تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی/جلد ۲۲/ شماره ۸۰/زمستان ۱۴۰۰/ص ٦٦-٥١
سایت مجله: https://www.amsr.areeo.ac.ir

مقاله علمی– پژوهشی

بررسی الگوی پخش مایع در تزریق محلول‌های کودی در زیر خاک و تأثیر عملیات هوادهی بر آن

اورنگ تاکی*

دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۴

چکیده

یکی از روش‌های کوددهی، تزریق محلول‌های کودی در خاک اطراف ریشهٔ درختان است که می‌تواند پس از هوادهی در خاک یا به طور مستقیم (بدون هوادهی) اجرا شود. در این تحقیق به بررسی الگوی پخش شدن مایع در خاک در دو حالت تزریق مستقیم مایع و تزریق آن پس از هوادهی در دو خاک خیس و خشک پرداخته شده است. در روش "تزریق مایع پس از هوادهی"، ابتدا هوای تحت فشار به مدت سه ثانیه از طریق نازل دستگاه در عمق ۵۰ سانتی‌متری تزریق و پس از آن مایع به مقدار مشخص در همان نقطه تزریق شد. اما در تیمار "تزریق مستقیم" فقط مایع تنها، بدون تزریق هوای فشرده، وارد خاک می‌شود. مایع انتخاب شده برای اجرای این آزمایش‌ها از ترکیب رنگ‌های معدنی انحلال‌پذیر در آب با رنگ متضاد با خاک به دست آمد. با کندن خاک اطراف محل تزریق و ردیابی ذرات رنگی، مساحت محدوده پخشیدگی مایع در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری و مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که در خاک خیس میزان پخشیدگی افقی مایع به طور معنی‌داری بیشتر است تا در خاک خشک، ولی اختلاف معنی‌داری بین دو روش "تزریق مستقیم مایع" و "تزریق بعد از هوادهی" مشاهده نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی

کوددهی عمیق، تزریق محلول در خاک، تزریق هوا در خاک

مقدمه

در باغبانی و نگهداری از فضای سبز تزریق گاز، تزریق مایع یا هردو به داخل خاک با هدف‌های مختلفی صورت می‌گیرد، مانند هوادهی و کاهش فشردگی خاک در اطراف ریشهٔ درختان، کوددهی درختان با محلول‌های شیمیایی مختلف و به کارگیری سموم دفع آفات خاکزی یا بیماری‌های ریشه. استفاده از دستگاه‌های تزریق در ابتدا در مناطق شهری و عرصه‌های فضای سبز به دلیل کافی نبودن فضا برای حرکت ادوات مورد نیاز برای زیر و رو کردن خاک پیشنهاد شد و پس از آن به عنوان راه‌حلی برای اصلاح خاک فشردهٔ اطراف درختان و بهبود نفوذپذیری آب و هوا به خاک مورد توجه قرار گرفت (Day & Bassuk, 1994).

در موارد بسیاری معابر و پیاده‌روها تا حدی به تنهٔ اصلی درختان نزدیک‌اند که اجرای هر گونه عملیات مکانیکی روی خاک را ناممکن می‌سازد. به همین منظور، استفاده از روش تزریق هوای فشرده برای کاهش فشردگی خاک موضوع تحقیق بسیاری از محققان بوده است.

*نگارنده مسئول: Email: orangtaki@yahoo.com
http://doi: 10.22092/AMSR.2021.354736.1385

به غیر از هوادهی، تزریق محلول در خاک به تنهایی کاربردهای مختلفی دارد. از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: دشوار بودن حرکت عناصر در خاک، از بین رفتن اثربخشی عناصر وقتی در معرض هوا و نور خورشید قرار می‌گیرند، یا حساس بودن توزیع دقیق محلول‌های گران‌قیمت در منطقه موثر فعالیت ریشه. این عمل می‌تواند با استفاده از پمپ‌های فشار قوی مایع و بدون استفاده از فشار هوا برای شکستن خاک صورت پذیرد. در این حالت، سامانهٔ تولید هوای فشرده می‌تواند تنها برای راه‌اندازی چکش نیوماتیکی برای کوبیدن نازل در خاک به کار گرفته شود یا به طور کلی حذف گردد.

ثمر و همکاران (Samar *et al.*, 2015) در تحقیقی در منطقهٔ شهریار، سولفات آهن را به همراه مادهٔ آلی و اسید سولفوریک در منطقهٔ فعالیت ریشه تزریق و اثرهای آن را در رفع زردی برگ‌ها، در مقایسه با افزودن کلات آهن به همراه آب آبیاری، ماندگارتر گزارش کردند. از آنجایی‌که یکی از ویژگی‌های ترکیبات معدنی آهن‌دار، بی‌تحرکی آنها در ستون خاک است، افزودن محلول این مواد در سطح خاک، منجر به انتقال آن همراه با آب نافذ نمی‌شود و بدین لحاظ اثر قرار دادن محلول در عمق فعالیت ریشه نتایج ماندگارتری به همراه داشته است.

در تحقیقی دیگر روی درختان افرای قرمز در آمریکا، گاز نیتروژن با فشار زیاد (۸۳ بار) با دستگاهی با نام تجاری تراونت[1] از طریق نازلی که در طول شکاف‌دار شده بود، وارد خاک‌های فشردهٔ اطراف درختان شد. پس از آن یک محلول کودی شامل تعداد زیادی عناصر مغذی از طریق نازل با فشار ۱۰ بار به شکاف‌های ایجاد شده توسط گاز فشرده وارد گردید. تزریق گاز نیتروژن و تزریق محلول هر یک به تنهایی نیز به عنوان یک تیمار اعمال و اثر هر یک از تیمارها با درختان شاهد از نظر توانایی افزایش طول ریشه های مویین مقایسه شدند. درختان انتخاب شده ۲۵ تا ۳۰ ساله بودند و اطراف همهٔ آنها به قطر ۳/۷ متر با مالچ پوشش یافته بود. از ریشه‌ها پس از هفت هفته با استوانه‌های فلزی نمونه‌برداری شد و پس از جداسازی از خاک به صورت محلول در آب در داخل سینی‌های شفاف قرار گرفتند و توسط یک اسکنر طول و سطح ریشه‌های کمتر از ۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تزریق گاز به تنهایی هیچ تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده ریشه ندارد. اما استفاده از محلول کودی تأثیر کوچکی (معنی‌دار) بر کاهش قطر ریشه‌ها، وزن ریشه در واحد حجم و مساحت ریشه در واحد حجم خاک گذاشته است (Hascher & Wells, 2007).

