴**	۱	عمق
۲۰/۸۶**	۳۸/۶۲**	۴	پوشش
۰/۱۲ <sup>ns</sup>	۱۲/۲۷**	۴	عمق × پوشش
۰/۱۲	۰/۱۳	۲۰	خطا
۴/۸۴	۲/۲۳	-	ضریب تغییرات (%)

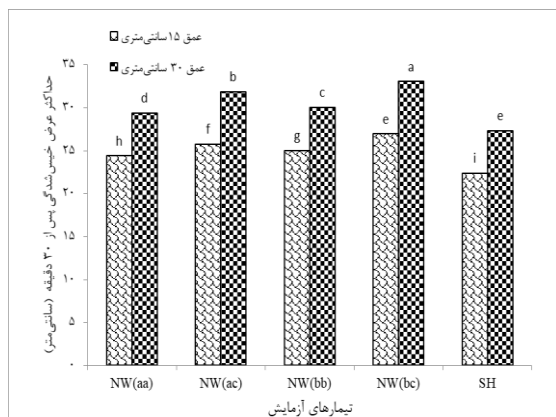
\*\* در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار، \* در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار و ns بی‌معنی

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که تیمارهای ژئوتکستایل، عرض خیس‌شدگی بیشتری نسبت به تیمارهای شن و ماسه ایجاد می‌کند و همچنین در تیمارهای ژئوتکستایل با کاهش ضریب آبگذری عمودی پوشش ژئوتکستایل، میزان عرض خیس‌شدگی افزایش می‌یابد. کمترین و بیشترین میزان عرض خیس‌شدگی در زمان ۳۰ دقیقه به ترتیب مربوط به تیمار شن و ماسه در عمق ۱۵ سانتی‌متر به مقدار ۲۲/۴ سانتی‌متر و تیمار NW(bc) با مقدار ۳۳/۱ سانتی‌متر است. با افزایش عمق کارگذاری تشک، عرض خیس‌شدگی نیز افزایش یافته است. به نظر می‌رسد به دلیل افزایش ارتفاع خاک روی ژئوتکستایل، فشار وارده به صفحات ژئوتکستایل افزایش یافته و آبگذری

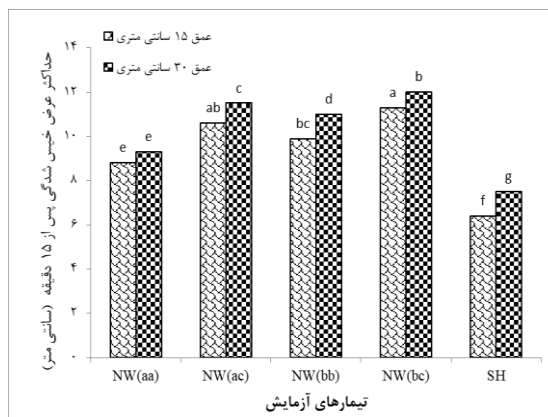
عمودی صفحات را کاهش داده است؛ در نتیجه عرض خیس‌شدگی افزایش یافته است. از طرف دیگر با افزایش زمان از شروع آزمایش اختلاف بین تیمارها کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که اختلاف بین بیشترین عرض خیس‌شدگی در تیمارهای ژئوتکستایل از حدود ۲۹ درصد به حدود ۱۱ درصد کاهش داشته و اختلاف بین بیشترین عرض خیس‌شدگی تیمار ژئوتکستایل NW(bc) با تیمار شن و ماسه از حدود ۷۰ درصد به ۲۰ درصد کاهش یافته است. با توجه به اینکه افزایش عرض خیس‌شدگی سبب افزایش فاصله لاترال‌ها و در نتیجه کاهش تعداد آن‌ها می‌شود، درک بهتر از فواصل خروجی، میزان دبی و عمق لوله می‌تواند سیستمی با بهترین و سودآورترین شرایط را ارائه دهد

شرایط مناسب‌تری در خصوص این ویژگی نسبت به سایر تیمارها دارند.

