

تعیین الگوی رطوبتی در خاک‌های آب‌گریز شده با لجن فاضلاب شهری در جریان دو بعدی

نگار نورمهناد^{۱*}، سید حسن طباطبائی^۲، عبدالرحیم هوشمند^۳، محمد رضا نوری امامزاده‌ئی^۴ و شجاع قربانی دشتکی^۵

چکیده

آب‌گریزی خاک بر پیشروی جبهه رطوبتی و انتقال املاح در خاک مؤثر است. این پژوهش برای بررسی چگونگی پیشروی جبهه رطوبتی در خاک‌های آب‌گریز انجام شد. خاک مورد بررسی از منطقه‌ای در مجاورت تصفیه‌خانه فاضلاب فولادشهر که تحت تأثیر درجات مختلفی (۲۵، ۶۵، ۸۰ درصد) از لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری قرار گرفت، برداشت شد. در حدود یک سال پس از آب‌گریز کردن خاک‌ها در اثر اضافه کردن میزان لجن‌های یادشده جبهه رطوبتی ناشی از آبیاری جویچه‌ای در آن‌ها تعیین شد. بدین منظور از یک محفظه شیشه‌ای با ابعاد $۷۰ \times ۵۰ \times ۶$ سانتی‌متر استفاده و عمقی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر آب با استفاده از دستگاه ماریوت روی سطح جویچه قرار داده شد. سپس پیشروی جبهه رطوبتی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در اثر افزایش آب‌گریزی در خاک، الگوی رطوبتی نیز نامنظم‌تر شد. با افزایش تخلخل خاک تأثیر آب‌گریزی ناشی از لجن بر نفوذپذیری کاهش یافت. اگرچه شدت نفوذ آب به خاک آب‌گریز با گذشت زمان کاهش یافت اما تفاوت شدت نفوذ اولیه و نهایی بسیار کم بود. در تیمار آبدوست (بدون افزودن لجن - شاهد) همواره هدایت هیدرولیکی اشباع کمتر یا مساوی شدت نفوذ آب به خاک بود اما در تیمارهای آب‌گریز به دلیل حبس هوا در حین نفوذ آب به داخل خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع بزرگ‌تر از شدت نفوذ آب به خاک به دست آمد. پیشروی جبهه رطوبتی در خاک تیمار شده با ۵۰ درصد لجن فاضلاب کندتر از خاک‌های تیمار شده با ۶۵ و ۸۰ درصد لجن فاضلاب بود. شاید این امر به دلیل غلبه تأثیر آب‌گریزی بر درشتی منافذ خاک در تیمار ۵۰ درصدی لجن بود.

واژه‌های کلیدی: آب‌گریزی خاک، تصفیه خانه فاضلاب، جبهه رطوبتی، شدت نفوذ.

ارجاع: نورمهناد ن. طباطبائی س. ح. هوشمند ع. نوری امامزاده‌ئی م. ر. و قربانی دشتکی ش. ۱۳۹۶. تعیین الگوی رطوبتی در خاک‌های آب‌گریز شده با لجن فاضلاب شهری در جریان دو بعدی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۶: ۷۱-۸۰.

۱- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور.

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

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران.

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

۵- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: negar_nourmahnad@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۲

مقدمه

آب‌گریزی (Water repellency) یکی از مشکلات متداول در خاک‌های جهان و یک پدیده شایع در خاک است (دکر و همکاران، ۲۰۰۵). مدیریت خاک‌های آب‌گریز دشوار و پیامدهای منفی بیشتری بر تولیدات کشاورزی و محیط‌زیست دارند (لتی و همکاران، ۱۹۷۵ و ریتسما و همکاران، ۱۹۹۳). پدیده آب‌گریزی تمایل خاک‌ها به جذب آب را کاهش می‌دهد زیرا در یک دوره زمانی مشخصی از چند ثانیه تا چندین روز در برابر مرطوب شدن مقاومت می‌کنند (دوئر و توماس، ۲۰۰۰).

خاک خشک به طور معمول رطوبت را به خاطر نیروهای قوی بین ذرات خاک و آب جذب می‌کند. این خاک‌ها هیدروفیلیک (Hydrophilic) یا غیر آب‌گریز نامیده می‌شوند. برخی از خاک‌های خشک با گذشت زمان آب‌گریز می‌شوند و به رطوبت اجازه نفوذ نمی‌دهند. این خاک‌ها هیدروفوبیک (Hydrophobic) یا آب‌گریز نامیده می‌شوند. قطره‌های آب در تماس با این خاک‌ها به شکل یک مهره در می‌آیند (قیوم، ۲۰۰۰). آب‌گریزی سبب کاهش ظرفیت نفوذ خاک‌ها، افزایش جریان سطحی، فرسایش خاک، غیریکنواختی الگوی رطوبتی، توسعه جریان‌های ترجیحی (Preferential flow) و آبشویی مواد شیمیایی کشاورزی می‌شود (ایمسون و همکاران، ۱۹۹۲ و ریتسما و همکاران، ۱۹۹۳). جریان‌های ترجیحی در خاک‌های مختلفی ایجاد می‌شود. این جریان‌ها سبب توزیع غیریکنواخت آب در محیط ریشه و در نتیجه جوانه‌زنی و رشد ضعیف گیاه (والیس و هورن، ۱۹۹۲)، آبشویی مواد غذایی و انتقال سریع آلودگی و املاح می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۰۰). در خاک‌های آب‌گریز امکان تشکیل جبهه غیرمنظم وجود دارد (جردن و همکاران، ۲۰۰۹). پژوهش‌گران مختلفی جریان ترجیحی و الگوی نامنظم جبهه رطوبتی را در خاک‌های که زیاد آب‌گریز دارند، مشاهده کردند (لتی، ۲۰۰۱). هندریکس و همکاران (۱۹۹۳) الگوی ناپایدار جریان را در خاک‌های آب‌گریز گزارش کردند. جریان انگشتی از سوی کاریلو و همکاران (۲۰۰۰) در خاک‌هایی که زمان نفوذ آب در آن بیشتر از ۶۰ ثانیه بود، دیده شد. باچرز و همکاران (۱۹۹۸) نیز نشان دادند که در خاک‌های شنی با درجات مختلف آب‌گریزی جریان‌های انگشتی رخ می‌دهد در حالیکه یک جبهه رطوبتی یکنواخت و گسترده افقی در خاک‌های

