



تأثیر عمق جریان بر توزیع آب و بروماید در آبیاری جویچه‌ای در یک خاک لوم شنی

*فریبرز عباسی^۱ و حمزه‌علی علی‌زاده^۲

^۱دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج،

^۲دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۶/۷؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۷/۱۴

چکیده

در این پژوهش برای بررسی اثر عمق جریان بر توزیع آب و املاح در آبیاری جویچه‌ای، دو سری آزمایش مزرعه‌ای در جویچه‌های کوتاه با انتهای بسته (طول ۳ متر) با جریان ایستا و در جویچه‌های بلند (طول ۱۱۵ متر) با جریان دینامیک در مرکز تحقیقات کشاورزی ماریکوپا در یک مزرعه با بافت لوم شنی بدون پوشش گیاهی انجام شد. در جویچه‌های بلند ۴ آزمایش شامل یک آزمایش در شرایط انتها باز با تزریق بروماید کلسیم در تمام مدت آبیاری و ۳ آزمایش در جویچه‌های انتها بسته با تزریق بروماید کلسیم در سه زمان نیمه اول آبیاری، نیمه دوم آبیاری و تزریق در تمام زمان آبیاری اجرا گردید. در جویچه‌های کوتاه سه آزمایش با زمان آبیاری مشابه (۹۰ دقیقه) ولی مقادیر مختلف آب و بروماید نفوذیافته ناشی از سه عمق آب ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر و دو آزمایش با مقادیر مشابه آب و بروماید کاربردی ولی زمان آبیاری متفاوت در جویچه‌هایی با عمق آب ۶ و ۱۰ سانتی‌متر انجام شد. رطوبت خاک در زمان‌ها، عمق‌ها و مکان‌های مختلف در عرض جویچه با استفاده از دستگاه نوترون‌متر و بازتاب‌سنج زمانی اندازه‌گیری گردید. نمونه‌های خاک نیز در تمامی آزمایش‌ها برای آنالیز غلظت بروماید در اعماق مختلف خاک تا عمق ۱/۸ متری برداشت شد. نتایج نشان داد عمق جریان در هر دو سری از آزمایش‌های انجام شده تأثیر زیادی روی توزیع آب و املاح زیر جویچه‌های مورد مطالعه داشت. اثرات عمق آب و زمان تزریق بروماید بر توزیع آب و املاح در لایه‌های سطحی خاک بیش‌تر و با افزایش عمق خاک از شدت آن کاسته شد. همچنین مقدار آب و بروماید نفوذیافته، به عمق

* مسئول مکاتبه: abbasi_friborz@yahoo.com

آب و زمان آبیاری و زمان تزریق بروماید بستگی داشته و به‌طور عموم در طول جویچه‌های بلند کاهش یافت. در جویچه‌های کوتاه نیز یکنواختی توزیع آب و بروماید به عمق آب و زمان تزریق املاح وابستگی نشان داد. بین عمق آب آبیاری و مقدار آب و بروماید نفوذیافته یک رابطه رگرسیونی خطی مشاهده گردید. عمق آب آبیاری ۱۴ سانتی‌متر و تزریق بروماید در مدت زمان کوتاه باعث بهبود یکنواختی توزیع در مقایسه با سایر عمق‌های مورد مطالعه شد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، عمق جریان، توزیع آب و بروماید

مقدمه

انتقال املاح در خاک تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و شرایط بالا و پایین دست پروفیل خاک قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که بررسی پدیده انتقال آب و املاح در خاک را پیچیده می‌نماید (والاچ و همکاران، ۱۹۹۱). برای مثال در بعضی مواقع انتقال آب و املاح توسط جریان ترجیحی انجام می‌گیرد (بون و جرمن، ۱۹۸۲). این جریان بدون واکنش با دیگر خلل و فرج خاک به سرعت به لایه‌های عمقی وارد شده و علاوه بر تلفات آب و املاح موجبات آلودگی منابع آب را فراهم می‌کند (مورای و هیگاشی، ۲۰۰۹). اگرچه در چند دهه اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه توصیف و مدل‌سازی حرکت آب و املاح تحت شرایط ماندگار و در مقیاس آزمایشگاهی به‌دست آمده اما، تعداد تحلیل‌های دقیق در مقیاس مزرعه‌ای به‌علت هزینه‌ها و نیروی کارگری مورد نیاز و همچنین پیچیدگی ذاتی ناشی از ناهمگنی خاک اندک بوده است. به‌عنوان مثال، هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک ممکن است حتی در فواصل کم تا چند برابر تغییر یابد (بریسلا و همکاران، ۱۹۸۴؛ بیگار و نیلسن، ۱۹۷۶). فرایندهای انتقال آب و املاح تحت تأثیر نوع خاک (ون‌دربورخت و همکاران، ۱۹۹۷؛ ون‌دربورخت و همکاران، ۲۰۰۱؛ شدت جریان (ون‌دربورخت و همکاران، ۱۹۹۷؛ ون‌دربورخت و همکاران، ۲۰۰۱؛ فورر و همکاران، ۱۹۹۹)، رژیم جریان (بومان و رایس، ۱۹۸۶؛ جینز و همکاران، ۱۹۸۸)، روش آبیاری (قدرتی و جوری، ۱۹۹۰؛ ترویانو و همکاران، ۱۹۹۳؛ فلوری و همکاران، ۱۹۹۴)، عمق جریان (مایلهول و همکاران، ۲۰۰۱؛ مایلهول و همکاران، ۲۰۰۷)، جریان ترجیحی (فلوری و همکاران، ۱۹۹۴؛ ون‌وسنیک و کاجانوسکی، ۱۹۹۴)، ناهمگنی خاک (جاکوئس، ۲۰۰۰)، شرایط اولیه (استینویز و ماک، ۱۹۸۸) و شرایط مرزی (روسو و همکاران، ۱۹۹۴) قرار می‌گیرد. حرکت و توزیع املاح در خاک به حرکت آب و توزیع

رطوبت در خاک وابسته است (بار- یوسف و بار- تال، ۱۹۹۵). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آبیاری به‌عنوان منبع تامین رطوبت، مهم‌ترین فاکتور مؤثر بر انتقال و توزیع املاح محسوب می‌شود. در این راستا عمق آب آبیاری و عمق جریان در جویچه‌ها از اهمیت بیش‌تری برخوردار هستند. عمق آب آبیاری بر شدت نفوذ و توزیع آب در خاک مؤثر است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که اثر عمق آب در آبیاری نواری به‌نسبت کم (پارلانژ، ۱۹۷۲؛ فیلیپ، ۱۹۵۸) ولی در آبیاری جویچه‌ای این اثر قابل ملاحظه است (فانگمیر و رامسی، ۱۹۷۸؛ سوزا، ۱۹۸۱؛ والندر و رایج، ۱۹۹۰). نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی ویلدنچایلد و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که اثر عمق جریان بر منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های ماسه‌ای معنی‌دار، ولی در خاک‌های ریز بافت قابل چشم‌پوشی بود. آزمایش‌های لایسیمتری پاپووا و همکاران (۲۰۰۰) نشان داد که تلفات نفوذ عمقی تحت‌تأثیر عمق جریان و مقدار املاح مورد استفاده، قرار گرفت. نتایج پژوهش‌های مایلهول و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که در جویچه‌های کوتاه و انتها بسته عمق جریان آب در قسمت‌های انتهایی بیش‌تر از سایر قسمت‌های جویچه بود. بنابراین، در این نواحی املاح بیش‌تر به لایه‌های عمقی نفوذ می‌کند. آن‌ها همچنین نشان دادند در سطوح عمق آب آبیاری کم، نیترات باقی‌مانده در لایه‌های بالایی کم‌تر تحت‌تأثیر آب‌شویی قرار می‌گیرد. در این حالت نیروی موئینگی اصلی‌ترین عامل انتقال املاح است که منجر به تجمع املاح در قسمت‌های بالای پشته می‌شود. در عمق‌های زیاد، هم نیروی ثقلی و هم نیروی موئینگی در جابه‌جایی املاح از لایه‌های بالا به لایه‌های عمیق‌تر مؤثر هستند. بنابراین، اگر عمق آب کاربردی زیاد باشد خطر افزایش آب‌شویی نیترات به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. مایلهول و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر عمق جریان و عمق آب کاربردی را در حرکت آب و املاح با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی^۱ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که عمق جریان و عمق آب کاربردی نقش مهمی در آب‌شویی نیترات و تجمع آن در بالای پشته‌ها دارد و سطوح آبیاری زیاد (به‌علت زمان کاربرد بیش‌تر) منجر به کاهش قابل‌ملاحظه اختلاف بین مقدار نیتروژن اندازه‌گیری شده در بالای پشته و کف جویچه می‌گردد. پنگ و لتی (۱۹۹۸) نشان دادند که افزایش عمق آب آبیاری منجر به افزایش تلفات نفوذ عمقی آب و املاح می‌شود. کریویازر و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که تلفات ناشی از آب‌شویی کود علاوه‌بر مدیریت آب به مدیریت کود نیز بستگی دارد. برای مثال تزریق کود در تمام مدت زمان آبیاری و یا زمان‌های انتهایی آبیاری نسبت به

1- HYDRUS-2D

نیمه اول آبیاری یکنواختی توزیع کود بیش‌تری را ایجاد می‌کند (پلایان و فاسی، ۱۹۹۷؛ عباسی و همکاران، ۲۰۰۹). به هر حال، مدیریت بهینه آب و کود برای جلوگیری از کاهش کیفیت منابع آب و خاک به‌علت مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، هدف اصلی از این پژوهش بررسی اثر عمق جریان آب بر توزیع رطوبت و بروماید در آبیاری جویچه‌ای تحت مدیریت‌های مختلف تزریق بروماید می‌باشد. تأثیر عمق جریان بر توزیع آب و بروماید در دو مقیاس کوچک و بزرگ در جویچه‌های کوتاه و جویچه‌های بلند مقایسه و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای در سال ۲۰۰۱ در مرکز تحقیقات کشاورزی ماریکوپا در ایالت آریزونا در یک مزرعه با بافت لوم شنی فاقد پوشش گیاهی انجام شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک منطقه در جدول ۱ ارایه شده است.