(Provenzano, 2007)؛ بنابراین به نظر می‌رسد تیمارهای با آبگذری عمودی کمتر و عمق بیشتر،



شکل ۳- اثرات متقابل عمق استقرار لوله‌های آبده و نوع تشک ژئوتکستایل بر حداکثر عرض خیس شدگی پس از ۳۰ دقیقه



شکل ۲- اثرات متقابل عمق استقرار لوله‌های آبده و نوع تشک ژئوتکستایل بر حداکثر عرض خیس شدگی پس از ۱۵ دقیقه

اثر هر دو فاکتور عمق نصب لوله‌های آبده و نوع پوشش بر ویژگی حداکثر عمق خیس شده پس از زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه در سطح یک درصد معنی‌دار شد.

#### حداکثر عمق خیس شدگی

جدول ۶ نتایج تجزیه واریانس حداکثر عمق خیس شده مربوط به زمان‌های مختلف را تحت دو عامل عمق نصب و پوشش نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان داد که

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس حداکثر عمق خیس شده مربوط به زمان‌های مختلف تحت عمق‌های کارگذاری و پوشش‌های مختلف

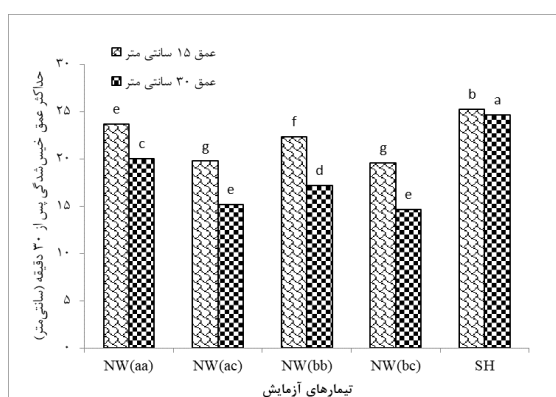
میانگین مربعات عمق خیس شده (سانتی‌متر مربع)		درجه آزادی	منابع تغییرات
پس از ۳۰ دقیقه	پس از ۱۵ دقیقه		
۴۲/۶۷**	۱۶/۵۴**	۹	تیمار
۱۰۹/۴۴**	۱۶/۶۳**	۱	عمق
۶۳/۲۵**	۳۲/۸۱**	۴	پوشش
۵/۴۱**	۰/۲۷*	۴	عمق X پوشش
۰/۱۶	۰/۱۵	۲۰	خطا
۲/۶۰	۳/۸۶	-	ضریب تغییرات (/.)

\*\* در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار، \* در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار و NS بی‌معنی

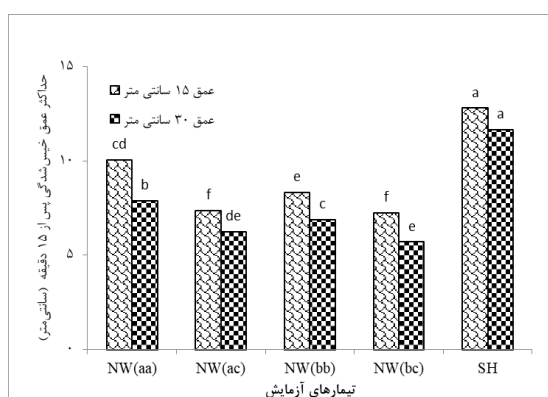
طرف پایین کمتر شده است. همان‌گونه که در خصوص عرض خیس شدگی بیان شد، به نظر می‌رسد با افزایش ارتفاع خاک روی ژئوتکستایل، فشار وارده به صفحات ژئوتکستایل نیز افزایش داشته و آبگذری عمودی صفحات را کاهش داده است در نتیجه عمق خیس شدگی با افزایش عمق نیز کاهش یافته است. بیشترین عمق خیس شدگی در زمان ۳۰ دقیقه، مربوط

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که در تیمارهای ژئوتکستایل بر خلاف عرض خیس شدگی، عمق خیس شده، گسترش کمتری نسبت به تیمارهای شن و ماسه دارد. همچنین در تیمارهای ژئوتکستایل با کاهش آبگذری عمودی ژئوتکستایل، میزان گسترش عمق خیس شدگی کاهش یافته است. با افزایش عمق کارگذاری تشک، گسترش عمودی جبهه رطوبتی به

نتایج این پژوهش با نتایج (2008) Lenjaji مطابقت داشت. ایشان در نتایج خود بیان کرد که تیمارهای پوشش‌دار دارای عمق خیس‌شدگی کمتری هستند. با توجه به اینکه نفوذ عمقی جزو تلفات آبیاری است و بیشتر هدف نگهداشت رطوبت در ناحیه ریشه گیاه است، تیمارهای دارای نفوذ عمقی کمتر، مطلوب‌تر هستند که به نظر می‌رسد تیمارهای با آبگذری عمودی کمتر و عمق بیشتر، دارای شرایط مناسب‌تری در خصوص این ویژگی نسبت به سایر تیمارها هستند.



