

بررسی آزمایشگاهی تأثیر مغناطیس و ماده‌ی آلی بر آب و مشخصات حرکت جبهه‌ی رطوبتی در محیط متخلخل

سید هادی ابطحی^{۱*}، محمد همتی^۲ و وحید رضا وردی‌نژاد^۳

چکیده

میدان‌های مغناطیسی، ضمن تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی آب، منجر به تغییر مشخصات حرکت آب در محیط متخلخل می‌شوند. هدف از تحقیق حاضر، بررسی آزمایشگاهی تأثیر تلفیقی و مجزای کاربرد مغناطیس و ماده‌ی آلی بر نحوه توزیع رطوبت در خاک‌های مطبق است. بدین منظور، تأثیر آب‌های مغناطیسی و معمولی بر مشخصات کیفی آب و همچنین، در قالب هشت تیمار، بر حرکت رطوبت در خاک‌های درشت‌بافت، ریزبافت، درشت‌بافت مخلوط با پیت‌ماس و ریزبافت مخلوط با پیت‌ماس مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت، نتایج نشان داد (به جهت عدم دسترسی، به ادوات ساده استاندارد، یا محدودیت شدید در به‌کارگیری دستگاه‌های بروز اولیه، ارجاع به نتایج و بحث‌ها، صرفاً پس از اعتبارسنجی مجدد در سطح ملی - بین‌المللی، بلامانع می‌باشد) که در اثر اعمال مغناطیس بر آب آبیاری، هدایت الکتریکی آب زهکشی در تمام تیمارها به‌جز تیمار خاک ریزبافت مخلوط با پیت‌ماس کاهش یافت و بیشترین کاهش در تیمار خاک ریزبافت و تا $0/875$ mmho/cm گزارش شد. همچنین، pH زه‌آب نیز در هر چهار تیمار خاک افزایش پیدا کرد که بیشترین افزایش در تیمار خاک ریزبافت مشاهده گردید و مقدار آن به $7/6$ رسید. علاوه بر آن، با تحلیل منحنی‌های پیشروی-توزیع رطوبتی خاک مشخص شد که در اثر به‌کارگیری آب مغناطیسی و به‌طور نمونه در بیشترین حالت ممکن در راستای افقی، شعاع پیشروی افقی با $19/81$ درصد افزایش به $38/9$ سانتی‌متر رسید. در پایان، نتایج تحقیق حاضر به‌طور کلی حاکی از تأثیرگذاری مغناطیس بر خصوصیات شیمیایی آب خاک و به‌ویژه مشخصات دینامیکی آب در خاک، از جمله الگوی توزیع رطوبتی و سرعت پیشروی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب مغناطیسی، پیت‌ماس، توزیع رطوبت، جبهه‌ی رطوبتی، خاک.

ارجاع: ابطحی س. ه. همتی م. و وردی‌نژاد و. ر. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی تأثیر مغناطیس و ماده‌ی آلی بر آب و مشخصات حرکت جبهه‌ی رطوبتی در محیط متخلخل. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۲۳-۳۶.

۱- دکتری تخصصی علوم و مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

* نویسنده مسئول: s.h.abtahi@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴

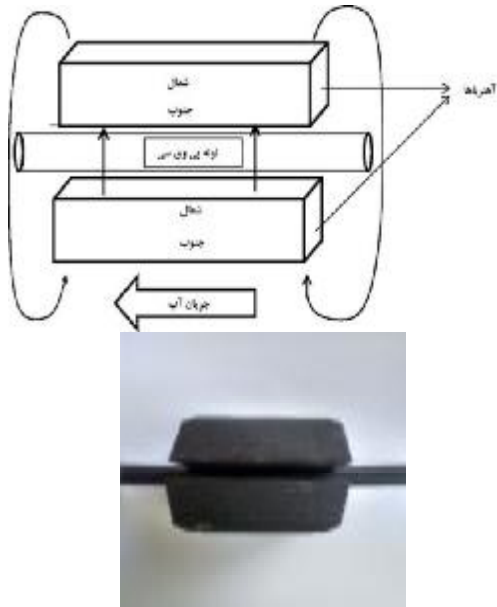
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۴

مقدمه

بررسی الگوهای رطوبتی تحت یک قطره‌چکان منفرد، لازمه‌ی طراحی، مدیریت و اجرای سیستم‌های آبیاری قطره‌ای است. طراحی مناسب این سیستم‌ها باید ترکیبی مطلوب از ابعاد الگوی خیس‌شدگی، دبی قطره‌چکان، ویژگی‌های خاک، عمق ناحیه‌ی ریشه و فاصله‌ی بین قطره‌چکان‌ها و لترال‌ها را شامل شود. عوامل متعددی همچون ویژگی‌های خاک، دبی قطره‌چکان، حجم آب مصرفی، زمان کاربرد و نوع آب مصرفی بر دینامیک آب در خاک تحت قطره‌چکان سطحی تأثیر می‌گذارند. با این حال، توجه کمتری به تأثیر نوع آب، به‌خصوص آب مغناطیسی بر دینامیک آب در خاک شده است. آب عبوری از بین میدان مغناطیسی دائمی یا الکترومغناطیس نصب شده بر روی خط لوله‌ی تغذیه، منجر به تصفیه‌ی فیزیکی آب و تولید آب مغناطیسی می‌شود (هیگاشیتانی و همکاران، ۱۹۹۳). با توجه به مطالعات متعدد ثابت شده است که حتی یک میدان مغناطیسی ضعیف نیز می‌تواند آب را مغناطیسی کند (امیری و دادخواه، ۲۰۰۶). البته سورندران و همکاران (۲۰۱۶a) هم نشان دادند که تفاوت در مشخصات آب پس از ۴/۵ روز از بین می‌رود و آب به شرایط طبیعی خود باز می‌گردد. همچنین، تجزیه و تحلیل نتایج تصاویر اسکن شده میکروسکوپ الکترونی نشان داد که ساختار بلوری کربنات کلسیم موجود در این نوع آب با آب عادی متفاوت است (سورندران و همکاران، ۲۰۱۶b)؛ به‌طوری که طول این کریستال‌ها در این تیمار آبی بیشتر از آب غیرمغناطیسی است. واضح است که همه این تغییرات در خواص آب‌های مغناطیسی و ویژگی‌های شیمیایی آن، منجر به تغییر در رفتار آب در هنگام حرکت در محیط متخلخل می‌شود. تغییر در مشخصات آب، از جمله خواص الکترومغناطیسی، ترمودینامیکی، اپتیکی و مکانیکی آن، به‌عنوان مثال باعث تغییر در غلظت، چگالی، ظرفیت انحلال نمک، نقاط جوش و انجماد، pH، هدایت الکتریکی، کشش سطحی و ثابت دی‌الکتریک می‌شود (ژیاونفنگ و بو، ۲۰۰۸). همچنین، کاربرد تیمار آب مغناطیسی علاوه بر خنثی کردن سختی آب، با به‌کارگیری نیرو به مولکول‌های آب موجب افزایش تعداد مولکول‌های آب در واحد حجم می‌شود (کیانی، ۱۳۸۶). خوش‌روش و همکاران (۲۰۱۱) و همچنین مصطفی‌زاده‌فرد و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از نتایج آزمایش‌های میدانی به بررسی