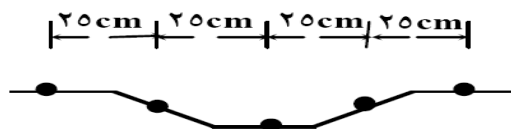
جدول ۱- برخی از مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه.

جرم مخصوص ظاهری (گرم در سانتی‌مترمکعب)	بافت خاک	درصد ذرات خاک			عمق (سانتی‌متر)
		شن	سیلت	رس	
۱/۴۹	لومی شنی	۷۴/۲۹	۲/۱۰	۱۶/۳۵	۰-۲۰
۱/۵۶	لومی شنی	۷۵/۰۴	۱/۶۶	۱۵/۶۵	۲۰-۴۰
۱/۵۰	لومی شنی	۷۶/۷۳	۱/۸۳	۱۵/۰۰	۴۰-۶۰
۱/۴۱	لومی شنی	۷۲/۳۴	۲/۸۵	۱۵/۷۲	۶۰-۸۰
۱/۴۶	لومی شنی	۷۱/۱۶	۴/۸۰	۱۶/۱۷	۸۰-۱۰۰
۱/۵۱	لومی شنی	۶۹/۵۷	۵/۲۹	۱۵/۹۲	۱۰۰-۱۴۰
۱/۳۸	لومی شنی	۷۰/۳۲	۳/۴۷	۱۵/۵۰	۱۴۰-۱۸۰

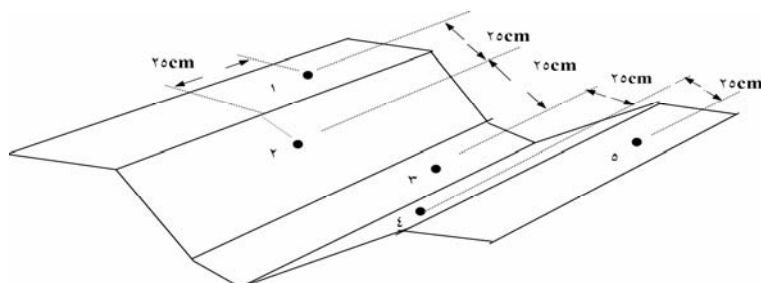
آزمایش‌ها به دو صورت یکی در جویچه‌های کوتاه و انتها بسته (طول ۳ متر) با جریان ایستا و دیگری در جویچه‌های بلند (طول ۱۱۵ متر) در مقیاس مزرعه‌ای با جریان دینامیک مشابه شرایط مزرعه انجام شد. فواصل جویچه‌ها در همه آزمایش‌ها براساس عرف منطقه ۱ متر در نظر گرفته شد. استفاده از

جویچه‌های کوتاه به دلیل امکان کنترل بهتر عمق کاربرد آب و همچنین کاهش اثرات ناهمگنی خاک اهمیت دارد (عباسی و همکاران، ۲۰۰۴؛ مایلهول و همکاران، ۲۰۰۷). در جویچه‌های کوتاه دو سری آزمایش انجام گردید. در سری اول، سه آزمایش با عمق جریان ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر و مدت زمان کاربرد یکسان آب و املاح اجرا شد. آبیاری اول به مدت ۹۰ دقیقه و در دو فاز صورت گرفت. در فاز اول، آبیاری در مدت ۶۰ دقیقه (برای هر سه عمق) به منظور خیس کردن نیم‌رخ خاک انجام شد. در فاز دوم، آب با بروماید کلسیم مخلوط و به مدت ۳۰ دقیقه به‌طور یکسان در هر سه آزمایش به‌کار رفت. در پایان فاز اول و دوم، آب باقی‌مانده در جویچه‌ها تخلیه و اندازه‌گیری گردید. سری دوم آزمایش‌ها شامل کاربرد مقادیر مشابه آب و املاح بود. مقدار آب مصرفی در این آزمایش‌ها مشابه مقدار آب نفوذیافته در عمق آبیاری ۱۴ سانتی‌متر در آزمایش‌های مدت زمان کاربرد یکسان بوده است. در این آزمایش‌ها دو سطح آب آبیاری ۶ و ۱۰ سانتی‌متر به‌کار گرفته شد. آبیاری اول مشابه با سناریوی مدت زمان کاربرد یکسان در دو فاز آب خالص و آب همراه با بروماید کلسیم انجام شد. با این تفاوت که مدت زمان آبیاری برای هر عمق براساس آزمایش قبلی با عمق ۱۴ سانتی‌متر تنظیم گردید. به این ترتیب که آزمایش‌ها تا زمانی که حجم آب و جرم بروماید نفوذیافته به‌میزان موردنظر در آزمایش با عمق ۱۴ سانتی‌متر برسد، ادامه یافت. در همه آزمایش‌ها، از غلظت یکسان بروماید (۱۰ گرم بر لیتر) استفاده گردید. رطوبت خاک در اعماق ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰، ۱/۴ و ۱/۸ متری از سطح خاک با استفاده از دستگاه نوترون‌متر (شکل ۱) و رطوبت لایه سطحی خاک (۳۰-۰ سانتی‌متر) به دلیل خطای نوترون‌متر نزدیک سطح زمین، توسط دستگاه بازتاب‌سنج زمانی^۱ و هم‌زمان با قرائت نوترون‌متر در زمان‌های قبل از هر آبیاری (شرایط اولیه)، بلافاصله بعد از هر آبیاری، و هر یک ساعت تا ۶ ساعت و پس از آن هر ۳ ساعت تا ۲۴ ساعت بعد از هر آبیاری اندازه‌گیری شد. سپس ۳ تا ۴ قرائت در هر روز تا روز سوم و ۱ تا ۲ قرائت در هر روز تا آبیاری بعدی انجام شد. نمونه‌برداری خاک برای اندازه‌گیری غلظت بروماید در عمق‌ها و مکان‌های مشابه با نوترون‌متر و در ۴ نوبت، قبل از آغاز آزمایش (مقادیر اولیه)، ۵ روز بعد از آبیاری اول و ۶ و ۲۰ روز بعد از آبیاری دوم صورت گرفت. فاصله دو آبیاری ۱۰ روز در نظر گرفته شد. حجم آب کاربردی نیز در همه آزمایش‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری گردید.

1- TDR



الف) نمای جلوی: محل نصب لوله‌های نوترون متر و برداشت نمونه‌های خاک



ب) چشم‌انداز کامل: شماره لوله‌های نوترون متر نصب شده در دو ردیف می‌باشد، در همه جویچه‌ها لوله‌های شماره ۲ و ۴ در ردیف اول و لوله‌های شماره ۱، ۳ و ۵ در ردیف دوم قرار دارند

شکل ۱- موقعیت نصب لوله‌های نوترون متر و محل برداشت نمونه‌های خاک در مقطع جویچه
الف) نمای جلوی، ب) چشم‌انداز کامل.

در جویچه‌های بلند، ۴ آزمایش در همان مزرعه انجام شد. یکی از آزمایش‌ها در جویچه‌های انتها باز و ۳ آزمایش دیگر در جویچه‌های انتها بسته اجرا شد. هر آزمایش شامل ۳ جویچه بود که اندازه‌گیری‌ها در جویچه غیرچرخ رو وسطی انجام گردید. دو جویچه چرخ رو کناری به‌عنوان محافظ عمل می‌کردند. در جویچه‌های انتها باز دو آبیاری با فاصله ۱۰ روز انجام شد. مدت زمان آبیاری اول و دوم به ترتیب ۱۵۰ و ۱۴۰ دقیقه، میانگین دبی ورودی آن‌ها به ترتیب ۱/۰۷ و ۱/۰۳ لیتر بر ثانیه بود. تزریق بروماید کلسیم در جویچه‌های انتها باز با غلظت ۶/۳ گرم بر لیتر در تمام مدت آبیاری اول انجام گردید. در جویچه‌های انتها بسته، تزریق بروماید کلسیم در سه زمان مختلف نیمه اول، نیمه دوم و تمام مدت زمان آبیاری به ترتیب با غلظت ۲/۷۹، ۲/۶۳ و ۵/۳۵ گرم بر لیتر به همراه آب آبیاری صورت گرفت. مدت زمان تزریق بروماید در آزمایش‌های نیمه اول، نیمه دوم و تمام مدت زمان آبیاری به ترتیب ۷۰، ۷۰ و ۱۴۰ دقیقه بود. روش اندازه‌گیری رطوبت مشابه جویچه‌های کوتاه در زمان‌های قبل از آبیاری، ۶ و ۱۲ ساعت بعد از آبیاری و پس از آن به صورت روزانه و تا ۱۵ روز بعد