شکل ۵- اثرات متقابل عمق استقرار لوله‌های آبد و نوع تشک ژئوتکستایل بر حداکثر عمق خیس‌شدگی پس از ۳۰ دقیقه



شکل ۴- اثرات متقابل عمق استقرار لوله‌های آبد و نوع تشک ژئوتکستایل بر حداکثر عمق خیس‌شدگی پس از ۱۵ دقیقه

تیمار NW(bb) است. اختلاف بین این دو تیمار به ۹۵ درصد نیز می‌رسد؛ به عبارت دیگر عمق صعود مویبگی در تیمار شن و ماسه تقریباً دوبرابر تیمار NW(bb) است. به‌طورکلی تیمارهای ژئوتکستایل دارای آبدی عمودی کم‌تر، صعود مویبگی کمتری دارند. این نتایج در تطابق با عرض و عمق خیس‌شدگی است. نتایج سایر پژوهشگران نیز نشان می‌دهد در خاک، لایه‌های با آبگذری بالاتر گسترش افقی بیشتر و گسترش عمودی کمتری دارند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Mohammed and Abed, 2020; Khanjani and Dalirehassannia, 2014).

در هر دو تیمار با گذشت زمان‌های موردنظر هنوز فاصله زیادی تا رسیدن جبهه رطوبتی به سطح خاک وجود دارد. در این مورد نیز به‌نظر می‌رسد تیمارهای ژئوتکستایل با آبگذری عمودی کمتر عملکرد بهتری دارند.

به تیمار شن و ماسه و عمق ۱۵ سانتی‌متر با مقدار ۲۵/۳ سانتی‌متر و حداقل آن مربوط به تیمار NW(bc) در عمق ۳۰ سانتی‌متر با مقدار ۱۴/۷ سانتی‌متر است. از طرف دیگر با افزایش زمان از شروع آزمایش، درصد اختلاف بین تیمارها کاهش می‌یابد. بیشترین درصد اختلاف تیمارها در عمق خیس‌شدگی بین تیمار ژئوتکستایل (NW(bc)) با تیمار شن و ماسه با ۶۸ درصد اختلاف است. تیمار شن و ماسه دارای عمق خیس‌شدگی بیشتر از سایر تیمارها بود؛ درحالی‌که در پارامتر عرض خیس‌شدگی، کمترین عرض را داشت.

### حداکثر صعود مویبگی

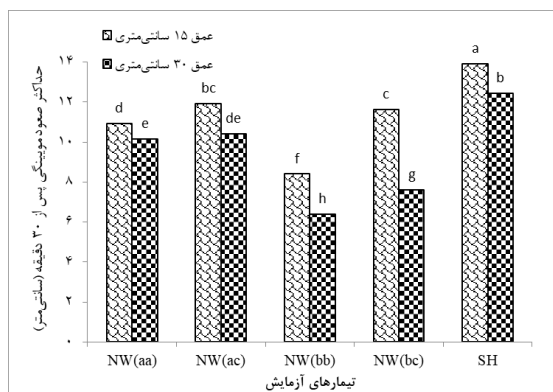
پارامتر صعود مویبگی یکی از پارامترهایی است که فقط در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مطرح می‌شود و مقدار آن تأثیر بسزایی در میزان تبخیر سطحی در این روش آبیاری دارد. هرچه مقدار صعود آب کمتر باشد، سطح خاک کمتر خیس می‌شود و تبخیر از سطح خاک نیز کمتر می‌شود. جدول ۷ نتایج تجزیه واریانس حداکثر صعود مویبگی مربوط به زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه برای عمق کارگذاری و نوع تشک ژئوتکستایل را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اثر عمق نصب لوله‌های آبد و نوع پوشش بر حداکثر صعود مویبگی در سطح یک درصد معنی‌دار شده است.