اثر آب مغناطیسی و شوری آب آبیاری بر الگوی توزیع رطوبت خاک تحت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای پرداختند. در پژوهش آن‌ها سه تیمار آب خالص به‌عنوان شاهد، آب حاوی ۲۰۰ ppm کربنات کلسیم و ۴۰۰ ppm کربنات کلسیم مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، نتایج نشان داد که رطوبت خاک تحت تیمار آب مغناطیسی نسبت به آب غیرمغناطیسی تا ۷/۵٪ بهبود یافت و این افزایش در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. همچنین، استفاده از آب مغناطیسی در کاهش نفوذ عمقی مفید بود. در نتیجه، کاهش فاصله‌های آبیاری برای دستیابی به عملکرد آبیاری بالاتر توصیه شد. در ادامه، مصطفی‌زاده‌فرد و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر آب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، مانند کاتیون و آنیون، تحت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای پرداختند. آن‌ها از آزمایش‌های مزرعه‌ای مشابه با تیمارهای مصطفی‌زاده‌فرد و همکاران (۲۰۱۱) استفاده کردند. اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی خاک با استفاده از نمونه‌گیری از خاک در موقعیت‌های مختلف در اطراف قطره‌چکان، برای آبیاری‌های اول و دهم ۲۴ ساعت پس از آبیاری انجام شد. نتایج به دست آمده، حکایت از آن داشت که استفاده از آب مغناطیسی منجر به کاهش قابل توجه کاتیون‌ها و آنیون‌ها می‌گردد. بیلدریم (۲۰۱۴) با تمرکز بر برخی از نکته‌هایی که می‌توانند مطالعه‌ی مصطفی‌زاده‌فرد و همکاران (۲۰۱۲) را بهبود دهند، به بررسی اصول هیدرولیکی برای جریان در قطره‌چکان‌های طولانی مسیر ماریپیچ درون خط، تأثیر تغییر ویسکوزیته بر رژیم جریان از طریق همان قطره‌چکان‌ها و تأثیر آب مغناطیسی بر عناصر شیمیایی خاک پرداخت. در نهایت، بحث‌ها لزوم تحقیقات بیشتر را در زمینه‌ی تأثیر مثبت آب مغناطیسی بر کاهش مشکل گرفتگی قطره‌چکان‌های طولانی‌مسیر سیلیکونی مورد آزمایش در مطالعه مصطفی‌زاده‌فرد و همکاران (۲۰۱۱) را مشخص کردند. همچنین، سورندران و همکاران (۲۰۱۶ a & b)، اثر آب مغناطیسی را بر خواص آب و رطوبت خاک با استفاده از آزمایش‌های گلدانی و مزرعه‌ای ارزیابی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تصفیه‌ی مغناطیسی منجر به تغییر خواص آب همچون هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، سطح شوری و pH شد. همچنین، مشخص شد که رطوبت خاک تحت به‌کارگیری تیمار آب مغناطیسی، نسبت به آب غیرمغناطیسی بالاتر بود. در نتیجه، هدف پژوهش حاضر

قطره‌چکان با دبی ثابت برابر با ۴ لیتر در ساعت را نشان می‌دهد.



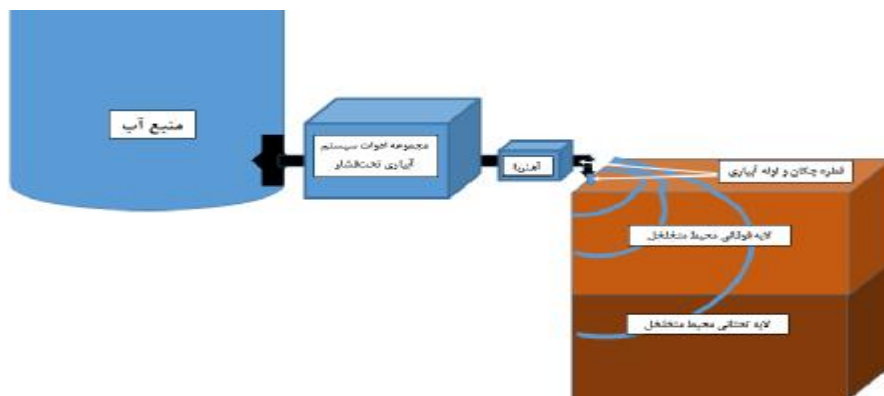
شکل ۱- شماتیک کلی و تصویری از جفت آهنرباهای دائمی استفاده‌شده برای مغناطیسی کردن آب درون لوله

بررسی تلفیقی و جداگانه آثار آب مغناطیسی و ماده آلی بر خصوصیات شیمیائی آب و دینامیک آب در خاک‌های مطبق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر با هدف بررسی آثار آب مغناطیسی بر حرکت آب در محیط‌های متخلخل خاکی و خاک مخلوط با ماده‌ی آلی پیت‌ماس و مقایسه‌ی آثار آن‌ها با شرایط استفاده از آب معمولی، در آزمایشگاه آبیاری و زهکشی و نیز آزمایشگاه خاک دانشگاه ارومیه طراحی و اجرا شد. در این تحقیق، برای به‌کارگیری مغناطیس از چهار جفت آهن‌ربای دائمی، با دو شدت مغناطیس مشخص (سه جفت آهن‌ربای ۰/۲ تسلا، و یک جفت آهن‌ربای ۰/۳ تسلا) استفاده شد (شکل ۱).

آزمایش‌ها برای مشاهده‌ی حرکت جبهه‌ی رطوبتی در خاک، در یک جعبه با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ cm از جنس پلکسی‌گلس شفاف انجام شد. شکل ۲، نمایی از مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل منبع آب، لوله‌ی پلاستیک، مجموعه آهن‌رباها برای به‌کارگیری میدان مغناطیسی بر آب، جعبه از جنس پلکسی‌گلس شفاف و



شکل ۲- شماتیک کلی و تصویری از مدل و برخی از تجهیزات آزمایش‌ها

در ادامه، پس از طی مراحل گوناگون آماده‌سازی مواد و ادوات آزمایش، بلافاصله پس از شروع آبیاری و ورود جریان آب به خاک، موقعیت جبهه‌های پیشروی رطوبت در سطح تماس آب، خاک و پلکسی‌گلس در بازه‌های زمانی مشخص ثبت شد. اندازه‌گیری پروفیل رطوبتی مذکور در جعبه‌ای که یک قسمت از چهار قسمت سیلندر کامل پروفیل خاک تحت آبیاری را نشان می‌داد، انجام شد. بنابراین در این آزمایش‌ها، یک‌چهارم از منطقه‌ی مرطوب خاک بررسی شد. در نتیجه، باید دبی قطره‌چکان واقعی در چهار ضرب شود (لی و همکاران، ۲۰۰۷؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵). در نهایت، مشخصات شیمیایی آب زهکشی خارج‌شده از تیمارهای محتوی نمونه‌های خاک و نمونه خاک‌های مخلوط با پیت‌ماس، با دستگاه‌های سنجش Ph (pH meter) و هدایت الکتریکی (EC meter) اندازه‌گیری گردید.

تیمارهای محیط متخلخل پژوهش حاضر نیز شامل دو نمونه‌ی خاک لوم شنی (۷۴٪ شن، ۱۱٪ رس و ۱۵٪ سیلت) و رسی (۱۵/۵٪ شن، ۵۲/۵٪ رس و ۳۲٪ سیلت) و محیط متخلخل هیدروپونیک (ماده‌ی آلی پیت‌ماس) بودند، که مشخصات فیزیکی خاک درشت‌بافت و ریزبافت در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

در پژوهش حاضر، تیمارهای ترکیبی خاک و هیدروپونیک، در قالب مخلوط همگن خاک با ماده‌ی آلی (۲۰٪) تهیه شدند. همچنین، ضخامت کل لایه خاک ۳۵ سانتی‌متر (ضخامت لایه‌ی درشت‌بافت (لوم شنی: SL) ۲۵ سانتی‌متر و لایه‌ی ریزبافت (رسی: C) ۱۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. از طرفی نیز، برای نصب دقیق و نظارت بیشتر بر تجهیزات آبیاری قطره‌ای و همچنین، رؤیت بهتر مراحل انجام آزمایش ۱۵ سانتی‌متر از بالای جعبه خالی نگه‌داشته شد. در ادامه، تیمارهای مذکور در قالب دو لایه‌ی مطابق افقی متراکم شدند. استراتژی نحوه‌ی بررسی تیمارهای ترکیبی مورد مطالعه T₁-T₈ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات خاک آزمایش‌ها

وزن مخصوص (g/cm ³)	pH	هدایت الکتریکی (mmho/cm)	بافت خاک	اجزای بافت خاک (%)			نوع خاک
				سیلت	رس	شن	
۱/۳۹	۷/۵۳	۰/۷۵	لوم شنی	۱۵	۱۱	۷۴	درشت‌دانه
۱/۶۹	۷/۴۵	۰/۹۰۳	رسی	۳۲	۵۲/۵	۱۵/۵	ریز‌دانه

جدول ۲- خلاصه‌ی تیمارهای تحقیق

تیمار	لایه فوقانی	لایه تحتانی	نوع لایه	نوع آب
T ₁	بافت ریز+پیت‌ماس (CP)	بافت درشت+پیت‌ماس (SLP)	افقی	مغناطیسی
T ₂	بافت ریز+پیت‌ماس (CP)	بافت درشت+پیت‌ماس (SLP)	افقی	معمولی
T ₃	بافت درشت+پیت‌ماس (SLP)	بافت ریز+پیت‌ماس (CP)	افقی	مغناطیسی
T ₄	بافت درشت+پیت‌ماس (SLP)	بافت ریز+پیت‌ماس (CP)	افقی	معمولی
T ₅	بافت درشت (SL)	بافت ریز (C)	افقی	مغناطیسی
T ₆	بافت درشت (SL)	بافت ریز (C)	افقی	معمولی
T ₇	بافت ریز (C)	بافت درشت (SL)	افقی	مغناطیسی
T ₈	بافت ریز (C)	بافت درشت (SL)	افقی	معمولی