آبدوست مشاهده شد. بعضی از پژوهش‌گران نشان دادند در صورتی که لایه آب‌گریز به اندازه کافی عمیق باشد ممکن است جریان پایدار ظاهر شود (هندریکس و همکاران، ۱۹۹۳).

براساس مشاهده‌های مزرع‌ای شدت نفوذ آب به داخل خاک‌های آب‌گریز بسیار نامنظم و احتمال وقوع جریان‌های ترجیحی در خاک‌های آب‌گریز بیشتر از خاک‌های آبدوست است (وانگ و همکاران، ۱۹۹۸). جریان‌های ترجیحی سبب توزیع غیریکنواخت آب در محیط ریشه و افزایش انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی می‌شود. بیشتر گزارش‌ها اثر آب‌گریزی بر کاهش ظرفیت نفوذ خاک (ایمسون و همکاران، ۱۹۹۲) و افزایش رواناب را نشان می‌دهد. به عنوان مثال در بررسی دبانو (۱۹۷۱) ظرفیت نفوذ خاک‌های آب‌گریز، ۲۵ برابر کمتر از خاک مشابه آبدوست بود. دوئر و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند که ظرفیت نفوذ خاک آب‌گریز خشک شنی، شش برابر کمتر از خاک شنی با آب‌گریزی کمتر است و نیز نشان دادند خاک آب‌گریز در ۵ دقیقه ابتدای اندازه‌گیری فقط یک درصد از پتانسیل نفوذ آب یک خاک آبدوست را دارد. خاک آب‌گریز به راحتی مرطوب نمی‌شود و رطوبت در منافذ و شکاف‌ها جریان می‌یابد. ریتسما و دکر (۱۹۹۴) بررسی مزرع‌ای روی حرکت رطوبت در خاک آب‌گریز انجام و نشان دادند در این خاک‌ها رطوبت فقط در بخش‌های خاصی حرکت می‌کند و خاک در میان این بخش‌ها به طور نسبی خشک بود. در بررسی دیگری که از سوی دکر و ریتسما (۲۰۰۰) انجام شد، مشاهده شد که خاک‌های آب‌گریز در برابر نفوذ آب به داخل خاک از خود مقاومت نشان می‌دهند و آب‌گریزی سبب توسعه الگوی ناپایدار و جریان ترجیحی در این خاک‌ها می‌شود. پایداری و دوام آب‌گریزی در لایه فوقانی خاک با استفاده از آزمایش زمان نفوذ قطره آب (Water Drop Penetration Time) تعیین شد.

همان‌طور که ذکر شد، یکی از تأثیرات آب‌گریزی انتقال سریع آب و املاح از طریق جریان‌های ترجیحی است. حرکت آب در خاک به عوامل مختلفی از جمله هدایت هیدرولیکی، شیب هیدرولیکی، تخلخل و ... بستگی دارد. هدایت هیدرولیکی، قدرت و توان خاک را در انتقال آب نشان می‌دهد. هر چه مقدار آن برای خاک بیشتر باشد، توانایی خاک در انتقال آب بیشتر خواهد بود (علیزاده،

- ترکیب ۲۵ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۷۵ درصد وزنی خاک (S25%)
- ترکیب ۵۰ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۵۰ درصد وزنی خاک (S50%)
- ترکیب ۶۵ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۳۵ درصد وزنی خاک (S65%)
- ترکیب ۸۰ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۲۰ درصد وزنی خاک (S80%)

به این ترتیب چهار تیمار خاک به دست آمد و با تیمار آبدوست (S0) - (بدون افزودن لجن فاضلاب به خاک) مقایسه شدند. بافت خاک پس از حذف مواد آلی از سوی آب اکسیژنه و نیز حذف کربنات‌ها با استفاده از اسید استیک غلیظ به دست آمد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تیمارها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تیمارها

| تیمار | نوع خاک | شن (%) | سیلت (%) | رس (%) | چگالی ظاهری (g.cm ⁻³) | ماده آلی (%) | EC(dS.m ⁻¹) |
|-------|---------|--------|----------|--------|-----------------------------------|--------------|-------------------------|
| S0 | لوم رسی | ۳۶/۲ | ۲۸ | ۳۵/۸ | ۱/۲۱ | ۱/۶۵ | ۱/۷ |
| S25% | لوم رسی | ۴۳/۷ | ۲۴/۴ | ۳۱/۹ | ۱/۰۴ | ۲/۹۲ | ۲/۲ |
| S50% | لوم شنی | ۵۴/۷ | ۳۴/۶ | ۱۰/۷ | ۰/۹۳ | ۴/۷۸ | ۳/۷۸ |
| S65% | لوم شنی | ۶۱/۴ | ۲۸/۸ | ۹/۸ | ۰/۹۲ | ۵/۳۱ | ۳/۷۸ |
| S80% | لوم شنی | ۶۷/۷ | ۲۳/۵ | ۸/۸ | ۰/۸۸ | ۶/۶۵ | ۳/۸۵ |