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ حداکثر صعود مویبگی مربوط به تیمار شاهد در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر است و کمترین صعود مویبگی مربوط به

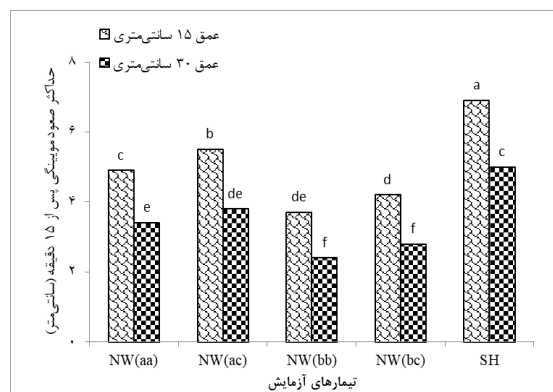
جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس حداکثر صعود مویبگی مربوط به زمان‌های مختلف تحت عمق‌های کارگذاری و پوشش‌های مختلف

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات صعود مویبگی (سانتی‌متر مربع)	
		پس از ۱۵ دقیقه	پس از ۳۰ دقیقه
تیمار	۹	۵/۵۰**	۱۵/۷۶**
عمق	۱	۱۸/۵۶**	۲۷/۲۶**
پوشش	۴	۷/۶۴**	۲۶/۲۸**
عمق X پوشش	۴	۰/۲۱*	۲/۳۵**
خطا	۲۰	۰/۱۰	۰/۱۳
ضریب تغییرات (/.)	-	۶/۸۵	۳/۳۸

\*\* در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار، \* در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار و NS بی‌معنی



شکل ۷- اثرات متقابل عمق استقرار لوله‌های آبد و نوع تشک ژئوتکستایل بر حداکثر صعود مویبگی پس از ۳۰ دقیقه



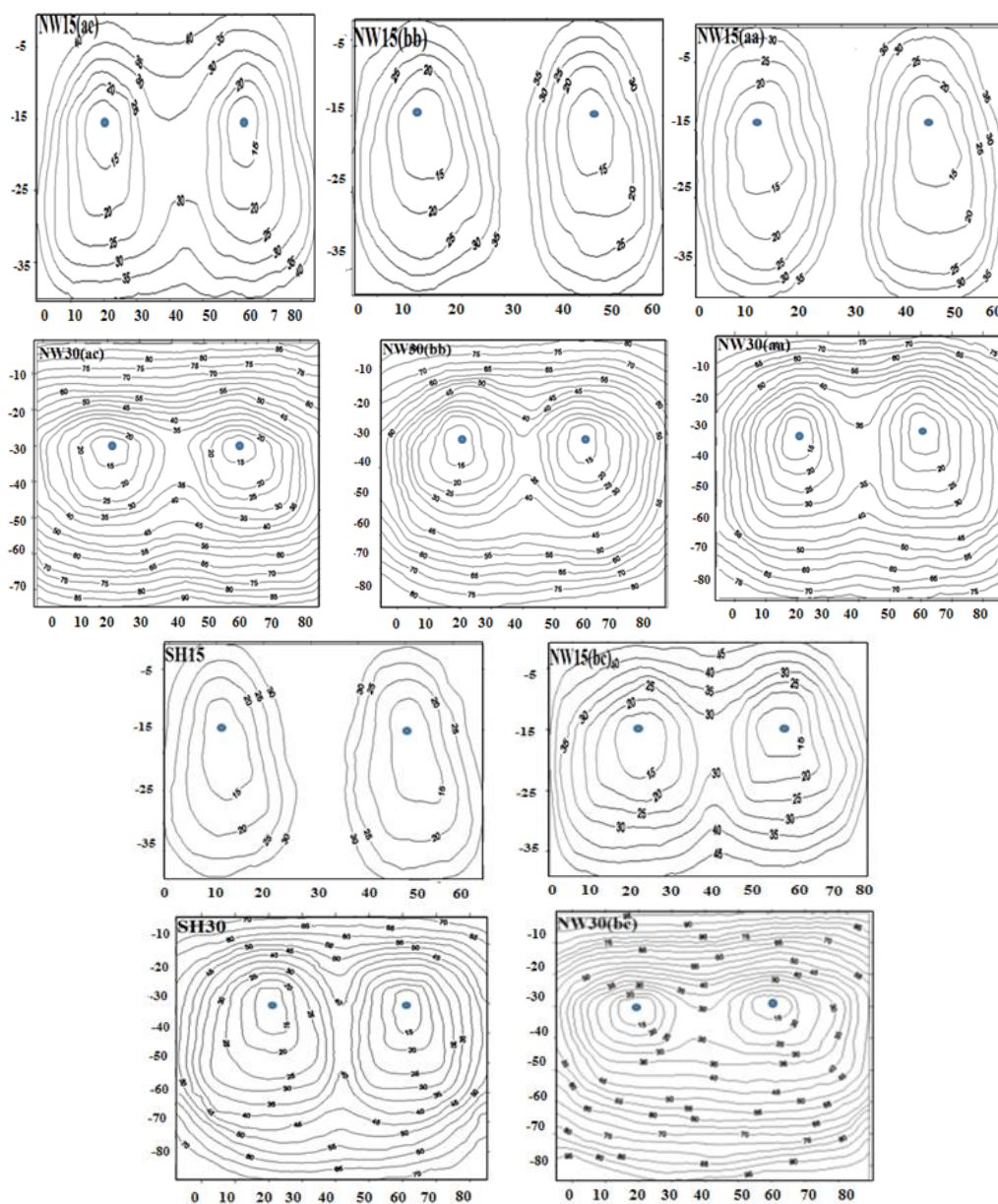
شکل ۶- اثرات متقابل عمق استقرار لوله‌های آبد و نوع تشک ژئوتکستایل بر حداکثر صعود مویبگی پس از ۱۵ دقیقه