معمولی، pH آب زهکشی در کلیه‌ی تیمارها افزایش یافت. با توجه به ظرفیت بالاتر خاک رس، در جذب و نگهداری نمک‌ها و همچنین، ظرفیت بالای آب مغناطیسی در آب‌شویی نمک، بیشترین میزان pH در تیمار رس گزارش شد که تا ۷/۶ افزایش پیدا کرد (جدول ۳). از طرف دیگر، تأثیر به‌کارگیری تیمار شدت مغناطیس بر مقادیر پارامترهای هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول، در کلیه‌ی تیمارها به‌جز تیمار SLP کاهش یافته و کیفیت

نتایج و بحث^۱

تأثیر پیت‌ماس و آب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی محلول زه‌آب خاک

در این بخش، با به‌کارگیری میدان مغناطیسی بر آب آبیاری و مقایسه‌ی نتایج کاربرد آب مغناطیس با آب

۱- به جهت عدم دسترسی، به ادوات ساده استاندارد، یا محدودیت شدید در به‌کارگیری دستگاه‌های به روز اولیه، ارجاع به نتایج و بحث‌ها، صرفاً پس از اعتبارسنجی مجدد در سطح ملی- بین‌المللی، بلامانع می‌باشد.

کاسترو پالاسیو و همکاران، ۲۰۰۷). در نتیجه، کاربرد آب مغناطیسی، با استناد به نتایج پژوهش حاضر و تحقیقات کنیا و پارسونز (۲۰۰۵) و محمد (۲۰۱۳) موجب کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی در محلول خاک (پس از برداشت محصول) می‌شود. همچنین به‌طور کلی، نتایج مذکور با نتایج حاصل از تغییرات پارامترهای کیفی در تحقیق الاوگایدی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت داشت.

آب بهبود یافت. همچنین، بیشترین مقدار کاهش پارامتر هدایت الکتریکی و مواد جامد محلول در آب زهکشی در اثر عبور آب غیرمغناطیسی از تیمار محیط متخلخل C گزارش شد و تا مقدار ۰/۸۷۵ کاهش یافت. پس می‌توان گفت پالایش آب توسط به‌کارگیری میدان مغناطیسی که جزء روش‌های تصفیه فیزیکی به شمار می‌رود، برخی از ویژگی‌های آن، مانند آرایش بارهای الکتریکی مولکول‌های آب، قابلیت انحلال نمک‌ها و pH آبی را تغییر می‌دهد

جدول ۳- نتایج پارامترهای خصوصیات کیفی آب تحت شرایط استفاده از آب مغناطیسی و پیت‌ماس

نوع آب	تیمار	هدایت الکتریکی (mmho/cm)	کل مواد جامد محلول (TDS (mg/l))	pH
معمولی	SLP	۰/۷۳۷	۴۷۱	۷/۶
	CP	۰/۹۵۰	۶۰۸	۷/۵
	C	۰/۹۰۳	۵۷۷/۹۲	۷/۴۵
	SL	۰/۷۵۰	۴۸۰	۷/۵۳
مغناطیسی	SLP	۰/۷۳۴	۴۶۹/۷۶	۷/۶۲
	CP	۰/۹۶۱	۶۱۵/۰۴	۷/۵۴
	C	۰/۸۷۵	۵۶۰	۷/۶
	SL	۰/۷۴۰	۴۷۳/۶	۷/۶۳

در مناطق کم‌آبی که ریشه‌های گیاهان عمیق است و نفوذ بیشتر آب در جهت عمقی و نیز خیس‌شدگی کمتر سطح خاک مورد نظر است، دارای اهمیت ویژه‌ای است. مقایسه‌ی منحنی‌های دو تیمار نمونه T_4 و T_3 از این نظر که نمونه‌ای پرکاربرد از وضعیت قرارگیری خاک‌ها در زمین‌های کشاورزی است، دارای اهمیت ویژه‌ای است. با توجه به شکل ۳ (ب)، کاربرد آب مغناطیسی در کل دوره‌ی آزمایش (۶۰ دقیقه) موجب کاهش ۸/۴٪ عمق نفوذ نسبت به شرایط استفاده از آب معمولی شد. البته در ۳۰ دقیقه‌ی اول نفوذ و کمی بعد از آن، پیشانی جبهه‌ی رطوبتی در خاک همگن درشت بافت قرار داشت. در انتهای این بازه‌ی زمانی نیز مشخص شد عمق نفوذ تحت تأثیر تیمار آب مغناطیسی (T_3) ۱۸/۱٪ نسبت به شرایط به‌کارگیری تیمار آب معمولی کاهش یافت. این نتیجه، بیانگر این موضوع است که در محیط متخلخل درشت بافت مخلوط با پیت‌ماس، تأثیر آب مغناطیسی بیشتر بود، که می‌تواند ناشی از تفاوت میزان اختلاط جریان در لوله‌های جریان در محیط متخلخل درشت‌بافت با ریزبافت باشد. در نتیجه، اختلاف بین مقادیر نفوذ تیمارهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی در ۳۰ دقیقه پایانی آزمایش ۵۶٪ کاهش نشان داد. نتیجه‌ی مذکور با نتایج الاوگایدی

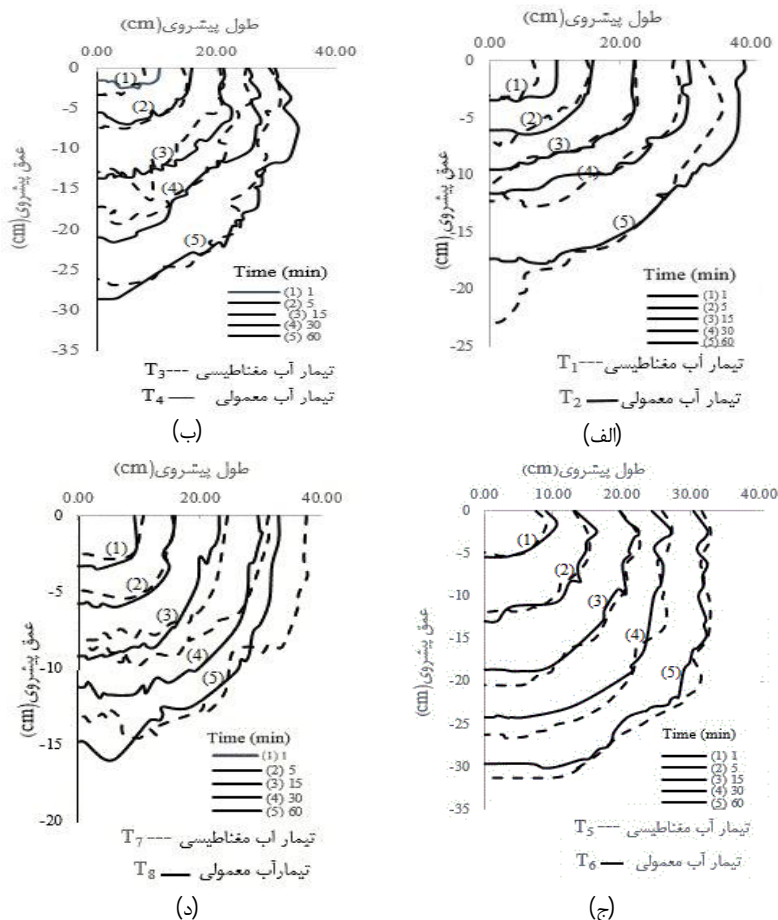
همچنین، ممکن است اختلاط فیزیکی بین لوله‌های جریان سیال متأثر از میدان مغناطیسی در میزان تأثیرپذیری آن اهمیت داشته باشد (لین، ۱۹۹۱)؛ در نتیجه، دلیل برخی از تفاوت‌ها نیز می‌تواند ناشی از این امر باشد.