بی‌تأثیر بودن تزریق گاز یا هوا بر فشردگی خاک در تحقیقات دیگر محققان نیز آمده است. در تحقیقی برای بررسی چگونگی شکست خاک در اثر تزریق گاز، پس از تزریق گاز نیتروژن با فشار ۵۰ بار در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک، یک محلول رنگی از همان نازل به داخل خاک تزریق شد و با حفر پروفیل‌های طولی و عرضی الگوی شکست‌های ایجاد شده در خاک به دست آمد. در این تحقیق مشخص شد که شکست‌ها بیشتر در عمق ۲۳ تا ۲۵ سانتی‌متری و به صورت افقی یا محدب (از عمق تا سطح خاک) اتفاق می‌افتد و اثر معنی‌داری بر ساختمان خاک و وزن مخصوص ظاهری آن نمی‌گذارد. اندازهٔ شکست‌های ایجاد شدهٔ افقی در دو سایت متفاوت (از نظر فشردگی) ۵۶ و ۳۹ سانتی‌متر گزارش شد (Smiley, 2001).

1- Travent

اسمایلی (Smiley, 1994) در گزارشی دیگر چنین می‌گوید: تزریق هوا در خاک در بعضی موارد منجر به بهبود خواص فیزیکی خاک می‌شود، اما این امر به شدت وابسته به نوع خاک و شرایط آن است؛ به علاوه هیچ تأثیر معنی‌داری در اثر تزریق هوا در خاک در قطر تنه چهار گونه از درختان مشاهده نشده است. نداشتن اختلاف آماری معنی‌دار در رشد جوانه، ارتفاع درخت و وزن خشک اندام هواییپنج گونه درخت دیگر نیز گزارش شده است (Rolf, 1994).

نتایج مشابهی نیز در بخش کشاورزی و در خاک‌های زراعی مبنی بر از بین رفتن اثرهای زیرشکنی پس از دو سال در اثر خاک‌ورزی متداول گزارش شده است که اقتصادی بودن این عملیات را با توجه به هزینهٔ زیاد آن با چالش مواجه ساخته است (Bishop & Grime, 1978).

روش دیگری که برای تزریق محلول در خاک به کار گرفته شده تزریق از سطح است. در این روش از یک واترجت برای تزریق محلول در خاک استفاده شده است. استفاده از واترجت که برای سوراخ‌کاری و برش مواد مختلف اعم از فلزات، شیشه و سنگ بسیار رایج است؛ بر مبنای خروج مایع از روزنه‌ای کوچک با سرعت بسیار زیاد (دو تا سه برابر سرعت صوت) تحت فشارهای بسیار بالا (۳۵۰۰ تا ۷۰۰۰ بار). در این روش سطح مورد برخورد در معرض فرسایش نقطه‌ای قرار می‌گیرد و با توجه به سرعت زیاد سیال برش با سرعت قابل قبولی صورت می‌گیرد. در آزمایشی در انستیتوی تحقیقات ماشین‌های کشاورزی و هیدرولیک برونزویک آلمان، آب با یک پمپ فشار قوی از روزنهٔ یک نازل خارج و با توجه به انرژی زیاد ذخیره شده در آن به سطح خاک نفوذ می‌کند. در این آزمایش، نازل با سرعت ۲ متر در ثانیه در سطح خاک‌هایی با بافت مختلف حرکت داده شد و میزان نفوذ محلول به داخل خاک در فشارهای مختلف آب بین ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ بار اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش میزان خروج محلول با افزایش فشار مایع افزایش می‌یابد و برای مثال در فشار ۴۰۰ بار هفت و نیم لیتر در دقیقه بوده است. نتایج این آزمایش نشان داد که با افزایش فشار تا ۱۲۰۰ بار عمق نفوذ آب به ۱۶ سانتی‌متر در خاک شنی و به ۱۴ سانتی‌متر در خاک رسی می‌رسد. با توجه به سرعت اشاره شده برای نازل می‌توان دریافت که مایع تا این اعماق در کسری از ثانیه برای هر نقطه (۰/۰۰۰۵ ثانیه برای هر میلی‌متر برش و نفوذ در خاک) نفوذ یافته است و در صورت تمرکز بر یک نقطه می‌توان به عمق‌های بیشتری دست یافت. البته با تمرکز نازل در یک نقطه و جمع شدن محلول در حفره، انرژی جریان آب در اثر عبور از حجم آب جمع شده در گودال تحلیل می‌رود و عمق نفوذ از حد مشخصی تجاوز نمی‌کند. این آزمایش نشان می‌دهد که خاک‌های سنگین‌تر با داشتن ساختمانی منسجم‌تر انرژی بیشتری برای نفوذ در خاک نیاز دارند تا خاک‌های سبک‌تر. تکرار این آزمایش با فشار ثابت پمپ در خاکی مشخص ولی در رطوبت‌های مختلف نیز نشان داد که با افزایش رطوبت خاک، عمق نفوذ مایع با شیب زیادی افزایش می‌یابد و علت این امر کاهش مقاومت برشی خاک در رطوبت‌های بالا گزارش شده است. مشاهدات محققان در بررسی خاک بعد از عبور واترجت نشان داده که جریان آب ایجاد شده از شکاف نازکی وارد خاک می‌شود ولی با افزایش عمق نفوذ عرض شکاف بازتر می‌شود و در انتهای مسیر حجم نسبتا بزرگی از مایع جمع می‌گردد. این اتفاق در اثر اصطکاک جریان آب با دیوارهٔ شکاف و

همچنین باز شدن مخروط جریان خارج شده از نازل اتفاق می‌افتد و در نهایت انرژی جریان با برخورد به توده آب جمع شده در کف شیار تحلیل می‌رود (Niemoller *et al.*, 2011).

در این تحقیق به بررسی چگونگی توزیع مایع در زیر خاک و تأثیر تزریق هوای فشرده در خاک پیش از تزریق پرداخته شده است. ارائهٔ روشی عملی و قابل اجرا برای تزریق می‌تواند نقش بسزایی در کاهش مصرف کود و آلودگی‌های متعاقب آن و افزایش کارایی کود و عملکرد درختان داشته باشد.

مواد و روش‌ها

الگوی پخش شدن مایع تحت فشار از روزنه‌ای در زیر خاک تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله ویژگی‌های فیزیکی خاک، رطوبت خاک، فشار و دبی مایع، ویسکوزیته مایع و مقدار مایع است. اما با فرض یکسان بودن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مایع و خاک، برای تعیین اثر دو عامل رطوبت خاک و هوادهی قبل از تزریق بر چگونگی پخش شدن محلول در زیر خاک، آزمایشی در یک مزرعه با خاک رسی (بدون پوشش گیاهی) اجرا شد. این آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده (اسپلیت پلات) بر پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار صورت گرفت که در آن رطوبت خاک (در دو سطح) به عنوان فاکتور اصلی و روش‌های تزریق (دو سطح) به عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. رطوبت‌های مورد مقایسه به عنوان فاکتور اصلی شامل رطوبت ۵ تا ۶ درصد (خاک خشک) و ۱۶ تا ۱۷درصد (خاک خیس) بر پایهٔ وزن خشک بود که بر اساس رطوبت طبیعی خاک خشک در زمان اعمال تیمارها (اوایل پاییز) و رطوبت خاک در روز پنجم پس از آبیاری (پس از خشک شدن سطح خاک تا حدی که امکان حرکت کارگر در زمین فراهم باشد) در نظر گرفته شد. این مقادیر بر طبق اندازه‌گیری رطوبت بر پایهٔ خشک در عمق ۵۰ سانتی‌متری ارائه شده است. روش‌های مختلف تزریق به عنوان فاکتور فرعی شامل تزریق مستقیم مایع و تزریق مایع پس از هوادهی بودند. مشخصات خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات خاک محل آزمایش