(۱۳۸۱). از آن‌جا که آب‌گریزی بر حرکت آب در خاک تأثیر دارد در این پژوهش الگوی رطوبتی خاک‌های آب‌گریز تعیین و نتایج با خاک آبدوست مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

برای تهیه خاک آب‌گریز از خاک با بافت لوم رسی استفاده شد که این خاک از منطقه‌ای در مجاورت تصفیه‌خانه فاضلاب فولادشهر در استان اصفهان برداشت شد. این تصفیه‌خانه در موقعیت ۵۱ درجه و ۲۴ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی است. برای آب‌گریز کردن خاک درجه‌های مختلفی از لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری به‌صورت زیر به آن اضافه شد. معیار انتخاب این درجه‌های آزمایش‌های آب‌گریزی بود تا بتوان درجات مختلفی از خاک آب‌گریز تهیه کرد.

برای جلوگیری از ایجاد جریان ترجیحی در بدنه محفظه شیشه‌ای، جدار داخلی آن را با گریس پوشانیده و مقداری ماسه بادی روی آن پاشیده شد. سپس خاک به‌صورت لایه‌ای تا ارتفاع ۵۵ سانتی‌متری در محفظه ریخته و کوبیده شد. پس از متراکم کردن خاک‌ها تا رسیدن به چگالی ظاهری مربوطه، جویچه‌ای با عمق ۹ و عرض ۲۸ سانتی‌متر در خاک ایجاد شد. در کف جویچه برای جلوگیری از ایجاد حفره، کمی سنگریزه ریخته شد. پلاستیکی در کف آن انداخته و ارتفاع ثابتی از آب از سوی محفظه ماریوت روی آن قرار داده شد. هم‌زمان با شروع آزمایش و به کار انداختن کرونومتر، پلاستیک به آرامی برداشته شد و به این ترتیب شکل پیشروی آب در جویچه تعیین شد. برای تعیین شدت نفوذ در خاک، در هر لحظه حجم آب نفوذ کرده از مخزن ماریوت بر سطح جویچه تقسیم شد. پس از تعیین جبهه پیشروی در جویچه شبیه‌سازی شکل جبهه در زمان‌های مختلف با نرم‌افزار SURFER 8 (مؤسسه نرم‌افزاری گلدن، ۲۰۰۲) انجام شد.

برای تعیین آب‌گریزی از دو روش ۱- آزمایش زمان نفوذ قطره آب (دکر و جانگریس، ۱۹۹۰) و ۲- آزمایش مولارته محلول آب و الکل (لتی و همکاران، ۲۰۰۰) استفاده و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. برای کاهش اثر تغییرات زمانی ویژگی‌های خاک، در حدود یک سال پس از تیمار نمونه‌ها هدایت هیدرولیکی اشباع با روش بار ثابت و الگوی رطوبتی در آن‌ها تعیین شد. در این راستا از یک محفظه شیشه‌ای با ابعاد ۶×۵۰×۷۰ سانتی‌متر که یک سمت آن از جنس کارتن پلاست بود، استفاده شد (شکل ۱).



شکل ۱- محفظه ساخته شده برای انجام آزمایش

نتایج و بحث

حرکت آب در خاک

برای شبیه‌سازی حرکت آب، از خاک‌های هوا خشک استفاده شد. پیش از شروع آزمایش میزان رطوبت اولیه و

زمان نفوذ قطره آب در خاک‌ها تعیین شد. ویژگی‌های مربوط به زمان و عمق آب کاربردی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر مربوط به رطوبت اولیه خاک، عمق آب کاربردی و زمان نفوذ آب

| تیمار | عمق آب کاربردی (cm) | زمان رسیدن آب به انتهای محفظه (min) | رطوبت اولیه خاک (cm ³ .cm ⁻³) | زمان نفوذ قطره آب (s) | درجه آب‌گریزی |
|-------|---------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|---------------|
| S0 | ۵ | ۱۸۴/۳ | ۰/۱۰۵ | ۰ | آبدوست |
| S25% | ۵ | ۱۸۵/۰ | ۰/۱۱۲ | ۱۰ | آب‌گریز اندک |
| S50% | ۵ | ۱۹۵/۰ | ۰/۱۰۰ | ۱۲ | آب‌گریز اندک |
| S65% | ۵ | ۱۷۵/۰ | ۰/۰۵۴ | ۳۰ | آب‌گریز اندک |
| S80% | ۵ | ۹۴/۸ | ۰/۰۵۰ | ۷۳ | آب‌گریز قوی |

بررسی شدت نفوذ آب در تیمارها

جریان ورودی به جویچه با توجه به حجم آب خروجی از مخزن ماریوت نسبت به زمان قرائت شد. در تیمارها علاوه بر تخلخل و بافت خاک، خاصیت آب‌گریزی نیز بر نفوذپذیری آن‌ها مؤثر است. نفوذپذیری در حقیقت قابلیت نفوذ آب از سطح به درون خاک است (علیزاده، ۱۳۸۱) و از آن‌جا که آب‌گریزی، عدم توانایی خاک برای جذب آب است بنابراین می‌تواند عامل مؤثر و تأثیرگذاری در فرایند نفوذ آب به داخل خاک و در نتیجه نفوذپذیری خاک باشد. این موضوع از شکل ۲ نیز قابل استنتاج است. در تیمار آبدوست شدت نفوذ اولیه زیاد است و مقدار آن برابر با ۱۳۰/۲ سانتی‌متر بر ساعت بود که البته مقدار آن به سرعت افت کرده و پس از گذشت یک ساعت به ۳۲/۴ سانتی‌متر بر ساعت رسید و بعد از آن با گذشت زمان و افزایش رطوبت خاک باز هم شدت نفوذ کمتر شد و در نهایت به مقدار ثابت ۱۳/۰۴ سانتی‌متر بر ساعت رسید که به‌طور تقریبی با مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده به روش بار ثابت برابر بود (شکل ۲- الف).