تأثیر آب مغناطیسی بر الگوی توزیع رطوبت

در مقایسه‌ی منحنی‌های جبهه‌های پیشروی دو تیمار T_2 و T_1 از شکل ۳ (الف)، افزایش ۲۳/۶۸٪ عمق نفوذ آب در خاک و کاهش ۱۷/۲٪ طول پیشروی در سطح خاک تحت تأثیر به‌کارگیری تیمار شدت مغناطیسی، در انتهای بازه ۶۰ دقیقه‌ای آزمایش مشاهده شد. همچنین، همان‌طور که در این شکل مشخص شد، تا زمانی که جبهه‌ی رطوبتی آب در بافت ریزدانه‌ی خاک مخلوط با پیت‌ماس قرار داشته است، تفاوت مذکور میان دو تیمار T_2 و T_1 محسوس نبود. البته با توجه به مقادیر عمق نفوذ در دو منحنی مربوط به زمان ۳۰ دقیقه و مقایسه‌ی آن‌ها، مشخص شد عمق پیشروی آب در خاک در اثر استفاده از آب مغناطیسی ۶٪ افزایش یافته است؛ در حالی که با ورود آب به بافت درشت خاک مخلوط با پیت‌ماس، این تفاوت ملموس‌تر شد. در نتیجه، تیمار ترکیبی آب و خاک مذکور

همکاران، ۲۰۰۵). نتیجه‌ی حاضر از جنبه اقتصادی، کاربردهای متعددی دارد که از مهم‌ترین آن‌ها، می‌توان به کاهش نفوذ عمقی، هدررفت آب و افزایش کارایی مصرف و بهره‌وری آب کشاورزی اشاره کرد. در نتیجه، استفاده از چنین تیماری در مناطق مختلف کشور که با مشکل تنش و بحران آبی مواجه هستند، ضروری به‌نظر می‌رسد.

و همکاران (۲۰۱۷) در زمینه کاهش (۶/۳ درصد) نفوذ عمقی آب در خاک مطابقت داشت. البته تفاوت مشاهده‌شده میان نتایج پژوهش حاضر با تحقیقات بررسی‌شده را می‌توان ناشی از عواملی چون شدت، جهت و مدت زمان قرارگیری در معرض میدان مغناطیسی، نرخ جریان محلول و کیفیت آب دانست (چیپووسکی و



شکل ۳- مقایسه‌ی منحنی حرکت آب در خاک، تحت تیمارهای مختلف آب و محیط متخلخل

ذخیره شده در خاک کافی باشد، فاصله‌ی قطره‌چکان‌ها و در نتیجه لترال‌ها نیز می‌تواند افزایش یابد. همچنین، الاوگایدی و همکاران (۲۰۱۷) تحت شرایطی مشابه و با استفاده از آب مغناطیسی اعلام کردند که استفاده از آب مغناطیسی منجر به افزایش شعاع مرطوب سطحی و کاهش عمق مرطوب عمودی برای پروفیل‌های خاک همگن می‌شود. البته در مورد لایه‌های غیرهمگن نیز نتایج نسبتاً مشابهی حاصل شد. یافته‌های اشاره شده قبل با نتایج مصطفی‌زاده فرد و همکاران (۲۰۱۱) و خوش‌روش و همکاران (۲۰۱۱) هم تا حدی مشابه است. در نتیجه، به

از طرف دیگر، پیشروی شعاعی آب در سطح خاک، در نتیجه‌ی استفاده از آب مغناطیسی ۳/۵٪ افزایش پیدا کرد. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشخص است، بجز در منحنی پیشروی ۶۰ دقیقه، در دیگر بازه‌های زمانی آزمایش، منحنی آب مغناطیسی در پروفیل سطحی خاک در جهت افق، پیشرفت کمتری نسبت به منحنی آب معمولی داشته است، که این امر نشان‌دهنده‌ی لزوم گذشت زمان، برای مشاهده‌ی تأثیرگذاری واقعی آب مغناطیسی است. از طرف دیگر، در آبیاری قطره‌ای با افزایش شعاع خیس‌شدگی، در صورتی که حجم آب

خلاف دو تیمار T_5 و T_6 ، به کارگیری آب مغناطیسی موجب کاهش ۱۰/۸٪ عمق نفوذ و افزایش ۱۹/۸٪ طول پیشروی شد. پس می‌توان از تیمار حاضر نیز در نواحی کشاورزی با تیمارهای خاکی مشابه، که زیر کشت گیاهانی با ریشه سطحی بوده و میزان تبخیر در آنها پایین است، بهره برد. به طور کلی، مقدار متوسط حجم آب ذخیره شده در منطقه‌ی مرطوب خاک، به دلیل استفاده از آب مغناطیسی افزایش می‌یابد. مصطفی‌زاده فرد و همکاران (۲۰۱۱) و سورندران و همکاران (۲۰۱۶b) دو دلیل ممکن را برای رطوبت بالای آب مغناطیسی ارائه کردند. اول، مغناطیس شدن مولکول‌های آب که تحت تأثیر نیروهای ون در والز و پیوندهای هیدروژن و در واکنش با یون‌ها بوده‌اند، موجب افزایش چسبندگی آن‌ها به ذرات می‌شود. دلیل دیگر، تغییر ساختار و تعدادی از خواص فیزیکی آب عبوری از درون یک میدان مغناطیسی است (گابریلی و همکاران، ۲۰۰۱). در نتیجه‌ی این امر، نرخ تبخیر و ترقق کاهش یافته و رطوبت بیشتری در خاک باقی می‌ماند. با توجه به عوامل اشاره شده، نتایج حاصل از تیمار حاضر در پژوهش جاری با دلیل اول مطابقت داشت. همچنین، با توجه به اینکه مطالعه‌ی فعلی در شرایط آزمایشگاهی و بدون کاشت انجام شده است و به سبب استفاده نکردن از آب شور، دلیل دوم تا حد زیادی می‌تواند در اینجا نادیده گرفته شود. به همین دلیل است که در برخی از تیمارهای آزمایش‌ها، نفوذ عمقی در حالت استفاده از آب مغناطیسی بیشتر از آب معمولی و طول پیشروی در سطح خاک کمتر حاصل شده است. در ادامه‌ی پژوهش حاضر، شعاع‌های پیشروی آب در محیط متخلخل مطابق درشت‌بافت و درشت‌بافت مخلوط با پیت‌ماس، به ترتیب بر روی خاک ریزبافت و ریزبافت مخلوط با پیت‌ماس، در زمان‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل ۴). در تیمار تحت آبیاری با آب معمولی (T_4) مشاهده شد که در جهت عمقی امتداد زیر قطره‌چکان و همچنین با افزایش زاویه‌ی شعاع بررسی از امتداد عمقی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، میزان شعاع پیشروی به‌طور پیوسته تحت زاویه صفر درجه کمترین و تحت زاویه ۹۰ درجه بیشترین بود. اختلاف مذکور بین شعاع‌های پیشروی متأثر از آب مغناطیسی و آب معمولی، از اوایل آزمایش (دقیقه اول) تا اواسط آن (دقیقه ۳۰) ۸۳/۷۲٪ افزایش یافت؛ ولی در ادامه تا انتهای آزمایش ۶۳/۲۹٪ کاهش پیدا کرد. این

سبب کاربرد آب در آبشویی، همان‌گونه که در پژوهش مصطفی‌زاده فرد و همکاران (۲۰۱۱) نیز مدّتظر بوده است، می‌توان با به‌کارگیری این تیمار، حجم آب مشخصی را برای آبشویی سطح وسیع‌تری از خاک و صرفاً در عمق کمتر و مفید ناحیه‌ی توسعه‌ی ریشه، استفاده کرد.

لازم به ذکر است که در دو بازه‌ی زمانی اول آزمایش (۱ و ۵ دقیقه) منحنی‌های پیشروی تحت تأثیر آب مغناطیسی در جهت عمقی بر منحنی‌های مربوط به تیمار آب معمولی پیشی گرفتند. این نتیجه نشان داد که برای مشاهده‌ی تأثیر تیمار مغناطیس بر عمق نفوذ، لازم است بازه‌ی زمانی مشخصی بعد از شروع آزمایش سپری شود. در تیمار حاضر، نفوذ سریع‌تر آب مغناطیسی در جهت عمقی در ابتدای نفوذ، دارای کاربرد ویژه‌ای است و به دلیل عبور سریع‌تر آب از لایه‌ی سطحی خاک، میزان تبخیر از خاک به میزان بالایی کاهش می‌یابد. در نتیجه، استفاده از آب مغناطیسی در این تیمار در اثر استفاده از مخلوط ماده‌ی آلی، علاوه بر بهبود ساختمان خاک، می‌تواند منجر به توزیع گسترده‌تر رطوبت و افزایش مساحت خیس‌شده در لایه‌ی سطحی خاک شود. نتیجه‌ی اخیر برای گیاهانی که در چنین تیماری از محیط متخلخل رشد می‌کنند، و توزیع ریشه‌های آن‌ها در کلیه‌ی جهات افقی یا عمودی گسترده است، حائز اهمیت بسیار است.