Table 1- Soil characteristics of experiment site

بافت خاک Soil texture	رس (درصد) Clay (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	شن (درصد) Sand (%)	ظرفیت مزرعه (درصد) Field capacity (%)	حد انقباض (درصد) Shrinkage limit (%)	حد خمیری (درصد) Plastic limit (%)	حد روانی (درصد) Liquid limit (%)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب) Bulk density (gr/cm^3)	ماده آلی (درصد) Organic matter (%)
رسی سیلتی	48	42	10	18	10.5	18.8	36	1.41	<1%

برای اعمال تیمارهای رطوبت پس از انتخاب زمین و پیاده کردن نقشهٔ آزمایش، یکی از دو کرت اصلی در هر بلوک (که به خاک مرطوب اختصاص داده شده بود)، آبیاری و در روز پنجم بعد از آبیاری، تیمارهای تزریق در آن اعمال شد. در این زمان تیمارهای تزریق مربوط به خاک خشک نیز در کرت‌های آبیاری نشده اعمال شد. برای این کار، هر کرت اصلی به طول ۵ متر به دو کرت فرعی تقسیم و

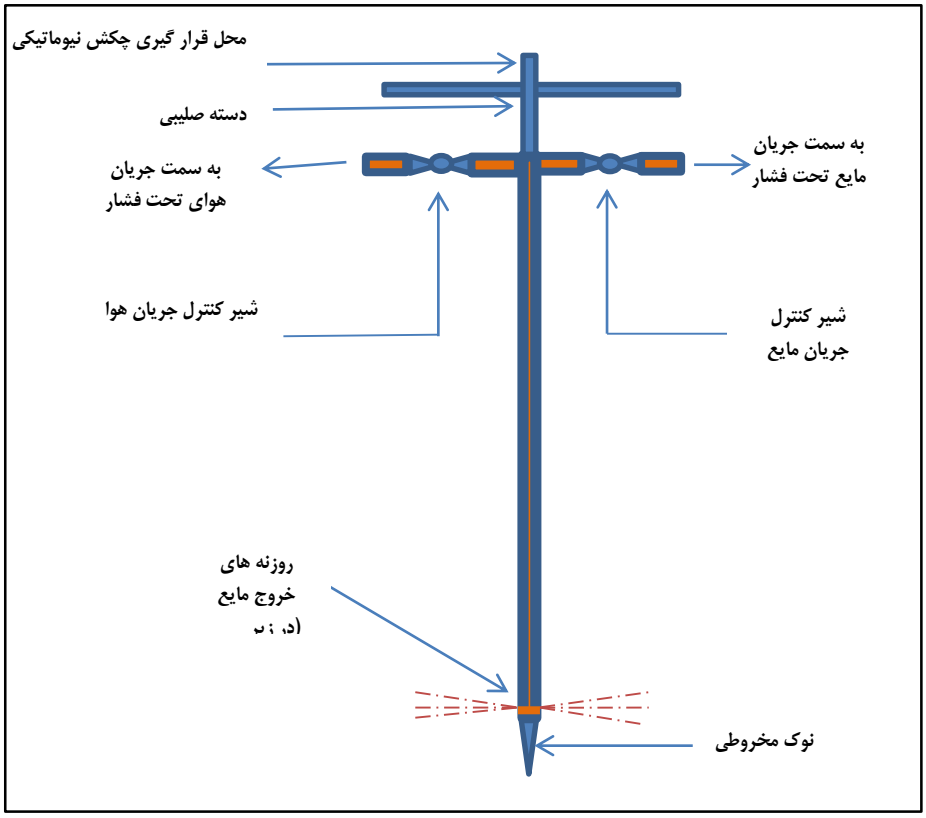
هر کرت فرعی به صورت تصادفی به یکی از روش‌های تزریق اختصاص داده شد. هر تیمار تزریق به تعداد یک مشاهده در میانه هر کرت اجرا شد تا فضای کافی برای بررسی پخشیدگی مایع در زیر خاک وجود داشته باشد.

شکل ۱، دستگاه مورد استفاده برای تزریق را نشان می‌دهد که از تلفیق دو سامانهٔ مجزا برای تولید هوای فشرده و تولید مایع تحت فشار ساخته شده است. این سامانه‌ها روی یک شاسی سوار می‌شوند و توان مورد نیاز خود را از محور توانده‌ی تراکتور می‌گیرند. وجود یک موتور مستقل روی این دستگاه امکان راه‌اندازی سامانه‌ها را بدون نیاز به تراکتور هم فراهم کرده است. (این موتور هنگام استفاده از ماشین در فضای سبز شهری و حمل و نقل با خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد).

سامانهٔ تولید هوای فشرده از یک کمپرسور پیستونی، دو مخزن هوای فشرده و شیرهای ایمنی و کنترل جریان تشکیل شده است که قابلیت ایجاد فشار تا ۱۶ بار را داراست. سامانهٔ تأمین مایع تحت فشار نیز ساختمانی مشابه سمپاش‌های متداول تراکتوری دارد که از یک مخزن، یک پمپ پیستونی، فشارشکن و شیر کنترل جریان تشکیل شده و می‌تواند فشار را تا ۴۰ بار تأمین کند. نازل این دستگاه از یک لولهٔ فولادی به طول ۷۰۰ میلی‌متر با قطر خارجی ۲۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است که یک نوک مخروطی در انتهای آن جوش داده شده است (شکل ۲). در بالای لولهٔ نازل مقری برای نصب چکش نیوماتیکی و یک دسته افقی برای جابه‌جایی و بالا کشیدن نازل از خاک تعبیه شده است. نازل از طریق یک سه راهه به دو شیلنگ مجزا برای ورود مایع و هوای فشرده متصل شده و دو شیر فشار قوی در طرفین سه راهه برای قطع و وصل جریان هوا و مایع در نظر گرفته شده است. برای به حرکت درآوردن چکش نیوماتیک نیز یک جریان مجزا از شیلنگ اصلی انتقال هوا منشعب شده است (شکل ۳).