سانتی‌متر است. از بین تیمارهایی که در عمق ۳۰ سانتی‌متر قرار گرفته است، تیمارهای ژئوتکستایل با آبدگری عمودی پایین‌تر مدت زمان بیشتری برای رسیدن جبهه رطوبتی به سطح خاک لازم داشتند و تیمار NW(bb) با عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر با مدت زمان ۹۰ دقیقه بیشترین زمان را برای رسیدن جبهه رطوبتی به سطح خاک لازم داشته است. در ضمن گستردگی و همپوشانی جبهه رطوبتی نیز به خوبی انجام شده است. در مقابل جبهه رطوبتی در تیمار شن و ماسه با عمق نصب ۱۵ سانتی‌متر در حدود ۳۰ دقیقه به سطح خاک رسیده و کمترین زمان را داشته است. براساس این پارامتر نیز تیمارهای ژئوتکستایل با آبدگری عمودی پایین، تیمارهای مطلوب‌تری بوده‌اند.

### هم‌پوشانی جبهه‌های رطوبتی

پیشروی جبهه رطوبتی برای تیمارهای آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. منحنی‌های نشان داده شده در شکل منحنی هم‌زمان است. با رسیدن جبهه رطوبتی به سطح خاک، آزمایش به پایان می‌رسید. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، کارگذاری در عمق ۱۵ سانتی‌متر باعث شده است تا همپوشانی پیاز رطوبتی بین جبهه‌های رطوبتی لوله‌های آبد به‌طور کامل اتفاق نیفتد؛ اما نصب در عمق ۳۰ سانتی‌متر این فرصت را به‌وجود آورده است که جبهه‌های رطوبتی به‌خوبی همپوشانی داشته باشند؛ بنابراین عمق ۳۰ سانتی‌متر در این شرایط مطلوب‌تر از عمق ۱۵





شکل ۸ - منحنی‌های پیشروی رطوبت تیمارهای مختلف در دو عمق کارگذاری ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر

### منابع

1. Abou Seeda, M.A., Hammad, S.A., Yassen, A.A., and Abou El-Nour, E.A., 2020. Evaluation and optimization of Subsurface Irrigation (SDI) system: A review. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 10(3): 503-534.
2. Afshar-Jahanshahi, M., Zarebyaneh, H., Naghavi, H. and Eslami, A., 2013. Assessment of influence of installation depth of emitter with same discharges on moisture distribution in subsurface drip irrigation system and simulation with HYDRUS-2D model. *Irrigation and Water Engineering*, 3(2): 101-113. [In Persian].
3. Al-Hazmi, H.E., Mohammadi, A., Hejna, A., Majtacz, J., Esmaili, A., Habibzadeh, S., Saeb, M.R., Badawi, M., Lima, E.C. and Mąkinia, J.,

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از تشک ژئوتکستایل در اطراف لوله‌های آبدی سبب گسترش الگوی توزیع رطوبت در جهت عرضی و کاهش صعود مویینگی و عمق خیس‌شدگی نسبت به تیمار شن و ماسه می‌شود. تشک‌های ژئوتکستایلی که از ژئوتکستایل‌هایی با آب‌گذری عمودی کم تهیه می‌شوند، می‌توانند گسترش افقی و عمودی مناسبی را ایجاد کنند و به‌عنوان یک گزینه مناسب برای زمین‌های فضای سبز، ورزشگاه‌ها و گلخانه‌ها با کشت گیاه بررسی شوند.

11. Mohammed, A.K. and Abed, B.S., 2020. Water distribution and interference of wetting front in stratified soil under a continuous and an intermittent subsurface drip irrigation. *Journal of Green Engineering*, 10(2): 268-286.
12. Najafi, P. and Tabatabaei, S.H., 2010. Application of sand and geotextile envelope in subsurface drip irrigation. *African Journal of Biotechnology*, 9: 5147-5150.
13. Provenzano, G., 2007. Using HYDRUS-2D Simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133: 342-349.
14. Rahimi, H., Ghobadina, M. and Sohrabi, T., 2007. Application of Geosynthetics in irrigation and drainage projects. IRNCID. Tehran, Iran. 126pp. [In Persian].
15. Ritzema, H., Abdel-Dayem, S., El-Atfy, H., Nasralla, M.R., and Shaheen, H.S., 2023. Challenges in modernizing the subsurface drainage systems in Egypt. *Agricultural Water Management*, 288, p.108484.
16. Soltani-Gerdefaramarzi, S., Alemzadeh, A. and Yarami, N., 2024. Effect of Subsurface Leaky Irrigation Using Wastewater on the Growth and Nutrient Content of Osage orange (*Maclura pomifera*). *Applied Fruit Science*, 66(1): 145-154.
17. Teshnizi, F.A., Ghobadina, M., Abbasi, F., Hallett, P.D. and Sepehrnia, N., 2023. Biochar and flow interruption control spatio-temporal dynamics of fecal coliform retention under subsurface drip irrigation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 253, p.104128.
2023. Wastewater treatment for reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*, p.116711.
4. Camp, C.R., 1998. Subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the ASAE*, 41(5): 1353-1367.
5. Ebrahimi, M., 2012. Investigation of wetting front in subsurface drip irrigation with geotextile envelope. MSc. University of Zanjan. Iran. [In Persian].
6. Goochani, S., Ghobadina, M., Tabatabaei, S.H., Motaghian, H. and Asgari, A., 2023. The effect of using bi-levels of geocomposite sheets on the quality of Shahrekord University wastewater. *Water and Soil Management and Modelling*. [In Persian].
7. Gunarathna, M.H.J.P., Sakai, K., Nakandakari, T., Kazuro, M., Onodera, T., Kaneshiro, H., Uehara, H. and Wakasugi, K., 2017. Optimized subsurface irrigation system (OPSIS): Beyond traditional subsurface irrigation. *Water*, 9(8), p.599.
8. Heshmati, F., Ghobadina, M., Nouri, M.R. and Tabatabaei, S.H., 2017. The effect of geocomposite sheets on the wetting pattern in subsurface irrigation system. *Journal of Water and Soil*, 7(2): 41-52. [In Persian].
9. Khanjani, S. and Dalirehassannia, R., 2014. Numerical Investigation of Layered Soils Moisture Distributions under Linear Source Drip Irrigation. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(2): 419-429. [In Persian].
10. Lenjabi, M., 2008. Consideration of soil moisture front in subsurface drip irrigation with geotextile envelope. MSc. thesis. Shahrekord University, Iran. [In Persian].