در ادامه، با بررسی منحنی پایان دوره‌ی دو تیمار T_5 و T_6 مشاهده شد که عمق نفوذ در جهت عمودی، در نتیجه‌ی استفاده از آب مغناطیسی ۵/۱٪ افزایش داشت. همچنین، طول پیشروی جبهه‌ی رطوبتی در سطح خاک و لایه‌ی سطحی تحت تأثیر کاربرد آب مغناطیسی ۴/۱٪ افزایش نشان داد. همان‌طور که در شکل ۳ (ج) نیز مشاهده شد، هر سه پروفیل رطوبتی آب در خاک در زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه پس از آزمایش، برخلاف دو بازه‌ی زمانی اول (۱ و ۵ دقیقه) جبهه‌ی رطوبتی متأثر از کاربرد آب مغناطیسی در هر دو جهت افقی سطح خاک و نیز در جهت عمودی محدوده‌ی زیر قطره‌چکان، دارای شعاع پیشروی بیشتری بودند.

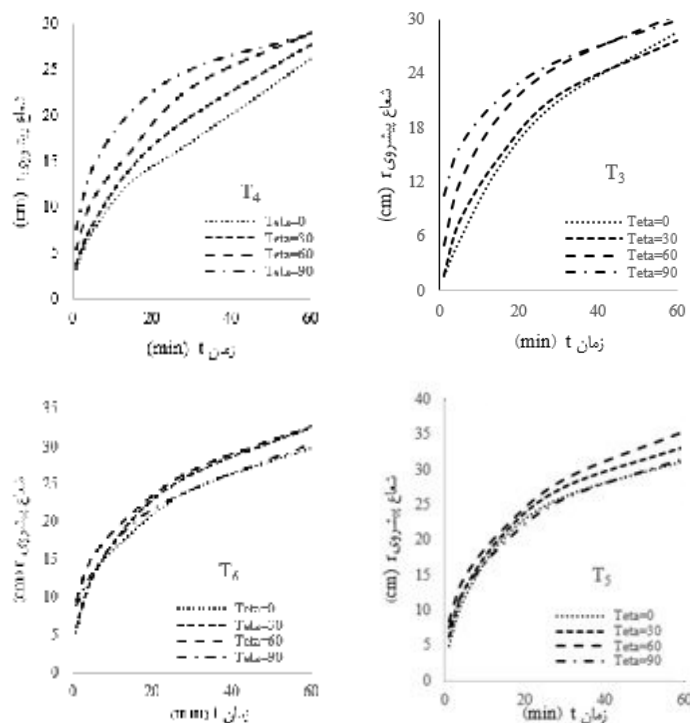
در ادامه، تأثیر کاربرد آب مغناطیسی، در حالت استفاده از مخلوط ماده‌ی آلی (پیت‌ماس) با بافت ریز و درشت خاک، تحت تیمار T_7 و مقایسه‌ی آن با شرایط به کار نگرفتن مغناطیس در تیمار T_8 بررسی شد (شکل ۳-د). در تیمار مذکور، مشابه مقایسه‌ی منحنی‌های دو تیمار T_3 و T_4 و بر

نفوذ سریع‌تر آب به داخل خاک و غلبه‌ی جریان عمودی بر افقی شد.

در ادامه، با توجه به شکل ۴، در تیمار T_5 بر خلاف تیمارهای T_3 و T_4 میزان شعاع پیشروی در جهت افقی $31/7$ سانتی‌متر و در جهت عمودی $31/4$ سانتی‌متر به دست آمد. همچنین، با بررسی نمودار تیمار T_6 ، وضعیت مشابهی وجود داشت. در تیمار متأثر از آب مغناطیسی (T_5) نیز به ویژه در انتهای آزمایش، تفاوت بین مقادیر پیشروی بسیار کم (کمتر از ۱٪) و حتی کوچک‌تر از اختلاف معادل در تیمار T_6 (۲٪) به دست آمد. در نتیجه، پروفیل توزیع رطوبت در عمق نیز نسبت به زاویه ۴۵ درجه از سطح یا عمق خاک، در مقایسه با تیمارهای مخلوط با پیت‌ماس دارای تقارن بیشتری بود.

نتیجه می‌تواند ناشی از بروز تأثیر واقعی گذشت زمان در اواخر دوره‌ی آزمایش، بر شعاع‌های پیشروی در لایه‌های محیط متخلخل تحت استعمال آب مغناطیسی باشد.

به‌طور کلی، روند مشاهده شده برای شعاع‌های پیشروی تیمار T_4 تحت زاوایای مختلف، در نیمه‌ی اول آزمایش در تیمار T_3 نیز تکرار شد؛ ولی در اواخر دوره‌ی آزمایش تحت این تیمار، منحنی مربوط به زاویه‌ی ۳۰ درجه بالاتر از منحنی صفر درجه قرار گرفت. دلیل این امر می‌تواند تأثیر جداره بر کاهش سرعت نفوذ در امتداد زیر قطره‌چکان باشد. از طرفی، منحنی زاویه‌ی ۶۰ درجه نیز در همین بازه‌ی زمانی بالاتر از ۹۰ درجه قرار گرفت. علت این امر می‌تواند تأثیر تلفیقی استفاده از آب مغناطیسی و مخلوط پیت‌ماس در لایه فوقانی باشد، که موجب افزایش تمایل



شکل ۴- مقایسه‌ی منحنی‌های حرکت شعاعی آب، در حالت قرارگیری بافت‌های درشت در لایه‌ی فوقانی محیط متخلخل

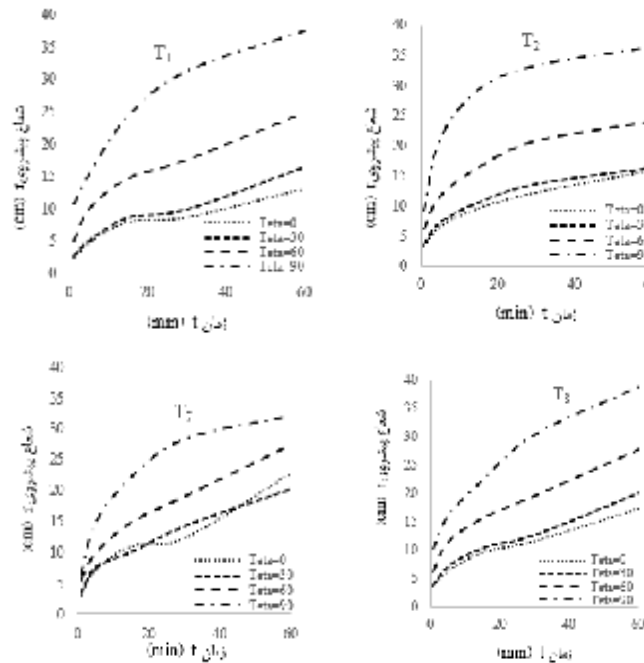
پیوستگی این روند در کل دوره‌ی آزمایش مشابه بودند؛ به طوری که در تیمار T_2 از ابتدای آزمایش تا دقیقه‌ی ۱۵، بیشترین میزان افزایش اختلاف پیشروی جبهه‌ی افقی با عمودی به مقدار ۲۱۲٪ مشاهده شد که در ۴۵ دقیقه پایانی به ۹/۶٪ رسید. از طرفی، میزان افزایش پارامتر شعاع پیشروی در جهت افقی نیز در ۳۰ دقیقه پایانی آزمایش به میزان محسوسی از ۲۵۹٪ در ۲۹ دقیقه اول

از طرف دیگر، در حالتی که خاک ریزبافت خالص و نیز مخلوط با پیت‌ماس در لایه‌ی فوقانی جعبه قرار داشت، وضعیت مقادیر شعاع‌های پیشروی در جهات مختلف و تحت زاوایای مختلف نسبت به عمق امتداد ریزش آب قطره‌چکان، مطابق نمودارهای شکل ۵ بود. همچنین، کلیه‌ی تیمارهای T_1 ، T_2 ، T_7 و T_8 از جنبه‌ی مقدار بیشتر پیشروی در جهت افقی نسبت به جهت عمودی و نیز

عمودی به دست آمد که این روند تا پایان آزمایش باقی ماند. همچنین، میزان سرعت پیشروی در بازه‌های ۴ دقیقه، ۱۰ دقیقه، ۱۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه پایانی آزمایش نیز به ترتیب در جهت افقی ۱/۴۲۵، ۰/۶۴، ۰/۵۴ و ۰/۲۸۳ سانتی‌متر در دقیقه و در جهت عمودی ۰/۸۷۵، ۰/۲۶، ۰/۲۰۷ و ۰/۱۵۷ سانتی‌متر در دقیقه به دست آمد. از طرف دیگر، در بررسی وضعیت پیشروی جبهه‌های رطوبتی در تیمار T₇، مقدار سرعت در محدوده‌های (۱ دقیقه اول آزمایش و همچنین، ۴، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه) میان نقاط منتخب زمانی (۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰) در جهت افقی به ترتیب ۶/۵، ۲/۰۸، ۰/۷۴، ۰/۴۱ و ۰/۱۳ سانتی‌متر در دقیقه و در جهت عمودی ۳/۱، ۱/۰۳، ۰/۳۸ و ۰/۰۹ و ۰/۳۵ سانتی‌متر در دقیقه بودند. نتایج اخیر نشان داد که در تیمار T₇ بر خلاف تیمار T₈ با گذشت زمان و در اواخر آزمایش بر خلاف تیمار آب معمولی، سرعت پیشروی در جهت عمودی بر سرعت افقی پیشی گرفت. این نتیجه می‌تواند ناشی از به‌کارگیری آب مغناطیسی در تیمار T₇ نسبت به استفاده از تیمار آب معمولی در T₈ باشد.