در تیمار S25% شدت نفوذ اولیه ۴۵/۶ سانتی‌متر بر ساعت بود که بعد از گذشت چهار دقیقه مقدار آن کم شد و به ۳۰/۶ سانتی‌متر بر ساعت رسید و در نهایت به مقدار نفوذ نهایی ۱۳/۵ سانتی‌متر بر ساعت رسید و نسبت به تیمار S0 افزایش یافت (شکل ۲- ب).

در تیمار S50% شدت نفوذ اولیه ۱۶/۸ سانتی‌متر بر ساعت بود پس از گذشت هشت دقیقه از ابتدای آزمایش

مقدار آن به ۲۵/۸ سانتی‌متر بر ساعت و در انتها به شدت نفوذ نهایی ۱۳/۸۶ سانتی‌متر بر ساعت رسید (شکل ۲- ج). نکته قابل توجه در این تیمار آن است که با وجود بافت درشت‌تر و درصد رطوبت اولیه پایین‌تر نسبت به تیمار S0 و S25%، شدت نفوذ اولیه آن نسبت به آن‌ها پایین‌تر بود. دلیل این موضوع شاید درجه آب‌گریزی بالاتر این تیمار نسبت به دو تیمار قبلی است. در حقیقت حرکت آب و نگهداشت آن در خاک‌های آب‌گریز نسبت به خاک‌هایی که قابلیت مرطوب شدن دارند، حتی پس از اینکه آب سرانجام در خاک آب‌گریز نفوذ کرد، متفاوت است. براساس گزارش فنگ و همکاران (۲۰۰۱) در حالی که در خاک آبدوست، شدت نفوذ با زمان کاهش می‌یابد، در خاک آب‌گریز شدت نفوذ بیشتر با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در این بررسی اگرچه شدت نفوذ با زمان افزایش نیافت اما تفاوت شدت نفوذ اولیه و نهایی بسیار کم بود، که دلیل آن همان بافت درشت تیمار و غلبه آن بر ویژگی آب‌گریزی بود. در حقیقت بافت درشت خاک سبب نفوذ سریع آب به درون خاک می‌شود و ویژگی آب‌گریزی فقط سرعت نفوذ را کاهش داده است.

در تیمار S65% شدت نفوذ اولیه ۳۱/۸ سانتی‌متر بر ساعت بود، پس از گذشت هشت دقیقه به ۲۵/۲ و در نهایت به مقدار ثابت ۱۸/۶ سانتی‌متر بر ساعت رسید. همان‌طور که در شکل ۲-د، مشاهده می‌شود شدت نفوذ اولیه این تیمار بالاتر از تیمار S50% بود دلیل این موضوع شاید آن است که اگر چه آب‌گریزی این تیمار بالاتر از تیمار S50% است اما اول اینکه از نظر درجه آب‌گریزی هر

خاک‌ها همواره شدت نفوذ کمتر از هدایت هیدرولیکی اشباع تعیین شده به روش بار ثابت بود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش آب‌گریزی نوسان‌ها نیز بیشتر می‌شود دلیل شاید این باشد که در لحظه خیس شدن هر لایه، عامل آب‌گریزی سبب ایجاد مقاومت در برابر نفوذ آب می‌شود اما پس از مرطوب شدن خاک مقاومت حاصل از آب‌گریزی در برابر نفوذ از بین می‌رود. البته هر چه بافت خاک نیز درشت‌تر شود مانند تیمار ۸۵٪ S درشتی بافت خاک بر ویژگی آب‌گریزی غلبه و آب سریع‌تر نفوذ می‌کند.