شکل ۱- دستگاه تزریق پشت تراکتوری مورد استفاده در آزمایش

Fig. 1- Tractor mounted soil injection machine used in experiment



شکل ۲- شماتیک نازل تزریق هوای فشرده و مایع

Fig. 2- Schematic of injection probe for compressed air and liquid

شکل ۳- نمونه نازل ساخته شده متصل به لوله‌های انتقال مایع و هوای فشرده و مجهز به چکش نیوماتیکی

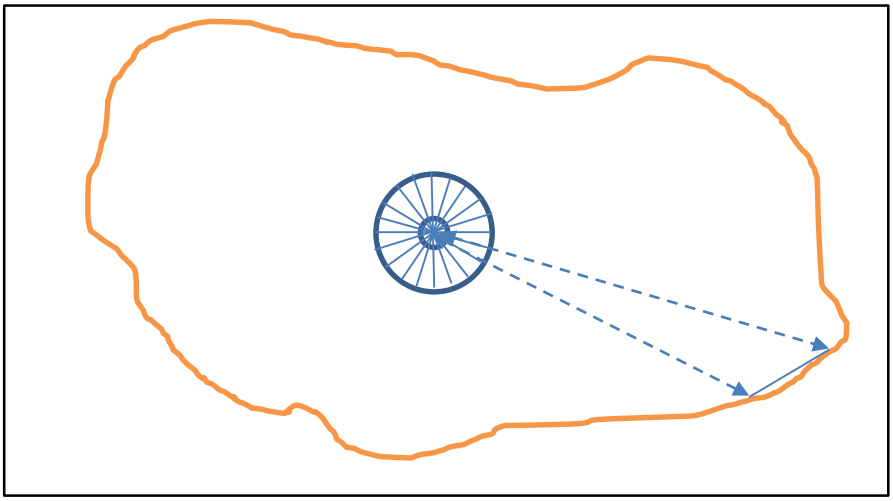
Fig. 3- Prototype of injection probe connected to air and liquid hoses and equipped with pneumatic hammer

در اطراف لولهٔ نازل نیز یک صفحهٔ مدور به قطر ۱۵ سانتی‌متر تعبیه شده است که به صورت کشویی در اطراف لوله حرکت می‌کند تا از پرتاب احتمالی ذرات خاک و مایع به سر و صورت کاربر جلوگیری کند. در انتهای لوله دو سوراخ به قطر ۳ میلی‌متر در جهت عمود بر محور لوله، امکان خروج سیال را به صورت افقی در دو طرف نازل فراهم می‌سازد.

درهر تیمار، نازل تا عمق ۵۰ سانتی‌متری با چکش نیوماتیکی در خاک کوبیده شد. در تیمارهای هوادهی پس از رسیدن فشار هوا به میزان حداکثر (۱۶ بار) شیر هوا به مدت سه ثانیه باز و بسته و پس از آن شیر مایع برای مدت ۹ ثانیه برای تزریق ۳ لیتر محلول در زیر خاک باز شد. در تیمارهای تزریق مستقیم، پس از کوبیدن نازل در خاک فقط شیر مایع برای زمان تعیین شده باز شد. زمان لازم برای خروج ۳ لیتر مایع از هر یک از نازل‌ها پیش از آزمایش با استفاده از ظرف‌های مدرج و کرنومتر اندازه‌گیری شد. برای انتخاب این مقدار در یک سری آزمایش‌های مقدماتی در شرایط رطوبتی مشابه تیمارهای آزمایش، چهار مقدار مایع شامل ۱، ۲، ۳ و ۴ لیتر در خاک خشک و مرطوب تزریق شد. در این آزمایش‌ها، که تزریق پس از هوادهی خاک صورت گرفت، مشخص گردید که تزریق ۴ لیتر مایع در خاک خشک در بعضی موارد به فوران مایع از اطراف نازل منجر می‌شود. بنابراین حداکثر مقدار مایع ممکن برای مقایسه تیمارها در آزمایش اصلی ۳ لیتر در نظر گرفته شد. مایع انتخاب شده برای اجرای این آزمایش‌ها از ترکیب آب و رنگ‌های معدنی محلول متضاد با رنگ خاک تشکیل شده بود. برای این کار لوله‌های ورودی و خروجی مخزن به یک ظرف مدرج محتوی محلول رنگی متصل گردید.

برای بررسی پخشیدگی مایع در زیر خاک، سه روز بعد از اعمال تیمارها خاک اطراف محل تزریق در محدودهٔ دایره‌ای به مرکز محل فرو رفتن نازل و به شعاع تقریبی یک متر به آرامی تا عمق ۵۰ سانتی متر با بیل دستی و کلنگ کنده شد و محدودهٔ پخش شدن افقی آن در لایهٔ عمقی با ردیابی ذرات رنگی خاک مشخص گردید. برای محاسبهٔ مساحت محدودهٔ پخشیدگی مایع در زیر خاک، از مرکز تزریق شعاع‌هایی به سمت محیط این محدوده در نظر گرفته شد و با اندازه‌گیری طول این شعاع‌ها و تعیین زاویهٔ بین شعاع ها مساحت شکل مورد نظر با مثلث‌بندی محاسبه شد (شکل ۴).

برای اینکار یک دایره فلزی کوچک به قطر ۷ سانتی متر که ۱۸ شعاع (قطاع) روی آن با فاصله‌های ۲۰ درجه از یکدیگر رسم شده بود انتخاب و مرکز آن بر روی نقطه تزریق قرار می‌گرفت. سپس با قرار دادن لبه نوار متر در امتداد هر یک از این شعاع‌ها فاصله مرکز تزریق تا محدودهٔ پخشیدگی مایع رنگی اندازه‌گیری شد و با محاسبه مساحت مثلث‌های محصور بین هر دو شعاع مجاور (با داشتن اندازه دو ضلع و زاویه بین آنها) مساحت شکل نامنظم پخشیدگی به دست آمد. به غیر از تعیین الگوی پخش شدن مایع در زیر خاک، مدت زمان کل صرف شده برای تزریق در هر تیمار نیز اندازه‌گیری شد.



شکل ٤- محاسبه مساحت محدودهٔ پخشیدگی مایع با روش مثلث‌بندی

Fig. 4- Measurement of the area of liquid diffusion by splitting it to adjacent triangles

نتایج و بحث

مشاهدات مزرعه‌ای در حین اجرای عملیات بیانگر آن است که رفتار خاک در حالت مرطوب کاملا متفاوت از رفتار آن در حالت خشک است. در خاک مرطوب، پس از فرو رفتن نازل تا عمق ۵۰ سانتی‌متر، با باز شدن شیر هوا و تزریق هوای فشرده در این عمق، لایه‌ای از خاک به سمت بالا حرکت می‌کند و با قطع جریان هوا به پایین برمی‌گردد. این بالا آمدگی تا حدود ۷۰ میلی‌متر در مرکز تزریق اندازه‌گیری شد که با دور شدن از مرکز به تدریج کاهش می‌یابد. حتی با باز شدن مجدد هوای فشرده این اتفاق می‌تواند تا چند مرتبه مشاهده شود. اما در حالت خشک با تزریق هوای فشرده هیچ نوع بالاآمدگی در خاک مشاهده نمی‌شود. در حالت مرطوب، مسدود بودن خلل و فرج خاک با آب باعث محبوس شدن هوا در زیر خاک می‌شود که به بالا آمدن لایه‌ای از خاک می‌انجامد. مرطوب بودن خاک همچنین باعث می‌شود تا خاک حالت کشسانی بیشتری داشته باشد و به راحتی از هم گسیخته نشود. بدین ترتیب مفری برای خروج هوای فشرده از خاک ایجاد نمی‌شود. برعکس در حالت خشک، از یک طرف وجود ترک‌های انقباضی در خاک راهی برای خروج هوا از خاک هستند و از طرف دیگر مقاومت برشی زیاد خاک خشک، اجازهٔ حرکت لایه‌های خاک را نسبت به یکدیگر نمی‌دهد.