از آبیاری اندازه‌گیری می‌شد. نمونه‌های خاک برای آنالیز غلظت بروماید و رطوبت وزنی خاک در ابتدا، وسط و انتهای جویچه‌ها برداشت شد. نمونه‌های خاک از سه نقطه (کف، بدنه و روی پشته) از یک طرف جویچه‌های آزمایشی از اعماق ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰، ۱/۴ و ۱/۸ متری از سطح خاک برداشت گردید. نمونه‌های خاک در هوا خشک و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. مقدار بروماید در عصاره ۱:۱ خاک و با استفاده از روش رنگ‌سنجی استاندارد اندازه‌گیری شد. عمق جریان در همه آزمایش‌ها با نصب خط‌کش در کف جویچه‌های آزمایشی اندازه‌گیری گردید. شیب عمومی مزرعه برای هر دو سری آزمایش ۰/۰۰۰۱ متر بر متر بود. برای نمایش توزیع رطوبت و بروماید در خاک، نقشه هم رطوبت و هم غلظت بروماید در خاک با استفاده از نرم‌افزار سورفر^۱ (نرم‌افزار گلندن، ۱۹۹۹) و به روش کریجینگ ترسیم شد. جزئیات بیش‌تر مربوط به چگونگی انجام آزمایش‌های تئوری حاکم بر حرکت آب و املاح در خاک توسط عباسی (۲۰۰۳) ارایه شده است.

نتایج و بحث

جویچه‌های کوتاه: مقادیر آب و بروماید نفوذیافته در آزمایش‌های مختلف در آبیاری اول و دوم در جدول ۲ ارایه شده‌اند. در آزمایش‌های مدت زمان کاربرد یکسان (SD)^۲ بین مقادیر آب و بروماید نفوذیافته و عمق‌های مختلف آب همبستگی وجود دارد. به‌طوری‌که با افزایش عمق آب آبیاری، مقدار آب و بروماید نفوذیافته در خاک افزایش می‌یابد. همچنین در آزمایش‌های مقادیر مشابه آب و املاح (SWS)^۳ بین زمان کاربرد آب و بروماید و سطوح آب همبستگی وجود دارد. با کاهش عمق آب در جویچه به‌خصوص در آبیاری اول، زمان کاربرد آب و بروماید افزایش می‌یابد (جدول ۲). بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که سطوح مختلف آب بر مقدار آب و بروماید نفوذیافته و زمان کاربرد آن‌ها مؤثر است. ضرایب رگرسیون بین متغیرهای مختلف (عمق آب، مقادیر آب و کود نفوذیافته و زمان کاربرد) بین ۰/۷۶ تا ۰/۹۸ قرار دارد.

1- SURFER

2- Same Duration

3- Same Water and Solute

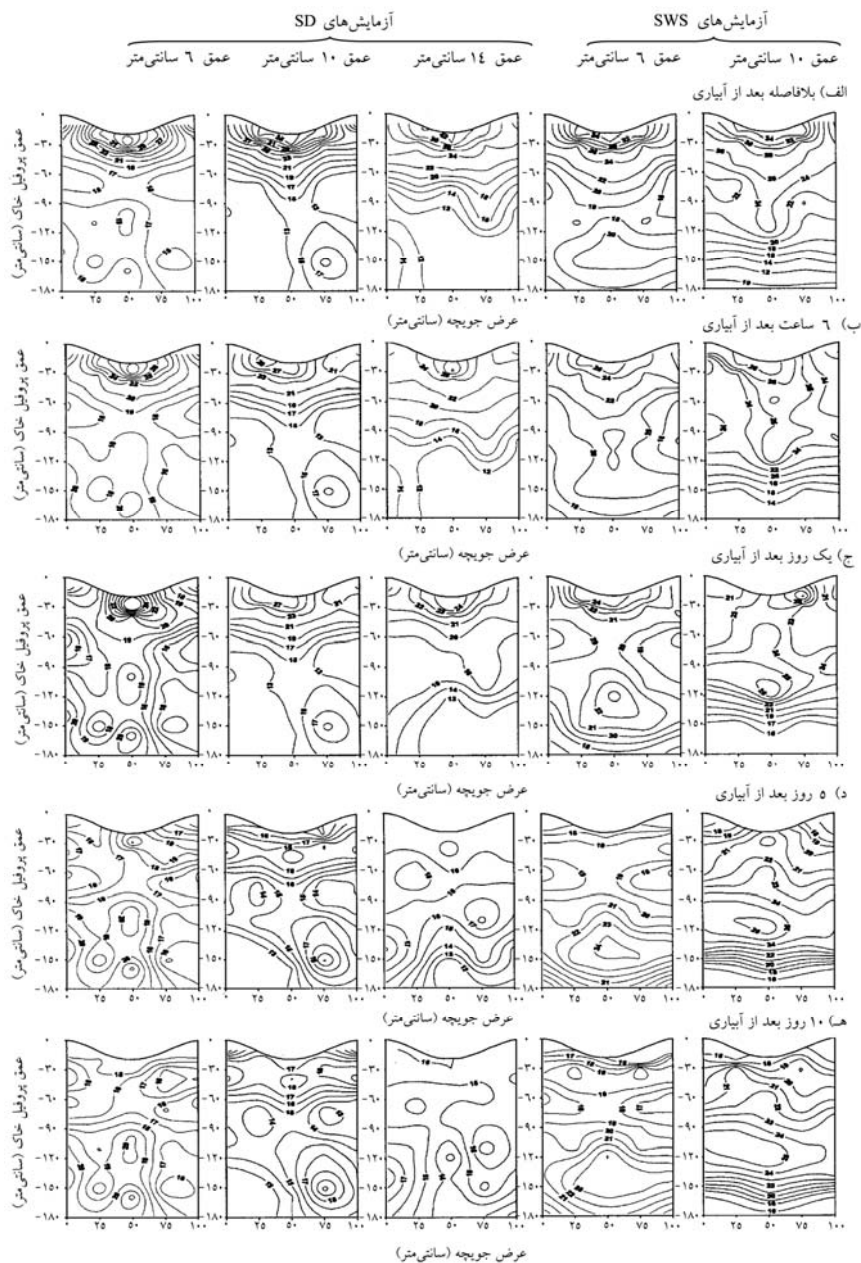
جدول ۲- مقادیر آب و بروماید نفوذ یافته در آبیاری اول و دوم جویچه‌های کوتاه.

آزمایش	عمق آب (سانتی‌متر)	آبیاری اول		آبیاری دوم	
		آب (لیتر بر متر)	بروماید (گرم بر متر)	آب (لیتر بر متر)	زمان کاربرد (دقیقه)
	۶	۳۱/۶۳	۷۰/۷۶	۸۲/۷	۹۰
SD	۱۰	۵۰/۷۲	۹۰/۱۷	۵۰/۲	۹۰
	۱۴	۹۸/۸۳	۲۱۸/۱۷	۲۴/۱	۹۰
	۶	۹۹/۴۲	۲۱۸/۳۳	۵۷/۰	۲۰۸
SWS	۱۰	۹۸/۴۲	۲۱۸/۳۳	۷۱/۶	۹۲

* اعداد داخل پرانتز زمان تزریق بروماید است.