آزمایش، به ۹/۳٪ کاهش یافت. همچنین، مقدار افزایش در جهت عمودی (عمقی) از ۲۷۰٪ به ۳۰٪ کاهش پیدا کرد. در نهایت، حداکثر مقدار شعاع پیشروی در پایان آزمایش در قالب تیمار T₂ و به میزان ۳۶/۴ سانتی‌متر حاصل شد. در ادامه بررسی، تیمار T₁ که همان تیمار محیط متخلخل T₂ اما متأثر از به‌کارگیری آب مغناطیسی است، روند مشابهی به دست آمد. در تیمار مذکور، میزان اختلاف شعاع‌های پیشروی در عمق از اوایل آزمایش (دقیقه ۱) تا دقیقه پنج، ۲۷/۷٪ افزایش داشت. در ادامه، میزان افزایش در دقایق ۱۵ و ۳۰ نسبت به زمان قبل از خود به ترتیب به ۵۳/۷۷٪ و ۳۸٪ افزایش یافت و در نهایت، شتاب روند افزایشی کاهش پیدا کرد و در زمان ۶۰ دقیقه نسبت به ۳۰ دقیقه به ۸٪ رسید.

در بخش دیگری از تحقیق حاضر، با بررسی نمودار شعاع پیشروی تیمار T₈ در دو جهت افقی و نیز عمودی مشخص شد که پارامتر سرعت پیشروی در بازه‌های زمانی یک دقیقه ابتدای آزمایش در جهت افقی ۱۰/۲ سانتی‌متر در دقیقه و در جهت عمودی ۳/۵ سانتی‌متر در دقیقه بود. همچنین، سرعت پیشروی در جهت افقی بیشتر از جهت



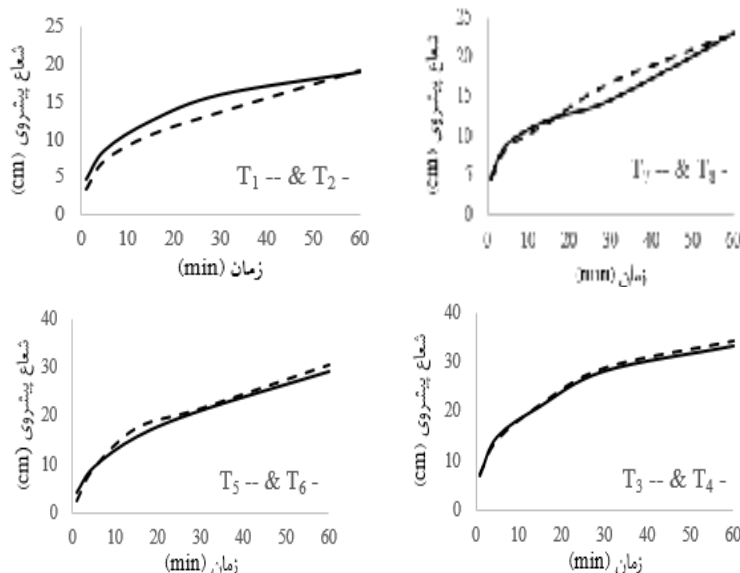
شکل ۵- مقایسه‌ی منحنی‌های شعاع پیشروی آب، در حالت قرارگیری بافت‌های ریز در لایه‌ی فوقانی محیط متخلخل

مغناطیس بر آب، شعاع پیشروی کاهش می‌یابد. همچنین، بررسی تیمار T₇ در مقایسه با T₈ نشان داد که در ۱۵

با مقایسه‌ی جداگانه‌ی شعاع‌های پیشروی تحت زاویه ۴۵ درجه نیز مشخص شد که در تیمارهای T₁ با T₂ و با اعمال

راستای زاویه‌ی ۴۵ درجه نیز مشاهده شد که شعاع‌های پیشروی در تیمارهای متأثر از آب مغناطیسی، در کل دوره‌ی آزمایش دارای روند مشابهی نسبت به هم بودند؛ به طوری که در بازه‌ی زمانی اول (۱۵ دقیقه‌ی ابتدایی) شعاع پیشروی تیمار مغناطیسی نسبت به تیمار معمولی کمتر بود.

دقیقه‌ی اول آزمایش، تیمار مغناطیس موجب کاهش گسترش شعاع رطوبتی و در ۴۵ دقیقه‌ی پایانی موجب افزایش آن، در این راستا شد. همچنین، تفاوت در میزان شعاع پیشروی در ۴۵ دقیقه‌ی پایانی آزمایش در مقایسه با تیمارهای T_7 و T_8 می‌تواند ناشی از استفاده نکردن از پیت‌ماس در خاک ریزبافت باشد. از طرف دیگر، با مقایسه‌ی نمودار تیمارهای T_3 با T_4 و T_5 با T_6 در



شکل ۶- مقایسه‌ی تیمارهای حرکت شعاعی آب در حالت قرارگیری بافت‌های ریز در لایه‌ی فوقانی-بافت‌های درشت در لایه‌ی فوقانی خاک

مورد انتظار از میدان مغناطیسی قابل بررسی باشد که امکان دارد در پژوهش حاضر وجود نداشته است (ماگارد، ۱۹۸۹).

در ادامه، تأثیرگذاری تیمار پیت‌ماس بر مؤلفه‌های عمق پیشروی و شعاع رطوبتی افقی تحت شرایط استفاده از آب مغناطیسی و عادی بررسی شد (جدول ۵). همچنین، با مشاهده‌ی نتایج مشخص شد که عمق نفوذ در تیمارهایی که خاک درشت‌بافت در لایه‌ی بالایی قرار دارد، تحت تأثیر معنی‌دار کاربرد ماده‌ی آلی پیت‌ماس قرار گرفت. در تیماری که لایه بالایی جعبه‌ی مورد آزمایش را خاک ریزبافت تشکیل داده و تحت آبیاری قطره‌ای با آب مغناطیسی قرار گرفت نیز، تأثیرپذیری فاکتور طول پیشروی معنی‌دار شد.

با توجه به مشخصات جبهه‌های پیشروی و جهت بررسی تأثیرگذاری تیمارهای آب مغناطیسی و پیت‌ماس بر آن‌ها، تیمارها تحت بررسی و مقایسه‌ی آماری قرار گرفتند (جدول ۴). در نهایت، نتایج نشان داد که اثرپذیری فاکتور طول پیشروی تحت تأثیر آب مغناطیسی در تیمارهایی که در آن‌ها خاک درشت‌بافت مخلوط با پیت‌ماس و نیز خاک ریزبافت در لایه‌ی فوقانی جعبه‌ی آزمایش قرار دارند، معنی‌دار بوده است. همچنین، در بین تیمارهای مورد بررسی، تیماری که خاک ریزبافت در بالای لایه‌بندی جعبه‌ی آزمایش قرار گرفته، از لحاظ تغییر مقدار پارامتر عمق نفوذ، معنی‌دار شد. از طرف دیگر فاکتور پیشروی با تفاوت ناچیز (۰/۰۲۶) نسبت به معیار معنی‌داری پژوهش حاضر معنی‌دار نشد. دلیل این امر می‌تواند ناشی از ضرورت وجود برخی از یون‌ها در آب برای داشتن تأثیر

جدول ۴- تحلیل آماری معنی‌داری مؤلفه‌های عمق نفوذ و طول پیشروی تحت تأثیر تیمار آب مغناطیسی