حرکت جبهه رطوبتی

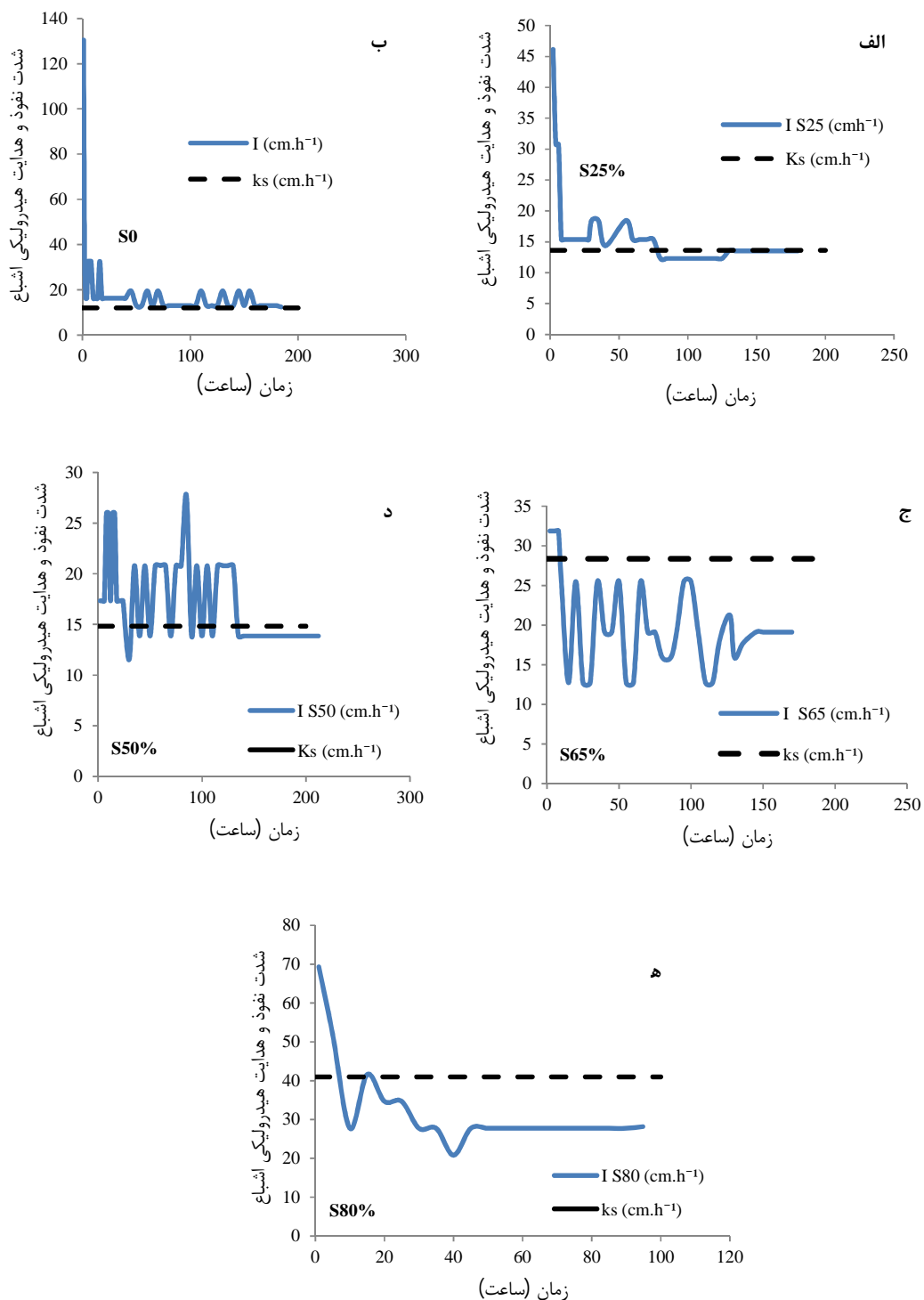
نقشه هم‌زمان پیشروی جبهه رطوبتی در تیمارها که با روش الگوریتم میانمایی کریجینگ با نرم‌افزار سورفر به دست آمد در شکل ۳- الف تا ۳- ه آمده است. خطوط هم‌زمان با گام‌های زمانی مشخص روی نقشه‌ها نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در نقشه‌ها مشخص است، در تیمار ۵۰٪ S مدت زمان پیشروی جبهه کندتر از سایر تیمارها بود و زمان بیشتری طول می‌کشد تا جبهه رطوبتی به انتهای پروفیل برسد. ویژگی‌های جبهه رطوبتی بیشتر می‌تواند اطلاعاتی درباره دینامیک فرایند نفوذ بدهد (سردا و همکاران، ۱۹۹۸). شکل و عمق جبهه رطوبتی بستگی به فرایند نفوذ دارد. با افزایش درجه آب‌گریزی نامنظمی شکل جبهه نیز افزایش یافت. این موضوع را در شکل ۴ و ۵ نیز می‌توان مشاهده کرد.

دوئر و همکاران (۲۰۰۰) نیز الگوی غیریکنواختی برای جبهه رطوبتی در خاک‌های آب‌گریز مشاهده کردند. بررسی زاوالا و همکاران (۲۰۰۹) در خاک‌های آب‌گریز جبهه رطوبتی غیریکنواخت بود که نشان از جریان ناپایدار در آن‌ها داشت. در تیمار ۵۰٪ S خطوط هم‌زمان در انتهای پروفیل به یکدیگر نزدیک‌تر است. این موضوع بیانگر آن است که جبهه رطوبتی با افزایش فاصله نسبت به منبع آب کندتر حرکت می‌کند. در تیمار ۵۰٪ S شاید به دلیل غلبه تأثیر آب‌گریزی بر درشتی منافذ خاک، نسبت به تیمارهای ۶۵٪ S و ۸۰٪ S حرکت آب در خاک کندتر است.