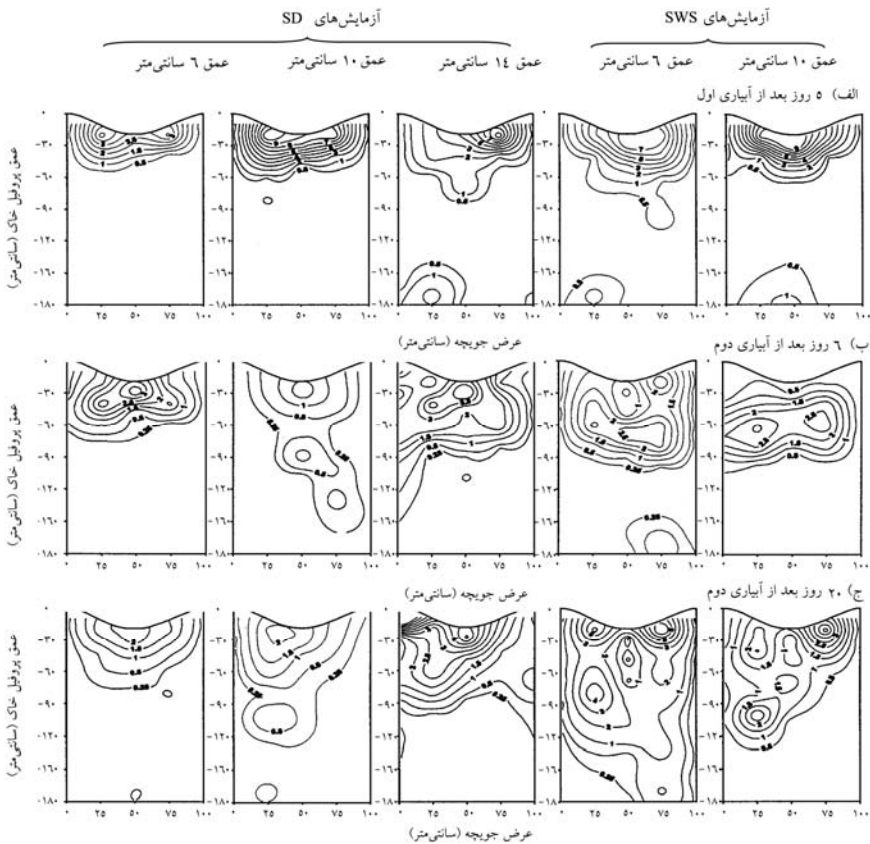
نقشه هم‌رطوبت خاک در زمان‌های مختلف بعد از آبیاری اول در شکل ۲ ارائه شده است. بیش‌ترین مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در کف جویچه حدود ۰/۳۵ یا ۰/۸۵ (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) مقدار رطوبت اشباع در حالت آزمایشگاه (۰/۴۰۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) است. به‌طور کلی، حرکت آب در آزمایش‌های SD (عمق‌های ۶ و ۱۰ سانتی‌متری) به سمت پایین و به‌طور عمده یک‌بعدی بوده و حرکت جانبی با توجه به بافت خاک (۷۰ درصد شن) محدود بود. اما در آزمایش‌های SWS الگوی خیس‌شدگی در ناحیه ریشه به‌طور عمده دویچه‌ای بوده است. جبهه رطوبتی در آزمایش‌های SD (به‌خصوص عمق ۶ سانتی‌متر) هرگز به پشته نرسید. در حالی که در آزمایش‌های SWS حتی در آزمایش با عمق ۶ سانتی‌متر هم پشته‌ها به‌خوبی خیس شدند. این مطلب به‌دلیل آن است که در آزمایش‌های SD (به‌خصوص عمق ۶ و ۱۰ سانتی‌متری) مقدار آب کم‌تری نسبت به آزمایش‌های SWS به‌کار رفته است. در مرحله توزیع مجدد، مقدار رطوبت در لایه سطحی جویچه‌ها نسبت به زمان کاهش یافته است (شکل ۲- ج، د، ه). دلیل اصلی آن تبخیر از سطح خاک و نفوذ آب سطحی به لایه‌های پایین‌تر می‌باشد. این عامل باعث شده تا رطوبت خاک ۱۰ روز پس از آبیاری در آزمایش‌های مختلف، تقریباً یکسان باشد (شکل ۲- ه). در آزمایش‌های SD، رطوبت خاک به‌ویژه در اعماق زیر ۱۰۰ سانتی‌متر و همچنین در مرحله توزیع مجدد، تا حدودی بدون تغییر باقی ماند (شکل ۲) که می‌تواند ناشی از مقادیر به‌نسبت کم آب به‌کار برده شده و شیب کم رطوبت در پروفیل خاک باشد. در مقابل، در آزمایش‌های SWS در مراحل نفوذ و توزیع مجدد، مقادیر رطوبت به‌وضوح تغییر می‌کند. در این آزمایش‌ها تغییر رطوبت در عمق‌های پایین‌تر از ۱۴۰ سانتی‌متر هم مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال مقدار رطوبت در آزمایش SWS عمق ۱۰ سانتی‌متر از حدود ۱۰ درصد (به‌عنوان مقدار اولیه، شکل ۲- الف) به حدود ۱۹ درصد (۱۰ روز بعد از آبیاری دوم) رسیده است. این به آن معنی است که نفوذ عمقی در آزمایش‌های SWS بیش‌تر از آزمایش‌های SD است. نقشه هم‌رطوبت در آبیاری دوم مشابه آبیاری اول بود (نتایج ارائه نشده است).

نقشه هم‌غلظت بروماید در آزمایش‌های مختلف جویچه‌های کوتاه در شکل ۳ ارائه شده است. غلظت بروماید در لایه‌های سطحی زیرجویچه‌ها در اولین نمونه‌گیری ۵ روز بعد از آبیاری بیش‌ترین است. ظاهراً حرکت رو به بالای جریان آب به دلیل تبخیر، باعث انتقال بروماید به سمت لایه‌های سطحی شده است. نقطه اوج غلظت در نمونه‌گیری‌های دوم و سوم اساساً به دلیل آب‌شویی و توزیع مجدد بروماید در پروفیل خاک در طول آبیاری دوم کم‌تر است. بیش‌ترین غلظت بروماید در نمونه‌گیری‌های دوم و سوم در آزمایش‌های SWS به دلیل مدت زمان طولانی‌تر کاربرد بروماید بیش‌تر از آزمایش‌های SD بود. در مجموع، میانگین جبهه املاح ۵ روز بعد از آبیاری اول و در اولین نمونه‌برداری در آزمایش‌های SWS و SD به‌طور متوسط به ترتیب به عمق‌های ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متری رسیده است. به هر حال، املاح در آزمایش‌های SWS احتمالاً به‌خاطر جریان ترجیحی به لایه‌های عمیق‌تر (حدود ۱۵۰ سانتی‌متر) منتقل شده‌اند (شکل ۳-الف). اثر جریان ترجیحی در دومین و سومین نمونه‌برداری در تمامی آزمایش‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۳-الف و ج). در بعضی از آزمایش‌ها جبهه املاح از عمق ۱۸۰ سانتی‌متری هم عبور کرده است. آبیاری دوم باعث انتقال جبهه املاح در همه آزمایش‌ها به عمق حدود ۱۴۰ سانتی‌متری شده است (به‌استثنای عمق ۶ سانتی‌متر در آزمایش SD). هر چند جریان ترجیحی و تغییرات مکانی خصوصیات خاک باعث شده که نتوان یک رابطه عمومی بین جبهه بروماید و سطح آب در جویچه‌ها ایجاد نمود، ولی واضح است که میانگین جبهه املاح در آزمایش‌های SWS به‌وضوح عمیق‌تر از آزمایش‌های SD می‌باشد. غلظت بروماید در عمق‌های به‌نسبت زیاد خاک (عمیق‌تر از ۱۴۰ سانتی‌متر) در تمام آزمایش‌های SD کم‌تر از آزمایش‌های SWS بود. انتقال بروماید در آزمایش‌های SD به‌طور عمده به‌صورت یک‌بعدی و بروماید به‌طور عمده در لایه‌های سطحی خاک باقی ماند. به‌کار بردن کود همراه آب آبیاری (کود آبیاری) با استفاده از اعماق به‌نسبت کم آب و مدت زمان کاربرد کوتاه (مانند تیمارهای SD) ممکن است از نظر مدیریت کود باعث ایجاد مشکلاتی شود. در این شرایط کودها ممکن است بیش‌تر از آن‌که در ناحیه ریشه قرار گیرند تا جذب گیاهان شوند، در کف جویچه و لایه سطحی آن قرار گیرند و سپس در آبیاری‌های بعدی و در طول فصل رشد از منطقه ریشه خارج و یا در شرایطی که خاک خشک است تصعید شوند. این فرض به‌خصوص در اوایل فصل رشد که ریشه‌های گیاه هنوز توسعه نیافته‌اند، صدق می‌کند. این نگرانی به‌ویژه هنگام استفاده از کودهای جامد در روش پخش سطحی وجود دارد. در این موارد کودها به‌صورت حل نشده در سطح خاک خشک به‌ویژه هنگامی که عمق جریان و زمان کاربرد آب کم باشد، باقی می‌مانند. این کودها بعداً از طریق تصعید یا سایر فرایندهای محیطی از بین می‌روند.



شکل ۲- رطوبت اندازه‌گیری شده (درصد حجمی) در آزمایش‌های مختلف (الف) بلافاصله، (ب) ۶ ساعت، (ج) ۱ روز، (د) ۵ روز و (ه) ۱۰ روز بعد از آبیاری اول.

نتایج پژوهش‌های مایلهول و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که در سطوح عمق آب آبیاری کم، به‌علت این‌که اصلی‌ترین عامل انتقال املاح نیروی موئینگی است، نترات باقی‌مانده در لایه‌های بالایی کم‌تر تحت تأثیر آب‌شویی قرار گرفته و معمولاً در قسمت‌های بالایی پشته باقی می‌ماند. ولی در عمق‌های آبیاری زیاد به‌علت این‌که علاوه بر نیروی موئینگی، نیروی ثقلی هم در جابه‌جایی املاح مؤثر و باعث انتقال املاح از لایه‌های سطحی به لایه‌های زیرین می‌شود. بنابراین، اگر عمق آب کاربردی زیاد باشد احتمال افزایش آب‌شویی نترات به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج این پژوهش با یافته‌های مایلهول و همکاران (۲۰۰۱) مطابقت دارد.

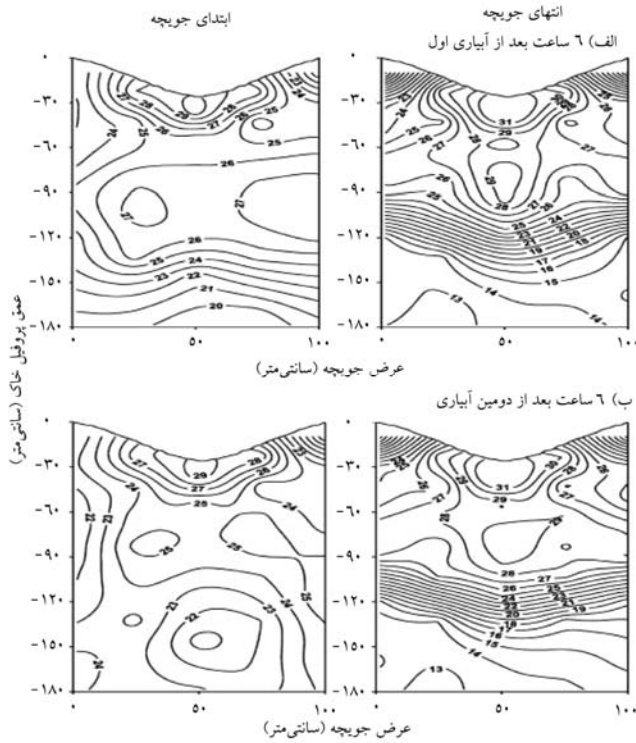


شکل ۳- غلظت بروماید اندازه‌گیری شده (گرم بر لیتر) در آزمایش‌های مختلف جویچه‌های کوتاه الف) ۵ روز بعد از آبیاری اول، ب) ۶ روز بعد از آبیاری دوم، ج) ۲۰ روز بعد از آبیاری دوم د) ۳۰ روز پس از شروع آزمایش‌ها.