بررسی‌ها برای ردیابی چگونگی توزیع مایع رنگی در زیر خاک نشان می‌دهد در حالت مرطوب، مایع در صفحه‌ای تقریبا افقی در زیر خاک حرکت می‌کند. محل قرارگیری این صفحه دقیقا در عمق قرار گرفتن سوراخ‌های افقی نازل است. این بدین معنی است که با اعمال فشار سیال لایهٔ خاک بالای محل تزریق به سمت بالا حرکت می‌کند و مایع در فضای ایجاد شده بین دو لایه به صورت افقی حرکت می‌کند. مشاهدات در حین حفاری از بالا به پایین نشان داد که در عمق مذکور تا چند روز پس از تزریق، لایهٔ بالایی از لایهٔ پایینی به راحتی جدا می‌شود و ذرات رنگی قابل ردیابی هستند. شکل ۵ نمونه‌ای از لایهٔ جدا شده از کف گودال و نحوهٔ پخش شدن مایع را در صفحه افقی در خاک مرطوب نشان می‌دهد.

با بررسی الگوی پخش ذرات رنگی محلول در مایع در حالت خاک خشک، مشخص شد که پخشیدگی مایع در این حالت محدود به ناحیه‌ای کوچک در اطراف نازل است و مایع تنها در ترک‌های انقباضی اطراف نازل حرکت می‌کند. از آنجایی‌که این ترک‌ها بیشتر به حالت عمودی از بالا به پایین منتشر شده‌اند، در هنگام حفاری رگه‌های رنگی محلول در لایه‌های سطحی در نزدیکی نازل دیده می‌شوند که حرکت مایع در ترک‌های انقباضی و به سمت بالا را نشان می‌دهد. مشاهدات مزرعه‌ای همچنین نشان داد که در برخی موارد فضاهای خالی خاک خشک گنجایش تزریق بیش از ۳ لیتر محلول را ندارند و محلول از اطراف نازل به سمت بالا فوران می‌کند.

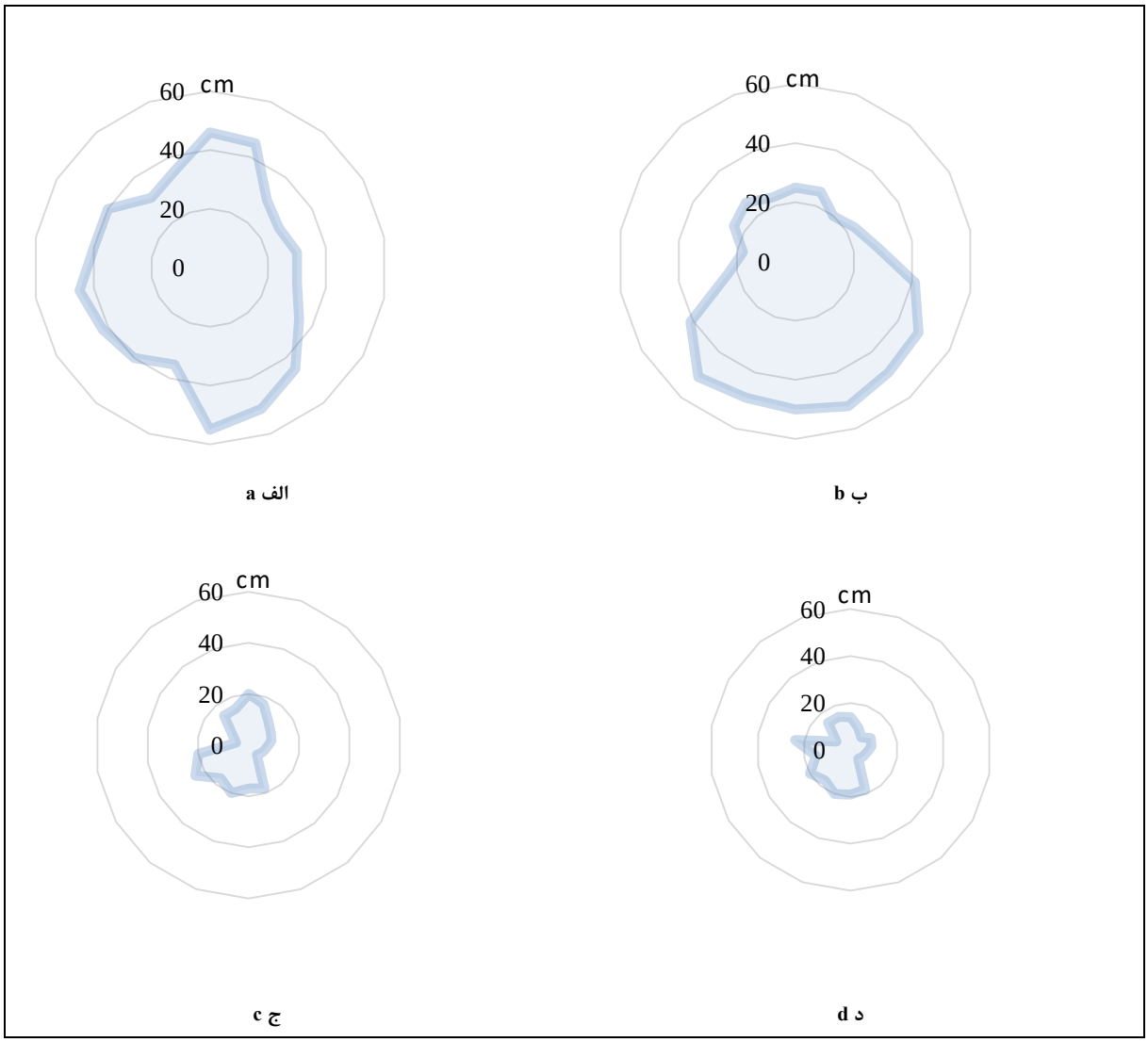
شکل ۵- ردیابی پخش مایع رنگی (نقاط زرد رنگ) در صفحه افقی در عمق تزریق

Fig. 5- Tracking the dyed liquid (yellow particles) at the depth of injection in a horizontal plane