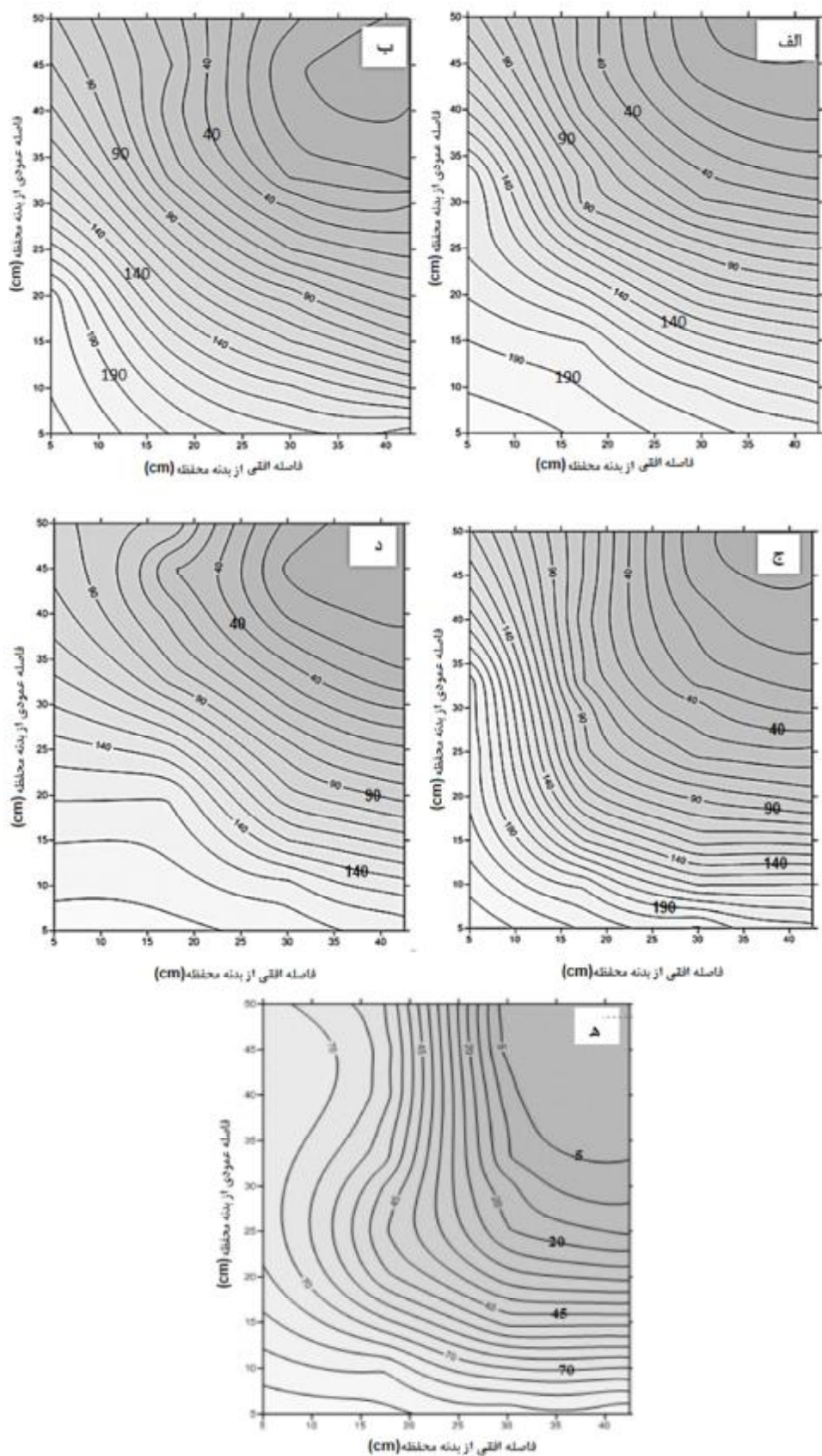
دو دارای آب‌گریزی کم هستند دوم اینکه درصد شن و میزان تخلخل آن بیشتر از تیمار ۵۰٪ S است. در حقیقت در این تیمار اثر افزایش منافذ به افزایش آب‌گریزی غلبه داشت (شکل ۲- د).

در تیمار ۸۰٪ S شدت نفوذ اولیه ۶۹ سانتی‌متر بر ساعت بود پس از گذشت یک دقیقه به ۵۱/۶ و در نهایت به مقدار ثابت ۲۷/۶ سانتی‌متر بر ساعت رسید (شکل ۲- ه). در این تیمار نیز اگرچه آب‌گریزی بیشتر از سایر تیمارها بود اما افزایش درصد ذرات هم اندازه شن و نیز میزان بالای تخلخل در این تیمار بر افزایش آب‌گریزی غلبه داشته، بنابراین شدت نفوذ اولیه و نهایی آن بالاتر از تیمارهای ۵۰٪ S و ۶۵٪ S بود. البته شدت نفوذ اولیه در این تیمار (۶۹ سانتی‌متر بر ساعت) نسبت به تیمار آبدوست (۱۳۰/۲ سانتی‌متر بر ساعت) پایین‌تر بود اگرچه شدت نفوذ نهایی آن بالاتر بود، در حقیقت نفوذ در ابتدای جریان بیشتر تحت تأثیر آب‌گریزی است. به نظر می‌رسد که اثر آب‌گریزی لجن بر نفوذپذیری با افزایش تخلخل خاک کاهش می‌یابد. خاشیوان و همکاران (۲۰۰۷) در خاک‌های آب‌گریز ناشی از مواد نفتی به نتیجه مشابهی رسیدند. بررسی کایود و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیانگر کاهش شدت نفوذ در اثر آب‌گریزی ناشی از آتش‌سوزی بود. در حقیقت آب‌گریزی خاک سبب کاهش شدت نفوذ آب به درون خاک، افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود (جوردن و همکاران، ۲۰۰۸). براساس مشاهده‌های مزرعه‌ای شدت نفوذ آب به داخل خاک‌های آب‌گریز بسیار نامنظم و احتمال وقوع جریان‌های ترجیحی در خاک‌های آب‌گریز بیشتر از خاک‌های آبدوست است (وانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

از مقایسه شکل‌های ۲ الف- ه مشاهده می‌شود در تیمار آبدوست همواره هدایت هیدرولیکی اشباع کمتر یا مساوی شدت نفوذ آب به داخل خاک است اما در تیمارهای آب‌گریز به دلیل حبس هوا در حین نفوذ آب به داخل خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع بزرگ‌تر از شدت نفوذ آب به خاک است این موضوع با نظر وانگ و همکاران (۲۰۰۰) نیز هماهنگی دارد. براساس بررسی آن‌ها روی سه خاک آب‌گریز با درجه آب‌گریزی شدید و متوسط و کم، در این