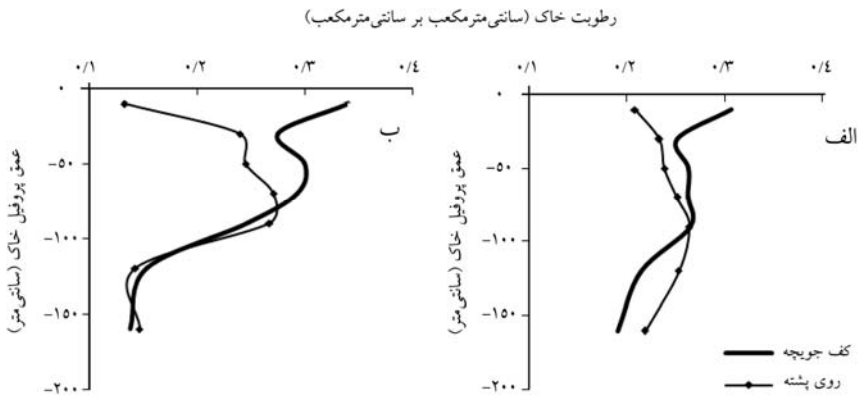
جویچه‌های بلند: نقشه هم‌رطوبت خاک ۶ ساعت بعد از هر یک از آبیاری‌های اول و دوم در ایستگاه‌های مختلف آزمایش FD در شکل ۴ ترسیم شده است. اختلاف به نسبت کمی بین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در دو آبیاری مشاهده می‌شود. توزیع رطوبت در بخش‌های ابتدایی جویچه‌ها در تمام پروفیل خاک به نسبت یکنواخت است. در حالی که در ایستگاه خروجی توزیع رطوبت محدود به کف جویچه بوده و در جهات جانبی از یکنواختی مناسبی برخوردار نیست. جریان آب به سمت پشته‌ها اغلب تحت تأثیر نیروی موئینگی قرار می‌گیرد که در این آزمایش‌ها به خاطر بافت درشت خاک مزرعه و کوتاه بودن زمان آبیاری مقدار آن اندک است. همان‌طور که انتظار می‌رفت عمق آب نفوذیافته به لایه‌های پایین‌تر در ایستگاه ورودی بیش‌تر از ایستگاه خروجی است. برای مثال مقدار رطوبت در کف جویچه ایستگاه ورودی پس از گذشت ۱۰ روز از آبیاری اول حدود ۲۵-۲۰ درصد نسبت به شرایط اولیه (قبل از آبیاری) افزایش یافت در حالی که در ایستگاه خروجی این مقدار حدود ۱۴ درصد بود.

برای قضاوت بهتر، مقایسه یک‌بعدی پروفیل رطوبتی خاک در ایستگاه‌های ورودی و خروجی در کف و پشته جویچه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. بین رطوبت خاک در کف جویچه و پشته آن اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای به‌ویژه در لایه‌های سطحی دیده می‌شود. این اختلاف در ایستگاه خروجی به‌خاطر عمق جریان کم‌تر ملموس‌تر است. از این جنبه هم نتایج این پژوهش با نتایج مایلهل و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد.

میانگین عمق جریان، فرصت نفوذ، مدت زمان تزریق بروماید و نفوذ عمقی آب و بروماید به اعماق پایین‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر در ایستگاه‌ها و آزمایش‌های مختلف جویچه‌های بلند در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نفوذ عمقی در هر یک از آزمایش‌ها به عمق جریان، مدت زمان نفوذ و زمان کاربرد بروماید بستگی دارد. برای مثال در جویچه‌های انتها باز (آزمایش FD) با مدت زمان کاربرد آب و کود بیش‌تر، تلفات نفوذ عمقی آب و املاح بیش‌تری نسبت به آزمایش‌های تزریق کود در کل زمان آبیاری (آزمایش T) و نیمه دوم آبیاری (آزمایش SH) ایجاد می‌کند. نفوذ عمقی آب و بروماید در طول جویچه، به‌دلیل کاهش فرصت نفوذ، کاهش عمق جریان و کاهش عمق آب کاربردی کاهش می‌یابد. تغییرات عمق آب آبیاری و بالا بودن فرصت نفوذ در جویچه‌های انتها باز به‌دلیل باز بودن انتهای جویچه‌ها می‌باشد.



شکل ۴- توزیع رطوبت در ایستگاه‌های مختلف آزمایش جویچه‌های انتها باز در جویچه‌های بلند (الف) ۶ ساعت بعد از آبیاری اول، (ب) ۶ ساعت بعد از آبیاری دوم.



شکل ۵- مقایسه رطوبت در کف و پشته جویچه در ایستگاه ورودی (الف) و خروجی (ب) جویچه‌های انتها باز ۶ ساعت بعد از آبیاری اول.

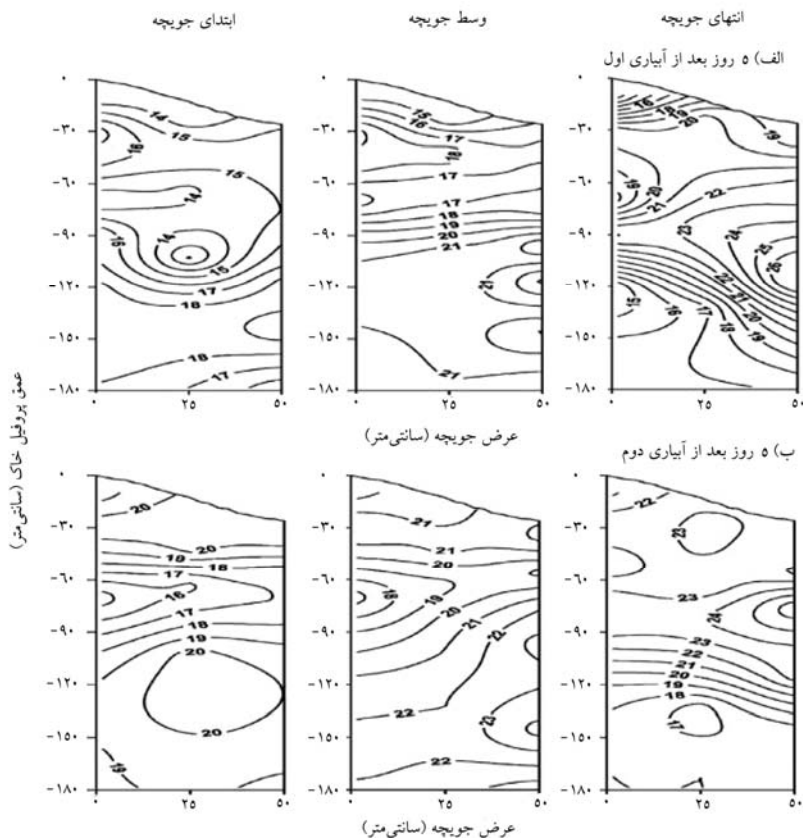
جدول ۳- میانگین عمق جریان آب، فرصت نفوذ، زمان تزریق بروماید و تلفات آب و بروماید از طریق نفوذ عمقی.

آزمایش	ایستگاه	عمق جریان (سانتی‌متر)	فرصت نفوذ (دقیقه)	زمان تزریق املاح (دقیقه)	نفوذ عمقی	
					آب (لیتر بر متر)	بروماید (گرم بر متر)
	ورودی جویچه	۸/۷ (۷/۷)*	۳۰۵ (۱۸۵)		۸۲/۷	۱۳۹/۷
FD	وسط جویچه	۶/۰ (۵/۸)	۲۴۳ (۱۶۲)	۲۷۵ (۰)	۵۰/۲	۹۵/۹
	خروجی جویچه	۲/۷ (۲/۵)	۷۰ (۹۲)		۲۴/۱	۸/۴
	ورودی جویچه	۹/۰	۱۸۴		۵۷/۰	۱۳/۰
T	وسط جویچه	۶/۷	۱۵۵	۱۴۰	۷۱/۶	۳/۲
	خروجی جویچه	۶/۲	۷۵		۴۶/۶	۱/۱
	ورودی جویچه	۸/۰	۱۶۸		۸۶/۶	۱۶/۱
'FH	وسط جویچه	۷/۸	۱۴۲	۷۰	۶۶/۹	۱۱/۲
	خروجی جویچه	۶/۷	۹۰		۴۵/۹	۰/۷
	ورودی جویچه	۸/۱	۱۵۶	۷۰	۴۰/۳	۲۳/۰
SH	وسط جویچه	۵/۳	۱۱۸		۲۳/۶	۵/۸

* اعداد داخل پرانتز مربوط به آبیاری دوم است.