بررسی الگوی پخشیدگی مایع در تیمارهای آزمایش

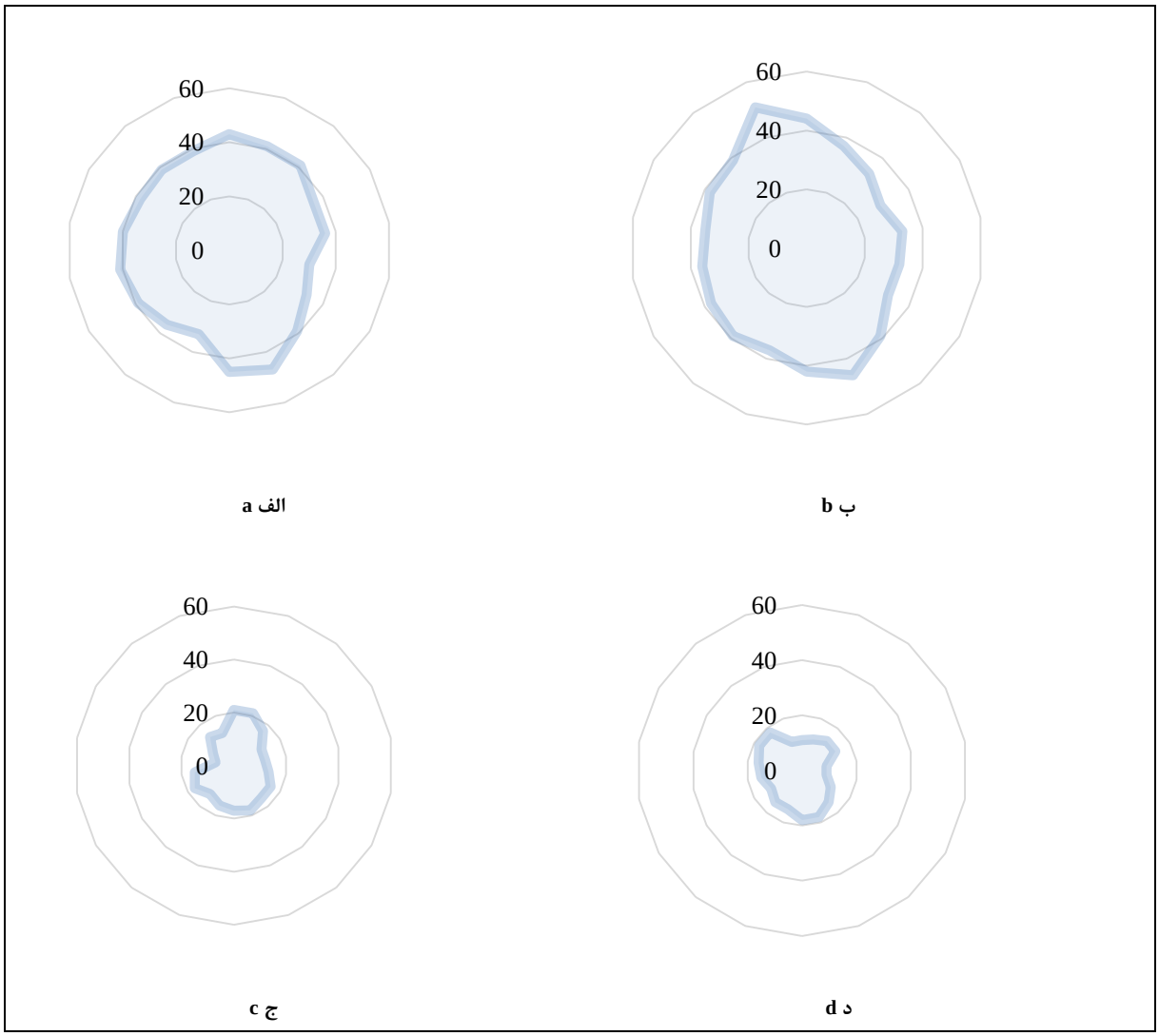
با ترسیم محدودهٔ پخشیدگی افقی مایع در تیمارهای آزمایش به روش اندازه‌گیری شعاع‌های نقاط واقع بر محیط آن، تصویری از الگوی پخش افقی محلول در تیمارهای مختلف به دست آمد. شکل ۶ و ۷ نمونه‌هایی هستند از الگوی پخش افقی محلول که از دو تکرار آزمایش رسم شده‌اند.

برای مقایسهٔ کمی میزان پخشیدگی مایع، مساحت محدودهٔ پخشیدگی محاسبه و ارزیابی شد. نتایج تجزیهٔ واریانس در جدول ۲ نشان می‌دهد که تیمار رطوبت خاک در سطح احتمال یک درصد بر مساحت محدودهٔ پخشیدگی مایع موثر بوده است، در حالی‌که هوادهی پیش از ترزیق تأثیر معنی‌داری بر این شاخص نداشته است. این جدول همچنین نشان می‌دهد که اثرهای متقابل تیمارها بر میزان مساحت محدودهٔ پخشیدگی معنی‌دار نیست.



شکل ٦- الگوی پخشیدگی افقی مایع در زیر خاک در تکرار اول در تیمارهای مختلف : الف) خاک مرطوب بعد از هوادهی، ب) خاک مرطوب بدون هوادهی، ج) خاک خشک بعد از هوادهی، و د) خاک خشک بدون هوادهی

Fig. 6- Subsoil diffusion pattern of liquid at first replication in different treatments: a) moist soil after aeration, b) moist soil without aeration, c) dry soil after aeration, d) dry soil without aeration.



شکل ۷- الگوی پخشیدگی افقی مایع در زیر خاک در تکرار دوم در تیمارهای مختلف: الف-) خاک مرطوب بعد از هوادهی، ب) خاک مرطوب بدون هوادهی، ج) خاک خشک بعد از هوادهی و د) خاک خشک بدون هوادهی

Fig. 7- Subsoil diffusion pattern of liquid at second replication in different treatments: a) moist soil after aeration, b) moist soil without aeration, c) dry soil after aeration, d) dry soil without aeration.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات مساحت محدوده پخشیدگی مایع

Table 2- Analysis of variance for diffused area of liquid

میانگین مربعات مساحت محدوده Mean square of the area	درج آزادی Degree of freedom	Source	منابع تغییرات
14285.5 $^{n.s}$	3	Replication	تکرار
59051540.3**	1	Moisture content	رطوبت خاک
12951.1	3	First error	خطای اول
73712.3 $^{n.s}$	1	Aeration	هوادهی
67600 $^{n.s}$	1	Moisture ×Aeration	رطوبت× هوادهی
34061.3	6	Second error	خطای دوم