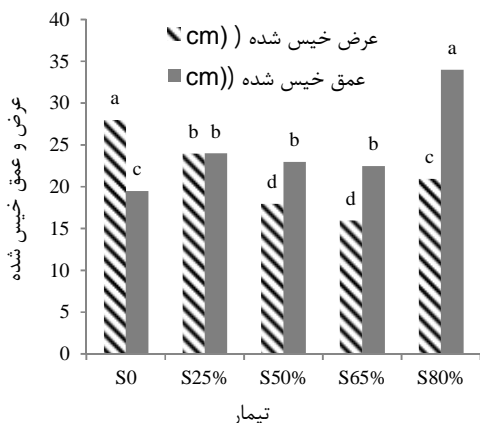


شکل ۲- شدت نفوذ و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در تیمارهای مختلف



شکل ۳- نقشه خطوط هم‌زمان پیشروی جبهه رطوبتی در تیمارهای S0 (الف)، S25% (ب)، S50% (ج)، S65% (د) و S80% (ه)

به ترتیب ۱۹/۵، ۲۴، ۲۳، ۲۲/۵ و ۳۴ cm بود (شکل ۶). بنابراین تیمار آبدوست عمق پیشروی کمتری در مدت زمان مشخص نسبت به سایر تیمارها داشت که البته دلیل آن بافت ریزتر این تیمار نسبت به سایر تیمارهاست. در تیمارهای آب‌گریز با افزایش آب‌گریزی، عمق پیشروی کاهش یافت. اما در تیمار S80% به دلیل افزایش معنی‌دار تخلخل نسبت به سایر تیمارها و بافت درشت آن تأثیر آب‌گریزی چشم‌گیر نبود و جبهه رطوبتی در این تیمار نسبت به سایر تیمارها سریع‌تر پیشروی کرد. ناداو و همکاران (۲۰۱۱) نیز جبهه رطوبتی را در خاک‌های آب‌گریز شده در اثر آبیاری با پساب با خاک‌های آبدوست مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که منطقه خیس شده در خاک آب‌گریز، ۳۵ درصد میزان آن در خاک آبدوست بود و از آنجا که در پژوهش آن‌ها آب کاربردی در هر دو خاک یکسان بود بنابراین عرض خیس شده کمتر در تیمار آب‌گریز سبب افزایش جریان عمودی (شاید به صورت جریان ترجیحی) نسبت به خاک آبدوست شد.



شکل ۶- عرض و عمق خیس شده در تیمارهای لجن فاضلاب یک ساعت پس از شروع آبیاری

سطح خیس شده در تیمارها پس از ترسیم با نرم‌افزار سورفر، با استفاده از نرم‌افزار اتوکد (Autocad 2013) به دست آمد (جدول ۳). از آنجا که کمترین سطح خیس شده و بیشترین عرض خیس شده در تیمار S0 مشاهده شد بنابراین کمترین عمق خیس شده پس از یک ساعت آبیاری در این تیمار به دست آمد. بیشترین سطح خیس شده در تیمار S80% مشاهده شد.

دلیل این موضوع منافذ درشت‌تر در این تیمار است. همچنین به دلیل کاهش عرض و عمق خیس شده در



شکل ۴- جبهه پیشروی در تیمار آبدوست



شکل ۵- نمونه‌ای از رسم خطوط هم‌زمان پیشروی جبهه رطوبتی در آزمایشگاه (مربوط به تیمار S50%)

حداکثر عمق، عرض و سطح خیس شده در تیمارها

حداکثر عرض خیس شده یکی از پارامترهای مهم در آبیاری است به این دلیل که هرچه آب در عرض گسترش پیدا کند، از گسترش آن در عمق جلوگیری می‌شود و در نتیجه هدرفت عمقی آن کاهش می‌یابد. نیروی ثقل مایل است آب را به سمت پایین بکشاند و نیروی ماتریک که یک نیروی نگهدارنده است سبب توزیع بیشتر آب به طرفین می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که یک ساعت پس از شروع آبیاری عرض خیس شده در تیمارهای آزمایش S0، S25%، S50%، S65% و S80% به ترتیب برابر ۲۸، ۲۴، ۱۸، ۱۶ و ۲۱ سانتی‌متر بود. پس با افزایش آب‌گریزی عرض خیس شده نیز کم شد بنابراین کاشت گیاهان در جویچه‌های عریض برای افزایش نفوذ در خاک‌های آب‌گریز توصیه می‌شود. البته تیمار S80% عرض خیس شده بیشتری نسبت به تیمار S65% و S50% داشت که دلیل آن پیشروی سریع‌تر آب (به دلیل بافت درشت‌تر) در زمان یکسان در این تیمار است. عمق خیس شده در زیر جویچه نیز پس از گذشت یک ساعت از شروع آبیاری در تیمار S0، S25%، S50%، S65% و S80%