مقادیر توزیع رطوبت برای آزمایش‌های FD، FH، SH و T در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. توزیع رطوبت کم و بیش در ایستگاه‌ها و آزمایش‌های مختلف به‌خاطر تبخیر از لایه‌های سطحی خاک و ۱۸ میلی‌متر بارندگی چند روز بعد از آبیاری و قبل از نمونه‌برداری یکنواخت و یکسان است. نقشه هم‌غلظت بروماید در ایستگاه‌های مختلف آزمایش FD در شکل ۸ مقایسه شده‌اند. نکته دارای اهمیت در این شکل، یکنواخت نبودن توزیع بروماید در هر یک از ایستگاه‌ها و بین ایستگاه‌های مختلف است. غلظت بروماید در ایستگاه‌های ورودی و وسط جویچه به‌نسبت یکنواخت توزیع شده، در حالی‌که توزیع آن در ایستگاه انتهایی بسیار غیریکنواخت و تنها در بخش محدودی از خاک توزیع شده است. از جمله عوامل مؤثر بر این یکنواخت نبودن، کم بودن عمق آب آبیاری و فرصت کم نفوذ بروماید در قسمت‌های انتهایی جویچه می‌باشد. متوسط عمق آب آبیاری در ایستگاه‌های ورودی، میانه و خروجی این آزمایش به‌ترتیب ۸/۷، ۶/۰ و ۲/۷ سانتی‌متر و مدت زمان تزریق بروماید ایستگاه‌های ذکر شده به‌ترتیب ۳۰۵، ۲۴۳ و ۷۰ دقیقه می‌باشد (جدول ۳).

1- First Time

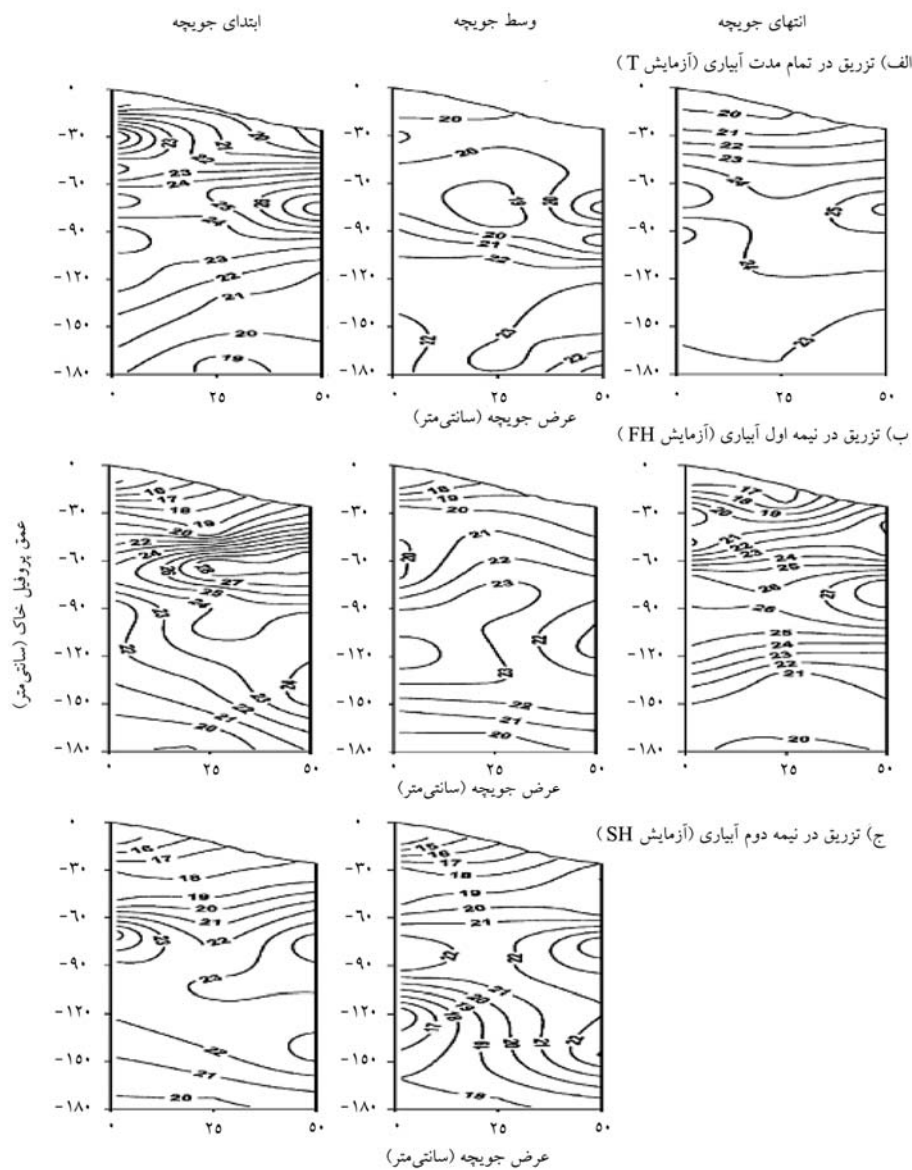


شکل ۶- توزیع رطوبت (سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب) در ایستگاه‌های مختلف آزمایش FD
 (الف) ۵ روز بعد از آبیاری اول، (ب) ۵ روز بعد از آبیاری دوم.

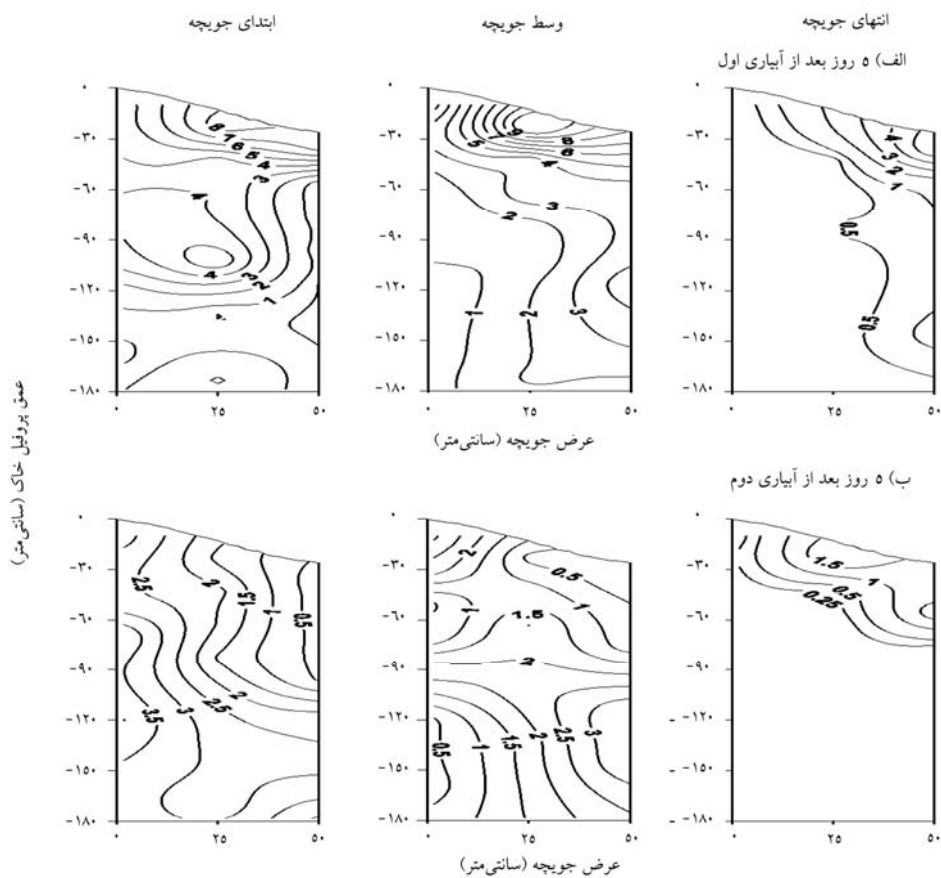
بارندگی به مقدار ۱۸ میلی‌متر ۳/۵ روز بعد از آبیاری دوم (۱/۵ روز قبل از نمونه‌برداری) باعث شستشوی بیش‌تر و یکنواخت‌تر شدن توزیع بروماید در پروفیل خاک گردید. مقدار آب‌شویی در بخش‌های ورودی و میانی جویچه‌ها دارای شدت بیش‌تری بود. در حالی‌که یکنواختی توزیع در خروجی کم و بیش مشابه آبیاری اول بود (شکل ۸-ب). بیش‌ترین غلظت بروماید از ۹ میلی‌گرم بر لیتر در آبیاری اول به حدود ۳/۵ میلی‌گرم بر لیتر بعد از آبیاری دوم کاهش یافت. علت این امر نیز در انتشار توده‌ای یا احتمالاً پخشیدگی املاح می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در قسمت‌های ورودی و میانی جویچه انتقال املاح به اعماق بیش‌تر است. در حالی‌که در قسمت‌های انتهایی جویچه بروماید حداکثر تا عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک انتقال یافته است.