** معنی‌دار بودن اختلاف در سطح احتمال ۱ درصد و $^{n.s}$نبود اختلاف معنی‌دار

**Significantly different at 1% level, $^{n.s}$ No significant difference

در جدول ۳، میانگین مساحت‌های پخشیدگی در تیمارهای مختلف ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که بیشترین میزان پخشیدگی مربوط به حالتی است که تزریق در خاک خیس پس از هوادهی صورت گرفته است. پخشیدگی در خاک خیس بدون هوادهی نیز اختلاف معنی‌داری با تیمار هوادهی شده در خاک خیس ندارد. اما در برخی موارد (دو تکرار از چهار تکرار) به نظر می‌رسد یکنواختی توزیع در اطراف محل تزریق در تیمار هوادهی شده بیشتر است. شکل ۶ مربوط به تکراری است که در آن الگوی پخشیدگی مایع در تیمار هوادهی شده و بدون هوادهی متفاوت است (شکل ۶ الف و ب). با مقایسهٔ این الگوها می‌توان دریافت که در حالت هوادهی نشده، پخشیدگی مایع به یک سمت بیشتر از پخشیدگی مایع به طرف مقابل است. همان‌طور که پیش از این اشاره گردید این اختلافات در همهٔ تکرارها مشاهده نمی‌شود. برای مثال، در شکل ۷ که مربوط به یکی دیگر از تکرارهاست این چولگی مشاهده نمی‌شود. این اختلافات که در نیمی از تکرارها مشاهده می‌شود از نظر سطح پخشیدگی نیز اختلاف معنی‌داری ندارند (جدول‌های ۲ و ۳). از آنجاکه در عملیات هوادهی حجم زیادی از هوا در مدت زمانی کوتاه به داخل خاک تزریق می‌شود، شکست خاک در اطراف محل تزریق یکنواخت‌تر است و مایع می‌تواند در صفحهٔ شکستی که هوادهی ایجاد کرده است به طور یکنواخت‌تر حرکت کند. اما در حالت بدون هوادهی، بالا آمدن خاک تنها ناشی از فشار مایع است. با توجه به اینکه ورود مایع به داخل منافذ خاک، نسبت به هوا، با سرعت کمتری پیش می‌رود و با توجه به محدود بودن مقدار مایع، ممکن است خاک در یک سمت مقاومت کمتری از خود نشان دهد و جریان ترجیحی مایع به سمتی حرکت کند که کمترین مقاومت را از خود نشان دهد. در این حالت، در سمت دیگر تنها حوضچه‌ای از مایع در جلو روزنهٔ نازل تشکیل می‌شود (شکل ۸) و مایع از این حوضچه به سمت دیگر حرکت می‌کند.

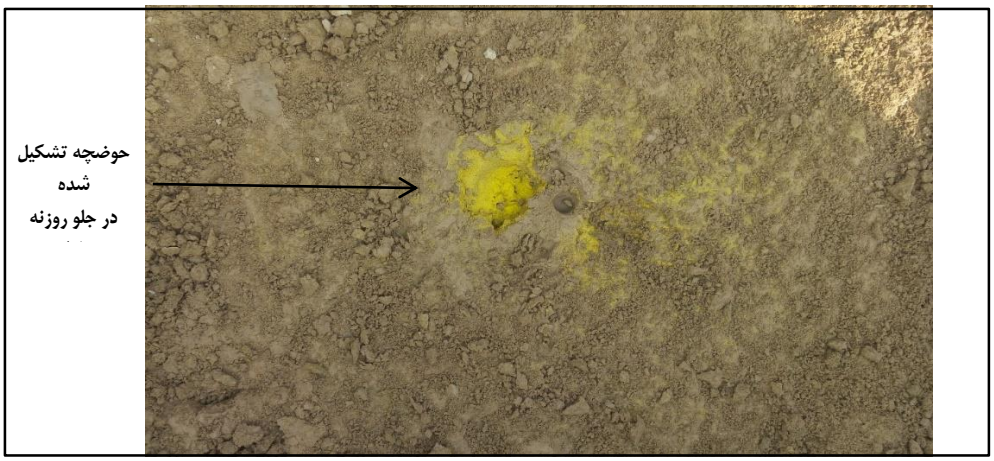
جدول ۳- میانگین مساحت محدودهٔ پخشیدگی مایع (سانتی‌متر مربع) در تیمارهای آزمایش

Table 3- Mean of diffused area of liquid (cm2) in different treatments

تیمار		هوادهی شده قبل از تزریق	تزریق مستقیم بدون هوادهی
Treatments		**Aerated before injection**	**Direct injection before aeration**
خاک خیس	Moist soil	*4585 a	a 4319
خاک خشک	Dry soil	613b	607b

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف لاتین متفاوت، از نظر آماری بر پایهٔ آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

* Means in each column with different letters are significantly different based on Duncan test at 5% level.



شکل ۸- حرکت ترجیحی مایع در یک سمت نازل و تشکیل حوضچه در سمت دیگر در تیمار هوادهی نشده

Fig. 8- Preferable current of liquid in one side and formation of a cavity on the other side in no-aeration treatment

شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که سطح پخشیدگی مایع در خاک خشک به میزان قابل توجهی کمتر است تا در خاک خیس. در این حالت، خالی بودن منافذ خاک باعث می‌شود تا هوای تزریق شده به راحتی به سطح خاک راه یابد و در زیر خاک محبوس نشود. از طرف دیگر، مقاومت خاک خشک در مقابل شکست، تحت فشار سیال تزریق شده بسیار زیادتر از مقاومت خاک خیس است. این دو عامل باعث می‌شود که تزریق سیال باعث بالا آمدن خاک و ایجاد صفحات شکست نشود و مایع نتواند به مانند حالت خیس در صفحهٔ شکست حرکت کند. بنابراین، در حالت خشک هوادهی عملا هیچ اثری بر خاک ندارد و در مرحلهٔ تزریق محلول نیز مایع فقط در خلل و فرج نزدیک به محل تزریق، شکست‌های طبیعی خاک و ترک‌های انقباضی نفوذ می‌کند که بیشتر به سوی سطح خاک کشیده شده‌اند. مشاهدات در حین حفاری نیز مؤید آن است که در حالت خشک رگه‌هایی از مایع رنگی در خاک نزدیک محل تزریق دیده می‌شود. شکل ۹ پروفیل عمودی حفر شده در یکی از تکرارها مربوط به تیمار خاک خشک را نشان داده است. در این پروفیل، حفرهٔ نشان داده شده در اطراف نازل (محل فرو رفتن نازل با چوب مشخص شده است) با کندن خاک مرطوب اطراف نازل ایجاد شده است. با توجه به خشک بودن خاک در این تیمار، ناحیهٔ مرطوب اطراف نازل به عنوان محل پخشیدگی مایع در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در این تصویر مشخص است، مایع در خاک خشک تنها در حجم محدودی از خاک اطراف نازل و ترک‌های مرتبط با این حجم نفوذ کرده و امکان حرکت افقی آن فراهم نشده است.

ظرفیت مزرعه‌ای ماشین

نتایج اندازه‌گیری زمان لازم برای کوبیدن نازل در خاک، هوادهی و تزریق مایع در دو حالت خاک خشک و خاک خیس در جدول ۴ آورده شده است. این مقادیر شامل زمان لازم برای پر شدن مخزن هوا و رسیدن به فشار لازم (در دور ۵۴۰ محور توانده‌ی) و فرو بردن و بالا کشیدن نازل است.

شکل ۹- پروفیل عمودی در محل تزریق مایع در خاک خشک

قسمت‌هایی از خاک اطراف نازل (با چوب نشان داده شده است) که در اثر تزریق مایع مرطوب شده، کنده شده و به عنوان محل پخش مایع نشان داده شده است.

Fig. 9- Vertical cross- section at injection point in dry soil

The wet soil around the probe (displayed by the stick) is removed to show the area affected by liquid injection.