تیمارها	فاکتور	مقدار t	درجه آزادی (df)	Sig ¹ (2-tailed)
T ₂ و T ₁	طول پیشروی	۲/۳۷۵	۴	۰/۰۷۶
	عمق نفوذ	۱/۸۲۱	۴	۰/۱۴۳
T ₄ و T ₃	طول پیشروی	۲/۸۴۹	۴	۰/۰۴۶
	عمق نفوذ	۰/۶۰۸	۴	۰/۵۷۶
T ₆ و T ₅	طول پیشروی	۰/۲۸۷	۴	۰/۷۸۹
	عمق نفوذ	۱/۲۴۸	۴	۰/۲۸
T ₈ و T ₇	طول پیشروی	۲/۸۲۱	۴	۰/۰۴۸
	عمق نفوذ	۵/۲۷۲	۴	۰/۰۰۶

(معنی‌دار: اگر $P < 0.05$)

جدول ۵- تحلیل آماری معنی‌داری مؤلفه‌های عمق نفوذ و طول پیشروی تحت تأثیر تیمار پیت‌ماس

تیمارها	فاکتور	مقدار t	درجه آزادی (df)	Sig ¹ (2-tailed)
T ₇ و T ₁	طول پیشروی	۴/۳۱۴	۴	۰/۰۱۳
	عمق نفوذ	۲/۵۴۶	۴	۰/۰۶۴
T ₈ و T ₂	طول پیشروی	۱/۳۳۹	۴	۰/۲۵۱
	عمق نفوذ	۱/۳۳۲	۴	۰/۲۵۴
T ₅ و T ₃	طول پیشروی	۰/۴۴۷	۴	۰/۶۷۸
	عمق نفوذ	۴/۲۵۳	۴	۰/۰۱۳۱
T ₆ و T ₄	طول پیشروی	۱/۰۹۴	۴	۰/۳۳۶
	عمق نفوذ	۴/۰۹۸	۴	۰/۰۱۵

(معنی‌دار: اگر $P < 0.05$)

زاویه‌ی ۴۵ درجه بیشترین سرعت پیشروی ۰/۵۷ cm/min و کمترین میزان آن ۰/۴۹ cm/min به ترتیب تحت تیمارهای T₃ و T₆ مشاهده شد. در نتیجه، همان‌طور که مشخص شد، تمام مقادیر حداکثر و حداقل سرعت تجمعی پیشروی به ترتیب تحت شرایط تیمارهای T₃ و T₆ حاصل شدند که علت این امر را می‌توان کاربرد مخلوط پیت‌ماس با خاک در تیمار T₃ دانست.

در ادامه‌ی نتایج جدول ۶، مقادیر سرعت پیشروی بین جبهه‌های حرکت شعاعی آب در خاک (مربوط به زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه) مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج مذکور مشاهده شد که بیشترین و کمترین میزان سرعت پیشروی در جهت عمود بر سطح خاک یا تحت زاویه صفر با جداره، با مقادیر ۰/۳ cm/min و ۰/۱۷ cm/min و به ترتیب در تیمارهای T₆ و T₃ حاصل شدند. همچنین با مطالعه‌ی وضعیت پیشروی میان‌پیشانی‌های رطوبتی در جهت شعاعی و تحت زاویه ۴۵ درجه با جداره یا سطح افقی، بیشترین میزان سرعت پیشروی در تیمار T₅ به میزان ۰/۳ cm/min و کمترین میزان آن نیز در تیمار T₄ به میزان ۰/۱۷ cm/min مشاهده شد. در نهایت با بررسی

سرعت پیشروی تجمعی و سرعت پیشروی میان‌جبهه‌های رطوبتی

با توجه به نتایج جدول ۶ (تیمارهای محتوی بافت درشت در لایه‌ی فوقانی محیط متخلخل مطبق) بیشترین میزان سرعت پیشروی تجمعی در جهت عمودی (با زاویه صفر درجه نسبت به جدار عمودی و امتداد ریزش آب از قطره‌چکان) ۰/۵۲ cm/min در تیمار T₃ و کمترین میزان آن در تیمار T₆ به مقدار ۰/۴۴ cm/min به دست آمد، که نشان‌دهنده‌ی تأثیر آب مغناطیسی در افزایش سرعت نفوذ آب در خاک است. علت این امر که در واقع توجیه‌کننده‌ی نتایج مقادیر بالاتر تیمارهای متأثر از آب مغناطیسی نسبت به تیمارهای آب معمولی در اکثر تیمارها است، کم‌شدن گازهای آزاد موجود در آب به‌هنگام مغناطیسی‌شدن آب بود (ژاکوب، ۱۹۹۹). همچنین، در بررسی سرعت پیشروی تجمعی با زاویه‌ی ۹۰ درجه نسبت به جداره (در راستای حرکت آب در سطح خاک) بیشترین سرعت به میزان ۰/۵۳ cm/min در تیمار T₃ و کمترین میزان در تیمار T₆ با مقدار ۰/۴۸ cm/min حاصل شد. علاوه بر این، با بررسی سرعت پیشروی تجمعی تحت

میزان $0/2$ cm/min بوده است. پس می‌توان دلیل مشاهده‌ی نتیجه‌ی مذکور را ناشی از تأثیر استفاده از ماده‌ی آلی در تیمار T_4 دانست.

وضعیت پیشروی میان جبهه‌های رطوبتی در سطح افقی خاک، کمترین میزان سرعت پیشروی در تیمار T_6 به میزان $0/13$ cm/min و بیشترین مقدار در تیمار T_4 به

جدول ۶- مقادیر سرعت‌های پیشروی تجمعی و سرعت‌های میان جبهه‌های رطوبتی در تیمارهای T_3, T_4, T_5 و T_6

تیمارهای آزمایش‌ها	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه صفر درجه (عمود) (cm/min)	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه ۴۵ درجه (cm/min)	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه ۹۰ درجه (افقی) (cm/min)	فاصله زمانی ۳۰ تا ۶۰ دقیقه (min)	سرعت پیشروی بین جبهه‌های پیشروی در جهت عمود (cm/min)	سرعت پیشروی بین جبهه‌های پیشروی تحت زاویه ۴۵ درجه (cm/min)	سرعت پیشروی بین جبهه‌ها در جهت افقی (cm/min)
T_3 دقیقه‌ی ۶۰	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۵۳	۳۰ دقیقه	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۹
T_4 دقیقه‌ی ۶۰	۰/۵	۰/۵۶	۰/۵۱	۳۰ دقیقه	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۲
T_5 دقیقه‌ی ۶۰	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۵	۳۰ دقیقه	۰/۲۵	۰/۳	۰/۱۵
T_6 دقیقه‌ی ۶۰	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۴۸	۳۰ دقیقه	۰/۳	۰/۲۷	۰/۱۳

درجه جبهه‌ی رطوبتی در خاک نیز، بیشترین میزان سرعت پیشروی در تیمار T_8 به میزان $0/29$ cm/min و کمترین میزان این پارامتر نیز در همین جهت، تحت تیمار T_2 و با مقدار $0/1$ cm/min به دست آمد. در ادامه، تحت زاویه‌ی حرکتی صفر درجه با سطح افقی خاک، نیز بیشترین مقدار سرعت پیشروی میان دو جبهه‌ی رطوبتی در تیمار T_8 با مقدار $0/28$ cm/min و کمترین سرعت پیشروی نیز در تیمار T_2 به میزان $0/1$ cm/min مشاهده شد.

در جمع‌بندی این بخش نیز می‌توان گفت، در بخش سرعت پیشروی تجمعی تیمار T_7 تمام مقادیر حداکثر را به خود اختصاص داد. این نتیجه، گویای این نکته است که تأثیر به‌کارگیری تیمار آب مغناطیسی بر سرعت پیشروی مربوط به کل دوره نسبت به اضافه کردن ماده‌ی آلی به خاک بیشتر و مؤثرتر بوده است. از طرف دیگر، در قسمت سرعت‌های نفوذ مابین جبهه‌ها نیز در فاصله‌ی زمانی ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، تیمار T_8 با دو مقدار حداکثر، به‌عنوان شاخص‌ترین تیمار معرفی شد. در نهایت، می‌توان گفت که نتیجه‌ی مذکور بیانگر تأثیر کمتر تیمار آب مغناطیسی بر فاکتور مذکور در نیمه‌ی دوم و انتهای آزمایش بوده است.