توزیع بروماید در جویچه‌های انتها بسته (شکل ۹) به‌استثنای آزمایش تزریق بروماید در تمام مدت آبیاری (T) کم و بیش مشابه آزمایش FD، یکنواخت نبودن توزیع در ایستگاه‌های خروجی و یکنواختی توزیع بهتر در قسمت‌های ابتدایی و میانی جویچه را نشان می‌دهد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود در آزمایش SH (شکل ۹-ج) به‌دلیل ضریب زبری و نفوذپذیری بیش‌تر، آب هرگز به انتهای مزرعه نرسید. شباهت توزیع بروماید اندازه‌گیری شده در ایستگاه میانی با ایستگاه خروجی در آزمایش T (شکل ۹-الف) به‌دلیل این‌که عمق جریان و زمان کاربرد بروماید در قسمت میانی بیش‌تر به قسمت ورودی جویچه شبیه است (نسبت به قسمت خروجی) کمی غیرمنتظره می‌باشد. در این زمینه هم به‌نظر می‌رسد که تغییرپذیری مکانی خصوصیات هیدرولیکی و ویژگی‌های انتقال املاح خاک نقش داشته باشند. عمق جریان ۹/۶، ۶/۷ و ۶/۲ سانتی‌متر و زمان کاربرد کود ۱۸۴، ۱۵۵ و ۷۵ دقیقه به‌ترتیب برای ایستگاه‌های ورودی، میانی و خروجی آزمایش T اندازه‌گیری شد.

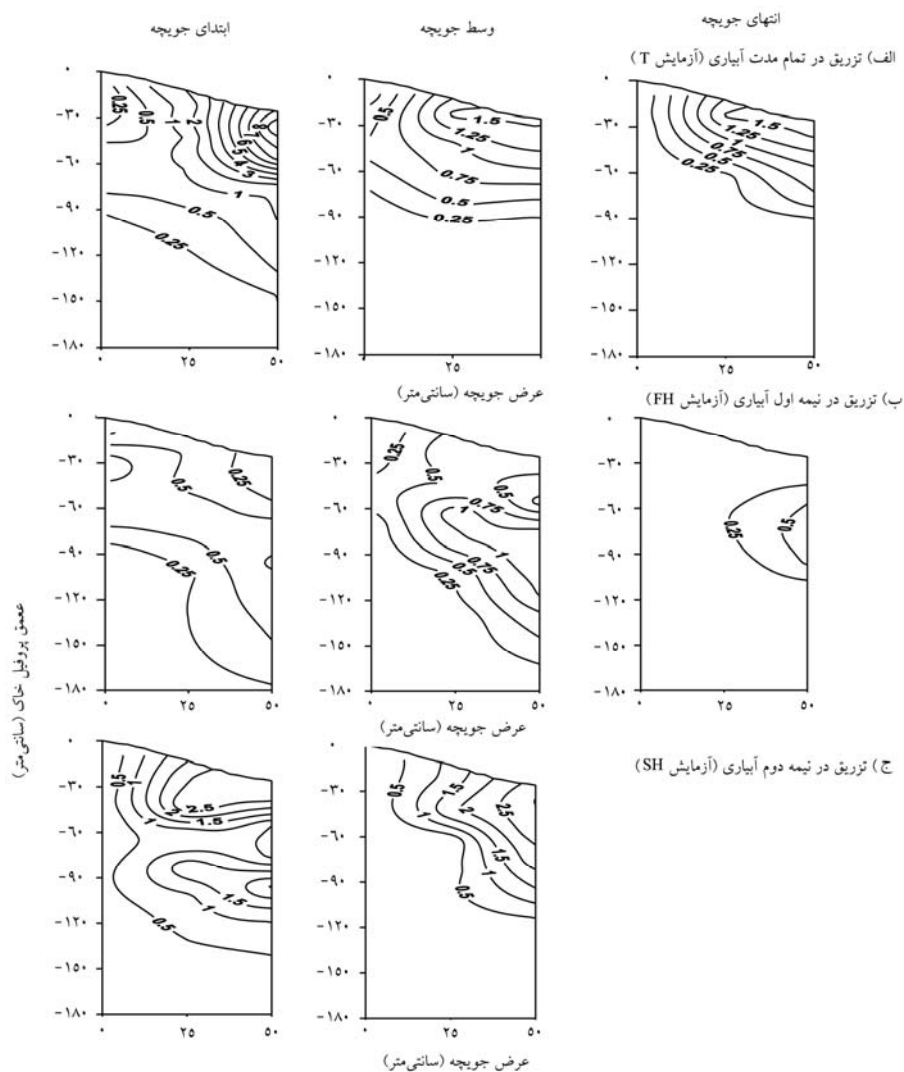
به‌منظور مقایسه کمی تأثیر سناریوهای مختلف، راندمان کاربرد املاح برای هر یک تعیین شد. راندمان کاربرد املاح برای آزمایش‌های FD، T، SH و FH به‌ترتیب ۴۹/۸، ۱۰۰، ۶۴ و ۹۲/۷ درصد محاسبه گردید. بخشی از کاهش راندمان در آزمایش FD به‌خاطر تلفات کود به‌واسطه نفوذ عمقی و بخشی هم به‌دلیل تلفات بروماید از طریق رواناب سطحی از انتهای مزرعه می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که راندمان کاربرد بروماید در جویچه‌های انتها بسته بیش‌تر از جویچه‌های انتها باز است. در جویچه‌های انتها بسته، تزریق در نیمه اول آبیاری دارای بیش‌ترین تلفات بروماید از طریق نفوذ عمقی و کم‌ترین راندمان کاربرد کود اتفاق افتاد. یکنواختی توزیع نیمه پایین برای آزمایش‌های FD، T، SH و FH به‌ترتیب ۷۲، ۸۸، ۶۲ و ۷۴ درصد محاسبه شد. یکنواختی توزیع به‌نسبت بالای بروماید (به‌ویژه در آزمایش FD) در صورت لزوم به معنای راندمان کاربرد املاح بالا نیست. زیرا بخشی از املاح به همراه آب آبیاری از طریق آب‌شویی یا رواناب سطحی از منطقه توسعه ریشه‌ها خارج و تلف می‌شود. عباسی و همکاران (۲۰۰۹) یکنواختی توزیع نیمه پایین کود در کودآبیاری جویچه‌ای را در یک خاک لومی بدون پوشش زراعی بین ۹۵/۹-۸۶/۶ گزارش نمودند که اندکی بیش‌تر از نتایج این پژوهش می‌باشد. دلیل اصلی بالا بودن یکنواختی توزیع کود در آن آزمایش‌ها در مقایسه با آزمایش‌های این پژوهش آن است که در این پژوهش کود در آبیاری اول تزریق شد. ولی در آزمایش‌های عباسی و همکاران (۲۰۰۹) کود در آبیاری دوم تزریق گردید. بالا بودن ضریب زبری مانینگ و نفوذپذیری خاک در آبیاری اول موجب کاهش یکنواختی توزیع آب و به‌تبع کود می‌شود.



شکل ۷- توزیع رطوبت (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب) ۵ روز بعد از آبیاری اول در جویچه‌های انتها بسته در آزمایش الف (T، ب) FH و ج) SH.



شکل ۸- غلظت بروماید اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف آزمایش FD در جویچه‌های بلند (الف) ۵ روز بعد از آبیاری اول، (ب) ۵ روز بعد از آبیاری دوم.



شکل ۹- توزیع غلظت بروماید در ایستگاه‌های مختلف جویچه‌های بلند انتها بسته الف) تزریق در تمام مدت آبیاری (آزمایش T)، ب) تزریق در نیمه اول آبیاری (آزمایش FH) و ج) تزریق در نیمه دوم آبیاری (آزمایش SH).

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که در همه آزمایش‌ها بین مقدار تجمع آب و جرم بروماید نفوذیافته در خاک و عمق جریان آب رابطه مثبت وجود دارد. عمق آب بیشتر، به زمان کم‌تری برای نفوذ مقدار معینی آب (یا املاح) نیاز داشت. نتایج همچنین نشان داد آبیاری با عمق آب

بیش‌تر و زمان کاربرد کم‌تر منجر به افزایش یکنواختی توزیع آب و املاح در پروفیل خاک و تلفات نفوذ عمقی آب و کود کم‌تر در مقایسه با آبیاری با عمق آب کم‌تر و زمان کاربرد بیش‌تر می‌شود. آبیاری با عمق آب کم و متوسط و زمان کاربرد به‌نسبت کوتاه نمی‌تواند مقدار رطوبت مورد نیاز تمام ناحیه ریشه و لایه‌های سطحی را تامین کند. اگرچه آبیاری با عمق آب کم و متوسط با زمان کاربرد زیاد، توزیع آب و املاح بهتری را در پروفیل خاک به همراه دارد. ولی تلفات آب و املاح از طریق نفوذ عمقی در این حالت افزایش می‌یابد. برای مثال آبیاری با عمق جریان ۱۴ سانتی‌متر و زمان ۹۰ دقیقه در جویچه‌های کوتاه مقدار آب کافی برای تامین رطوبت با توزیع تقریباً یکنواخت در ناحیه ریشه و پشته‌های جویچه را به همراه دارد. از منظر مدیریت آبیاری در جویچه‌های انتها بسته، به‌منظور افزایش یکنواختی توزیع، استفاده از عمق جریان بیش‌تر با زمان آبیاری کم‌تر توصیه می‌شود. در حالی‌که عمق جریان کم و زمان آبیاری بیش‌تر به‌دلیل تجمع کم‌تر املاح در بالای پشته‌ها برای استفاده از آب‌های با کیفیت کم توصیه می‌گردد. همچنین، آبیاری با عمق آب کم، زمان کاربرد آب زیاد و مدت زمان تزریق کود می‌تواند یک روش مدیریتی کاربردی برای این حالت باشد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که عمق آب و مدت زمان کاربرد آب و املاح نقش اساسی در توزیع آب و املاح دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که یکنواختی توزیع آب و املاح به عمق جریان آب و مدت زمان کاربرد آب و کود بستگی دارد. توزیع املاح در طول جویچه‌ها و در ایستگاه‌های مختلف تقریباً غیریکنواخت بود. توزیع املاح در نیمه اول طول جویچه‌ها بسیار یکنواخت‌تر از نیمه دوم جویچه‌ها بوده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که تلفات آب و املاح از طریق نفوذ عمقی به عمق جریان، فرصت نفوذ، مدت زمان تزریق املاح و طول جویچه‌ها بستگی دارد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، عمق جریان آب و مدت زمان کاربرد آب و املاح در توزیع یکنواختی آب و املاح در خاک نقش مهمی دارد. به‌طوری‌که تغییرات اندک در عمق جریان آب باعث تغییر به نسبت بیش‌تری در یکنواختی توزیع آب و املاح در خاک می‌شود.