- Amelia D. 1998. Soil hydrological response under simulated rainfall in the. Dehesa land system Extremadura, SW Spain under drought conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*. 23: 195-209.
5. DeBano L. F. 1971. The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Soil Science American Proceeding*. 35: 340-343.
 6. Dekker L. W. and Jungerius P. D. 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena*, Suppl. 18: 173– 183.
 7. Dekker L. W. and Ritsema C. J. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology*. 231-232: 148-164.
 8. Dekker L. Oostindie W. K. and Ritsema C. J. 2005. Exponential increase of publications related to soil water repellency. *Australian Journal of Soil Research*. 43: 403-441.
 9. Doerr S. H. and Thomas A. D. 2000 a. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*. 231-232: 134-147.
 10. Doerr S. H. Shakesby R. A. and Walsh R. P. D. 2000 b. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth- Science Reveiws*. 51: 33-65.
 11. Feng G. L. Letey J. and Wu L. 2001. Water ponding depths affect temporal infiltration rates in a water-repellent sand. *Soil Science Society of America Journal*. 65: 315-320.
 12. Hendrickx J. M. H. Dekker L.W. and Boersma O. H. 1993. Unstable wetting fronts in water repellent field soils. *Journal of Enviromental Quality*. 22: 109-118.
 13. Imeson A. C. Verstraten J. M. Van Mullingen E. J. and Sevink J. 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forests. *Catena*. 19: 345-361.
 14. Jordan A. Martínez-Zavala L. and Bellinfante N. 2008. Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain. *Catena*. 74: 137-143.
 15. Jordan A. Zavala M. Nava L. Alanis N. 2009. Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena*. 79: 60-71.
 16. Kayode S. Are G. A. Oluwatosin O. D. Adeyolanu A. and Oke. O. 2009. Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties. *Soil & Tillage Research*. 103: 4-10.
 17. Khashiboun K. Zilberman A. Shaviv A. Starosvetsky J. Armon R. 2007. The fate of *Cryptosporidium Parvum* Oocysts in reclaimed water irrigation-history and non-history soils irrigated with various effluent qualities. *Water Air Soil Pollut*, 185: 33-41.

تیمارهای S50% و S65% سطح خیس شده در این تیمارها پس از یک ساعت کمتر از سایر تیمارهای آب‌گریز بود که شاید به دلیل غلبه ویژگی آب‌گریزی به درستی بافت خاک در این تیمارها است. این موضوع را می‌توان با توجه به سطح خیس شده در این تیمارها نسبت به تیمار شاهد نیز مشاهده شد.

جدول ۳- سطح خیس شده در تیمارهای لجن فاضلاب پس از یک ساعت آبیاری

| تیمار | سطح خیس شده پس از ۶۰ دقیقه | نسبت سطح خیس شده/ هر تیمار به تیمار شاهد |
|-------|----------------------------|--|
| S0 | ۴۳۷/۰۶d | ۱ |
| S25% | ۵۹۶/۵۰۳b | ۱/۳۶ |
| S50% | ۵۰۲/۰۲۴c | ۱/۱۵ |
| S65% | ۴۹۸/۷۷c | ۱/۱۴ |
| S80% | ۹۸۳/۰۷a | ۲/۲۴ |

نتیجه‌گیری

آب‌گریزی خاک بر حرکت آب در خاک و الگوی رطوبتی مؤثر است به طوری که با افزایش درجه آب‌گریزی نامنظمی شکل جبهه نیز، افزایش یافت. در تیمار S50% شاید به دلیل غلبه تأثیر آب‌گریزی بر درستی منافذ خاک، نسبت به تیمارهای S65% و S80% حرکت آب در خاک کندتر است. با افزایش آب‌گریزی عرض خیس شده نیز کم شد. بنابراین کاشت گیاهان در جویچه‌های عریض برای افزایش نفوذ در خاک‌های آب‌گریز توصیه می‌شود. البته تیمار S80% عرض خیس شده بیشتری نسبت به تیمار S65% و S50% داشت که دلیل آن پیشروی سریع‌تر آب (به دلیل بافت درشت تر) در زمان یکسان در این تیمار است.

منابع

۱. علیزاده ا. ۱۳۸۱. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۳۵۳ ص.
2. Bauters T. W. J. DiCarlo D. A. Steenhuis T. S. and Parlange J. Y. 1998. Preferential flow in water-repellent sands. *Soil Science Society of America journal*. 62: 1185-1190.
3. Carrillo M. L. K. Letey J. and Yates S. R. 2000. Unstable water flow in a layered soil: I. Effects of a stable water-repellent layer. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 450-455.
4. Cerda A. Schnabel S. Ceballos A. and Gomez-

18. Letey J. 2001. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency. *Hydrologic Processes*. 15: 2867-2875.
19. Letey J. Osborn J. F. and Valoras N. 1975. Soil water repellency and the use of nonionic surfactants. Contribution No 154, University of California, Davis, CA, 85 p
20. Letey J. M. Carrillo L. K. and Pang X. P. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*. 231-232: 61-65.
21. Nadav I. Tarchitzky J. Ayccegi A. L. and Chen Y. 2013. Soil surface water repellency induced by treated wastewater irrigation: physico-chemical characterization and quantification. *Irrigation Science*. 31(1): 49-58.
22. Quyum A. 2000. Water migration hydrophobic through soils. A thesis for the degree of Master of Science. Department of civil engineering. Calgary, Alberta. 144 P.
23. Ritsema C. J. Dekker L. W. Hendrickx J. M. H. and Hamminga W. 1993. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*. 29(7): 2183-2193.
24. Ritsema C. J. and Dekker L. W. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. Dynamics of fingered flow. *Water Resources Research*. 30: 2159-2531.
25. Wallis M. G. and Horne D. J. 1992. Soil water repellency. In: Stewart B. A. (Ed.), *Advances in Soil Science*. 20. Springer, New York. pp: 91-146.
26. Wang Z. Feyen J. and Elrick D. E. 1998. Prediction of fingering in porous media. *Journal of Water Resources Research*. 34: 2183-2190.
27. Wang Z. L. Wu Q. and Wu J. 2000. Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability. *Journal of Hydrology*. 231-232: 76-83.
28. Zavala L. M. Gonzalez F. A. and Jordan L. A. 2009. Fire-induced soil water repellency under different vegetation types along the Atlantic dune coast-line in SW Spain *Catena*. 79: 153-162.