در ادامه بررسی‌ها و در جدول ۷ (تیمارهای محتوی بافت ریز در لایه‌ی فوقانی محیط متخلخل مطبق) بیشترین میزان سرعت پیشروی تجمعی عمودی، در تیمار T_7 به میزان $0/22$ cm/min و کمترین میزان آن $0/38$ cm/min و در تیمار T_1 گزارش شد. همچنین، تحت زاویه‌ی پیشروی ۴۵ درجه‌ی آب در خاک، بیشترین سرعت پیشروی تجمعی آب به میزان $0/39$ cm/min در تیمارهای T_8 و T_7 به دست آمد. از طرفی، کمترین میزان این فاکتور در دوره‌ی زمانی ۶۰ دقیقه، در تیمارهای T_1 و T_2 به میزان $0/32$ cm/min حاصل شد. در ادامه، با مشاهده‌ی نتایج پیشروی آب در جهت سطح خاک، کمترین میزان سرعت تجمعی پیشروی آب به میزان $0/54$ cm/min در تیمار T_8 و در نهایت بیشترین مقدار سرعت تجمعی پیشروی تجمعی در تیمار T_8 و به مقدار $0/65$ cm/min بوده است. همچنین، در بخش دوم از جدول ۷ کمترین میزان سرعت پیشروی میان جبهه‌های حرکت رطوبت در خاک (مربوط به زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه) در جهت عمقی، با مقدار $0/08$ cm/min متعلق به تیمار T_1 و بیشترین مقدار تحت تیمار T_7 و به میزان $0/35$ cm/min حاصل گردید. تحت زاویه‌ی حرکتی ۴۵

جدول ۷- مقادیر سرعت‌های پیشروی تجمعی و سرعت‌های میان‌پیشانی‌های رطوبتی در تیمارهای T₁، T₃، T₄ و T₆

تیمارهای آزمایش‌ها	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه صفر درجه (عمود) (cm/min)	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه ۴۵ درجه (cm/min)	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه ۹۰ درجه (افقی) (cm/min)	فاصله زمانی ۳۰ تا ۶۰ دقیقه (min)	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه ۹۰ درجه (افقی) (cm/min)	سرعت پیشروی تجمعی تحت زاویه ۴۵ درجه (cm/min)	سرعت پیشروی تجمعی تحت جهت افقی (cm/min)
T ₁ دقیقه‌ی ۶۰	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۶۳	۳۰ دقیقه	۰/۶۳	۰/۳۲	۰/۲۱
T ₂ دقیقه‌ی ۶۰	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۶۱	۳۰ دقیقه	۰/۶۱	۰/۳۲	۰/۱
T ₇ دقیقه‌ی ۶۰	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۵۴	۳۰ دقیقه	۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۱۳
T ₈ دقیقه‌ی ۶۰	۰/۲۹	۰/۳۹	۰/۶۵	۳۰ دقیقه	۰/۶۵	۰/۳۹	۰/۲۸

نتیجه‌گیری^۱

در تحقیق حاضر، تأثیر آب مغناطیسی و پیت‌ماس بر توزیع رطوبتی در خاک و برخی از ویژگی‌های کیفی آب بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد که روند تأثیرگذاری معنی‌دار استفاده از آب مغناطیس بر برخی از تیمارهای مشخص و الگوهای توزیع رطوبتی و شعاع‌های پیشروی آنها محسوس است. همچنین، در مورد فاکتور عمق نفوذ بیشترین تغییرپذیری کلی ناشی از تیمار آب مغناطیسی در تیمارهای T₁ (افزایشی)، T₇ (کاهشی)، T₃ (کاهشی) و T₅ (افزایشی) مشاهده شد. از طرف دیگر، بالاترین تأثیرپذیری عرض پیشروی نیز به ترتیب در تیمارهای T₇ (افزایشی)، T₁ (کاهشی)، T₅ (افزایشی) و T₃ (افزایشی) به دست آمد. پس به‌طور کلی، می‌توان تیمار T₇ را به‌عنوان تیماری که بیشترین تأثیرپذیری مفید را از آب مغناطیسی در مطالعه‌ی حاضر داشته است، معرفی کرد. در نتیجه می‌توان حتی بدون استفاده از به‌کارگیری تیمار ماده‌ی آلی و کاربرد کودهای محتوی آن، از وضعیت موجود خاک‌های کشاورزی که دارای وضعیت مشابه با تیمار حاضر و حتی تیمارهای مشابه هستند، بیشتر بهره برد.

منابع

- کیانی ع. ۱۳۸۶. آب مغناطیسی پدیده‌ای نو در ارتقای بهره‌وری آب. ماهنامه زیتون. ۲۳۹: ۲-۳.
- Al-Ogaidi A. A. M. Wayayok A. and Rowshon M. K. A. F. 2017. The influence of

- magnetized water on soil water dynamics under drip irrigation systems, Journal of Agriculture Water Management. 180: 70-77.
- Amiri M. C. and Dadkhah A. A. 2006. On reduction in the surface tension of water dueto magnetic treatment. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects. 252-255.
 - Castro Palacio J. C. Morejon L. P. Velazquez Abud L. and Govea A. P. 2007. Stimulation of Pinus tropicalis M. seeds by magnetically treated water. International Agrophysics. 21: 173-177.
 - Chibowski E. Szcześ A. and Hołysz L. 2005. Influence of Sodium Dodecyl Sulfate and Static Magnetic Field on the Properties of Freshly Precipitated Calcium Carbonate. ACS Public. 21: 8114-8122.
 - Gabrielli C. Jaouhari R. Maurin G. and Keddani M. 2001. Magnetic water treatment for scale prevention. Water Res. 35: 3249-3259.
 - Higashitani K. Kage A. Katamura S. Imai K. and Hatade S. 1993. Effects of amagnetic field on the formation of CaCO₃ particles. Journal of Colloid and Interface Science. 156: 90-95.
 - Jacob B. 1999. Magnetic treatment of irrigation water: Experimental results and application conditions. Environmental Science and Technology. 33: 1280-1285.
 - Kenya A. D. Parsons S. A. 2005. A spectrophotometer- based study of magnetic water: Assessment of ionic vs. surface mechanisms. Water Research. 40: 517-524.
 - Khoshravesh M. Mostafazadeh-Fard B. Mousavi S. F. Kiani A. R. 2011. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation. Soil Use Manage.
 - Li J. Ji H. Li B. and Liu Y. 2007. Wetting patterns and nitrate distributions in layered-

۱- با توجه به محدودیت شدید در استفاده از دستگاه‌های ساده، یا عدم دسترسی به ابزار اولیه استاندارد، استناد به نتایج و بحث‌ها، صرفاً پس از صحت‌سنجی مجدد در سطح ملی- بین‌المللی، بلامانع می‌باشد.

- textural soils under drip irrigation. *Agriculture Sciences in China*. 6(8): 970-980.
12. Lin I. J. 1991. Magnetic treatment of water used for agricultural purposes (United State Patent), Patent Number 5,009, 791.
 13. Maggard S. M. 1989. A chemo metric analysis of a magnetic water treatment device, PhD thesis, Baylor University, Waco, Texas.
 14. Mohamed A. I. 2013. Effects of magnetized low quality water on some soil properties and plant growth. *International Journal of Research in Chemical Environment*. 3(2): 140-147.
 15. Mostafazadeh-Fard B. Khoshraresh M. Mousavi S. F. and Kiani A. R. 2011. Effects of magnetized water and irrigation water salinity on soil moisture distribution intrickle irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 137: 398-402.
 16. Mostafazadeh-Frad B. Khoshraresh M. Mousavi S. F. and Kiani A. R. 2012. Effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138: 1075-1081.
 17. Surendran U. Ramesh V. Jayakumar M. Marimuthu S. and Sridevi G. 2016a. Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semi arid tropical agro ecosystem in India. *Soil Tillage Reserch*. 158: 10-21.
 18. Surendran U. Sandeep O. and Joseph E. J. 2016b. The impact of magnetic treatment of Irrigation water on plant, water and soil characteristics, *Journal of Agriculture Water Management*. 178: 21-29.
 19. XiaoFeng P. and Bo D. 2008. Investigation of changes in properties of water under theaction of a magnetic field. *Sci. China Ser. G Phys. Mech. Astron*. 51: 1621-1632.
 20. Yildirim G. 2014. Discussion of effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation by B. Mostafazadeh-Fard, M. Khoshraresh, S. F. Mousavi, and A. R. Kiani. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 140(7014008): 1-2.
 21. Zhang J. Li J. Zhao B. and Li Y. 2015. Simulation of water and nitrogen dynamics as affected by drip fertigation strategies. *Journal of Integrative Agriculture*. 14: 2434-2445.