منابع

1. Abbasi, F. 2003. Field-scale analyses of water flow and solute transport in furrows. Ph.D. Thesis, No. 555, K.U. Leuven, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Leuven, Belgium.
2. Abbasi, F., Feyen, J. and Van Genuchten, M.Th. 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. J. Hydro. 290: 1-2. 63-79.

3. Abbasi, F., Liaghat, A.M. and Ganjeh, A. 2009. Evaluation of fertigation uniformity in furrow irrigation. *Iranian J. Agric. Sci.* 39: 1. 117-129.
4. Bar-Yosef, B. and Bar-Tal, A. 1995. Principles of fertigation. In: Cohen, Y. (Ed.), *Summary of Lecture Notes on Irrigation Science and Greenhouse*
5. Beven, K.J. and Germann, P.F. 1982. Macropores and water flow in soils, *Water Resour. Res.* 18: 1311-1325.
6. Biggar, J.W. and Nielsen D.R. 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. *Water Resour. Res.* 12: 78-94.
7. Bowman, R.S. and Rice, R.C. 1986. Transport of conservative tracers in the field under intermittent flood irrigation. *Water Resources Research*, 22: 11. 1531-1536.
8. Bresler, E., Dagan, G., Wagenet, R.J. and Laufer, A. 1984. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 16-25.
9. Crevoisier, D., Popova, Z., Mailhol, J.C. and Ruelle, P. 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agric. Water Manage.* 95: 354-366.
10. Fangmeier, D.D. and Ramsey, K.K. 1978. Intake characteristics of irrigation furrows. *Trans. ASAE*, 21: 696-700.
11. Flury, M., Fluhler, H., Jury, W.A. and Leuenberger, J. 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research*, 30: 7. 1945-1954.
12. Forrer, I., Kasteel, R., Flury, M. and Fluhler, H. 1999. Longitudinal and lateral dispersion in an unsaturated field soil. *Water Resources Research*, 35: 10. 3049-3060.
13. Ghodrati, M. and Jury, W.A. 1990. A field study using dyes to characterize preferential flow of water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 6. 1558-1563.
14. Golden Software. 1999. *Surfer Version 7.0: Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers*. Golden Software, Colo., USA.
15. Jacques, D. 2000. Analysis of water flow and solute transport at the field scale. Ph.D. Diss. No. 454. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, Fac. Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen.
16. Jaynes, D.B., Bowman, R.S. and Rice, R.C. 1988. Transport of a conservative tracer in the field under continuous flood irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 3. 618-624.
17. Mailhol, J.C., Crevoisier, D. and Triki, K. 2007. Impact of water application conditions on nitrogen leaching under furrow irrigation: experimental and modeling approaches. *Agric. Water Manage.* 87: 275-284.
18. Mailhol, J.C., Ruelle, P. and Nemeth, I. 2001. Impact of fertilization practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrig. Sci.* 20: 139-147.
19. Mori, Y. and Higashi, N. 2009. Controlling solute transport processes in soils by using dual-porosity characteristics of natural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1418-1427.

20. Pang, X.P. and Letey, J. 1998. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water, salinity, and nitrogen model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1418-1427.
21. Parlange, J.Y. 1972. Theory of water movement in soils. 6: Effect of water depth over soil. *Soil Sci.* 113: 5. 308-312.
22. Philip, J.R. 1958. The theory of infiltration: 6. Effect of water depth over soil. *Soil Sci.* 85: 278-286.
23. Playan, E. and Faci, J.M. 1997. Border irrigation: field experiment and a simple model. *Irrig. Sci.* 17: 163-171.
24. Popova, Z., Varlev, I., Kutev, V. and Shopova, D. 2000. Lysimeter study on ground water degradation due to different fertilisation and irrigation management. In: *Proceeding of ICID-ICWRM in the 21st Century, Budapest, Hungary, 1-2 June 2000*, Pp: 177-181.
25. Russo, D., Zaidel, J. and Laufer, A. 1994. Stochastic analysis of solute transport in partially saturated heterogeneous soil: I. Numerical experiments. *Water Resources Research*, 30: 3. 769-779.
26. Souza, F. 1981. Non linear hydrodynamic model of furrow irrigation. Ph.D. Thesis, University of California, Davis, CA.
27. Steenhuis, T.S. and Muck, R.E. 1988. Preferred movement of nonadsorbed chemicals on wet, shallow, sloping soils. *J. Environ. Quality*, 17: 3. 376-384.
28. Troiano, J., Garretson, C., Krauter, C., Brownell, J. and Hutson, J. 1993. Influence of amount and method of irrigation water application on leaching of atrazine. *J. Environ. Quality*, 22: 2. 290-298.
29. Van Weesenbeeck, I.J. and Kachanoski, R.G. 1994. Effect of variable horizon thickness on solute transport. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 5. 1307-1316.
30. Vanderborght, J., Gonzalez, C., Vanclooster, M., Mallants, D. and Feyen, J. 1997. Effects of soil type and water flux on solute transport. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 2. 372-389.
31. Vanderborght, J., Vanclooster, M., Timmerman, A., Seuntjens, P., Mallants, D., Kim, D.J., Jacque, D.S., Hubrechts, L., Gonzalez, C., Feyen, J., Diels, J. and Deckers, J. 2001. Overview of inert tracer experiments in key Belgian soil types: Relation between transport and soil morphological and hydraulic properties. *Water Resources Research*, 37: 12. 2873-2888.
32. Wallach, R., Israeli, M. and Zaslavsky, D. 1991. Small perturbation solution for steady non-uniform infiltration into soil surface of a general shape. *Water Resources Research*, 27: 7. 1665-1670.
33. Wallender, W.W. and Rayej, M. 1990. Shooting method for Saint Venant equations of furrow irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 116: 1. 114-122.
34. Wildenschild, D., Hopmans, J.W. and Simunek, J. 2001. Flow rate dependence of soil hydraulic characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1. 35-48.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 17(4), 2011
www.gau.ac.ir/journals

Effects of flow depth on distribution uniformity of water and bromide in a sandy loam soil in furrow irrigation

***F. Abbasi¹ and H.A. Alizadeh²**

¹Associate Prof., Research Institute of Agricultural Engineering, Karaj,

²M.Sc. Student, Dept. of Irrigation and Drainage, University of Tehran

Received: 2009/08/29; Accepted: 2010/10/06

Abstract

In this study, the effect of flow depth on water content and solute distribution was assessed in furrow irrigation. Two series of field experiments including small and large scale furrow experiments were conducted. In large scale, four experiments were carried out. One experiment was conducted under free-draining (FD) conditions in which bromide was applied during the entire irrigation event and three experiments were carried out in blocked-end furrows in which bromide was injected either during the entire irrigation event (100%), the first half of the irrigation (FH), and the second half of the irrigation (SH) event. In small scale, five field experiments were conducted on short blocked-end furrows. Three experiments were carried out, each with the same duration but with different amounts of water and solutes resulting from 6, 10, and 14 cm furrow water depths. Two more experiments were performed with the same amounts of applied water and solute and, consequently, different durations, on furrows with depths of 6 and 10 cm of water. Soil water contents at different times and locations in furrow cross-section were measured with neutron probe tubes and TDR. Soil samples for bromide analysis and gravimetric soil water contents from all the experiments were collected at different depths up to 1.80 m, 5 days after the irrigation at three locations near the inlet, in the middle, and close to the outlet of the experimental furrows. Results in large scale experiments showed substantial non-uniformity in solute distribution along the monitored furrows, with the degree of non-uniformity depending upon flow depth and solute application time. The effects of flow depth and irrigation/bromide application time on soil water contents were more pronounced in the soil surface layers and were found to be relatively minor at deeper depths. Water and solute deep percolation rates also showed dependency to flow depth and solute application/opportunity time and gradually decreased along the furrows. In small scale experiments, results showed that both the water level and the duration played an important role in distributing water and solutes in the soil profile. A positive correlation was found between water level and infiltrated amount of water or solute. Irrigation with the 14 cm water level and short application time improved the distribution of water and solutes within the soil profiles, while also causing relatively less deep percolation of water and solutes as compared to low and moderate water levels and relatively long duration times.

Keywords: Furrow irrigation, Water depth, Water and bromide distribution

* Corresponding Author; Email: abbasi_friborz@yahoo.com