جدول ٤- زمان لازم برای اجرای مراحل مختلف عملیات در یک بار تزریق محلول (دقیقه)

Table 4- Required time for different stages of an injection (minutes)

	کوبیدن نازل Probe hammering	هوادهی Aeration	تزریق مایع Liquid injection	یک بار عملیات تزریق محلول بدون هوادهی Single injection without aeration	یک بار عملیات هوادهی و تزریق محلول Single injection with aeration
خاک خشک Dry soil	8	9*	1	9	18
خاک خیس Wet soil	2	9	1	3	13

* این مقدار شامل زمان لازم برای پر شدن مخزن‌های هوا تا رسیدن به فشار ۱۶ بار، بازکردن شیر هوا و تزریق هوا به خاک است.

* This amount includes the time required for charging air tanks to a pressure of 16 bar, opening the air valve and air injection.

با مروری بر این جدول می‌توان دریافت که به طور کلی تزریق بعد از هوادهی، در مقایسه با تزریق مستقیم محلول، بسیار زمان‌بر است. حذف هوادهی در خاک خیس زمان مورد نیاز را به کمتر از یک چهارم و در خاک خشک به نصف کاهش می‌دهد. در عملیات هوادهی به طور متوسط به ۹ دقیقه زمان برای رسیدن فشار مخزن به ۱۶ اتمسفر نیاز است که با توجه به ظرفیت کمپرسور دستگاه غیر قابل اجتناب خواهد بود. این در حالی است که با باز کردن شیر هوا برای هوادهی (به مدت ۳ ثانیه) فشار

مخـزن تـا حـد ۴ اتمسـفر افـت می‌کنـد و بـرای تزریـق بعدی باید زمـان مشـابهی را صـرف کـرد. از طـرف دیگـر، کوبیـدن نـازل بـا اسـتفاده از چکـش نیومـاتیکی نیـاز بـه فشـار بـالای هـوا (بـالاتر از ۱۲ اتمسـفر) دارد کـه بـه زمان نسـبتا قابـل تـوجهی نیـاز خواهـد بـود. ایـن مقـدار مخصوصـا در خـاک خشـک بـه طـور متوسـط ۸ دقیقـه یعنی ۴ برابر این زمان در خاک خیس است.

بنـابراین، در صـورت تزریـق مسـتقیم محلـول (بـدون هـوادهی) هـر بـار تزریـق در خـاک خـیس تنهـا بـه ۳ دقیقـه زمـان نیـاز دارد در حالی‌کـه ایـن مقـدار بـرای خاک خشک سه برابر (۹ دقیقه) خواهد بود.

نتیجهگیری

از ایـــن تحقیـــق می‌تـــوان دریافـــت کـــه بـــرای دستیابی بـه بیشـترین میـزان پخشـیدگی افقـی مـایع در زیر خاک، باید ایـن عملیـات در حالـت خـیس اجـرا شـود تـا فشـار اعمـال شـده از طـرف سـیال بتوانـد لایـه‌ای از خاک را بلند کند و مـایع در زیـر ایـن لایـه حرکـت کنـد. در حالـت خشـک، سـطح پخشـیدگی مـایع در اطـراف نـازل کمتـر از یـک هفـتم در خـاک خـیس اسـت و بخشـی از مـایع بـه جـای قـرار گـرفتن در عمـق مطلـوب بـا حرکـت در ترک‌هـای منتهـی بـه سـطح، در لایـه‌های ســطحی‌تر توزیــع می‌شــود. هــوادهی نیــز تــأثیر معنـی‌داری بـر سـطح پخشـیدگی مـایع نداشـته تنهـا در برخـی مـوارد بـه پخـش یکنواخـت‌تر مـایع در اطـراف نازل کمـک کـرده اسـت. هـوادهی خـاک پـیش از تزریـق محلــول، زمــان کــل عملیــات را بــه بــیش از ۴ برابــر افـزایش می‌دهدکـه بـا توجـه بـه معنـی‌دار نبـودن تـأثیر آن بـر سـطح پخشـیدگی و کـاهش ظرفیـت اجـرای کـار عملیاتی غیر ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

Bishop, J. C., & Grimes, D. W. (1978). Precision tillage effects on potato root and tuber production. *American Potato Journal, 55*, 65-71.

Day, S. D., & Bassuk, N. L. (1994). A review of the effects of soil compaction and amelioration treatments on landscape trees. *Journal of Arboriculture, 20*, 9-17.

Hascher, W., & Wells, C. E. (2007). Effects of soil decompaction and amendment on root growth and architecture in red maple (Acer rubrum). *Arboriculture & Urban Forestry, 33*(6), 428-432.

Niemoller, B., Harms, H. H., & Lang, T. (2011). Injection of liquids into the soil with a high-pressure jet. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 13*(2), 1-15.

Rolf, K. (1994). *Soil compaction and loosening effects on soil physics and tree growth*. In G. W. Watson & D. Neely (Eds.). The landscape below ground. International Society of Arboriculture, Savoy, IL.

Samar, S. M., Pasandide, M., Rostami, A., & Heydari, H. (2015). Peach trees lime-induced chlorosis alleviation as affected by soil injection of iron sulphate in Shahriar region. *Research Report*. Soil and Water Research Institute. (in Persian)

Smiley, E. T. (1994). *The effects of soil aeration equipment on tree growth*. In G. W. Watson & D. Neely (Eds.). The landscape below ground. International Society of Arboriculture, Savoy, IL.

Smiley, E. T. (2001). Terravent™: Soil Fracture Patterns and Impact on Bulk Density. *Journal of Arboriculture, 27*(6), 326-330.

Agricultural Mechanization and Systems Research/Vol.22/No.80/Winter 2022/P:51-66
Journal Home Page: https://amsr.areeo.ac.ir

Research Paper

Diffusion Pattern of Injected Liquid under the Soil and the Impact of Aeration on It

O. Taki

Associated Professor, Agricultural Engineering Research Department Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. AREEO, Isfahan, Iran. Email: orangtaki@yahoo.com
Received: 30 May 2021, Accepted: 25 December 2021
http://doi: 10.22092/AMSR.2021.354736.1385

Abstract

Injecting Liquid fertilizers in trees root zone is one of the fertilizing methods that can be implemented either after air injection (aeration) or directly without aeration. This study focused on diffusion pattern of the liquid injected directly or after aeration under the soil in both dry and wet soils. To apply treatments associated with aeration, the compressed air was primarily injected for 3 seconds followed by injecting liquid for a certain time, whereas for direct liquid injection no air was applied into the soil. The applied liquid was made of water and mineral dyes to contrast the soil color. The soil was excavated in the vicinity of injection point and the area of diffused dyed particles was measured in different treatments. The results showed that diffusion rate in wet soil was significantly higher than that of dry soil but aeration before liquid injection had no significant effect on the liquid diffusion rate. In wet soil, applying the air pressure upheaves the soil layer above the injection point and by cutting the pressure the soil subsides on its original point. The injected liquid flows horizontally into the fractures developed below the upheaved layer. In direct injection in wet soil, the liquid pressure itself was still adequate to upheave the top layer and the liquid flew horizontally below the top layer. In dry soil, on the contrary, due to high shear strength of soil, no upheaving occurred in both injection treatments and the injected liquid was restrained in close vicinity of injection point

Keywords: Air Injection in Soil, Deep Fertilization, Liquid Injection in Soil

© 2022 Agricultural Mehanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)